

© А.В. Бубліков¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

АЛГОРИТМ ФАЗИФІКАЦІЇ ВХІДНОЇ ВЕЛИЧИНИ СИСТЕМИ НЕЧІТКОГО АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ВИКОНАВЧИМ ОРГАНОМ ВИДОБУВНОГО КОМБАЙНА ЗА ГІПСОМЕТРІЄЮ ВУГІЛЬНОГО ПЛАСТА

© A. Bublikov¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

THE ALGORITHM OF FUZZIFICATION OF THE INPUT VALUE OF FUZZY SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF THE EXECUTIVE BODY OF SHEARER ON COAL SEAM HYPSONOMETRY

Мета. Мета полягає у створенні інформативного критерію, за допомогою якого виявляються унікальні закономірності зміни у часі струму статора двигуна приводу різання видобувного комбайна за умови початку присікання виконавчим органом видобувного комбайна породи біля покрівлі вугільного пласта. Також метою у статті є створення алгоритму фазифікації цього інформативного критерію на основі аналізу збігу графіків функцій, що апроксимують зміну у часі низькочастотної складової струму статора на різних часових інтервалах переміщення вверх виконавчого органу видобувного комбайна.

Методика дослідження полягає у встановленні статистичної характеристики струму статора двигуна приводу різання видобувного комбайна, що є чутливою до порушення закономірностей зміни у часі низькочастотної складової струму статора двигуна приводу різання через початок присікання виконавчим органом комбайна породи біля покрівлі вугільного пласта, та в адаптуванні цієї характеристики для використання у якості функцій належності відповідних термів системи нечіткого автоматичного керування виконавчим органом комбайна за гіпсометрією пласта.

Результати дослідження. Поява на другому етапі за умови двоетапного східчастого переміщення виконавчого органу видобувного комбайна вверх присікання породи з відмінністю опірності різанню у порівнянні з вугіллям на 14% й більше призводить до суттєвої зміни ступеню відмінності відхилення струму статора двигуна приводу різання окремо на першому та другому етапах переміщення органу в діапазоні частот від 3,12 до 6,25 Гц. Це дозволило у якості чіткого інформативного критерію використати ступінь розбіжності максимальних значень кривих, що апроксимують зміну у часі струму статора двигуна приводу різання комбайна в діапазоні частот від 3,12 до 6,25 Гц на окремих етапах переміщення виконавчого органу вверх. Також встановлено, що для різних сполучень властивостей вугілля й породи за умови фазифікації чіткого інформативного критерію режиму руйнування матеріалу біля покрівлі пласта на основі апроксимації гістограм розподілу значень критерію найбільш прийнятними апроксимуючими функціями, що забезпечують відносне відхилення значень функцій від частот гістограм не більше 10%, є ступеневі поліноми p' ятого порядку.

Наукова новизна полягає у використанні для ідентифікації режимів руйнування матеріалу біля покрівлі пласта результату аналізу ступеню порушення закономірностей зміни у часі ни-

з'являється складової струму статора двигуна приводу різання на окремих часових інтервалах переміщення виконавчого органу вверх. При цьому запропонований алгоритм фазифікації чіткого інформативного критерію, що є мірою порушення цих закономірностей.

Практичне значення. Результати досліджень будуть використані для створення системи нечіткого автоматичного керування виконавчим органом видобувного комбайна за гіпсометрією вугільного пласта.

Ключові слова: *система нечіткого автоматичного керування, видобувний комбайн, ідентифікація режимів роботи, гіпсометрія вугільного пласта.*

Вступ. Відомо, що підвищена зольність вугілля викликає збільшення транспортних витрат, ускладнення умов його спалювання та погіршення якості твердих продуктів хімічної переробки вугілля – напівкоксу й коксу, у які майже повністю переходять мінеральні домішки [1]. При цьому однією з причин присутності зольної частини вугілля, що складається з “зовнішніх” домішок, є людський фактор, коли через несприятливі умови роботи оператор видобувного комбайна здійснює неефективне керування виконавчим органом за гіпсометрією вугільного пласта. Тому вирішення задачі автоматизації процесу керування виконавчим органом видобувного комбайна за гіпсометрією пласта є актуальним питанням.

Складність вирішення задачі автоматизації процесу керування виконавчим органом видобувного комбайна за гіпсометрією пласта полягає у відсутності на сьогодні способу однозначного визначення типу матеріалу, що руйнується виконавчим органом комбайна біля покрівлі пласта. Це пов'язано з постійною й непередбачуваною зміною властивостей породи й вугілля під час виймання вугільного пласта. Тому спроби створення датчиків межі “порода – вугілля” [2] виявилися безуспішними, оскільки властивості вугілля та породи змінюються випадково та у широких межах як у просторі по довжині пласта і в його поперечному перерізі через віджимання вугілля, так і у часі під впливом вологості та технології видобутку вугілля. Тому неможливо настроїти датчик межі порода-вугілля на фіксовану різницю властивостей.

Іншим підходом щодо вирішення задачі автоматизації процесу керування виконавчим органом видобувного комбайна за гіпсометрією пласта є встановлення залежності положення виконавчого органу від положення комбайна у лаві, коли комбайном керує оператор [3]. Але недоліком цього підходу є те, що вплив людського фактору на якість процесу керування повністю не усувається. Крім того, по мірі просування забою вглиб пласта профіль межі “порода – вугілля” змінюється, що потребує нового навчаючого циклу за участі оператора. Таким чином, людина продовжує перебувати у забої, який є небезпечною зоною з суттєво несприятливими умовами праці.

Останнім часом впроваджуються перспективні способи непрямої ідентифікації типу матеріалу, що руйнується виконавчим органом комбайну біля покрівлі пласта, на основі інтелектуального аналізу інформації з вимірювальних пристроїв та давачів, що не перебувають у прямому контакті з вугіллям й породою. Так, наприклад, у роботі [4] описаний спосіб ідентифікації типу матеріалу на основі аналізу сигналу на виході датчика, що вимірює параметри вібрації корпусу

виконавчого органу. А у роботі [5] для ідентифікації типу матеріалу використовується аналіз інформації, що отримується за допомогою тепловізора. В обох роботах задача ідентифікації типу матеріалу повністю не вирішена й запропоновані рішення потребують подальшого вдосконалення.

У зв'язку з цим запропонований підхід щодо непрямой ідентифікації типу матеріалу, що руйнується виконавчим органом комбайна біля покрівлі пласта, який полягає у визначенні індикативної події, за допомогою якої фіксується перетинання виконавчим органом межі “порода – вугілля”, встановленні для цієї події унікальної закономірності зміни у часі струму статора двигуна приводу різання комбайна, та визначенні інформативного критерію, що дозволяє виявити означену закономірність в інформаційному сигналі.

Формулювання мети статті (постановка завдання). У статті поставлено за мету визначити інформативний критерій, за допомогою якого виявляються унікальні закономірності зміни у часі струму статора двигуна приводу різання видобувного комбайна за умови початку присікання виконавчим органом видобувного комбайна породи біля покрівлі вугільного пласта. Також метою у статті є створення алгоритму фазифікації цього інформативного критерію на основі аналізу збігу графіків функцій, що апроксимують зміну у часі низькочастотної складової струму статора на різних часових інтервалах переміщення вверх виконавчого органу видобувного комбайна.

Виклад основного матеріалу дослідження. Виділимо характеристики режимів роботи комбайна, що властиві процесу керування виконавчим органом видобувного комбайна за гіпсометрією вугільного пласта. З урахування задачі керування запропонуємо такі характеристики режиму руйнування, як “Руйнування вугілля на ділянці біля безпосередньої покрівлі пласта” (“Присікання породи відсутнє” ($P1$)) та “Руйнування породи на ділянці біля безпосередньої покрівлі пласта” (“Присікання породи присутнє” ($P2$)).

Далі проведемо обґрунтування індикативної події, що дозволить ідентифікувати перелічені вище характеристики режиму руйнування масиву вугілля й породи виконавчим органом. При цьому єдиним джерелом інформації є датчик фазного струму статора двигуна приводу різання комбайна. Струм статора двигуна приводу різання пропорційний силі, що необхідна для руйнування масиву вугілля й породи виконавчим органом. Таким чином, якщо інформаційним сигналом є струм статора двигуна приводу різання, індикативна подія пов'язана зі зміною зусилля, що необхідно прикласти для руйнування вугілля чи породи виконавчим органом на ділянці біля безпосередньої покрівлі пласта. Отже, у нашому випадку ідентифікація характеристик руйнування вугілля й породи виконавчим органом проводиться на основі зміни властивостей матеріалу на ділянці біля безпосередньої покрівлі пласта, що характеризують зусилля, яке необхідно прикласти для руйнування цього матеріалу різцями. Згідно з методиками розрахунку сили різання на різці [6], цими властивостями матеріалу є опірність різанню та крихкість.

Основною проблемою визначення зміни опірності різанню чи крихкості матеріалу біля покрівлі пласта є те, що присікання породи біля покрівлі потрібно

визначати якомога раніше, оскільки це впливає на зольність вугілля, що визначає його собівартість. Якщо присікання породи відбувається на незначну величину (до 5 см), кут охоплення прошарку породи біля покрівлі у декілька разів менше за кут охоплення прошарку вугілля. Крім того, прошарок породи знаходиться у зоні входження різця в масив, де товщина стружки, що знімається різцем, в 1,5-2 рази менша за товщину стружки поблизу середини траєкторії переміщення різця за умови його контакту з масивом. Перелічені фактори є причиною того, що за умови початку присікання породи виконавчим органом на незначну величину до 5 см сила опору масиву вугілля й породи руйнуванню виконавчим органом практично не змінюється, і за цією індикативною подією неможливо провести ідентифікацію характеристик режиму руйнування масиву.

Зазначена проблема має місце за умови, коли напрям руху виконавчого органу співпадає з напрямом руху комбайна, тобто виконавчий орган не переміщується у вертикальній площині. Але, коли виконавчий орган починає переміщуватися у вертикальній площині, вектор швидкості руху виконавчого органу повертається майже на 80 градусів відносно напрямку руху комбайна за рахунок того, що середня швидкість руху виконавчого органу у вертикальній площині (для комбайна УКД300 9 м/хв) значно перевищує швидкість руху органу у горизонтальній площині (фактично це швидкість переміщення комбайна на грані заштибовки виконавчого органу – 2,8 м/хв). Це призводить до значного збільшення куту охоплення виконавчим органом прошарку породи біля покрівлі з 3-5 до 20-30 градусів, та зміщенню зони максимальної товщини стружки саме до ділянки, де розташований прошарок породи. За цих умов відносна вага складової сили опору руйнуванню саме прошарку породи біля покрівлі в загальній силі опору збільшується з 3-5% до 50%, що є передумовою можливості ідентифікації зміни властивостей прошарку матеріалу біля покрівлі навіть за умови його незначного присікання виконавчим органом.

Таким чином, для нашого випадку індикативною подією є зміна сили опору руйнуванню виконавчим органом верхнього прошарку матеріалу біля безпосередньої покрівлі пласта під час переміщення виконавчого органу у вертикальній площині.

З метою зменшення похибки помилкової ідентифікації характеристик режиму руйнування прошарку матеріалу біля покрівлі пласта запропонований алгоритм переміщення виконавчого органу у вертикальній площині, що, з урахуванням перехідного процесу на початковій стадії переміщення, забезпечує однакову динаміку руху виконавчого органу на двох сусідніх часових інтервалах, на яких відбувається порівняльний аналіз сили опору руйнуванню масиву виконавчим органом для пошуку означеної індикативної події.

Переміщувати вгору виконавчий орган пропонується східчасто у два етапи, на кожному з яких відбувається руйнування прошарку матеріалу однакової товщини, але на різній відстані від ґрунту. Таким чином, окремо для кожного прошарку на різній відстані від ґрунту визначаються сили опору руйнуванню виконавчим органом, порівняння яких дозволяє ідентифікувати розбіжність матеріалів прошарків, якщо вони мають різні опірність та крихкість.

З метою пошуку унікальних закономірностей в інформаційному сигналі за умови настання обраної індикативної події проаналізуємо зміну у часі основних режимних параметрів видобувного комбайна, що характеризують процес переміщення виконавчого органу у вертикальній площині за запропонованим алгоритмом (рис. 1). Динаміка режимних параметрів комбайна отримана на основі обчислювального експерименту за допомогою комплексної імітаційної моделі видобувного комбайна як мехатронної системи [7] за умов: швидкість руху комбайна – 2,8 м/хв, швидкість обертання виконавчого органу – 78 об/хв, номінальна швидкість руху виконавчого органу комбайна у вертикальній площині – 9 м/хв.

З рис.1 ми бачимо, що за умови нерухомого у вертикальній площині виконавчого органу (до 10 с), коли кут нахилу вектору швидкості руху виконавчого органу відносно осі переміщення комбайна дорівнює нулю (рис.1,б), максимальне значення товщини стружки становить 1,8 см (рис.1, в), а струм статора двигуна приводу різання змінюється випадковим чином у діапазоні значень від 34 до 115 А з незмінним середнім значенням 59 А (рис.1,г).

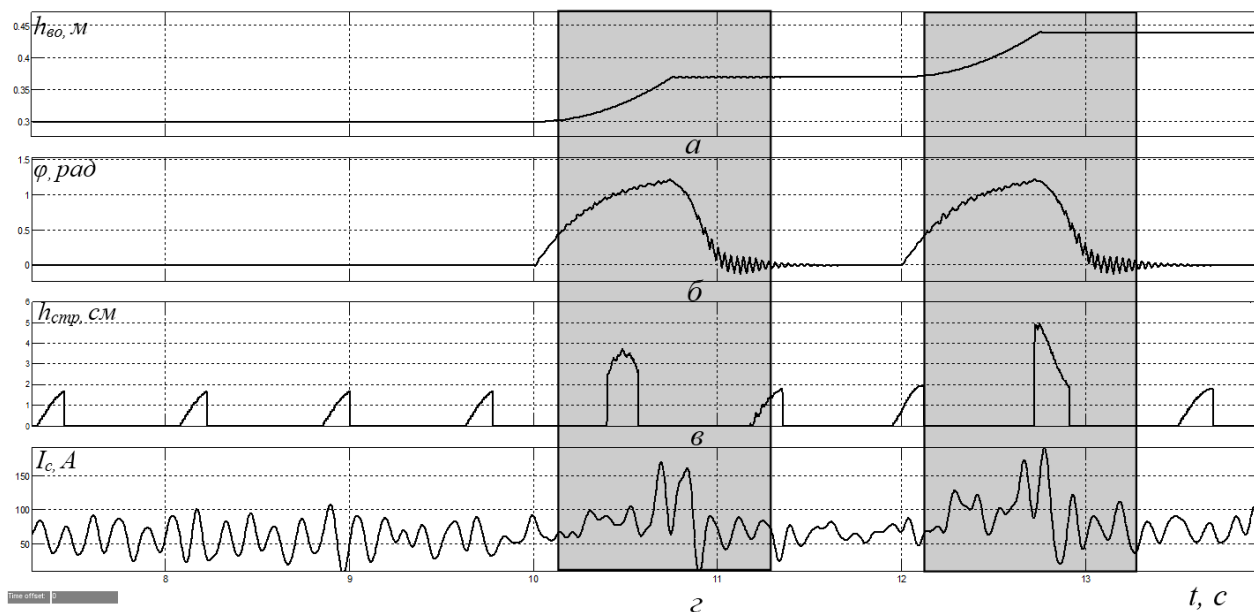


Рис. 1. Зміна у часі: *a* – висоти підйому виконавчого органу; *б* – куту нахилу вектору швидкості переміщення виконавчого органу відносно напрямку переміщення комбайна; *в* – стружки вугілля й породи, що знімається одним з різців; *г* – струму статора двигуна приводу різання

Перший етап переміщення виконавчого органу вгору відбувається з 10 до 12 с, а другий – з 12 до 14 с (рис.1,а). Аналіз рис.1,б показує, що на цих часових інтервалах кут нахилу вектору швидкості руху виконавчого органу відносно осі переміщення комбайна збільшується за експоненціальним законом до 1,27 рад. На кожному етапі під час руху виконавчого органу вгору протягом 0,7 с майже кожний різець вступає у контакт з масивом один раз. В залежності від того, на

якій стадії руху виконавчого органу різець входить у контакт з масивом, відрізняються фаза та амплітуда синусоїдальної функції, що описує зміну у часі товщини стружки, яка знімається різцем. Так, з рис.1, в видно, що на другому етапі різець входить в масив практично у зоні максимальної товщини стружки, коли фаза дорівнює 90 градусам (на першому етапі фаза становить приблизно 70 градусів). Також зазначимо, що максимальна товщина стружки на другому етапі більша (5 см), ніж на першому (3,8 см). Тобто, можна зробити висновок, що чим довше переміщується виконавчий орган вгору, й, як наслідок, чим більше кут нахилу вектору швидкості його руху відносно осі переміщення комбайна, тим кращі створюються умови для ідентифікації присікання породи – входження різців в контакт з матеріалом покрівлі відбувається у зоні максимальної стружки, а значить вага складової сили опору руйнуванню матеріалу покрівлі у загальній силі опору руйнуванню масиву виконавчим органом збільшується.

Якщо проаналізувати інформаційний сигнал на рис.1,г, то можна зробити висновок, що на інтервалі часу від 10 до 14 с на кожному етапі переміщення виконавчого органу, окрім високочастотних коливань струму статора з резонансною частотою двигуна, з'являється разове відхилення струму від середнього значення 59 А на більш низькій частоті (виділені на рис.1 сірою заливкою). Це пов'язано зі зміною у часі максимальної товщини стружки, що повторює динаміку руху виконавчого органу, – за умови розгону органу товщина стружки зростає, а коли орган гальмує – товщина стружки зменшується до значення, яке було за умови нерухомого органу (1,8 см). Величина збільшення струму статора на низькій частоті у процесі переміщення вгору виконавчого органу залежить від характеру руху виконавчого органу, кута охоплення виконавчим органом масиву, а також від властивостей матеріалу, що руйнується (його опірності руйнуванню та крихкості). Таким чином, якщо забезпечити однакову динаміку руху органу на двох етапах його переміщення вгору, за ступенем відмінності відхилення струму статора двигуна приводу різання на низькій частоті на першому та другому етапах можна ідентифікувати відмінність властивостей матеріалу, що руйнується органом окремо на кожному етапі.

Отже, унікальною закономірністю, що є ознакою настання індикативної події зміни сили опору руйнуванню виконавчим органом видобувного комбайна прошарку матеріалу біля покрівлі, є збільшення ступеню відмінності відхилень струму статора двигуна приводу різання на низькій частоті (від 3 до 6 Гц) на окремих етапах переміщення виконавчого органу вгору.

Високочастотні коливання струму статора заважають відстежити зазначену закономірність в інформаційному сигналі через їх випадковий характер та значну амплітуду, що сумірна з величиною відхилення струму статора на низькій частоті за умови руху виконавчого органу вгору. Таким чином, можна зробити висновок, що за умови вейвлет-аналізу інформаційного сигналу ця закономірність проявляється на масштабних рівнях, на яких високо-частотна складова є фільтрованою. З іншої сторони, занадто низький рівень масштабу за умови вейвлет-аналізу сигналу не дозволить зафіксувати зміну низькочастотної складової струму на короткому часовому інтервалі біля 1 с. Аналіз результатів вейвлет-

перетворення струму статора двигуна приводу різання як інформаційного сигналу показав, що більше 80% енергії низькочастотних коливань струму статора, що пов'язані з рухом виконавчого органу вверх, зосереджено на восьмому масштабному рівні. Отже, прийнявши усі вейвлет-коефіцієнти та масштабні коефіцієнти, крім восьмого, рівними нулю, та здійснивши зворотне вейвлет-перетворення, отримаємо у якості інформаційного сигналу низькочастотну складову струму статора $I_{c.n-ч}$, що відтворює закономірності низькочастотних змін струму, які пов'язані з рухом виконавчого органу вверх.

За чіткої інформативний критерій характеристик режиму руйнування матеріалу біля покрівлі пласта пропонується прийняти відносне відхилення максимальних значень функцій, що апроксимують низькочастотну складову струму статора на різних етапах переміщення виконавчого органу комбайна вверх:

$$INF_CR = \frac{|\max(F1(i)) - \max(F2(i))|}{\max(F1(i))}, \quad (1)$$

де $F1(i)$ та $F2(i)$ – функції у вигляді поліномів високих порядків, які є результатами апроксимації, відповідно, першої Y_1 та другої Y_2 допоміжних вибірок методом найменших квадратів; i – змінна для нумерації елементів допоміжних вибірок. Допоміжні вибірки Y_1 та Y_2 інформаційного сигналу формуються зі значень низькочастотної складової струму статора двигуна приводу різання, відповідно, на першому та другому етапах переміщення виконавчого органу вверх.

З урахуванням запропонованого інформативного чіткого критерію, що визначається за формулою (1), створений алгоритм фазифікації чіткого інформативного критерію (рис.2).

У блоці 2 на рис.2 подається команда на опускання виконавчого органу на подвійну величину східчастої зміни у часі висоти підйому виконавчого органу h . Це потрібно для формування над виконавчим органом прошарків матеріалу, які до цього він руйнував у зоні покрівлі пласта.

Далі за допомогою блоку 3 організується цикл з метою формування вибірки струму статора $DATA_I_c$ протягом часу $T_{науза}$, що необхідний для формування прошарків матеріалу над виконавчим органом, плюс 4 с для двоетапного східчастого переміщення виконавчого органу вверх.

Зауважимо, що з урахуванням кроку заміру струму статора у часі 100 мс перехід часу у секундах до кількості елементів вибірки у блоці 3 відбувається шляхом множення на 100.

У блоці 4 відбувається формування вибірки струму статора $DATA_I_c$ зі значень струму статора двигуна приводу різання шляхом додавання його значення на кожному кроці заміру струму у кінець вибірки.

У блоці 5 перевіряється умова завершення часу $T_{науза}$, який необхідний для формування прошарків матеріалу, що ідентифікуються, над виконавчим органом.

Якщо час $T_{науза}$ не пройшов, ніякі дії не здійснюються, а якщо пройшов – відбувається перехід до гілки алгоритму на основі блоків 6-9 (рис.2).

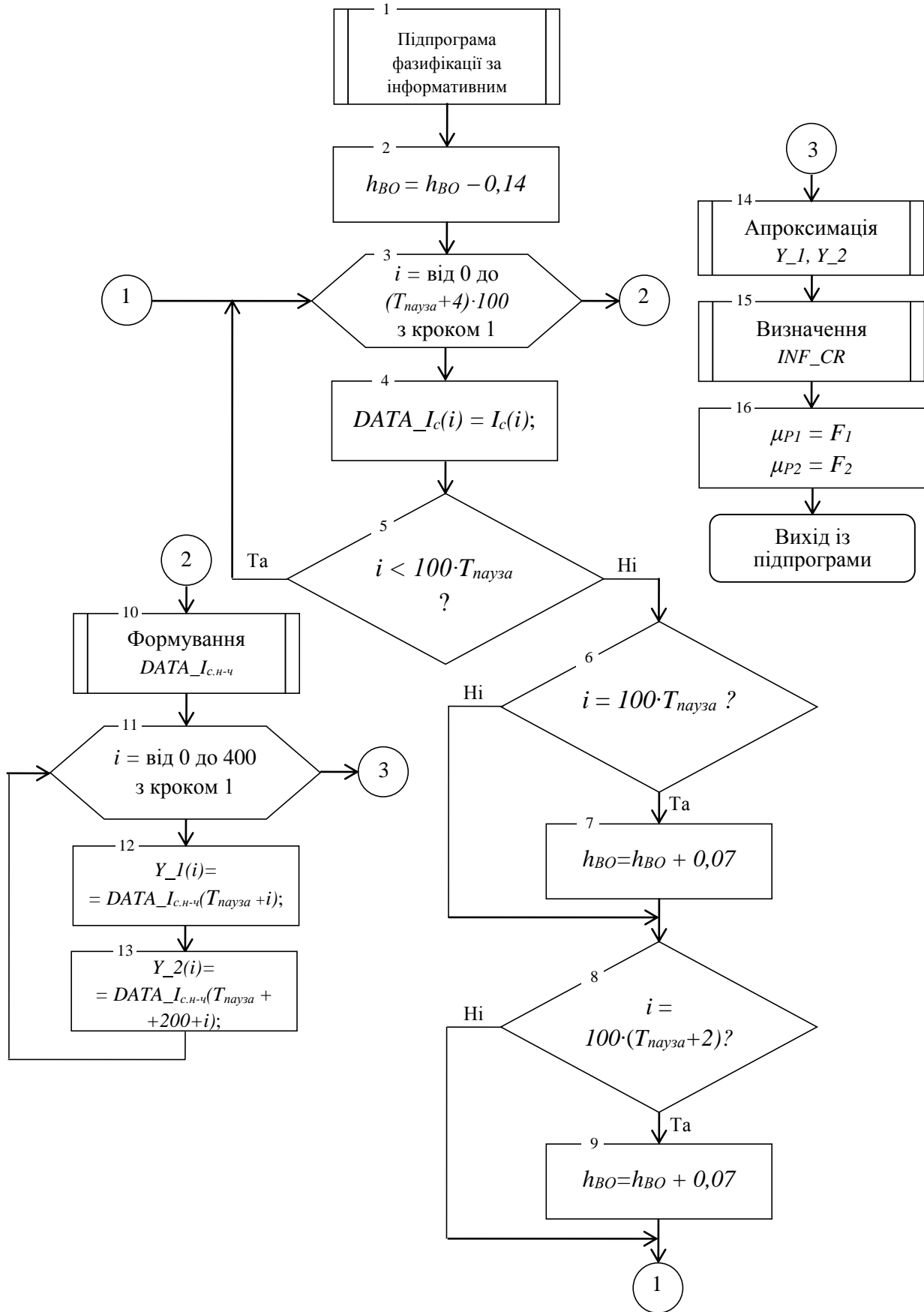


Рис. 2. Схема алгоритму фазифікації інформативного критерію системи нечіткого автоматичного керування за гіпсометрією пласта

Блоки 6-9 необхідні для реалізації алгоритму двосхідчастого переміщення виконавчого органу видобувного комбайна вверх з кроком у часі 2 с та кроком за рівнем 0,07 м з метою створення індикативної події для ідентифікації присікання породи.

Після двосхідчастого переміщення виконавчого органу комбайна вверх закінчується частина алгоритму на рис.2, що реалізує збір даних, та відбувається перехід до частини алгоритму, що реалізує аналіз цих даних й визначення чіткого інформативного критерію режиму руйнування матеріалу біля покрівлі пласта. При цьому відбувається вихід з циклу на основі блоку 3 та перехід до блоку 10. Блок 10 – це підпрограма, в якій виконується вейвлет-перетворення струму статора двигуна приводу різання комбайна на основі сформованої вибірки $DATA_{I_c}$, та формування вибірки зі значень низькочастотної складової струму статора $DATA_{I_{c,n-c}}$ за алгоритмом, описаним вище.

Після цього за допомогою блоку 11 на рис.2 організується цикл з метою формування допоміжних вибірок Y_1 та Y_2 , що складаються зі значень низькочастотної складової струму статора двигуна приводу різання, відповідно, на першому та другому етапах переміщення виконавчого органу комбайна вверх. Перша допоміжна вибірка Y_1 формується у блоці 12, а друга Y_2 – у блоці 13 на рис.2.

Після формування допоміжних вибірок Y_1 та Y_2 відбувається вихід з циклу, що організований на основі блоку 11, та перехід до блоку 14. Блок 14 – це підпрограма, в якій здійснюється апроксимація зміни у часі низькочастотної складової струму статора двигуна приводу різання окремо на першому (допоміжні вибірка Y_1) та другому (допоміжні вибірка Y_2) етапах переміщення виконавчого органу вверх ступеневими поліномами високих порядків методом найменших квадратів.

Далі у блоці 15 на рис.2, що також є підпрограмою, визначається чіткий інформативний критерій за формулою (1). Але при цьому з метою уніфікації чіткого інформативного критерію обмежимо діапазон зміни його значень від 0 до 1, де 1 – це 100%-на відносна різність максимальних значень функцій, що апроксимують низькочастотну складову струму статора на різних етапах переміщення виконавчого органу вверх:

$$INF_CR = \begin{cases} INF_CR & \text{якщо } INF_CR \leq 1 \\ 1 & \text{якщо } INF_CR > 1 \end{cases}.$$

Для фазифікації чіткого інформативного критерію системи нечіткого автоматичного керування за гіпсометрією пласта необхідно для обраних вище нечітких множин (термів) $P1$ та $P2$ запропонувати функції належності. Для цього проведемо статистичну оцінку розподілу значень чіткого інформативного критерію для різних гірничо-геологічних умов, а також з урахуванням усіх зовнішніх впливів на видобувний комбайн як мехатронну систему. При цьому оцінку будемо проводити для двох випадків – за умови відсутності присікання породи біля покрівлі пласта виконавчим органом комбайна та коли присікання породи має місце.

Для статистичної оцінки розподілу значень чіткого інформативного критерію необхідно сформувати вибірку зі значень критерію. Для цього окремо для кожного випадку присікання та відсутності присікання породи виконавчим органом був проведений обчислювальний експеримент на основі комплексної імітаційної моделі видобувного комбайна як мехатронної системи [7] на часовому інтервалі 5 годин. З урахуванням середньої швидкості подачі комбайна 3 м/хв та тривалості одного циклу ідентифікації режиму руйнування матеріалу біля покрівлі пласта 11 с, за результатом обчислювального експерименту отримуємо вибірку зі значень чіткого інформативного критерію розміром 1636 елементів.

Нормована за максимальною частотою гістограма вибірки значень чіткого інформативного критерію за умови відсутності присікання породи з урахуванням різних властивостей вугілля показана на рис.3,а. Гістограма відповідає гірничо-геологічним параметрам пласта С₅ шахти «Павлоградська» Донецького басейну з діапазоном зміни в'язкості вугілля від 1,6 до 3,5 та діапазоном зміни опірності вугілля різанню від 300 до 407 Н/мм.

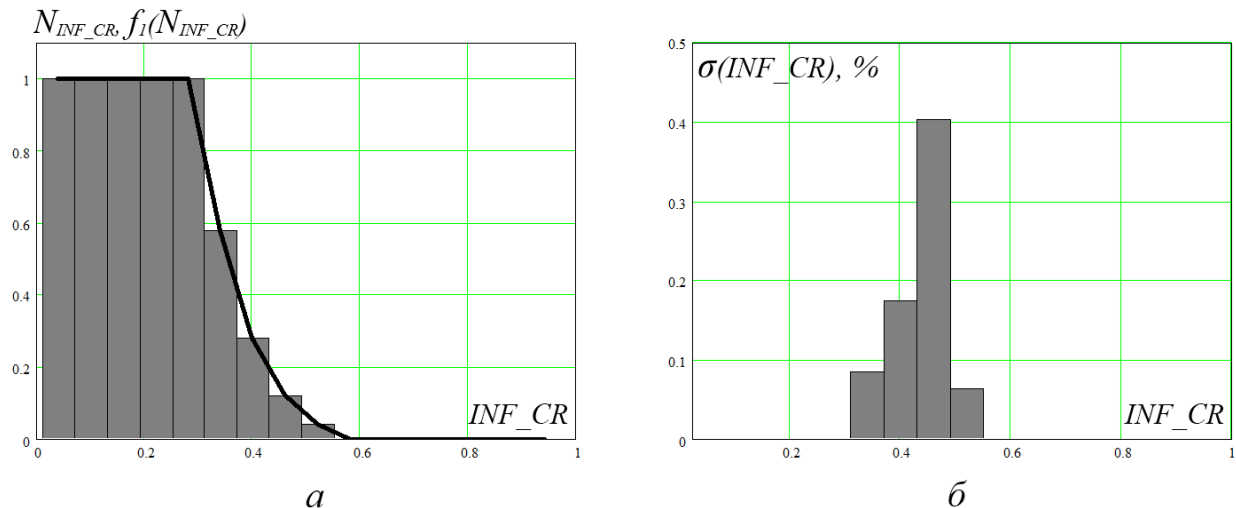


Рис. 3. Результат визначення функції належності для терму «Присікання породи відсутнє» за запропонованим інформативним критерієм (а) та похибки апроксимації гістограми вибірки значень інформативного критерію (б)

Усі значення чіткого інформативного критерію, що близькі до нуля, мають однаковий смисл та говорять про високий ступінь близькості максимальних значень кривих, що апроксимують низькочастотну складову струму статора на різних етапах переміщення виконавчого органу. З урахуванням цього, усі нормовані частоти гістограми на рис.3,а, що знаходяться лівіше максимального екстремуму, прийняті рівними одиниці.

Далі за частотами гістограми вибірки значень інформативного критерію, що менше за одиницю та більше нуля, методом найменших квадратів проводимо апроксимацію ступеневим поліномом п'ятого порядку:

$$f_1(INF_CR) = 1178,84 \cdot INF_CR^5 - 2630,96 \cdot INF_CR^4 + 2285,58 \cdot INF_CR^3 - 950,73 \cdot INF_CR^2 + 182,44 \cdot INF_CR - 11,58.$$

Запропонована функція належності для терму «Присікання породи відсутнє» за інформативним критерієм може бути застосована для вугільних пластів з різними гірничо-геологічними параметрами. При цьому на всьому інтервалі діапазону зміни інформативного критерію відносна похибка апроксимації не перевищує 0,5% (рис.3,б). Це говорить про високу точність апроксимації гістограми ступеневим поліномом 5 порядку.

З урахуванням рис.3,а та результату апроксимації гістограми вибірки значень інформативного критерію, функція належності для терму «Присікання породи відсутнє» за інформативним критерієм в аналітичній формі буде мати вигляд:

$$F_1(INF_CR) = \begin{cases} 1 & \text{if } INF_CR < 0,28; \\ f_1(INF_CR) & \text{if } 0,28 \leq INF_CR \leq 0,58; \\ 0 & \text{if } INF_CR > 0,58. \end{cases}$$

Далі аналогічним способом та для аналогічних гірничо-геологічних умов визначимо функцію належності для терму “Присікання породи присутнє”. Нормована за максимальною частотою гістограма вибірки значень чіткого інформативного критерію за умови присутності присікання породи для різних сполучень властивостей вугілля й породи показана на рис.4.

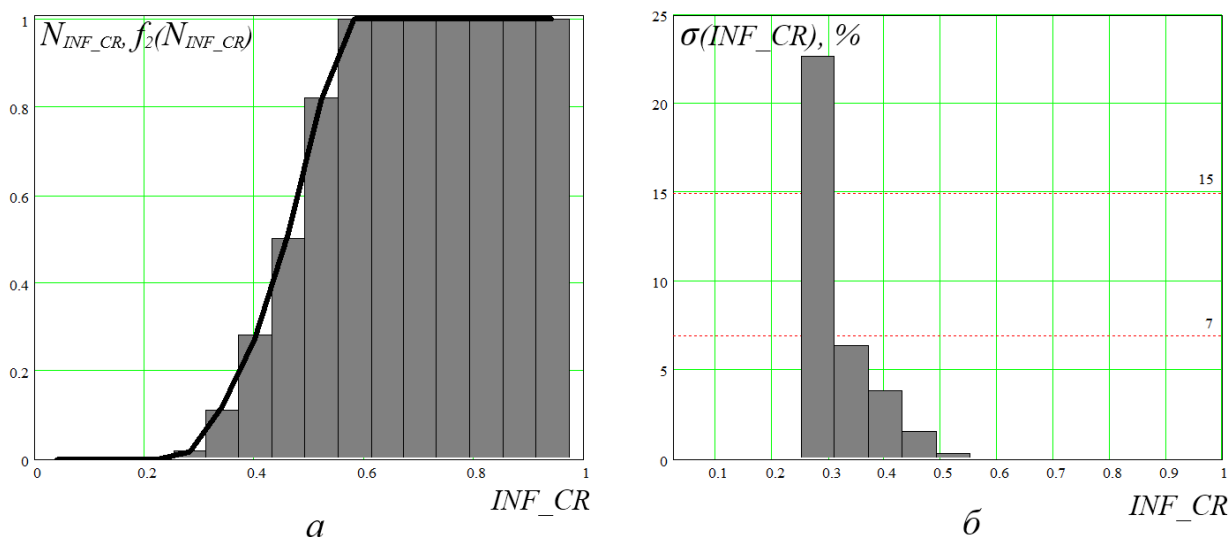


Рис. 4. Результат визначення функції належності для терму «Присікання породи присутнє» за запропонованим інформативним критерієм (а) та похибки апроксимації гістограми вибірки значень інформативного критерію (б)

Усі значення чіткого інформативного критерію, що близькі до одиниці, мають однаковий смисл та говорять про високий ступінь розбіжності максимальних значень кривих, що апроксимують низькочастотну складову струму статора

на різних етапах переміщення виконавчого органу. З урахуванням цього, усі нормовані частоти гістограми на рис.4,а, що знаходяться правіше максимального екстремуму, прийняті рівними одиниці.

Далі за частотами гістограми вибірки значень інформативного критерію, що менше за одиницю та більше нуля, методом найменших квадратів проводимо апроксимацію ступеневим поліномом п'ятого порядку:

$$f_2(INF_CR) = -1328,87 \cdot INF_CR^5 + 2491,74 \cdot INF_CR^4 - 1829,72 \cdot INF_CR^3 + 666,54 \cdot INF_CR^2 - 119,58 \cdot INF_CR + 8,379.$$

Відмітимо, що запропонована функція належності для терму «Присікання породи присутнє» за інформативним критерієм може бути застосована для вугільних пластів з різними сполученнями властивостей вугілля й породи безпосередньої покрівлі.

З рис.4,б ми бачимо, що на значимому інтервалі діапазону зміни інформативного критерію, коли ступінь належності терму більше 0,2, відносна похибка не перевищує 7%. Суттєва похибка більше 10% до значення критерію 0,3 за віссю абсцис на рис.4,б пояснюється невеликими значеннями функції належності. Але зазначимо, що з точки зору логіки нечіткого керування розбіжності ступеню належності на 0,004 у діапазоні значень функції належності до 0,2 суттєвого впливу на алгоритм прийняття рішень не мають.

З урахуванням рис.4,а та результату апроксимації гістограми вибірки значень інформативного критерію, функція належності для терму «Присікання породи присутнє» за інформативним критерієм в аналітичній формі буде мати вигляд:

$$F_2(INF_CR) = \begin{cases} 0 & \text{if } INF_CR < 0,22; \\ f_2(INF_CR) & \text{if } 0,22 \leq INF_CR \leq 0,58; \\ 1 & \text{if } INF_CR > 0,58. \end{cases}$$

Отже, за алгоритмом на рис.2 на основі запропонованих функцій належності F_1 та F_2 у блоці 16 визначаються, як результат фазифікації чіткого інформативного критерію, функції належності відповідних критерію термів вхідній лінгвістичній змінній системи:

$$X = \langle Name, T, [0,1] \rangle,$$

де $Name$ – назва вхідної лінгвістичної змінної («Ідентифікація режиму роботи комбайна за інформативним критерієм»); T – базова терм-множина вхідної лінгвістичної змінної системи:

$$T = \{P1, P2\}.$$

Висновки. 1. Поява на другому етапі за умови двоетапного східчастого переміщення виконавчого органу видобувного комбайна вверх присікання породи з відмінністю опірності різанню у порівнянні з вугіллям на 14% й більше призводить до суттєвої зміни ступеню відмінності відхилення струму статора двигуна приводу різання окремо на першому та другому етапах переміщення органу в

діапазоні частот від 3,12 до 6,25 Гц. Це дозволило у якості чіткого інформативного критерію використати ступінь розбіжності максимальних значень кривих, що апроксимують зміну у часі струму статора двигуна приводу різання комбайна в діапазоні частот від 3,12 до 6,25 Гц на окремих етапах переміщення виконавчого органу вверх.

2. Встановлено, що для різних сполучень властивостей вугілля й породи за умови фазифікації чіткого інформативного критерію режиму руйнування матеріалу біля покрівлі пласта на основі апроксимації гістограм розподілу значень критерію найбільш прийнятними апроксимуючими функціями, що забезпечують відносно відхилення значень функцій від частот гістограм не більше 10%, є ступеневі поліноми p' ятого порядку. При цьому апроксимація проводилася методом найменших квадратів.

Перелік посилань

1. Светкіна, О. Ю., Нетяга, О.Б., Тарасова, Г.В., & Лисицька, С.М. (2017). *Основи технічного аналізу вугілля*. Дніпро : НГУ.
2. Иванов, А. А., Бражников, И. А., Ткачев, В. В., Шаруда, В. Г., Ковальчук, В. В., Кожевников, В. Л., Чернышев В. П., Пушкарь, М. С., & Веремей, Е. Н. (1987). *Автоматизация процессов подземных горных работ*. Донецк: Вища шк. Головное изд-во.
3. Tan, C., Xu, R., Wang, Z., Si, L., & Liu, X. (2016). An Improved Genetic Fuzzy Logic Control Method to Reduce the Enlargement of Coal Floor Deformation in Shearer Memory Cutting Process. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2016, 1–14. doi:10.1155/2016/3973627
4. Si, L., Wang, Z., Liu, X., Tan, C., Liu, Z., & Xu, J. (2016). Identification of Shearer Cutting Patterns Using Vibration Signals Based on a Least Squares Support Vector Machine with an Improved Fruit Fly Optimization Algorithm. *Sensors*, 16(1), 90. doi:10.3390/s16010090
5. Sustainable Intelligent Mining Systems. European Commission: European Innovation Partnership on Raw Materials (n.d.). Retrieved September 28, 2018, from <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/eip-raw-materials/en/content/sustainable-intelligent-mining-systems>
6. Позин, Е. З., Меламед, В. З., & Тон, В. В. (1984). *Разрушение углей выемочными машинами*. Москва: Недра.
7. Бубликов, А. В. (2016). Експертна система нечіткого автоматичного керування видобувним комбайном як частина мехатронної системи. *Гірнична електромеханіка та автоматика*, 41 – 48.

АННОТАЦИЯ

Цель. Цель заключается в создании информативного критерия, с помощью которого выявляются уникальные закономерности изменения во времени тока статора двигателя привода резания добычного комбайна при начале присечки исполнительным органом добычного комбайна породы у кровли пласта. Также целью в статье является создание алгоритма фазификации этого информативного критерия на основе анализа совпадения графиков функций, аппроксимирующих изменение во времени низкочастотной составляющей тока статора на различных временных интервалах перемещения вверх исполнительного органа добычного комбайна.

Методика исследования заключается в определении статистической характеристики тока статора двигателя привода резания добычного комбайна, которая является чувствительной к

нарушению закономерностей изменения во времени низкочастотной составляющей тока статора двигателя привода резания из-за начала присечки исполнительным органом комбайна породы у кровли пласта, и в адаптации этой характеристики для использования в качестве функций принадлежности соответствующих термов системы нечеткого автоматического управления исполнительным органом комбайна по гипсометрии пласта.

Результаты исследования. Появление на втором этапе при двухэтапном ступенчатом перемещении исполнительного органа добычного комбайна вверх присечки породы с измененной сопротивляемостью резанию по сравнению с углем на 14% и более приводит к существенному изменению степени расхождения отклонений тока статора двигателя привода резания отдельно на первом и втором этапах перемещения органа в диапазоне частот от 3,12 до 6,25 Гц. Это позволило в качестве четкого информативного критерия использовать степень расхождения максимальных значений кривых, аппроксимирующих изменение во времени тока статора двигателя привода резания комбайна в диапазоне частот от 3,12 до 6,25 Гц на отдельных этапах перемещения исполнительного органа вверх. Также установлено, что для различных сочетаний свойств угля и породы при фазификации четкого информативного критерия режима разрушения материала у кровли пласта на основе аппроксимации гистограмм распределения значений критерия наиболее приемлемыми аппроксимирующими функциями, обеспечивающими относительное отклонение значений функций от частот гистограмм не более 10%, являются степенные полиномы пятого порядка.

Научная новизна заключается в использовании для идентификации режимов разрушения материала у кровли пласта результата анализа степени нарушения закономерностей изменения во времени низкочастотной составляющей тока статора двигателя привода резания на отдельных временных интервалах перемещения исполнительного органа вверх. При этом предложенный алгоритм фазификации четкого информативного критерия является мерой нарушения этих закономерностей.

Практическое значение. Результаты исследований будут использованы для создания системы нечеткого автоматического управления исполнительным органом добычного комбайна по гипсометрии угольного пласта.

Ключевые слова: *система нечеткого автоматического управления, добычной комбайн, идентификация режимов работы, гипсометрия угольного пласта.*

ABSTRACT

Purpose. The purpose is to create an informative criterion that reveals violations of the regularity of changes in time of the stator current of the cutting drive motor of a shearer at the beginning of cutting by the executive body of the breed near the roof of the seam. Also, the purpose of the paper is to create a fuzzification algorithm for this informative criterion based on the analysis of the coincidence of function graphs that approximate the change in time of the low-frequency component of the stator current at different time intervals of moving upward of the executive body of the shearer.

The methodology of research consists is to establish the statistical characteristics of the stator current of the cutting drive motor of a shearer, which are sensitive to the violation of the regularity of change in time of the low-frequency component of the current of the drive motor of a cutting drive because of the beginning of cutting by the executive body of the breed near the roof of the seam, and also to adapt these characteristics for use as term membership functions.

Findings. The appearance of rock cutting at the second stage of a two-stage step-by-step movement of the executive body of the shearer with a modified cutting resistance compared to coal by 14% or

more leads to a significant change in the degree of divergence of deviations of the stator current of cutting drive motor separately in the first and second stages of executive body movement in the range of frequencies from 3.12 to 6.25 Hz. This allowed as a numerical informative criterion to use the degree of divergence of the maximum values of the curves that approximate the time variation of the stator current of the cutting drive motor of shearer in the frequency range from 3.12 to 6.25 Hz at certain stages of moving upward of the executive body. It was also found that for various combinations of coal and rock properties, at fuzzification of a numerical informative criterion of mode of material destruction near the roof of the seam, based on approximation of histograms of criterion values distribution, the most acceptable approximating functions, providing the relative deviation of function values from histogram frequencies not more than 10%, are the polynomials of fifth order.

The originality consists in using to identify the modes of material destruction near the roof of the seam the result of analyzing the degree of violation of the regularity of changes in time of the low-frequency component of the stator current of the cutting drive motor on the separate time intervals of moving upward of the executive body. At the same time, the algorithm of fuzzification of a numerical informative criterion, which is a measure of violation of the regularity, is proposed.

Practical implications. The research results will be used to create a system of fuzzy automatic control by the executive body of the shearer on coal seam hypsometry.

Keywords: *system of fuzzy automatic control, shearer, the identification of working modes, coal seam hypsometry.*