

роботи комбайна, які впливають на прийняття рішень оператором: режим роботи двигуна приводу різання, режим руйнування масиву вугілля й породи виконавчими органами та режим транспортування і навантаження зруйнованого матеріалу виконавчим органом на забійний конвеєр. За умови створення баз правил нечітких продукцій для систем нечіткого автоматичного керування режимами роботи комбайна характеристики цих режимів прийняті за підумови правил нечітких продукцій, а дії оператора комбайна – за висновки правил нечітких продукцій з можливістю подальшого уточнення дії.

2. Незмінність у процесі роботи комбайна товщини стружки вугілля, що відповідає межі між енергоефективним та неенергоефективним режимами руйнування масиву вугілля виконавчим органом комбайна, дозволяє системі нечіткого автоматичного керування за умови прийняття рішення враховувати результат ідентифікації характеристик режиму руйнування на попередніх кроках, що зменшує вірогідність неточної ідентифікації режиму руйнування. Для цього використані додаткові терми для вхідної лінгвістичної змінної системи та підумови у базі правил нечітких продукцій системи.

3. Завдяки тому, що гіпсометрія пласта змінюється у просторі значно повільніше у порівнянні з часом, необхідним для ідентифікації присікання породи виконавчим органом, є можливість в алгоритмі прийняття рішень системою нечіткого автоматичного керування органом за гіпсометрією пласта забезпечити прийняття рішення щодо зміни положення виконавчого органу за умови появи відповідної унікальної закономірності в інформаційному сигналі не один, а декілька разів поспіль. Це забезпечується введенням окремих термів для вхідної лінгвістичної змінної системи “до цього перебували у режимі ...” та складних умов у базі правил нечітких продукцій системи на кшталт “до цього перебували у режимі руйнування породи” ТА “наразі перебуваємо у режимі руйнування породи”. Завдяки цьому зменшується вірогідність неточної ідентифікації режиму руйнування матеріалу біля покрівлі пласта.

#### Список літератури

1. Стадник Н. И. Мехатроника в угольном машиностроении // Н. И. Стадник, А. В. Сергеев, В. П. Кондрахин / Горное оборудование и электромеханика. – М.: Новые технологии, 2007. – № 4. – С. 20 – 29.
2. Стадник Н.И. Мехатронный подход при анализе движущихся горных комплексов // Н. И. Стадник / Энергетика, контроль та діагностика об'єктів нафтогазового комплексу. – 2013. – № 1(19). – С. 91 – 98.
3. 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.
4. Проведение испытаний работы очистного комбайна УКД300 в условиях шахты «Павлоградская»: Отчет о научно-исследовательской работе / [ науч. рук. Н. И. Стадник ]. — Донецк : Донгипроуглемаш, 2004. – 35 с.
5. Топорков А. А. Машинист горных выемочных машин / А. А. Топорков. – М. : Недра, 1991. – 334 с.
6. Крестовоздвиженский П. Д. Некоторые результаты наблюдений за работой очистных комбайнов на шахтах Кузбасса / П. Д. Крестовоздвиженский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 6. – С. 120–123.
7. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH / А. В. Леоненков. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
8. Позин Е. З. Разрушение углей выемочными машинами / Е. З. Позин, В. З. Меламед, В. В. Тон. – М. : Недра, 1984. – 288 с.
9. Бубликов А. В. Експертна система нечіткого автоматичного керування видобувним комбайном як частина мехатронної системи / А. В. Бубликов // Гірнична електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Д. : НГУ, 2016. – Вип. 97. – С. 41 – 48.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Ткачовим В.В.*

УДК 622.489:658.012.011

**А.В. Малієнко, Л.С. Коряшкіна, С.В. Козир**  
(Україна, Дніпро, НТУ «Дніпровська політехніка»)

### **НЕЛІНІЙНА МОДЕЛЬ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИДОБУТКУ ВУГІЛЛЯ З УРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ, ЕНЕРГЕТИЧНИХ І ВИРОБНИЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ШАХТИ**

**Анотація.** Розглянуто задачу оптимізації плану видобутку вугілля за певний період часу в межах однієї шахти з урахуванням трьох типів обмежень: технологічних – за вмістом золи, сірки і вологи у загальному обсязі видобутого вугілля; виробничих – на планову потужність лав і поточний стан сховища вугілля поверхні (СВП); енергетичних – на максимально можливе електричне навантаження по вугільному підйому, транспорту і водовідлив. Критерієм оптимізації є мінімальна сумарна собівартість ви-

добутого вугілля по всім лавам за період  $T$ , у тому числі мінімізація штрафу за перевищення ліміту витраченої електроенергії і витрат, пов'язаних із зміною поточного стану СВП. Запропоновано математичну модель, яка є задачею мінімізації нелінійної функції за лінійних обмежень.

**Ключові слова:** математична модель, видобування вугілля, технологічний процес видобутку вугілля, оптимізація роботи гірничого підприємства.

**Анотация.** Рассмотрена задача оптимизации плана добычи угля за определенный период времени в пределах одной шахты с учетом трех типов ограничений: технологических – по содержанию золы, серы и влаги в общем объеме добытого угля; производственных – на плановую мощность лав и текущее состояние хранилища угля поверхности (ХУП), энергетических – на максимально допустимую электрическую нагрузку, связанную с подъемом угля, его транспортировкой, а также с водоотливом. Критерием оптимизации является минимальная суммарная себестоимость добытого угля по всем лавам шахты за период  $T$ , в том числе минимизация штрафа за превышение лимита затраченной электроэнергии и расходов, связанных с изменением текущего состояния ХУП. Предложена математическая модель указанной задачи, которая является задачей минимизации нелинейной функции при линейных ограничениях.

**Ключевые слова:** математическая модель, добычи угля, технологический процесс видобутку угля, оптимизация работы горного предприятия.

**Abstract.** The problem of optimizing the coal production plan for a certain period of time within the same mine has been considered, taking into account three types of constraints: technological – on ash, sulfur and moisture content in the total volume of coal mined; production – at the planned capacity of the lavas and the current state of the surface coal storage (SCS), energy – at the maximum allowable electrical load associated with the lifting of coal, its transportation, and also with the drainage. The optimization criterion is the minimum total cost of coal mined in all lavas for a period  $T$ , including minimizing the penalty for exceeding the limit of electricity consumed and the costs associated with changing the current state of the SCS. It is proposed a mathematical model of this problem, which consists of minimizing a nonlinear function under linear constraints.

**Key words:** mathematical model, coal mining, the technological process of coal mining, optimization of the mining enterprise.

### Вступ.

Гірничовидобувна промисловість є однією з найважливіших галузей як світової, так і вітчизняної економіки, оскільки мінерально-сировинний потенціал держави обумовлює не тільки ефективність функціонування інших галузей промисловості, а і рівень розвитку соціальної сфери, визначаючи місце країни у світовій економічній системі. Галузь традиційно відносять до числа найскладніших з точки зору управління. Це пов'язано із необхідністю постійних і значних інвестицій, високими витратами на операційну діяльність, сильним впливом біржових цін на ресурси, проблемами захисту навколишнього середовища, здоров'я та гарантування безпеки. Крім того, на розвиток галузі значно впливають різні регулюючі органи. Серед найбільш пріоритетних завдань компаній галузі є: оптимізація/інтеграція виробничих операцій, підвищення ефективності ланцюжка поставок, інновації для управління ростом, раціоналізація бізнес-одиниць, управління енергетичними затратами, управління цінами на сировину, управління витратами, підвищення продуктивності.

Не зменшуючи важливість фінансової підтримки і значущості дії зовнішніх обставин на функціонування вуглевидобувних підприємств, слід зазначити, що вагомою складовою в процесі пошуку стратегій розвитку як самих гірничих підприємств, так і галузі в цілому, є більш раціональне використання наявних внутрішніх резервів шахт. Збитковість багатьох вугледобувних підприємств частіше за все обумовлена недостатньо ефективним управлінням, необґрунтованим зростанням витрат на видобуток вугілля, відсутністю механізмів, що дозволяють максимально використовувати наявний потенціал. Ніяка ні фінансова, ні інвестиційна підтримка не дозволить забезпечити ефективний видобуток вугілля і не поліпшить економічні показники роботи шахт при низькому рівні управління і безгосподарності.

Одним з напрямків підвищення ефективності управління вуглевидобувними підприємствами є реалізація таких найважливіших інструментів господарювання, як планування і контроль, а отже, й використання математичних моделей і методів в плануванні та управлінні.

**Об'єктом досліджень** є технологічний процес видобутку вугілля.

Предметом дослідження є математична модель задачі пошуку такого плану видобутку вугілля, який за наявних виробничих і технологічних обмежень забезпечував би зниження собівартості видобутку, транспортних витрат і штрафу за перевищення ліміту витраченої електроенергії.

**Метою роботи** є розробка математичної моделі задачі оптимізації обсягів видобування вугілля з усіх лав деякої шахти за певний період часу з урахуванням виробничих потужностей шахти, а також технологічних і

енергетичних обмежень, реалізація якої дозволить скоротити час і підвищити ефективність прийняття рішення диспетчером вугільної шахти щодо плану роботи гірничого підприємства.

**Постановка задачі.** На шахтах обсяг видобутку, який визначається за планом, щомісяця розподіляється між окремими діючими ділянками так, щоб забезпечувалася мінімальна собівартість одиниці видобутого вугілля при обов'язковому дотриманні технологічних вимог і умов виробництва. Процес видобутку має нерівномірний характер, що не може не позначатися на роботі всієї вугільної шахти. Нерівномірність обсягів видобутку пов'язана в першу чергу з характером залягання вугільного масиву, режимами роботи обладнання, попитом на продукцію підприємства. Для стабілізації обсягів видобутку, згладжування нерівномірності видобутку, транспортування, а головне зменшення простоїв обладнання технологічних комплексів гірничого підприємства необхідно впровадження та модернізація існуючих систем диспетчерського управління, удосконалення математичних моделей системи оперативного-диспетчерського управління (СОДУ).

**Огляд наукових публікацій.** Питанням підвищення ефективності управлінських рішень щодо функціонування і розвитку підприємств гірничодобувної галузі в сучасних ринкових умовах присвячена велика кількість наукових публікацій. Розглянемо деякі з них, де надаються рекомендації, отримані за рахунок використання економіко-математичного моделювання.

Так, у роботі [1] запропонована модель розвитку вугільної галузі країни, яка враховує ринкові умови функціонування галузі шляхом додавання до переліку виробників вугільної продукції джерел постачання імпортованого палива і запровадження таким чином конкурентних засад функціонування власних виробників – суб'єктів внутрішніх ринків вугілля. У результаті реалізації такої моделі визначаються обсяги видобутку вітчизняних шахтних підприємств, а також відповідні обсяги надходження імпортованого вугілля у порівнюваних варіантах спрямування капіталовкладень у галузь при заданих потребах економіки країни на вугільну продукцію.

Максимізація річного прибутку шахтного підприємства за рахунок оптимальної довжини комплексно-механізованого очисного забою розглянута в роботі [2]. Отримані аналітичні розв'язки цієї задачі показують нелінійні залежності оптимальної довжини лави від гірничо-геологічних, технологічних і техніко-економічних показників (марки, зольності, товарної ціни вугілля, опірності пласта різанню, наявності породних прошарків та ін.). У роботі також зазначено, що оскільки в більшості випадків шахта відпрацьовує не один пласт, а свиту вугільних пластів з різною якістю, задачу визначення оптимальної довжини лави (навіть при використанні того ж самого комплексу) необхідно вирішувати в кожному випадку заново при переході від відпрацювання одного пласта до іншого, тобто, не існує однозначної відповіді щодо обґрунтування оптимальної довжини лави для даного виду комплексу, а довжина лави має оптимізуватися для кожного вугільного пласта і навіть для окремих виїмкових стовпів, якщо гірничо-геологічні умови їх залягання істотно розрізняються. Розкрий шахтного поля на панелі, яруси, видобувні стовпи, а також календарний план їх відпрацювання в значній мірі змінюватимуться відповідно до розв'язку задачі оптимізації довжин очисних вибоїв для кожного пласта свити.

Економіко-математична модель розкриття і підготовки шахтного поля, яка запропонована в роботі [3], розроблена з використанням елементів теорії графів. В даній моделі виконується мінімізація обсягів проведення підготовчих робіт.

Важливим показником ефективності роботи гірничого об'єднання є собівартість видобутку. Моделювання (математичний опис) цієї величини дозволяє здійснити економічне обґрунтування проектів відпрацювання запасів, вибір оптимальної системи розробки, визначити та оптимізувати витрати основних ресурсів. Можливість урахування специфіки розробки запасів на гірничовидобувному підприємстві, яка значним чином впливає на вартісні показники і може значно відрізнятися для різних проектів відпрацювання руд, розглянуто в роботі [4] під час розрахунку витрат основних ресурсів. У цій роботі проведена формалізація економіко-математичної моделі визначення собівартості видобутку запасів гірничодобувного підприємства в умовах підземної розробки родовищ. Тут зазначено, що під час побудови моделі визначення собівартості необхідно забезпечити можливість диференційованого врахування гірничо-геологічних і технологічних параметрів різних проектів розробки запасів. Проведене дослідження показало, що за умов підземної розробки залізних руд основними із цих параметрів є такі: обсяг запасу, що підлягає відпрацюванню, розподіл міцності у видобувному блоці, обсяг нарізних, підготовчих робіт та очисного виймання, час відпрацювання запасів, продуктивність обладнання, місячна продуктивність блока з руди. Ці параметри обумовлюють витрати основних ресурсів та впливають на величину собівартості видобутку.

У роботі [5] розглянуто етапи керування гірничим підприємством, а також моделі і методи, що застосовуються для формалізації таких задач. У цих задачах гірничо-промислові системи розглядаються як природно-технологічні комплекси. Проаналізовані такі важливі для управління особливості процесів гірничого виробництва, як їх перебіг у нестационарному якісно і кількісно неоднорідному природному сере-

довищу, багаторівневість і комплексна взаємозалежність задач управління ними. Виділений мішаний дискретно-неперервний характер задач керування щодо змінних, стану і часу, обґрунтовано застосування формалізму гібридних систем і декомпозиційного підходу щодо побудови методів оптимізації. Розглянуто досвід вирішення проблем керування потоками надходження повітря на шахтах, перспективного і оперативного планування відкритих гірничих робіт.

Відомо, що існують і широко застосовуються деякі спеціальні методи постановки задач оптимізації та шляхи їх розв'язання. Це, наприклад, оптимізаційні методи визначення кінцевих границь відкритої розробки на базі застосування спеціалізованих варіантів динамічного програмування до блокових моделей родовища і кар'єра. Дані методи мають високий рівень обґрунтування. Велика кількість методів розв'язання оптимізаційних задач, що виникають на гірничих підприємствах, належать області інженерної математики та є лише евристиками. Незважаючи на те, що евристичні алгоритми відображають прийнятні результати при розв'язанні окремих задач, вони не можуть бути перенесені на інші, оскільки різноманітність таких завдань дуже велика. Разом з тим можна відзначити той сприятливий факт, що комбінаторна природа деяких задач керування в гірничій галузі не потребує дуже великої кількості допустимих варіантів, які мають місце, наприклад, в задачах теорії розкладів.

Як зазначено в роботі [5], в розроблених на даний момент промислових програмних комплексах моделювання і планування гірничого виробництва оптимізаційні моделі та методи застосовуються дуже обмежено. За допомогою таких програмних засобів реалізований переважно низькорівневий діалог, тобто по суті метод проб і помилок, часто в дуже обтяжному для користувачів вигляді. Причиною тут є насамперед складність розв'язання нелінійних задач в порівнянні з лінійними. Крім того, необхідно реалізувати для їх розв'язання цілий арсенал методів нелінійної оптимізації (в порівнянні з перевіреним симплекс-методом) і забезпечити зручні засоби для вибору методу, або цілої низки методів. Іншою причиною обмеженого застосування оптимізаційних моделей є їх недостатня адекватність або недостатня універсальність, неврахування ряду істотних умов складного і різноманітного гірського виробництва. Необхідність вносити вручну поправки до планових рішень, розрахованих формальними методами, але на основі грубих моделей, знецінює практичне значення оптимізаційних методів. На думку авторів, найкращим шляхом поступового подолання цієї проблеми є вдосконалення моделей, які більш точно відображають дискретно-неперервний характер процесів у неоднорідному просторово-часовому середовищі, і не настільки складних, щоб неможливо було вирішувати на їх основі задачі керування.

Отже, актуальним напрямком наукових досліджень є розвиток спеціалізованих методів теорії управління на основі модифікації або комбінації методів більш універсального характеру, орієнтованих на розв'язання цілих класів задач, що виникають з урахуванням їх принципових особливостей.

У роботі [6] наведена система оперативно диспетчерського керування, яка дозволить підвищити ефективність прийняття відповідальних рішень диспетчером вугільних шахт. Розроблена імітаційна модель визначення ємності накопичувальних бункерів вугільної шахти при розрахунку навантажень на лави, яка дозволяє враховувати нерівномірність роботи лав, лінійних ділянок транспортної мережі шахти і при цьому регулювати вантажопотік та оптимізувати прийняття рішень відповідальними співробітниками диспетчерських служб вугільних шахт.

У системі планових показників особливе місце займає обсяг видобутку вугілля, який в значній мірі формує величину багатьох інших показників, і в першу чергу – собівартості видобутку вугілля. План видобутку вугілля безпосередньо пов'язаний з планом по праці і заробітної плати, планами виробничих витрат, а також фінансових та інвестиційних планів. На відміну від моделей, запропонованих у вказаних вище роботах, представлена в даній роботі математична модель задачі оптимізації плану видобутку вугілля враховує одночасно наявні технологічні, виробничі й енергетичні потужності гірничого підприємства і забезпечує мінімальну собівартість видобутку, у тому числі й штрафи за можливі невиконання зазначених умов.

**Матеріали дослідження.** Нехай планується видобуток вугілля на період часу  $T$  з усіх лав шахти, що працюють у штатному режимі. Тут і надалі  $T$  вимірюється в годинах. Добуте вугілля з кожної лави може бути направлено частково – в загальну ємність (контейнер) для задоволення попиту, частково – на поповнення запасів вугля у СВП шахти. Якщо кількість добутого вугілля недостатня для задоволення потреб споживача (наприклад, у разі реалізації нештатної ситуації на деякій лаві), то решту можна відвантажити із сховища. При цьому мають бути враховані обмеження на використання електроенергії, на технологічні характеристики отриманої суміші, а також розміри СВП і номінальну кількість вугля, який має залишатися у сховищі на кінець періоду, що розглядається.

Задача розрахунку оптимальних навантажень на лави вугільної шахти за певний період часу складається з мінімізації сумарної собівартості видобутого вугілля по всім лавам за період  $T$ , у тому числі штрафу за перевищення ліміту витраченої електроенергії і витрат, пов'язаних із зміною поточного стану СВП, з урахуванням трьох типів обмежень: технологічних – за вмістом золи, сірки і вологи у загальному обсязі видобутого вугілля; виробничих – на планову потужність лав і поточний стан СВП; енергетичних

– на максимально можливе електричне навантаження вугільного підйому, транспорту, водовідливу та ін [7, 8].

Для побудови математичної моделі введемо такі позначення величин, що вважаються відомими:

$n$  – кількість працюючих лав;

$D_{pl}$  – плановий (узгоджений з попитом) обсяг видобутку вугілля шахти в цілому, т;

$C_i, i = \overline{1, n}$ , – собівартість тонни вугілля з  $i$  – тої лави, грн/т;

$X_i^{\min}, X_i^{\max}, i = \overline{1, n}$ , – відповідно мінімально і максимально можлива кількість вугілля, яке можна отримати з  $i$  – тої лави, і яка визначається технологічними характеристиками лави, т;

$0 \leq p_i \leq 1, i = \overline{1, n}$ , – ймовірність роботи  $i$ -тої лави в штатному режимі протягом періоду часу  $T$  (визначається за допомогою графу станів) ;

$Z_i$  – вміст золи у вугіллі  $i$ -го забою, %;

$S_i$  – вміст сірки у вугіллі  $i$ -го забою, %;

$W_i$  – вміст вологи у вугіллі  $i$ -го забою, %;

$B_1, B_2, B_3$  – граничні значення за змістом золи, сірки і вологи у суміші вугілля з усіх лав, %;

$\gamma_0$  – питомі (розраховані на тону) витрати, пов'язані із зберіганням надлишкової кількості вугілля на СВП, грн/т ;

$\gamma_1$  – розрахований розмір штрафу за перевищення ліміту на одиницю енергоносія, грн/(кВт\*год);

$\gamma_2$  – вартість відвантаження тони вугілля з СВП, грн/т;

$\beta_i, i = \overline{1, n}$ , – вартість транспортування (або зберігання) на СВП надлишкової однієї тони вугілля, видобутого з  $i$ -тої лави, грн/т;

$V_T$  – поточна кількість вугілля на СВП, т;

$V_H$  – номінальний обсяг вугілля на СВП, т;

$V_{\max}$  – максимальний обсяг вугілля на СВП, т;

$P_z$  – потужність, що відповідає заявленому ліміту на інтервалі часу  $T$ , кВт\*год;

$P_p$  – електричне навантаження вугільного підйому, кВт\*год;

$P_{tr}$  – електричне навантаження локомотивного транспорту, кВт\*год;

$P_{kt}$  – електричне навантаження конвеєрного транспорту, кВт\*год;

$P_v$  – електричне навантаження водовідливу, кВт\*год;

$P_{vs}$  – сумарна встановлена потужність обладнання, що відповідає можливостям підстанції, кВт\*год.

Для формалізації математичної моделі оптимізації плану видобутку вугілля введемо тепер такі змінні:

$z_i, i = \overline{1, n}$ , – обсяг вугілля, який планується видобувати з  $i$  – тої лави за одиницю часу, тобто поточна продуктивність  $i$  –ї лави, т/год;

$y_i, i = \overline{1, n}$ , – обсяг видобутого з  $i$ -го забою вугілля, для поповнення запасів СВП шахти, т;

$z = (z_1, z_2, \dots, z_n), y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  – вектори відповідних змінних;

$Y$  – обсяг вугілля, який забирається з СВП шахти на покриття запланованого попиту  $D_{pl}$  у разі недостатньої кількості видобутого вугілля, т.

Проміжними шуканими величинами, які характеризують роботу шахти протягом періоду  $T$ , є:

$\bar{D}_f$  – фактичний обсяг видобутку по шахті в цілому, т:

$$\bar{D}_f = \sum_{i=1}^n p_i T z_i;$$

$\Delta P$  – можливе перевищення ліміту споживаної електроенергії за період часу  $T$ , кВт\*год:

$$\Delta P = \begin{cases} P_s - P_z, & \text{якщо } P_s > P_z \\ 0, & \text{якщо } P_s \leq P_z \end{cases}$$

де

$$P_s = (P_p + P_{tr} + P_{kt} + P_k + P_v) \cdot \sum_{i=1}^n p_i T z_i;$$

$\Delta V$  – зміна обсягу вугілля в СВП, [т]:

$$\Delta V = \left( \sum_{i=1}^n y_i - Y \right) \cdot$$

Отже, математична модель задачі оптимізації плану видобутку вугілля з мінімальною собівартістю при всіх зазначених вище обмеженнях має вигляд:

$$G \rightarrow \min_{z, y, Y}$$

де

$$G = \sum_{i=1}^n C_i p_i T z_i + \gamma_1 \Delta P + \left( \gamma_2 Y + \sum_{i=1}^n \beta_i y_i \right),$$

за умов, що:

$$\sum_{i=1}^n Z_i (p_i T z_i - y_i) \leq B_1 \sum_{i=1}^n (p_i T z_i - y_i), \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n S_i (p_i T z_i - y_i) \leq B_2 \sum_{i=1}^n (p_i T z_i - y_i), \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n W_i (p_i T z_i - y_i) \leq B_3 \sum_{i=1}^n (p_i T z_i - y_i), \quad (3)$$

$$X_i^{\min} \leq p_i T z_i \leq X_i^{\max}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n (p_i T z_i - y_i) + Y \geq D_{pl}, \quad (5)$$

$$(P_p + P_{tr} + P_{kt} + P_k + P_v) \cdot \sum_{i=1}^n p_i T z_i \leq P_{vs}; \quad (6)$$

$$V_H \leq V_T + \sum_{i=1}^n y_i - Y \leq V_{\max}; \quad (7)$$

$$0 \leq Y \leq V_T, \quad (8)$$

$$0 \leq y_i \leq p_i z_i, \quad i = \overline{1, N}. \quad (9)$$

Отже, цільова функція  $G$  має такі складові: перший доданок визначає собівартість вугілля, добутого з усіх лав за період часу  $T$ ; другий доданок – штраф за можливе перевищення ліміту витраченої електроенергії; третій доданок враховує витрати, пов'язані зі зміною стану СВП.

Група умов (1) – (3) відповідає вимогам щодо вмісту золи, сірки та вологи у загальному обсязі вугілля, що видобувається; умова (4) враховує виробничі потужності самих лав шахти. Обмеження (5) означає, що кількість видобутого вугілля відповідної якості з урахуванням можливого відвантаження певної кількості на СВП (сховище вугілля поверхні шахти), і, поповнення його за рахунок вугілля із сховища, має бути не меншим за заплановану величину  $D_{pl}$ . Умова (6) носить енергетичний характер і відображає той факт, що споживання електроенергії не може перевищувати встановлений підстанцією ліміт. Умова (7) пов'язана із зміною кількості вугілля у СВП: на кінець періоду, що розглядається, обсяг вугілля у сховищі має бути не менше бажаного, але й не більше максимально можливого. Умови (8) – (9) очевидні.

Сформульована задача не є типовою задачею ЛП (лінійного програмування), оскільки доданок за перевищення ліміту електроенергії може бути відсутнім. Для її розв'язання можуть бути задіяні евристичні алгоритми, які дозволяють за прийнятний час встановити прийнятний розв'язок.

### Висновки

Реалізація розробленої математичної моделі задачі оптимізації плану видобутку вугілля на всіх лавах шахти за певний період дозволить удосконалити систему оперативного диспетчерського керування, за допомогою якої особа, яка приймає рішення, швидко і без залучення інших експертів розраховуватиме планові показники по шахті з урахуванням наявних виробничих потужностей, енергетичних навантажень і технологічних вимог щодо вугілля, яке видобувається і відвантажується або на сховища, або безпосередньо до споживачів.

### Список літератури

1. Математична модель розвитку вугільної промисловості України в умовах міжнародної конкуренції // Проблеми загальної енергетики. – 2014. – Вип. 1 (36). – С. 24 – 32
2. Ордин А. А. К вопросу об оптимизации длины и производительности комплексно-механизированного очистного забоя угольной шахты / А. А. Ордин, А. А. Метельков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. РАН. Сибирское отделение. – 2003. – № 2. – С. 100 – 112
3. Вагонова А.Г. Оптимізація витрат на спорудження підготовчих виробок вугільних шахт / А.Г. Вагонова, Т.А. Ерохина, О.О. Шашенко // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 3. – С. 21 – 25

4. Максимова І.І. Економіко-математична модель формування собівартості видобутку запасів гірничодобувного підприємства / І.І. Максимова // Глобальні та національні проблеми економіки. Миколаївський національний університет імені В.О. Сухомлинського. – 2014. – Вип. 2. – С. 1334 – 1338
5. Валуев А.М. О моделях методах оптимизации в задачах управления процессами горного производства/ А.М. Валуев // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. – Москва 16-19 июня 2014 г. – С. 4264 – 4275
6. Новицкий И.В., Малиенко А.В. Принципы построения математической модели системы оперативно диспетчерского управления угольных шахт / И.В. Новицкий, А.В. Малиенко // Материалы XII-ї міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми використання інформаційних технологій в сфері освіти, науки і промисловості" (Дніпропетровськ, 23-24 листопада 2016г.) – Д.: НГУ. – 2016. – С. 51 – 54
7. Малієнко А.В. Принципи побудови імітаційної моделі визначення ємності накопичувальних бункерів транспортної системи при оперативно диспетчерському управлінні вугільних шахт/ А.В. Малієнко// Материалы XIII міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми використання інформаційних технологій в сфері освіти, науки і промисловості" (Дніпро, 23-24 листопада 2017г.) – Д.: НГУ. – 2017. - С. 113-115.
8. Малиенко А.В. Моделирование оценки надежности системы технического обслуживания оборудования угольных шахт. / А.В. Малієнко // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук. техн. зб. – 2011.– Вип. 86. – С. 96 – 99

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф Мещеряковим Л.І.*

УДК 681.5.033.2

**О.І Швачка, Г.І. Манко, канд-ти техн. наук,**

*(Україна, Дніпро, ДВНЗ "Український державний хіміко-технологічний університет")*

#### **РОЗВИТОК МЕТОДІВ НАЛАТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА З ДОДАТКОВОЮ ДІЄЮ ДИФЕРЕНЦІАТОРУ**

***Анотація.** Розглянуто структуру пропорційного - інтегрально - диференціального регулятора з додатковим впливом диференціатора за пропорційною і диференціальною складовими для управління істотно інерційними об'єктами в умовах дії неконтрольованих збурень досить великої величини і режимах експлуатації близьким до критичних. Запропоновано підхід до розрахунку параметрів регулятора, що поєднує в собі принципи ітеративної настройки за показниками якості та експериментально-статистичні методи аналізу при варіюванні динамічних характеристик об'єкта. На підставі модельного експерименту експлуатації автоматичної системи з класичним ПІД-регулятором налаштованими інструментальними засобами і регуляторів з додатковим впливом диференціатора налаштованих експериментально-статистичним методом показано, що в другому випадку більш ефективна настройка при відпрацюванні збурень і встановленні параметрів процесу.*

***Ключові слова:** ПІД-регулятор, диференціатор, настройка, рівняння регресії, коефіцієнт кореляція, статистика, якість.*

***Аннотация.** Рассмотрена структура пропорционально – интегрально – дифференциального регулятора с дополнительным воздействием дифференциатора по пропорциональной и дифференциальной составляющим для управления существенно инерционными объектами в условиях действия неконтролируемых возмущений достаточно большой величины и режимах эксплуатации близким к критическим. Предложен подход к расчету настроек регулятора, объединяющий в себе принципы итеративной настройки по показателям качества и экспериментально-статистические методы анализа при варьировании динамических характеристик объекта. На основании модельного эксперимента эксплуатации автоматической системы с классическим ПИД-регулятором настроенными инструментальными средствами и регуляторов с дополнительным воздействием дифференциатора настроенных экспериментально-статистическим методом показано, что во втором случае более эффективная настройка при отработке возмущений и установлении параметров процесса.*

***Ключевые слова:** ПИД-регулятор, дифференциатора, настройка, уравнение регрессии, коэффициент корреляции, статистика, качество.*

***Abstract.** The structure is considered in proportion to the integral - differential controller with the additional influence of the differentiator on the proportional and differential components to control substantially in-*