

УДК 622.05.02

Мерзлікін А.В.

Донецький національний технічний університет (м. Покровськ)

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ СТІЙКОЇ РОБОТИ ОЧИСНИХ ВИБОЇВ

Проведено аналіз та побудовано фазові портрети процесу видобутку з лави на різних етапах часу. Визначено, що перехід від сталого режиму роботи в нестійкий відбувається поступово. Обґрунтовано стійкий режим вуглевидобутку з очисного вибою у вигляді автоколивань із періодом 6–12 діб, при цьому варіація коливань видобутку не перевищує 30%. Розроблено методуку, яка дозволяє на ранніх стадіях визначити нестійкість динамічної системи, якою є довгий очисний вибій вугільної шахти.

Ключові слова: ризики вуглевидобутку, фазові траєкторії, стійка робота, керований режим роботи.

Постановка проблеми. Розвиток вугільної галузі України стикається зі серйозними складними проектними ризиками вуглевидобутку. Причина цих ризиків полягає в тому, що практично всі поклади кам'яного вугілля нашої держави видобувається підземним способом на значних глибинах. Це зумовлює підвищені ризики, пов'язані з геологічною невизначеністю родовищ, високим рівнем небезпеки підземних робіт, аварій і катастроф, обмеженістю підземного робочого простору і підвищеним рівнем гірського тиску, що знижує мобільність техніки та надійність її експлуатації.

Високий рівень проектних ризиків вуглевидобутку зумовлений також невизначеністю зазначених факторів. Незважаючи на те, що навантаження на лаву планується як постійна величина, яка визначається параметрами вугільного пласта, продуктивністю виїмкової техніки та значним газовиділенням, фактичний видобуток з очисних вибоїв варіює в широких межах. Вважається, що коефіцієнт варіації видобутку з лави може сягати показника 50% і більше. Однак якщо забезпечується стійкий середній рівень заданого планового навантаження на лаву, така варіація не є критичною. У зв'язку з цим введено поняття стійкості і керованості роботою очисного вибою [1; 2].

Враховуючи високу невизначеність факторів, що впливають на рівень видобутку з лав і його варіабельності, останнім часом розвивається новий науковий напрям управління вуглевидобутком як стохастичною системою [3; 4]. При цьому темпи основних і допоміжних процесів вуглевидобутку розглядаються як випадкові величини розподілу, які використовуються як вхідні дані для мережевої моделі, а дослідження роботи вугледобувних вибоїв виконується шляхом статистичних випробувань методом Монте-Карло.

Разом із тим стохастичний стан системи може бути досягнуто і в процесі переходу динамічної системи з детермінованою поведінкою в нестійкий стан хаосу [5–8]. Тому дослідження переходів динамічних систем в некерований або хаотичний стан дає змогу отримати нові можливості, особливо перспективні з точки зору прогнозування нестійких станів із метою їх завчасного подолання.

Застосування комбінації методів дослідження якісної поведінки динамічних систем і емпіричних методів дає змогу отримати нові перспективні результати [9–11]. У цій статті описана реалізація такого підходу щодо дослідження стійкості роботи очисного вибою як динамічної системи зі стохастичними параметрами.

Постановка завдання. Довгий очисний вибій є дуже складною системою, поведінка якої регулюється як внутрішніми факторами, так і зовнішніми. Доведено, що оптимальне навантаження на лаву залежить від таких внутрішніх факторів, як довжина лави, тип обладнання, що застосовується, потужність очисного комбайна, швидкість пересування секцій механізованого кріплення, продуктивність конвєсера, надійність вибійного обладнання, організації робіт у лаві. Разом із тим на реальну величину видобутку вугілля істотно впливає низка зовнішніх факторів, перш за все, геологічні умови відпрацювання вугільного пласта, наприклад наявність малоамплітудних порушень, стійкість безпосередньої основний покривель, надмірне газовиділення з пласта і порід, що його містять, надійність транспортного ланцюжка, електропостачання, дотримання безпеки робіт, стан підготовчих виробок та ряд інших чинників.

Невизначеність зазначених факторів породжує високий рівень ризиків вуглевидобутку, управлінням якими не є тривіальним завданням [3; 4].

Незважаючи на дуже велику кількість факторів, що впливають, поведінка очисного вибою як динамічної системи може бути в першому наближенні описана системою диференціальних рівнянь. У багатьох випадках вдається використовувати систему, в якій час t не входить у праву частину в явному вигляді, причому часто для опису поведінки складної динамічної системи досить обмежитися системою з двох рівнянь.

З урахуванням вищенаведеного уявімо динаміку роботи довгого очисного вибою в загальному вигляді системою з двох диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= f_1(x_1, x_2), \\ \frac{dx_2}{dt} &= f_2(x_1, x_2) \end{aligned} \quad (1)$$

Відсутність часу в правій частині системи рівнянь означає, що поведінка системи в часі визначається параметрами самої системи. Це добре узгоджується з результатами попередніх досліджень, в яких встановлено, що динаміка видобутку з лави описується випадковою стаціонарною функцією [3]. Будемо вважати, що праві частини системи $f_1(x_1, x_2)$ та $f_2(x_1, x_2)$ безперервно диференціюються в області, яка визначає можливі діапазони значень аргументів, тобто справедлива теорема існування і єдності рішення цієї динамічної системи. Уявімо ці рішення у вигляді таких функцій:

$$x_1 = \varphi_1(t), x_2 = \varphi_2(t), \quad (2)$$

Зафіксувавши t на різних рівнях, можна отримати кілька кривих (або фазових траєкторій) на площині в координатах x_1, x_2 .

Таким чином отримують так званий фазовий портрет динамічної системи, за допомогою якого можна пояснювати і, головне, прогнозувати поведінку системи з досить високою вірогідністю, не заглиблюючись у численні деталі і тонкощі процесів, які відбуваються в цій системі.

Є певні вимоги до фазових траєкторій динамічної системи. Зокрема, дві фазових траєкторії не мають спільних точок, або мають повністю збігатися в іншому випадку. Крім того, фазова траєкторія, що відрізняється від точки, є гладкою кривою, до якої в будь-якій точці існує дотична. Будь-яка фазова крива належить до одного з трьох типів – гладка крива без самоперетинів, замкнута гладка крива (цикл), точка. Якщо фазова крива, що відповідає рішенню (2), є гладкою замкнутою кривою, то це рішення – періодична функція.

Зазвичай дослідження складної динамічної системи починають із того, що підбирають систему диференціальних рівнянь типу (1), яка, на думку дослідників, задовільно описує поведінку

системи, яка досліджується. Як правило, при цьому спираються на евристичні передумови і логічні міркування. Разом із тим складні системи можуть приховувати безліч характеристик, які не можуть бути виведені апіорі за допомогою логічних міркувань. У такому разі кращим є підхід, в якому математична модель системи будується на основі представницького числа експериментальних даних, отриманих у процесі спостережень за поведінкою системи.

При такому підході, з одного боку, збільшується гарантія того, що система диференціальних рівнянь буде встановлена з більш високою надійністю, а з іншого – можуть виникнути складнощі відокремлення детермінованих параметрів системи від випадкових впливів зовнішніх факторів. Разом із тим, якщо це завдання вдається вирішити, з'являється додаткова можливість дослідження поведінки динамічної системи в умовах перешкод і випадкових флуктуацій факторів, що впливають на цю систему.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для ілюстрації підходу був досліджений часовий ряд темпів видобутку з очисного вибою (рис. 1). Нормативний рівень видобутку вугілля з цієї лави становив 2020 т/добу, хоча фактичний, як видно з тимчасового ряду, був помітно нижчим.

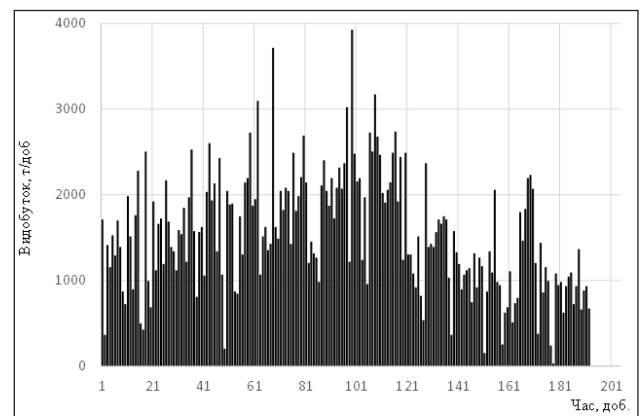


Рис. 1. Реалізація добового видобутку з очисного вибою протягом 190 діб

Робота лави ускладнювалася впливом кількох зовнішніх факторів і, перш за все, наявністю малоамплітудних порушень, які створювали істотні перешкоди виконанню планових завдань. Можна зробити припущення, що часовий ряд містить приховану періодичність. Якщо це так, його можна вважати результатом функціонування динамічної системи, структуру якої треба встановити. Спектральний аналіз свідчить про наявність гармоніки з високими значеннями коефіцієнтів і періодом 4,04 діб.

Згідно із запропонованою вище методикою будемо шукати приховану структуру системи виключно на базі її експериментального стохастичного сигналу, графік якого наведено на рис. 1. Для цього використовуємо широко поширений прийом зіставлення вихідного сигналу і його похідної за часом.

На рис. 2 показана графічна залежність обраних факторів. Незважаючи на зашумленість даних, досить добре проглядаються фрагменти траєкторій, які нагадують похилі еліпси.

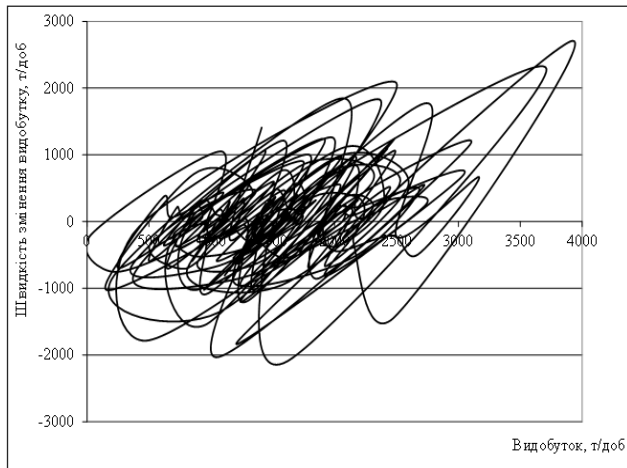


Рис. 2. Фазовий портрет очисного вибою як динамічної системи

Для контролю були обрані фрагменти багатого на перешкоди тимчасового ряду на різних інтервалах часу для того, щоб хаотичність траєкторій не заважала розгляду окремих періодичних циклів (рис. 3). Фрагмент (а) явно демонструє еліпсоїдні фазові траєкторії, які, незважаючи на взаємні перетини, досить наочно описують періодичний процес. Напрямок векторів траєкторій вказано стрілкою (за годинниковою стрілкою на графіку). Перетин траєкторій зумовлено природною варіацією експериментальних даних під дією випадкових впливів безлічі чинників, які були перераховані вище. На рис. 4 наведено відрізок тимчасового ряду, за яким побудовані зазначені траєкторії. Цей графік підтверджує періодичність процесу вуглевидобутку з лави, а період, що дорівнює 4 добам, добре узгоджується з даними спектрального аналізу. Видно також, що швидкість зміни темпів видобутку дещо відстає від самих темпів.

Такий характер взаємозв'язку добре описується моделлю Вольтерри-Лотки для конкуруючих процесів:

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dt} &= A(\alpha_1 - \beta_1 V) \\ \frac{dV}{dt} &= -V(\alpha_2 - \beta_2 A), \end{aligned} \quad (3)$$

де A – темпи видобутку, т/доб,
 V – швидкість зміння темпів, т/доб,

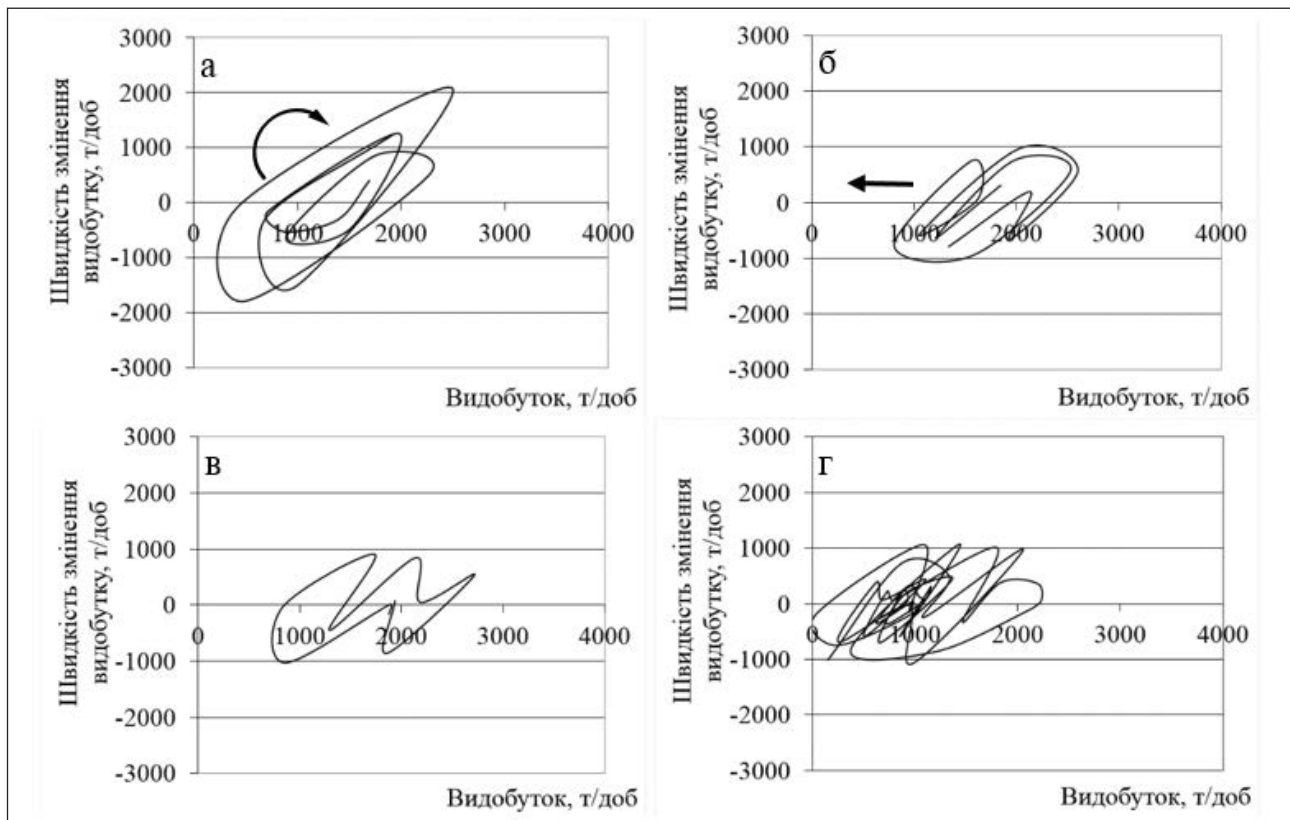


Рис. 3. Фрагменти фазового портрету процесу видобутку з лави на різних етапах часу

α, β – параметри диференціальних рівнянь.

Рішення системи має вигляд рівняння гармонічного осцилятора з періодом

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\alpha_1\alpha_2}}$$

На наступних фрагментах рис. 3 показано, як руйнується фазовий портрет динамічної системи, що досліджується, а її самоорганізована поведінка перетворюється на хаотичну.

На першому етапі відбувається дрейф траєкторій вліво, тобто в сторону зменшення темпів видобутку (б). Взагалі спостерігаються скачки як вліво, так і вправо, але загалом можна визначити стійкий дрейф у бік менших величин видобутку. Після цього виникає деформація еліпсової траєкторії (в). Це означає, що зникають явні ознаки періодичності процесу. На останньому етапі фазовий портрет стає невиразним, втрачає будь-яку структуру і нагадує хаос (г). Незважаючи на рідкісні викиди в сторону високих темпів видобутку, процес вуглевидобутку стає некерованим, нестійким, що призводить до хронічного невиконання планових завдань.

Виконані дослідження дають змогу запропонувати методику, яка дає змогу на ранніх стадіях визначити нестійкість динамічної системи, якою є довгий очисний вибій вугільної шахти. Як інструмент для оцінки стійкої роботи очисного вибою доцільно використовувати фазові портрети вуглевидобутку в координатах «добові темпи видобутку – швидкість її зміни», який представлений гладкою замкнутою кривою і має форму еліпса.

Реальні фазові траєкторії перетинаються, що викликано природною флуктуацією параметрів динамічної системи, яка залежить від великої кількості внутрішніх і зовнішніх факторів. Чим сильнішою є варіація положення еліпса, тим більшим є вплив випадкових процесів на функціонування очисного вибою як динамічної системи.

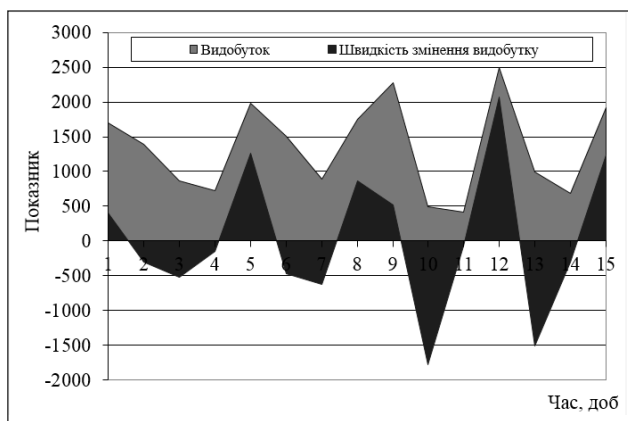


Рис. 4. Відрізок тимчасового ряду

Втрата стійкості роботи очисного вибою протікає в кілька етапів, першим з яких є дрейф траєкторії еліпса вліво в бік меншого видобутку. Під впливом стохастичних факторів швидкість дрейфу не є постійною. Крім того, можливі короточасні повернення вправо. На другому етапі відбувається спотворення еліпсової форми фазової траєкторії, що свідчить про втрату періодичності процесу. На останньому, третьому етапі фазові траєкторії стають повністю хаотичними, що є ознакою переходу до некерованого режиму роботи лави.

Аналіз показує, що здебільшого ознаки втрати стійкості роботи очисного вибою з'являються задовго до повної втрати стійкості. Згідно з досвідом, із моменту виникнення першої ознаки до повної втрати стійкості роботи очисного вибою проходить від 6 до 12 діб [12]. Протягом цього часу можна ідентифікувати загрозу втрати стійкості і розробити оперативні заходи з відновлення керованості лави.

Як приклад наводиться досвід коригування фазової траєкторії очисного вибою, за допомогою якого визначається величина впливів випадкових факторів на роботу очисного вибою. Нижче наведено приклад коригування фазової траєкторії, зображеної на фрагменті (в) рис. 3. Нагадаємо, що на ній зображено процес спотворення еліпсової форми траєкторії, що відповідає втраті періодичності видобутку і відбувається на другій стадії переходу від стійкої до нестійкої роботи очисного вибою.

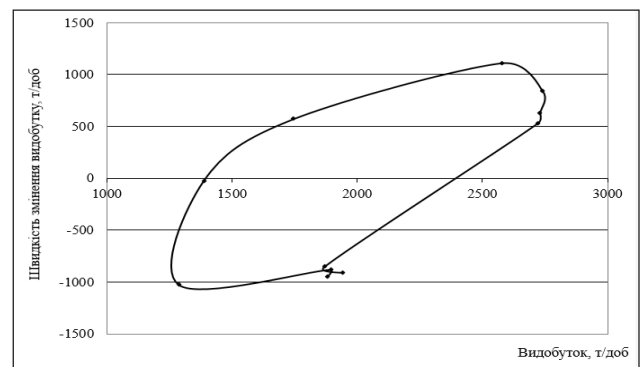


Рис. 5. Реконструкція фазової траєкторії

Для коригування еліпса є надійні вихідні дані, які взяті з практики роботи лави. По-перше, центр еліпса має знаходитися на осі абсцис у точці $A = 2020$ т/добу, оскільки це відповідає плановому навантаженню на лаву. По-друге, ліва і права межа еліпса має перетинати вісь абсцис у точках, які відповідають таким величинам видобутку, при яких забезпечується допустимий коефіцієнт її варіації (наприклад у межах

30%). По-третє, нахил головної осі еліпса має відповідати експериментально встановленим. Для знаходження величини нахилу головної осі еліпсу параметри окремих еліпсів були зібрані в загальну статистичну вибірку й оброблені. Виявилось, що, незважаючи на хаотичність і різний розмір еліпсів, нахил їх головних осей досить стабільний. Величина тангенса кута нахилу розподілена згідно з логнормальним законом, а його середня величина становить $1,56 \pm 0,48$. При цьому коефіцієнт варіації дорівнює 31%, що в практиці вуглевидобутку вважається цілком допустимою похибкою.

Оскільки точки на графіку рис. 3 (б) пов'язані з точками на графіку 5, відбувається автоматична корекція видобутку під час корекції еліпсової фазової траєкторії. На рис. 6 показаний графік фактичного видобутку, суміщений із його скорегованими рівнем. Після коригування видно відхилення видобутку від планового, що викликано негативним впливом зовнішніх факторів. У момент часу, який відповідає фрагменту тимчасового ряду на рис. 6, лава переходила малоамплітудні порушення, яке і додало основної ваги в зниження темпів вуглевидобутку.

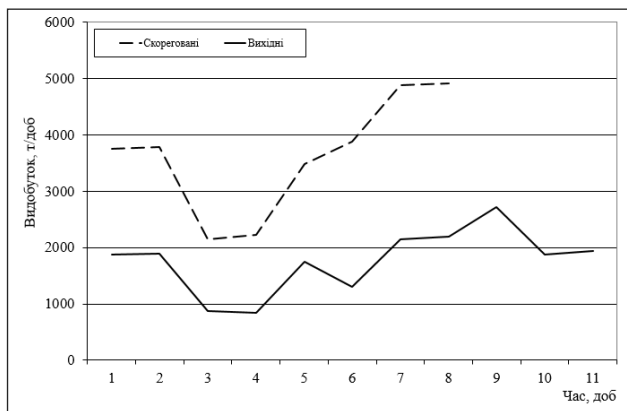


Рис. 6. Скореговані темпи видобутку

Таким чином, отримані відхилення від планового завдання, а також відомі причини, що викликали зазначені відхилення. Ця інформація є дуже цінною для управління роботою лави і розробки оперативних заходів із виведення очисного вибою в стійкий керований режим.

Отримані результати є перспективною базою для розробки методики управління роботою очисного вибою з метою зниження ризиків невиконання планового завдання вуглевидобутку. Надійність такої методики буде вищою, ніж методів, заснованих на дослідженні рішень диференціальних рівнянь зі стохастичними параметрами, оскільки в основі модифікованої методики лежить постійний моніторинг поточних фактичних даних роботи очисного вибою. Як теоретична основа використовуються лише базові поняття та підходи, що застосовуються при дослідженнях динамічних систем.

Висновки. Обґрунтовано нову методику прогнозу стійкості роботи очисного вибою як динамічної системи. Методика заснована на аналізі форми і параметрів фазових траєкторій системи в координатах «темпи видобутку – швидкість зміни темпів».

Показано, що динаміка роботи очисного вибою може бути описана системою рівнянь Вольтерри-Лотки, що відображає взаємодію конкуруючих процесів. Оскільки рішенням такої системи є гармонійний осцилятор, обґрунтований стійкий режим вуглевидобутку з очисного вибою у вигляді автоколивань із періодом 4–5 діб. При цьому варіація коливань видобутку не перевищує 30%, а фазовий портрет системи в координатах «темпи видобутку – швидкість їх зміни» являє собою еліпс, тангенс кута нахилу головної осі якого досить стабільний і становить $1,56 \pm 0,48$.

За результатами дослідження можна зробити висновок, що перехід від сталого режиму роботи в нестійкий відбувається в три етапи. На першому етапі спостерігається дрейф еліпсної траєкторії вуглевидобутку в сторону менших величин, потім відбувається поступове зміння форми еліпсу, і на завершальному етапі траєкторія набуває хаотичного вигляду, що, своєю чергою, наочно показує момент переходу роботи очисного вибою як динамічної системи, з керованого в некерований стан.

Запропоновано методику управління ризиками вуглевидобутку шляхом своєчасного прогнозу втрати стійкості роботи очисного вибою на основі корекції форми фазової траєкторії динамічної системи.

Список літератури:

1. Федоров В.Н. К вопросу технического регулирования производственных процессов современной шахты. Уголь. 2010. № 2. С. 49–51.
2. Федоров В.Н. Обеспечение ритмичной работы очистных забоев – главное условие роста эффективности. Уголь. 2009. № 1. С. 70–73.
3. Маевский В.С., Захарова Л.Н., В.С. Мерзликин Стохастическое моделирование рисков невыполнения программы развития горных работ на угольной шахте. Наукові праці ДонНТУ. Серія Проблеми моделювання і автоматизації проектування. 2011. Вип. 10(197). С. 101–110.

4. Захарова Л.Н., Назимко В.В. Исследование чувствительности программы развития горных работ и ее рисков в условиях угольной шахты. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2012. № 1 (53). С. 157–164.
5. Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах. М.: Наука, 1968. 416 с.
6. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, 1987. 424 с.
7. Кузнецов С.П. Динамический хаос. М.: Физматлит, 2001. 296 с.
8. Шильников В.П. Методы качественной теории в нелинейной динамике. Часть 1. Москва. Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2004. 416 с.
9. Безручко Б.П., Смирнов Д.А. Математическое моделирование и хаотические временные ряды. Саратов: Колледж. 2005. 344 с.
10. Smirnov D.A. Detection of weak directional coupling. *Phys. Rev. E*. 2005. Vol. 71. 037207.
11. Bezruchko V.P. Reconstruction of time-delayed feedback systems from time series. *Physica D*. 2005. Vol. 203. P. 209–223.
12. Ильяшов М.А., Назимко В.В. Мерзлякин А.В. Оценка устойчивости работы очистных забоев по параметрам распределения добычи. Материалы международной научно-практической конференции г. Днепропетровск, НГУ, 2011. С. 52–63.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЕВ

Проведен анализ, и построены фазовые портреты процесса добычи из лавы на разных этапах времени. Определено, что переход от устойчивого режима работы к неустойчивому происходит постепенно. Обоснован устойчивый режим угледобычи из очистного забоя в виде автоколебаний с периодом 6–12 дней, при этом вариация колебаний добычи не превышает 30%. Разработана методика, которая позволяет на ранних стадиях определить неустойчивость динамической системы.

Ключевые слова: *риски угледобычи, фазовые траектории, устойчивая работа, управляемый режим работы.*

DYNAMIC MODEL FOR PREDICTING SUSTAINABLE WORK OF LONGWALLS

The analysis and phase portraits of the extraction process from longwall at different stages of time have been made. It is determined that the transition from a stable mode of work to an unstable one occurs gradually. The steady mode of coal mining from a longwall in the form of self-oscillations with the period of 6–12 days is proved, wherein the variation of excovation oscillations does not exceed 30%. A technique has been developed that allows for the early stages to determine the instability of the dynamic system.

Key words: *coal mining risks, phase trajectories, stable operation, controlled operating mode.*