

УДК 622.73:621.926.5

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2026-1-22>

Ігор НОВИЦЬКИЙ

доктор технічних наук, професор, професор кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005

ORCID: 0000-0002-8780-6589

Scopus Author ID: 59312716800

Юлія ШЕВЧЕНКО

асистент кафедри системного аналізу та управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005

ORCID: 0000-0002-3895-3937

Scopus Author ID: 59312616400

Бібліографічний опис статті: Новицький, І., Шевченко, Ю. (2026). Взаємопов'язане моделювання електромеханічних процесів та динаміки завантаження млинів самоподрібнення руд. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2026-1-22>

ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ДИНАМІКИ ЗАВАНТАЖЕННЯ МЛИНІВ САМОПОДРІБНЕННЯ РУД

Метою цієї роботи є дослідження впливу коливань завантаження млина на характеристики споживаної потужності двигуна для розробки непрямих методів контролю ступеня заповнення барабана рудою в режимі реального часу.

Методологія передбачає використання методів класичної механіки та динаміки суцільних середовищ, а також методів теорії автоматичного керування та математичного аналізу з використанням середовищ імітаційного моделювання.

Наукова новизна полягає у тому, що запропонована математична модель враховую нелінійні коливання завантаження у барабані млина, що дозволяє більш точно моделювати і досліджувати перехідні процеси.

Висновки. В результаті проведеного дослідження було виявлено що навантаження у барабані, що обертається, являє собою нелінійну систему з параметричним збудженням коливань. При цьому електромеханічна система приводу, що включає в собі внутрішньомлинне навантаження як складовий елемент, може бути представлена двочастотною моделлю, що дозволяє досліджувати низькочастотні коливання в системі приводу, що збуджуються навантаженням.

Практична значимість. Описаний підхід дозволяє аналізувати різні аспекти поведінки системи «синхронний двигун – млин з навантаженням» і може бути використаний при розробці способів управління миттєвою швидкістю обертання барабана млина для покращення процесу подрібнення руди.

Ключові слова: млин самоподрібнення, математична модель, внутрішньомлинове завантаження, електропривод, момент опору, динаміка завантаження, Simulink, енергоефективність.

Igor NOVYTSKYI

Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Cyberphysical and Information-measuring systems, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave, Dnipro, Ukraine, 49005, novytskyi.i.v@nmu.one

ORCID: 0000-0002-8780-6589

Scopus Author ID: 59312716800

Yuliia SHEVCHENKO

Assistant Lecturer at the Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave, Dnipro, Ukraine, 49005, shevchenko.yu.o@nmu.one

ORCID: 0000-0002-3895-3937

Scopus Author ID: 59312616400

To cite this article: Novytskyi, I., Shevchenko, Y. (2026). Vzaiemopoviazane modeliuвання elektromekhanichnykh protsesiv ta dynamiky zavantazhennia mlyniv samopodribnennia rud [Coupled modeling of electromechanical processes and charge dynamics in autogenous mills]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2026-1-22>

COUPLED MODELING OF ELECTROMECHANICAL PROCESSES AND CHARGE DYNAMICS IN AUTOGENOUS MILLS

The main goal of this work is to study the influence of mill loading fluctuations on the characteristics of engine power consumption in order to develop indirect methods for monitoring the degree of drum filling with ore in real time.

The methodology is based on the application of classical mechanics and continuum mechanics, alongside control theory and mathematical analysis, utilizing simulation modeling environments.

The scientific novelty of this work lies in the proposed mathematical model, which accounts for the non-linear oscillations of the mill load. This approach enables more precise modeling and investigation of transient processes.

Conclusions. The study reveals that the load within the rotating drum acts as a non-linear system with parametrically excited oscillations. Furthermore, the electromechanical drive system, incorporating the in-mill charge as a core component, can be represented by a dual-frequency model. This approach enables the investigation of load-induced low-frequency oscillations within the drive system.

Practical significance. The described approach enables the analysis of various behavioral aspects of the 'synchronous motor – loaded mill' system. It can be utilized to develop control strategies for the drum's instantaneous rotational speed, ultimately optimizing the ore grinding process.

Key words: autogenous mill, mathematical modeling, in-mill charge dynamics, electric drive, resistance torque, Simulink, energy efficiency.

Актуальність проблеми. Підвищення енергоефективності процесів рудопідготовки є однією з найважливіших задач гірничо-збагачувальної галузі, оскільки стадія подрібнення споживає до 70% усієї електроенергії підприємства. Млини самоподрібнення є складними об'єктами керування, в яких технологічний процес руйнування руди тісно пов'язаний із динамічними процесами в електромеханічній системі привода.

Специфіка функціонування млинів самоподрібнення полягає у відсутності спеціальних подрібнювальних тіл (сталевих куль чи стержнів). Їх роль виконують великі шматки самої руди, що створює високий ступінь невизначеності параметрів об'єкта керування.

Тому вкрай необхідним для вирішення завдань оптимізації режимів роботи млинів є вивчення внутрішніх процесів, що відбуваються в барабані й безпосередньо пов'язані з руйнуванням руди, а також пошук

і обґрунтування таких технологічних параметрів (Новицький, 2017), які б глибше відображали сутність процесу подрібнення руди в барабані млина.

Мета дослідження полягає у розробці комплексної математичної моделі, яка враховує динаміку переміщення внутрішньомлинового завантаження та її взаємодію з електромеханічною системою привода барабанного млина.

Постановка проблеми. Математичне моделювання динаміки барабанного млина самоподрібнення є складним завданням, оскільки воно потребує опису взаємодії двох різних за природою систем, це механічної, як рух завантаження всередині барабана, та електротехнічної, як робота двигуна та перетворювача.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні науково-технічні задачі:

1. Створити та дослідити єдину математичну модель у системі «синхронний двигун – млин – завантаження».

2. Провести чисельне моделювання перехідних режимів моделі для визначення зон потенційної нестійкості роботи привода. Виявити умови виникнення резонансних коливань.

3. На основі аналізу отриманої моделі надати рекомендації що до розробки алгоритму адаптивного керування, який забезпечує стабілізацію технологічного режиму в точці мінімальних питомих витрат енергії, нівелюючи вплив нелінійних коливань завантаження на електромеханічну систему привода млина.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Аналіз існуючих публікацій показав, що попри глибоке вивчення механіки руху руди (Сокур, 2020), питання взаємодії динамічного завантаження з перехідними електромагнітними процесами привода залишається недостатньо висвітленим. Більшість авторів розглядають або суто механічні, або суто електричні процеси ізольовано. Так розвиток напряму "м'яких датчиків" у роботах (Wei, 2009; Harley, 2014) дозволив перейти від прямого вимірювання заповнення млина до оцінки стану завантаження через аналіз спектральних характеристик активної потужності двигуна та віброакустичних сигналів корпусу барабана.

Що до математичного опису процесів у млинах пройшов шлях від емпіричних моделей до складних чисельних симуляцій (Cleary, 2001). Інтеграція же цих процесів у динаміку електропривода найбільш повно відображена у працях (Новицький, 2017; Чорний, 2018), де млин розглядається як джерело інформативних сигналів про стан технологічного процесу.

Теоретичні засади саме енергоефективного функціонування млинів самоподрібнення закладені у праці (Новицький, 2017), де автор розкриває механізми взаємодії між технологічними показниками подрібнення та електричними параметрами привода.

Проте, подальшого розвитку потребує питання моделювання саме нелінійних коливань завантаження в перехідних режимах. Використання підходів у поєднанні з сучасними методами імітаційного моделювання дозволяє створити адекватну модель (Новицький, 2024) для задач енергоефективного керування процесом подрібнення руди в барабані млина.

Основний матеріал. Система "синхронний двигун – млин із навантаженням" (безредукторна схема) може бути наближено представлена у вигляді кількох зосереджених мас (моментів інерції), що пов'язані між собою пружним зв'язком та моментом тертя (рис. 1), який розуміється як процес обміну механічною енергією.

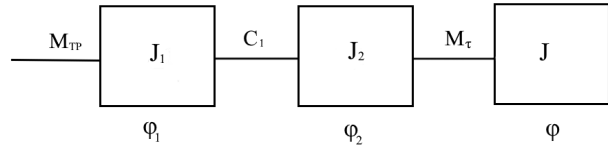


Рис. 1. Еквівалентна схема системи «привод – млин – навантаження»

На рисунку ротор синхронного двигуна позначено J_1 ; барабан млина – J_2 , який в системі розглядається як єдине ціле з частиною рудного навантаження; J – частина рудного навантаження (ядро), що здійснює коливальні рухи по внутрішній поверхні умовного барабана, утвореного матеріалом навантаження, що входить до J_2 .

Момент інерції мережі припускається рівним нескінченності.

Система "синхронний двигун – барабан – ядро" має три ступені вільності і може бути описана наступною системою диференціальних рівнянь другого порядку:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_1 + h_1 \cdot \dot{\varphi}_1 + c_1(\varphi_1 - \varphi_2) = M_d \\ J_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 + h_2 \cdot \dot{\varphi}_2 + c_1(\varphi_2 - \varphi_1) = -M_{тр} \\ J \cdot \ddot{\varphi} + h \cdot \dot{\varphi} = M_{тр} - M_{\tau} \end{cases} \quad (1)$$

де $\varphi_1, \varphi_2, \varphi$ – кути обертання мас відповідно ротора, барабана та ядра рудного навантаження; J_1, J_2, J – відповідні моменти інерції, зведені до вала двигуна; c_1 – жорсткість приводного валу двигуна млина (з урахуванням наявних пружних зчленувань); h_2, h_1, h – коефіцієнти, що враховують дисипативні втрати енергії в елементах; M_0 – електромагнітний момент двигуна; $M_{тр}$ – момент сил тертя між шарами матеріалу навантаження межі ядра; M_{τ} – момент від дії тангенціальних складових сил тяжкості ядра.

Момент сил тертя спокою навантаження на внутрішній поверхні барабана врівноважений реакцією футерування і рівняння не включений. Уточнимо, що є моменти, що входять у праві частини рівнянь системи.

З теорії електроприводу відомо, що рушійний момент синхронного двигуна має синхронну та асинхронну складові: $M_d = M + M_A$. причому синхронний момент M , у свою чергу, можна представити як суму статичної та динамічної складових:

$$M = M_0 + M_1,$$

де статична складова $M_0 = M + M(\varphi_0)$, φ_0 – відставання ротора від поля статора в режимі,

а динамічна складова має властивості механічного пружного зв'язку між електромагнітним полем збудженого ротора і обертовим полем статора:

$$M_1 = m_C \cdot \Delta\varphi,$$

де $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$ – відхилення кута відставання ротора φ від φ_0 у динамічному режимі, а віддалений момент m_C має сенс коефіцієнта жорсткості електромагнітного поля ($m_C = C_L$).

Повний вираз для синхронного моменту можна записати у вигляді:

$$M = M(\varphi_0) + \frac{dM}{d\varphi} \Big|_{\varphi=\varphi_0} \cdot \Delta\varphi = M(\varphi_0) + C_L \cdot \Delta\varphi. \quad (2)$$

Асинхронний момент M_A має властивості демпфера:

$$M_A = m_A \cdot S,$$

де m_A – питомий асинхронний момент, S – ковзання ротора щодо поля статора:

$$S = \frac{\Omega_C - \dot{\varphi}_1}{\Omega_C}; \quad \Omega_C = \frac{\omega_C}{p},$$

де $\dot{\varphi}_1$ – кутова швидкість ротора, p – число пар полюсів у двигуні; ω_C, Ω_C синхронні електрична та механічні швидкості ротора, причому $\dot{\varphi}_1 = \Omega_C + \frac{\dot{\varphi}}{p}$.

Тобто маємо

$$S = -\frac{\dot{\varphi}}{\omega_C}$$

Отже

$$M_A = -h_A \cdot \dot{\varphi},$$

де $h_A = m_A / \omega_C$ має сенс коефіцієнта демпфування.

Враховуючи вищевикладене, і переходячи в перших двох рівняннях (1) до неінерційної системи відліку, що обертається зі швидкістю: поля статора Ω_C (синхронна швидкість ротора), вводячи додаткову змінну β (що відраховується аналогічно змінній φ) описує коливання барабана млина, отримаємо наступну систему:

$$\begin{cases} J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + (h_1 + h_A \cdot p) \cdot \dot{\varphi} + (c_1 - c_L \cdot p) \cdot \varphi - c_1 \beta = p \cdot M(\varphi_0) - h_1 \omega_C + p c_L \varphi_0 \\ J_2 \cdot \ddot{\beta} + h_2 \cdot \dot{\beta} + c_1 (\beta - \varphi) = -p \cdot M_{TP} - h_2 \omega_C \\ J \cdot \ddot{\varphi} + f \cdot \dot{\varphi} = M_{TP} - M_\tau \end{cases} \quad (3)$$

Вирази для моментів сил тертя і тангенціальної складової сил тяжіння ядра, як і момент інерції J , містять коефіцієнти, залежні від розмірів ядра:

$$M_{TP} = f \cdot [m_H(\alpha) \cdot \dot{\varphi}^2 + m_N(\alpha) \cdot \cos\varphi], \quad M_\tau = m_\tau(\alpha) \cdot \sin\varphi, \\ J = J(\alpha),$$

де f – коефіцієнт тертя; α – центральний кут ядра у вигляді циліндричного сегмента; m_H, m_N, m_τ – відповідно коефіцієнт моменту сил тертя, який обумовлений дією інерційних (відцентрових) сил, момент сил тертя від дії нормальних (радіальних) складових сили тяжіння та момент від дії тангенціальних складових сили тяжіння.

У наближенні плоского тіла малих розмірів коефіцієнти m_H, m_N, m_τ набувають наступних значень:

$$m_H \approx J \approx m \cdot R^2 \\ m_N \approx m_\tau \approx mgR^2,$$

де m – маса ядра, g – прискорення вільного падіння, R – радіус кривизни траєкторії по якій двигается тіло, що моделює рух ядра.

Таким чином, система (3) буде мати вигляд:

$$\begin{cases} J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + (h_1 + h_A \cdot p) \cdot \dot{\varphi} + (c_1 - c_L \cdot p) \cdot \varphi - c_1 \beta = p \cdot M(\varphi_0) - h_1 \omega_C + p c_L \varphi_0 \\ J_2 \cdot \ddot{\beta} + h_2 \cdot \dot{\beta} + c_1 (\beta - \varphi) + f \cdot p \cdot [m_H \cdot \dot{\varphi}^2 + m_N \cdot \cos\varphi] = -h_2 \omega_C \\ J \cdot \ddot{\varphi} + f \cdot \dot{\varphi} \cdot m_H \cdot \dot{\varphi}^2 + h \cdot \dot{\varphi} + \sqrt{m_N^2 + m_\tau^2} \cdot \sin(\varphi - \varphi_0) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

де $\varphi_0 = \arctan\left(\frac{f \cdot m_N}{m_\tau}\right)$ – “середнє” значення ϑ , точніше угол відхилення при відсутності коливань ядра. Тобто $\frac{m_N}{m_\tau} \approx 1$.

Отримана система може бути перетворена до виду, придатного для обчислювального аналізу (завдання Коші), і вирішена одним із методів чисельного розв'язання систем звичайних диференціальних рівнянь.

Частина коефіцієнтів в системі постійних, що входять до рівнянь, наприклад $J, h_2, c_1, c_L, M(\varphi_0)$ відомі або визначаються досить точно розрахунковим шляхом, інші – такі як – J_2, J, m_H, m_N, m_τ – розраховуються приблизно або визначаються оціночною мірою, третіми іноді можна знехтувати (h_1, h_2), четверті взагалі невідомі (f, h) тим більше, якщо врахувати, що рівняння записані в ідеалізованій (спрощеній) формі та реальні коефіцієнти демпфування та тертя можуть самі залежати від швидкості, тобто. породжувати члени вищого порядку по $\dot{\varphi}$.

Більш того, залежність коефіцієнта тертя від швидкості є основним механізмом, відповідальним за генерацію коливань у системах, подібних до описуваної третім рівнянням в системі (4).

Проте роль джерела, що викликає генерацію незагасаючих коливань в системі можуть виконувати (і реально виконують) випадкові і регулярні (періодичні) обурення руху ядра навантаження. Відповідні члени можуть бути враховані у другому та третьому рівняннях системи як випадкова або регулярна складова в коефіцієнтах, що характеризують рух ядра – f, m, R .

Так, наприклад, при врахуванні не співвісності барабана в системі спостерігаються явища параметричного резонансу (Novytskyi et al., 2024). Крім цього, у реальних системах є й інші джерела періодичних обурень.

Невизначеність низки коефіцієнтів перешкоджає бути непереборною перешкодою якісного дослідження характеру рухів у системі у залежність від співвідношення між членами різної природи.

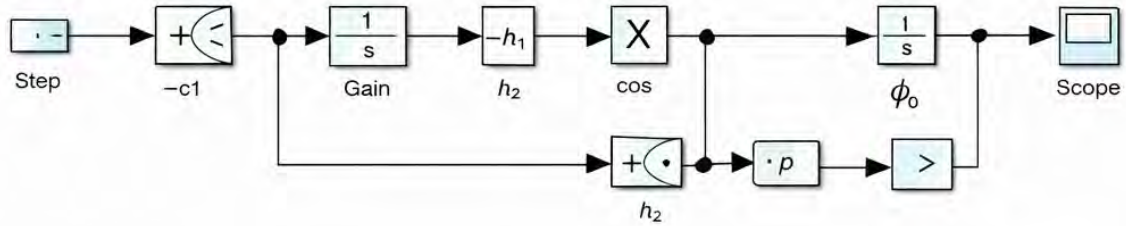


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі у Simulink

На завершення відзначимо найбільш загальні властивості, які властиві системі (4). Як показують розрахунки цієї моделі (рис. 2) – система є двочастотною.

Типовий вид результуючого коливання показаний на (рис. 3).

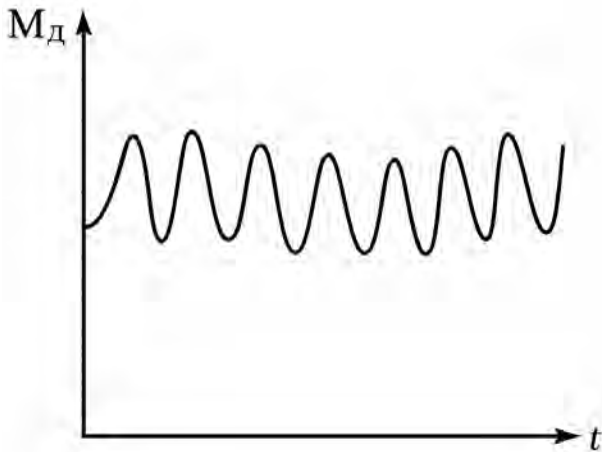


Рис. 3. Вид коливального процесу у системі

Як видно на рисунку 3 низька частота в спектрі коливань відповідає коливанням ядра рудного навантаження, а висока – власним коливанням валу. Значення частот та амплітуд коливань визначаються параметрами (коефіцієнтами) системи.

При певних співвідношеннях параметрів коливання можуть не виникати зовсім (за відсутності "зовнішнього" збудження) або набувати резонансного характеру. При внесенні випадкових збурень як білого шуму система «відфільтровує» коливання у своїх частотах. Для розрахунку амплітуд коливань необхідний більш точний облік нелінійностей і коефіцієнтів демпфування системи.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Отже, отримана система (4) вигідно відрізняється від відомих за літературою (Сокур, 2016) моделей наявністю

конкретизації складових моменту сил тертя і точнішим обліком інших членів рівнянь, тому дає більш адекватний опис основних фізичних процесів в барабані млина.

Крім того моделювання взаємодії завантаження та привода дозволяє перейти від "статичного" розуміння роботи млина до динамічного керування, де швидкість обертання адаптується до поточного стану руди всередині барабана.

Таким чином, описаний підхід дозволяє аналізувати різні аспекти поведінки системи «синхронний двигун – млин із навантаженням» і може бути використаний при розробці способів управління миттєвою швидкістю обертання барабана млина.

Крім цього розробка моделі дозволить оптимізувати енергоспоживання у роботі млина і захистити обладнання в критичних резонансних режимах при своєчасній діагностиці стану.

В подальшому планується розробка та дослідження інтелектуальної системи моніторингу (Коряшкіна, 2025), яка дозволяє знизити ризик аварійних зупинок при роботі млина сомопідбилення руд.

В результаті проведеного дослідження було виявлено:

- Електромеханічна система привода, що включає внутрішньомлинне навантаження як складовий елемент, може бути представлена двочастотною моделлю, що дозволяє досліджувати низькочастотні коливання в системі привода, що збуджуються навантаженням.

- Збільшення роботи сил тертя, викликане коливаннями центральної частини навантаження при роботі млина прямопропорційно квадрату амплітуди її коливань.

- Внутрішньомлинне навантаження в барабані, що обертається, є нелінійною системою з параметричним збудженням коливань.

- Наявність коливальних режимів, що супроводжують процес взаємного прослизання внутрішніх шарів рудного навантаження, призводить до активізації стирання руди та підвищення ефективності подрібнення всередині барабану.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Новицький І. В. Ус С. А. Сучасна теорія керування. Навчальний посібник. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2017. 263 с. ISBN: 978-966-350-661-6.
2. Сокур В. І., Білецький В. С., Відмідь І. О., Робота Є. М. Підготовка руд: дроблення, подрібнення, класифікація. Монографія. Кременчук: Щербатих О. В., 2020. 494 с. ISBN: 978-617-639-272-9.
3. Wei D., Craig I. K. Grinding mill circuit control. A review. *Control Engineering Practice*, 2009. No. 17(10). P. 1117–1128. doi: 10.1016/j.conengprac.2009.04.010
4. Hapley R. Virtual sensing and its application in mineral processing [J. Academic Press, 2014.
5. Cleary P. W. Charge behaviour and power consumption in variable speed mills. *Minerals Engineering*, 2001. No. 14(12), P. 1529–1544. doi: 10.1016/S0892-6875(01)00168-9
6. Новицький, І. В. Енергоєфективне керування режимами роботи млинів самоподрібнення. Монографія. Дніпропетровськ : Видавець ФОП Чернявський Д. О., 2017.
7. Чорний О. П., Луговой А. В., Родькін Д. Й., Сисюк Г. Ю., Садовой О. В. Моделювання електромеханічних систем. Навчальний посібник. Кременчук, 2001. 410 с.
8. Новицький І., Шевченко Ю., Трипутень М. Адаптивна система управління процесом самоподрібнення руд у барабанних млинах. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2024, № 4, С. 151–158, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-4-18>
9. Novytskyi I., Shevchenko Y. Обґрунтування критерія оптимального керування процесом самоподрібнення руд у барабанних млинах. [Justification of the criterion for optimal control of the self-grinding process of ores in drum mills]. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2024. No 4. P. 61-66. doi: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-4/061>
10. Сокур М. І. Білецький В. С. Шепета В. В. Автоматизація процесів подрібнення руд у млинах самоподрібнення. Монографія. Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2016. 156 с.
11. Коряшкіна, Л., Малієнко, А., Станіна, О., Шевченко, Ю., Кодола, Я. Системний аналіз та оптимальний вибір комплексу заходів для підвищення безпеки на підприємстві. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2025. С. 72–80, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2025-2-7>

REFERENCES:

1. Novytskyi, I., & Us, S. (2017). Modern theory of healing: textbook for universities. National Mining University. ISBN 978-966-350-661-6.
2. Sokur, M. I., Biletskyi, V. S., Vidmid, I. O., & Robota, E. M. (2020). Ore preparation (crushing, grinding, classification): *monograph*. ISBN 9786176392729
3. Wei, D., & Craig, I. K. (2009). Grinding mill circuit control: A review. *Control Engineering Practice*, 17(10), 1117–1128. doi: 10.1016/j.conengprac.2009.04.010
4. Hapley R. (2014). Virtual sensing and its application in mineral processing. Academic Press.
5. Cleary, P. W. (2001). Charge behaviour and power consumption in variable speed mills. *Minerals Engineering*, 14(12), 1529–1544. doi 10.1016/S0892-6875(01)00168-9
6. Novytskyi, I. V. (2017). Enerhoefektyvne keruvannia rezhymamy roboty mlyniv samopodribnennia [Energy-efficient control of operation modes of self-grinding mills: Monograph]. Kryvyi Rih: Publisher FOP Cherniavskiyi D. O.
7. Chorny, O. P. (2001). Modeliuvannia elektromekhanichnykh system: navchalnyi posibnyk [Modeling of electromechanical systems: a study guide]. Kremenchuk: KDPU.
8. Novytskyi, I., Shevchenko, Yu., Tryputen, M. (2024). Adaptivna sistema upravlinnia protsesom samopodribnennia rud u barabannykh mlynakh [Adaptive control system of the self-grinding process of ores in autogenous mills]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 4, 151–158, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-4-18>
9. Novytskyi I., & Shevchenko Y. (2024). Justification of the criterion for optimal control of the self-grinding process of ores in drum mills. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, № 4. P. 61-66. doi: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-4/061>
10. Sokur, M. I., Biletskyi, V. S., & Shepeta, V. V. (2016). Avtomatyzatsiia protsesiv podribnennia rud u mlynakh samopodribnennia [Automation of ore grinding processes in self-grinding mills]. PP Shcherbatykh O. V.
11. Koriashkina, L., Malienko, A., Stanina, O., Shevchenko, Yu., Kodola, Ya. (2025). Systemnyi analiz ta optymalnyi vybir kompleksu zakhodiv dlia pidvyshchennia bezpeky na pidpriemstvi [System Analysis and Optimal Selection of a Set of Measures to Improve Workplace Safety at an Enterprise]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 72–80, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2025-2-7>



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

Дата першого надходження статті до видання: 11.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 20.05.2026