

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-367-29>

УДК 622.232.72:621.865.8

СТАДНИК МИКОЛА

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0003-2109-6219>

e-mail: stadnik1948@gmail.com

ШТУЦЬ АНДРІЙ

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>

e-mail: shtuts1989@gmail.com

ЛИПНИЦЬКИЙ РОМАН

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0009-0001-3711-5632>

e-mail: lroma5105@gmail.com

КОГУТ ВАСИЛЬ

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0009-0009-2357-8693>

e-mail: vacokkogut@gmail.com

ПРИНЦИПИ МЕХАТРОНИКИ ТА ПАРАЛЕЛЬНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ЯК ОСНОВА НАДІЙНОСТІ ГРАНІТОДОБУВНИХ ГІРНИЧИХ МАШИН З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ СИСТЕМАМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯМ

У статті досліджено сучасну тенденцію інтелектуалізації вибійних гірничих машин, зумовлену зростанням вимог до продуктивності, енергоефективності, надійності та ресурсу основних вузлів, а також до рівня промислової безпеки під час розробки міцних гірських порід, зокрема граніту. Обґрунтовано, що сучасний гранітодобувний очисний комплекс доцільно розглядати не як сукупність окремих механічних агрегатів, а як інтегровану мехатронну систему, у якій механічні, силові (електротехнічні та гідравлічні), електронні та інформаційні компоненти функціонують у межах єдиної архітектури керування. Ключові процеси регулювання, моніторингу та діагностики реалізуються через розподілену інформаційну мережу, що забезпечує узгоджену роботу електротехнологій, систем постачання енергії та інтелектуальних модулів керування.

Проаналізовано принципи відмінності між очисними комбайнами попереднього покоління з гідравлічною системою подачі (типу РКУ) та машинами нового покоління з частотно-регульованим електроприводом подачі (типу КДК500). Показано, що для сучасних машин електронно-інформаційні компоненти, датчики стану, системи технічної діагностики та програмно-алгоритмічні засоби керування є не допоміжними, а структуроутворювальними елементами, від яких безпосередньо залежить їх працездатність і надійність. Зростання ролі електроніки, вбудованого програмного забезпечення та мережевої взаємодії переводить такі машини у клас кіберфізичних систем, у яких електротехнологічні процеси тісно інтегровані з інформаційними потоками.

На основі структурно-функціонального аналізу з використанням S- та F-моделей доведено, що традиційний послідовний («вертикальний») підхід до проєктування не забезпечує належного узгодження компонентів різної фізичної природи, що призводить до виникнення конфліктуючих параметрів у місцях їх стику, зниження ефективності функціонування та необхідності пізніх конструктивних коригувань. Запропоновано застосування принципів паралельного (concurrent) проєктування, яке передбачає попередній функціонально-структурний аналіз, математичне та імітаційне моделювання взаємодії підсистем, а також формування вимог до контурів авторегулювання, систем діагностики та інформаційної взаємодії між машинами комплексу й диспетчерським пунктом.

Такий підхід дає змогу на ранніх етапах розроблення виявляти обмежувальні чинники технологічного процесу – транспортування гірничої маси, стабілізацію машини, вплив оператора, пиловиділення, вібраційні навантаження та режими енергопостачання – і цілеспрямовано враховувати їх під час синтезу систем керування. Отримані результати можуть бути використані для підвищення продуктивності, надійності електротехнологічних процесів, енергоефективності систем постачання та безпеки мехатронних гранітодобувних машин, а також для створення передумов переходу до малолюдних і безлюдних технологій видобутку граніту.

Ключові слова: мехатроніка, гранітодобувні гірничі машини, надійність, електротехнології, частотно-регульований електропривод, паралельне проєктування, інтелектуальні системи керування, інформаційна взаємодія, технічна діагностика, системи постачання енергії.

STADNIK MYKOLA, SHTUTS ANDRIY, LYPNYTSKYI ROMAN, KOHUT VASYL

Vinnitsia National Agrarian University

PRINCIPLES OF MECHATRONICS AND CONCURRENT ENGINEERING AS THE BASIS FOR RELIABILITY OF GRANITE MINING MACHINES WITH INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS FOR ELECTROTECHNOLOGIES AND POWER SUPPLY

The paper investigates the contemporary trend toward the intellectualization of face mining machines, driven by increasing requirements for productivity, energy efficiency, reliability, service life of critical components, and industrial safety in the extraction of hard rock formations, particularly granite. It is substantiated that a modern cutting complex should not be regarded as a collection of independent mechanical units, but rather as an integrated mechatronic system in which mechanical, power (electrical and hydraulic), electronic, and information components operate within a unified control architecture. In such systems, key control, monitoring, and diagnostic processes are implemented through a distributed information network that integrates electrotechnologies, intelligent control modules, and power supply subsystems.

The fundamental differences between previous-generation shearer loaders equipped with hydraulic feed systems (RKU type) and new-generation machines featuring variable-frequency electric feed drives (KDK500 type) are analyzed. It is demonstrated that, in modern machines, electronic and information components, state sensors, technical diagnostic systems, and software-based control algorithms are not auxiliary elements but structural components that directly determine operability and reliability. The increasing role of embedded electronics, real-time control algorithms, and network-based communication transforms such mining machines into cyber-physical systems, where electromechanical processes are tightly integrated with digital information flows.

Based on structural and functional analysis using S- and F-models, it is shown that the traditional sequential ("vertical") design approach fails to ensure proper coordination of components of different physical nature. This results in conflicting parameters at subsystem interfaces, reduced operational efficiency, and the necessity of late-stage design modifications. To overcome these limitations, the application of concurrent (parallel) engineering principles is proposed. This approach involves preliminary functional-structural analysis, mathematical and simulation modeling of subsystem interactions, and early synthesis of automatic control loops, diagnostic functions, and information exchange mechanisms between mining machines and the dispatch control center.

The proposed methodology enables the identification of limiting technological factors at the early stages of design, including rock mass transportation capacity, machine stabilization constraints, operator-related limitations, dust generation, vibration loads, and power supply conditions. Incorporating these factors into the design process enhances productivity, reliability of electrotechnological processes, energy efficiency of power supply systems, and overall operational safety. The obtained results form a methodological basis for the development of intelligent mechatronic mining machines and create prerequisites for the transition to low-manpower and fully unmanned granite extraction technologies.

Keywords: mechatronics, granite mining machines, reliability, electrotechnologies, variable-frequency electric drive, concurrent engineering, intelligent control systems, information interaction, technical diagnostics, power supply systems.

Стаття надійшла до редакції / Received 21.04.2026

Прийнята до друку / Accepted 17.07.2026

Опубліковано / Published 31.07.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Стадник Микола, Штуть Андрій, Липницький Роман, Когут Василь

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями

Зростання вимог до продуктивності, енергоефективності, надійності, ресурсу та безпеки гранітодобувних гірничих машин об'єктивно зумовлює їх конструктивно-функціональне ускладнення шляхом інтеграції частотно-регульованих електроприводів, систем автоматичного керування, технічної діагностики та засобів інформаційної взаємодії [1, 5]. Унаслідок цього сучасний гранітодобувний комплекс перестає бути суто електромеханічною системою типу «двигун–редуктор» і набуває ознак багатокomпонентного мехатронного об'єкта, у якому механічні, силові (електротехнічні та гідравлічні), електронні та інформаційні компоненти функціонують у межах єдиної інтегрованої архітектури керування [4, 6].

Водночас у науково-технічній літературі та практиці інженерного проектування відсутні уніфіковані критерії якісного та кількісного оцінювання рівня «мехатронності» гірничих машин, а також формалізований інструментарій структурно-функціонального аналізу їхніх компонентів і взаємодій [3, 4]. Традиційний послідовний («вертикальний») підхід до проектування, що передбачає розподіл функцій за рівнями та ізольоване конструювання підсистем, не забезпечує належного узгодження елементів різної фізичної природи [3]. Це спричиняє виникнення конфліктуючих параметрів у місцях стику підсистем, необхідність пізніх коригувань за результатами випробувань, зростання вартості та подовження циклу створення обладнання [1, 2].

Найгостріше зазначена проблема проявляється під час розроблення гранітодобувних різальних і очисних комбайнів нового покоління з частотно-регульованими системами подачі, працездатність і керованість яких безпосередньо залежать від електронно-інформаційних компонентів і мережевої взаємодії [5, 6]. У таких умовах обмеження швидкості переміщення та продуктивності визначаються не лише механічними характеристиками машини, а й можливостями транспортної системи, параметрами стабілізації, операторським фактором, умовами пилопригнічення та режимами енергопостачання [2].

Отже, виникає актуальне науково-прикладне завдання – розроблення формалізованого підходу до побудови та аналізу S- і F-моделей гранітодобувного мехатронного комплексу та його агрегатів. Такий підхід має забезпечувати раннє виявлення конфліктів параметрів, обґрунтування функцій інформаційної взаємодії й контурів авторегулювання, а також реалізацію принципів паралельного (concurrent) проектування для досягнення заданих показників продуктивності, енергоефективності, надійності та ресурсу в реальних гірничо-геологічних умовах [2, 4].

Аналіз літературних джерел

Забезпечення сучасних вимог до гірничих машин неможливе без їх істотного ускладнення, насамперед у частині електроприводів, систем автоматичного керування, технічної діагностики та інтелектуальних модулів оброблення даних [1, 5]. Вибірні машини останнього покоління характеризуються високим рівнем інтеграції електротехнологічних і інформаційних компонентів, що істотно трансформуює їхню функціональну структуру та принципи керування [5, 6].

Сучасний очисний комплекс розглядається як складна технічна система, у якій складові частини пов'язані не лише механічно, а й інтегровані в єдину інформаційну мережу з централізованою або розподіленою архітектурою керування [2, 6]. Така інтеграція забезпечує узгоджену роботу електроприводів, гідравлічних систем, сенсорних модулів, систем технічної діагностики та енергопостачання, що безпосередньо впливає на показники продуктивності та надійності обладнання [1, 5].

У різних галузях техніки широкого застосування набув мехатронний підхід до проектування складних машин і систем [3, 4]. Мехатроніка визначається як міждисциплінарний напрям науки й техніки, що ґрунтується на синергетичній інтеграції механічних, електротехнічних, електронних та інформаційних компонентів з метою

створення інтелектуальних систем керування рухом і функціональними процесами [4]. При цьому визначальною ознакою мехатронного об'єкта є не лише наявність зазначених компонентів, а їх функціонально узгоджена взаємодія, яка забезпечує появу нових якісних властивостей системи – адаптивності, самодіагностики та підвищеної експлуатаційної надійності [1, 4].

Аналіз наукових праць свідчить, що впровадження принципів мехатроніки у гірниче машинобудування потребує переходу від традиційних послідовних схем проєктування до інтегрованих методів структурно-функціонального аналізу та моделювання [2, 3]. Проте питання формалізації критеріїв оцінювання рівня мехатронності гранітодобувних машин, а також системної інтеграції електротехнологій, систем енергопостачання та інтелектуальних алгоритмів керування залишаються недостатньо розробленими.

Формування цілей статті

Метою статті є обґрунтування доцільності застосування принципів мехатроніки та паралельного проєктування під час створення гранітодобувних гірничих машин як складних багатокомпонентних систем із високою часткою електронно-інформаційних елементів, орієнтованих на підвищення надійності, енергоефективності та інтелектуалізації процесів керування [2, 4, 5].

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

1. Проаналізувати тенденції інтелектуалізації гранітодобувних машин і обґрунтувати перехід від традиційних електромеханічних схем до інтегрованих мехатронних структур із розподіленою інформаційною взаємодією [4, 6].

2. Обґрунтувати доцільність застосування S- та F-моделей для структурно-функціонального опису гранітодобувного комплексу та його основних агрегатів – різальної машини, конвеєрної системи, опорних і перемішувальних модулів [2, 3].

3. Визначити ключові чинники, що обмежують продуктивність і швидкість переміщення видобувної машини (транспортування гірничої маси, стабілізація, операторський фактор, пилопригнічення, режими енергопостачання) та встановити їхній вплив на вимоги до систем автоматичного керування [1, 5].

4. Виявити типові конфліктуючі параметри у місцях стику компонентів різної фізичної природи та обґрунтувати способи їх усунення шляхом синтезу контурів авторегулювання, захисних функцій і механізмів інформаційної взаємодії [2, 4].

5. Показати, що застосування принципів паралельного проєктування на основі аналізу S- і F-моделей дає змогу скоротити обсяг пізніх конструктивних коригувань, зменшити строки розроблення та підвищити продуктивність, надійність і ресурс мехатронних гранітодобувних машин [2, 3].

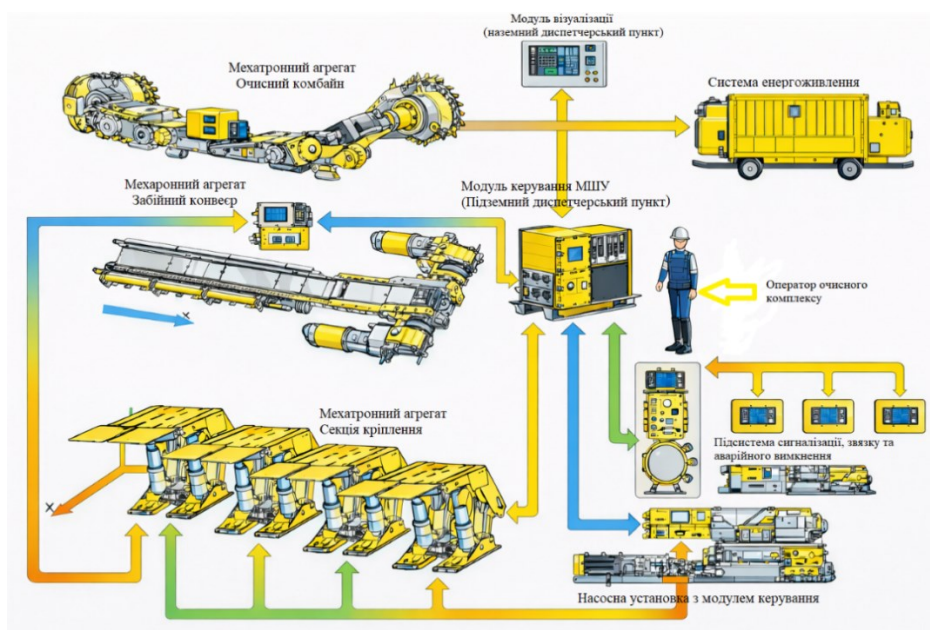


Рис. 1. Структурна схема мехатронного гранітодобувного комплексу

Для гірничо-шахтного машинобудування принциповим етапом переходу до мехатронних систем став очисний комбайн з електричним приводом подачі на основі частотно-регульованого електропривода [5]. Саме впровадження перетворювачів частоти та цифрових систем керування стало визначальним чинником інтеграції електротехнологій, силової електроніки та інформаційних компонентів у структуру гірничої машини, що об'єктивно змінило підходи до її проєктування та забезпечення надійності [1, 5].

Комбайни попереднього покоління оснащувалися системами автоматизації різного рівня складності. Зокрема, машини типу РКУ комплектувалися комплексом автоматизації КУАК, який базувався на мікропроцесорній техніці та забезпечував реалізацію функцій контролю й часткової автоматизації [3]. Проте

електронні та інформаційні компоненти виконували переважно допоміжну роль, тоді як керування рухом залишалося можливим у ручному режимі. Частка електронної складової у структурі системи керування становила близько 11 %, тоді як силові (електро- та гідроприводи) й механічні компоненти – по 44,5 % відповідно [5].

Машини нового покоління принципово відрізняються архітектурою керування. Взаємодія оператора з комбайном здійснюється виключно через керувальний модуль, який формує цифровий керувальний код і передає його загальною шиною даних до виконавчих підсистем [6]. Такий підхід зумовлений особливостями роботи частотно-регульованого електропривода з автономним інвертором, який реалізує керування швидкістю обертання двигуна за допомогою широтно-імпульсної модуляції з частотою перемикання близько 2500 Гц та одночасним контролем значної кількості внутрішніх параметрів [5]. За таких умов функціонування машини без електронно-інформаційних компонентів є неможливим, що дозволяє класифікувати її як повноцінний мехатронний об'єкт [4, 6].

У структурі керування рухом комбайна нового покоління частка електронної складової зростає до 35 %, інформаційної – до 6 %, тоді як частки силових і механічних компонентів становлять по 29,5 % [5]. Сумарна частка електронно-інформаційних елементів перевищує 40 %, що істотно змінює принципи його проектування, зокрема в частині електротехнологічної узгодженості, функціональної інтеграції та забезпечення експлуатаційної надійності [1, 4].

Мехатронність комбайна визначає не лише його керованість, а й загальну працездатність. Якщо автоматизація спрямована переважно на поліпшення умов праці оператора, то мехатронна інтеграція забезпечує синергетичну взаємодію механічних, силових та інформаційних компонентів, що формує нові якісні властивості системи – адаптивність, самодіагностику та прогнозування технічного стану [1, 4]. Оператор або система вищого рівня керування впливають лише на вихідні функції машини, тоді як внутрішні процеси реалізуються за допомогою інтелектуальних алгоритмів і контурів авторегулювання [2].

Отже, поняття «мехатронний комбайн» не є тотожним поняттю «автоматизований комбайн». У мехатронній системі електронно-інформаційні компоненти виконують не лише функції керування рухом, а й функції технічної діагностики, адаптації режимів роботи, моніторингу стану вузлів і прогнозування відмов [1]. Передавання частини або всіх функцій автоматизації безпосередньо мехатронному об'єкту потребує перегляду традиційних підходів до проектування систем керування гірничих машин [3].

Зростання складності сучасних гранітодобувних машин зумовлене не лише підвищенням функціонально-параметричних характеристик, а й необхідністю забезпечення їхньої надійності як складних технічних систем [1]. Вимоги до підтримання працездатності протягом заданого ресурсу зумовлюють розширення функцій діагностики, збільшення кількості контрольованих параметрів і ускладнення алгоритмів оброблення інформації [2]. Це, своєю чергою, спричиняє подальше зростання частки електронних і інформаційних компонентів у структурі очисного комбайна та посилює роль систем енергопостачання в забезпеченні стабільності роботи електротехнологічних модулів [5].

Очисний комбайн КДК500 нового покоління, що розробляється на основі принципів мехатроніки, містить близько 30 електронно-інформаційних модулів, об'єднаних у єдину мережеву структуру та інтегрованих із системами вибою [6]. Така архітектура забезпечує координацію електроприводів, гідросистем, сенсорів, модулів енергопостачання та засобів диспетчерського контролю, що створює передумови для реалізації інтелектуальних систем керування та переходу до малолюдних технологій видобутку [2, 6].

Проектування мехатронних машин із високою часткою електронно-інформаційних компонентів не може здійснюватися за традиційними методами. Нормативна база гірничого машинобудування (ДСТУ 3974, КД 12.10.002-96 та ін.) сформована в межах ієрархічної («вертикальної») концепції проектування, за якої система поділяється на підсистеми, а її функції розглядаються як сума функцій окремих рівнів [3].

У межах такого підходу проектування здійснюється послідовно – від формування цілей і технічного завдання до розроблення компонентів, їх випробування, інтеграції та коригування. Однак цей метод не передбачає повноцінного структурно-функціонального аналізу взаємодії компонентів різної фізичної природи та, як правило, не включає системного математичного й імітаційного моделювання на ранніх стадіях [2, 3].

Розподіл функцій часто здійснюється на основі евристичних рішень, що базуються на досвіді розробників, а не на формалізованому системному аналізі. Це призводить до функціональної надмірності одних компонентів, домінування окремих підсистем і проектування інших за залишковим принципом. Відсутність комплексного моделювання взаємодії підсистем створює ілюзію завершеності технічних рішень і зводить проектування до використання традиційних, раніше апробованих схем, що є неприйнятним для сучасних мехатронних гранітодобувних машин [2, 4].

Неврахування закономірностей взаємодії компонентів у складі гранітодобувних машин призводить до необхідності суттєвих конструктивних коригувань за результатами приймальних випробувань і, як наслідок, до виготовлення установчої партії, що може істотно відрізнятись від дослідного зразка [1, 2]. Така ситуація є особливо критичною для машин, які експлуатуються в жорстких умовах кар'єрного видобутку граніту, де високі динамічні навантаження, абразивність породи та змінність гірничо-геологічних параметрів безпосередньо впливають на ресурс і експлуатаційну надійність обладнання [1]. За відсутності системного структурно-функціонального аналізу взаємодії механічних, силових і інформаційних підсистем виникають конфліктуючі параметри, що знижують ефективність роботи машини та ускладнюють забезпечення заданих показників продуктивності й енергоефективності.

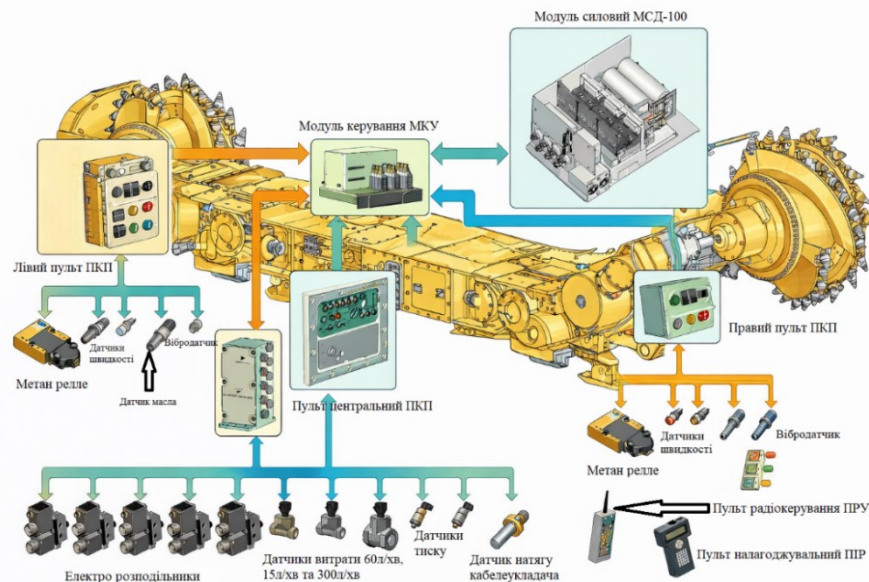


Рис. 2. Функціональна схема електрогідравлічної системи керування гірничою машиною для розробки гранітного масиву

Традиційна система проектування гірничих машин формувалася в умовах централізованої економіки, коли випробування дослідних зразків фінансувалися державою, а строки реалізації проектів могли коригуватися без істотних економічних наслідків [3]. У сучасних умовах ринкової конкуренції у гранітодобувній галузі такий підхід є неприйнятним. Замовник потребує обладнання, яке з першого етапу експлуатації забезпечує задану продуктивність, енергоефективність, ресурс і надійність незалежно від статусу машини. Це об'єктивно зумовлює необхідність переходу до інтегрованих методів проектування, що враховують взаємодію всіх підсистем ще на ранніх стадіях розроблення.

За таких умов створення мехатронних об'єктів для гранітодобувної промисловості потребує застосування принципів паралельного проектування (concurrent engineering methods) [1, 4]. Сутність цього підходу полягає в одночасному та узгодженому формуванні характеристик механічних, електротехнічних, гідравлічних і інформаційних компонентів із урахуванням їх взаємного впливу. У працях [1, 2] підкреслюється, що паралельне проектування є однією з ключових ознак мехатроніки, оскільки саме воно забезпечує синергетичну інтеграцію підсистем і формування нових якісних властивостей машини.

У межах такого підходу до формування технічного завдання обов'язково виконуються функціональний і структурний аналізи системи. Для гранітодобувних машин, зокрема різальних і фрезерних комплексів, побудова S-моделі неможлива без математичного моделювання, яке дозволяє врахувати взаємодію електроприводів, силових механізмів, систем подачі, різального інструменту та гірського масиву [2, 5]. Саме моделювання дає змогу на ранніх етапах проектування виявити потенційні конфлікти параметрів і забезпечити узгодження режимів роботи електротехнологічних і механічних компонентів. Це сприяє скороченню строків розроблення, зменшенню матеріально-технічних витрат і мінімізації обсягу приймальних випробувань.

Методи усунення конфліктів, що виникають у процесі інтеграції компонентів різної фізичної природи, можуть передбачати коригування функціонально-параметричних характеристик машини в цілому з урахуванням властивостей гірського масиву, зміну параметрів окремих конфліктуючих підсистем або розширення S-моделі шляхом введення додаткових мехатронних модулів і контурів авторегулювання [2]. Найбільш ефективним є підхід, за якого система автоматично адаптує режими роботи залежно від фізико-механічних характеристик граніту, реалізуючи принципи інтелектуального керування без жорсткого обмеження технологічних параметрів [4]. Такий підхід дозволяє підвищити стабільність процесу різання, зменшити перевантаження електроприводів і забезпечити оптимальні режими енергоспоживання.

Гранітодобувний комплекс як мехатронна система не може розглядатися як сукупність окремих машин. Кожен агрегат виконує власні функції, однак лише їх інтеграція в єдину систему дозволяє досягти головної мети – видобутку граніту із заданою продуктивністю, енергоефективністю та ресурсом у конкретних гірничо-геологічних умовах. Функціональна модель комплексу передбачає реалізацію процесів руйнування масиву, навантаження та транспортування гірської маси, стабілізації робочої зони та переміщення обладнання. Водночас F-модель різального комбайна включає переміщення вздовж фронту розробки, обертання виконавчих органів, регулювання їх положення та функції технічної діагностики. Конвеєрна система забезпечує транспортування маси з авторегулюванням пускових режимів і моніторингом стану, а опорні та перемішувальні модулі реалізують стабілізацію та переміщення обладнання з контролем власного технічного стану.

Застосування принципів паралельного проектування на основі аналізу S- та F-моделей дозволяє забезпечити узгодженість електротехнологічних, механічних і інформаційних компонентів, зменшити ймовірність виникнення конфліктуючих параметрів та підвищити експлуатаційну надійність гранітодобувних

машин. Саме такий системний підхід створює передумови для впровадження інтелектуальних систем керування та переходу до високоефективних, ресурсозберігаючих і малолюдних технологій видобутку граніту.

Основні функції гранітодобувного комплексу (F-модель системи) можна сформулювати так:

1. Пуйнування (різання) гранітного масиву;
2. Навантаження відокремленої гірської маси;
3. Транспортування гранітної маси;
4. Такріплення або стабілізація виробленого простору (за потреби);
5. Переміщення обладнання на нову ділянку розробки.

F-модель різального (очисного) комбайна, який забезпечує руйнування та навантаження гранітної маси, формулюється таким чином:

1. Переміщення комбайна вздовж фронту розробки за координатою X (основний кількісний параметр – швидкість подачі; залежний параметр – потужність привода подачі);
2. Обертання виконавчих органів (різальних дисків, барабанів тощо) (основний кількісний параметр – частота обертання; залежний параметр – потужність привода різання);
3. Переміщення виконавчих органів за координатою Y (основний кількісний параметр – швидкість переміщення; залежні параметри – витрата та тиск у гідросистемі, потужність привода гідросистеми);
4. Діагностика власного технічного стану (кількісний параметр – час виявлення відмови).

F-модель конвеєрної системи, що забезпечує транспортування гранітної маси:

1. переміщення відокремленої гірської маси вздовж фронту розробки за координатою X (основний кількісний параметр – швидкість ланцюга або стрічки; залежний параметр – потужність привода);
2. авторегулювання процесу пуску (зворотний зв'язок – навантаження приводів);
3. діагностика власного стану.

F-модель механізованої системи опор або допоміжних переміщувальних модулів, що забезпечують стабілізацію робочої зони та переміщення обладнання на нову ділянку, складається з однотипних секцій і включає:

1. переміщення транспортної або різальної системи по осі Z;
2. переміщення огорожувальних або опорних елементів за координатою Y;
3. позовжне переміщення секцій по осі Z;
4. переміщення бічних елементів за координатою X (для вирівнювання секції та підвищення стійкості конструкції);
5. діагностика власного технічного стану.

Основним кількісним критерієм досягнення мети гранітодобувного комплексу є теоретична та пов'язана з нею технічна продуктивність, які визначаються відповідно до [5].

$$Q_T = h \cdot b_z \cdot \gamma \cdot v, \text{ (т/хв)} \quad (1)$$

$$Q_e = 60 \cdot k_T \cdot Q_T \text{ (т/год)} \quad (2)$$

де:

k_m - коефіцієнт технічного використання машини;

h - потужність (товщина) гранітного масиву, м;

b_z - ширина захвату виконавчого органа видобувної (різальної) машини, м;

v - швидкість переміщення видобувної машини, м/хв;

γ - щільність граніту в масиві, т/м³.

Об'єднання трьох машин у систему, керовану оператором-людиною та такою, що взаємодіє з навколишнім середовищем, накладає функціональні обмеження на швидкість переміщення комбайна, а саме:

$$v \leq \begin{cases} v_{mp} \\ v_{kp} \\ v_{ок} \\ v_{mv} \end{cases} \quad (3)$$

де:

v_{mp} - гранична швидкість комбайна за фактором транспортування, тобто найбільша швидкість переміщення комбайна, за якої ще можливе транспортування всієї видобутої гранітної маси конвеєрною системою;

v_{kp} - гранична швидкість комбайна за фактором кріплення (стабілізації робочої зони), тобто найбільша швидкість переміщення комбайна, за якої секції опорної (або допоміжної) системи ще встигають переміщуватися до фронту розробки безпосередньо за комбайном;

$v_{ок}$ - гранична швидкість комбайна за фактором переміщення оператора, тобто найбільша швидкість переміщення комбайна, за якої оператор встигає слідувати за комбайном і здійснювати його керування;

v_{mv} - гранична швидкість комбайна за фактором пиловиділення, тобто найбільша швидкість переміщення комбайна, за якої забезпечується безпечна концентрація пилу та аерозолів у зоні руйнування гранітного масиву та в інших контрольованих точках.

Наведені вище обмеження не є новими, однак їх аналіз у поєднанні з поданими раніше F-моделями дає змогу зробити низку нових висновків.

Швидкість переміщення комбайна за фактором транспортування за умови оптимального використання можливостей конвеєра (тобто коли теоретична продуктивність різального комбайна дорівнює продуктивності вибійного конвеєра) визначається як:

$$v_{mp} = \frac{v_u}{\frac{h \cdot b \cdot \gamma}{sp_{max}}} \text{ (м/хв)}, \quad (4)$$

де:

v_u - швидкість ланцюга конвеєра, м/хв;

sp_{max} - максимальна площа поперечного перерізу завантажувальної частини конвеєра;

γ – щільність зруйнованого граніту, т/м³.

Швидкість переміщення опорної (кріпильної) системи визначається як:

$$v_{кр} = \frac{B_{кр}}{t_{кр}} \text{ (м/хв)}, \quad (5)$$

де:

$B_{кр}$ - крок установлення секцій опорної (кріпильної) системи вздовж фронту розробки, м;

$t_{кр}$ - час переміщення (передвижки) однієї секції опорної системи, хв.

Із формули 4 видно, що для підвищення v_{mp} необхідно збільшувати швидкість тягового органа конвеєра v_u . Крім того, v_{mp} залежить від напрямку руху комбайна. Оскільки зношування става та тягового органа конвеєра є пропорційним v_u , то для забезпечення заданого ресурсу необхідно доповнити F-модель конвеєра такими функціями:

1. Авторегулювання швидкості переміщення гірської маси за координатою X зі зворотним зв'язком за швидкістю комбайна.

2. Інформаційна взаємодія з комбайном.

Із формули 5 випливає, що для підвищення $v_{кр}$ необхідно скорочувати час $t_{кр}$, чого можна досягти шляхом застосування автоматичного (без участі оператора) переміщення секцій опорної системи у міру просування різального комбайна. Для цього F-модель секції опорної (кріпильної) системи необхідно доповнити такими функціями:

1. Автоматичне переміщення конвеєрної системи по осі Z (зворотний зв'язок – положення комбайна);

2. Автоматичне переміщення по осі Z (зсув секції)(зворотні зв'язки – положення комбайна та зусилля опори суміжної секції);

3. Авторегулювання положення за координатою Y (зворотний зв'язок – тиск у гідросистемі опори);

4. Авторегулювання положення по осі Z (зворотний зв'язок – положення конвеєра);

5. Інформаційна взаємодія з іншими секціями опорної системи.

Усунути обмеження за швидкістю переміщення оператора можливо лише за умови забезпечення автоматичного керування комбайном, тобто виключення виконання оператором функцій керування швидкістю та положенням виконавчих органів (параметри k_1 , k_3 відповідно до S-моделі комбайна). Для цього F-модель комбайна необхідно доповнити такими функціями:

1. Авторегулювання швидкості подачі (зворотний зв'язок – навантаження привода різання);

2. Авторегулювання положення виконавчих органів за координатою Y (зворотні зв'язки – міцність руйнованого гранітного масиву для роботи без підрізів, а також положення опорної системи за координатою Y для забезпечення геометричної прохідності комбайна);

3. інформаційна взаємодія з опорною системою.

За зазначеного розширення F-моделей стає можливим керування всіма машинами гранітодобувного комплексу одним оператором через підземний або наземний диспетчерський пункт (МШУ, див. рис. 1). Для забезпечення дистанційного контролю та керування з такого пункту необхідно доповнити F-моделі всіх машин ще однією функцією – інформаційною взаємодією з МШУ.

Запропонований функціональний аналіз гранітодобувного комплексу як мехатронної системи дає змогу вже на стадії проектування виявити низку конфліктуючих параметрів, що обмежують продуктивність і ресурс машин комплексу. Усунення цих конфліктів потребує суттєвого коригування початкових F-моделей усіх машин і застосування принципів паралельного проектування.

«Інтелектуалізація» гірничих машин, передавання функцій автоматизації мехатронному об'єкту дає змогу зробити наступний крок у напрямі створення малолюдних і безлюдних технологій видобутку граніту.

Проектування гірничих машин нового технічного рівня, що є мехатронними об'єктами та складаються з компонентів різної фізичної природи, вимагає від сучасного інженера-конструктора зміни підходів до проектування, а також ширшого спектра знань і навичок. Насамперед це зумовлено багаторазовим зростанням частки інформаційних та електронних компонентів у структурі керування рухом гірничих машин і в забезпеченні їх працездатності.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У роботі показано, що сучасні гірничі та кар'єрні машини доцільно розглядати як інтегровані мехатронні системи, у яких механічні, силові (електротехнічні та гідравлічні), електронні та інформаційні компоненти утворюють єдине функціональне ціле. Працездатність, керованість і надійність таких машин визначаються не

лише міцністю та кінематикою механічних вузлів, а й якістю інформаційної взаємодії, стабільністю енергопостачання та ефективністю алгоритмів керування електротехнологічними процесами.

Обґрунтовано, що зростання частки електронно-інформаційних елементів, застосування частотно-регульованих електроприводів і розподілених систем керування принципово змінюють вимоги до проектування гірничих і кар'єрних машин. Послідовний («вертикальний») підхід не забезпечує належного узгодження компонентів різної фізичної природи на стиках підсистем, що призводить до конфліктуючих параметрів, перевантажень, погіршення енергоефективності та необхідності пізніх конструктивних коригувань.

На основі структурно-функціонального аналізу встановлено, що продуктивність і допустимі режими роботи машин у складі комплексу формуються сукупністю обмежень, пов'язаних із транспортуванням гірничої маси, стабілізацією, пиловиділенням, вібраційними навантаженнями, операторським фактором та режимами енергопостачання. Підвищення продуктивності за умов збереження ресурсу та безпеки потребує цілеспрямованого доповнення функціональних моделей агрегатів контурами авторегулювання, захисними функціями та механізмами інформаційної взаємодії між машинами комплексу.

Доведено доцільність застосування принципів паралельного проектування, які передбачають попередній функціонально-структурний аналіз і моделювання взаємодії підсистем на ранніх стадіях. Такий підхід забезпечує раннє виявлення конфліктів параметрів, скорочення обсягу пізніх доопрацювань, підвищення надійності електротехнологічних процесів і створює передумови для впровадження інтелектуальних систем керування та переходу до малолюдних і безлюдних технологій у кар'єрному видобутку.

Результати можуть бути використані під час розроблення та модернізації гірничих і кар'єрних машин (різальних/фрезерних комплексів, бурових установок, конвеєрних систем, допоміжних опорно-переміщувальних модулів) для узгодження механічних, силових і інформаційних підсистем у межах єдиної архітектури керування. Це дозволяє на етапі технічного завдання формувати обґрунтовані вимоги до електроприводів, силових електроніки, сенсорних систем, мережевого обміну даними та енергопостачання.

Практичний ефект полягає у зменшенні ризику «дорогих» пізніх змін після випробувань, скороченні строків доведення дослідних зразків і підвищенні відтворюваності характеристик серійних виробів. Застосування паралельного проектування дає змогу забезпечити оптимальне узгодження продуктивності різальної машини з транспортною здатністю конвеєрів, можливостями стабілізації, умовами пилопригнічення та допустимими енергетичними режимами, що безпосередньо підвищує технічну та експлуатаційну ефективність кар'єрного комплексу.

Окремим напрямом практичного використання є синтез контурів автоматичного регулювання подачі та навантаження, адаптивне керування режимами руйнування породи, а також впровадження вбудованих засобів технічної діагностики і прогнозування відмов. Це дає змогу підвищити ресурс основних вузлів, зменшити простой та забезпечити стабільність електротехнологічних процесів у жорстких умовах кар'єрної експлуатації.

Запропоновані підходи також можуть бути покладені в основу створення диспетчерських систем дистанційного керування та моніторингу, які забезпечують централізований контроль стану агрегатів, координацію їх режимів роботи й перерозподіл функцій між оператором та інтелектуальними модулями керування, що є необхідною передумовою для впровадження малолюдних і безлюдних технологій у гірничій та кар'єрній галузі.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з:

- 1) розробленням уніфікованих кількісних показників «мехатронності» гранітодобувних машин (з урахуванням частки електронно-інформаційних компонентів, рівня інтеграції та адаптивності);
- 2) побудовою математичних і імітаційних моделей взаємодії агрегатів комплексу з гранітним масивом для прогнозування продуктивності, енерговитрат і зношування в реальних гірничо-геологічних умовах;
- 3) синтезом та верифікацією контурів автоматичного керування подачею, стабілізацією та транспортуванням з урахуванням обмежень ресурсу й пилопригнічення;
- 4) розвитком мережевих протоколів і архітектури інформаційної взаємодії для реалізації надійного дистанційного диспетчерського керування та впровадження малолюдних/безлюдних технологій видобутку граніту.

Література

1. Kukhar, V., Vasylevskyi, O., Shtuts, A. (2025). Investigation of the Causes of Operational Breakdowns in Metallurgical Equipment and Vehicle Parts Produced by Open Die Forging. In: Aikin, M., et al. *Advanced and Novel Technologies Interdisciplinary Collaboration in Materials Science. ANTICM 2025. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham*. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-032-00373-7_23
2. Kupchuk I., Kolisnyk M., Shtuts A., Paladii M., Didyk A. Experimental evaluation stress-strain state for billets during rolling stamping by rollers. *Colloquium-journal*. 2021. №16 (103). 40-48. URL: <https://colloquium-journal.org/wp-content/uploads/2022/05/Colloquium-journal-2021-103-2.pdf>
3. Shtuts A., Kolisnyk M., Yavdyk V. Improvement of processes of rolling stamping on the basis of investigation of technological parameters on the mechanics of workpieces formation. *Motrol*. 2018. Vol. 20. №1. P. 19-25. URL: <http://repository.vsau.vin.ua/getfile.php/16504.pdf>
4. Shtuts A., Saftiuk Y. Infrared spectroscopy as a tool to improve the reliability of intelligent analysis of sulfur-

- containing compounds in petroleum fuels. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2025. Vol. 359, № 6.2. P. 17–21. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-359-72. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-72>
5. Shtuts A.A., Saftiuk Y.V. Intelligent systems for improving the reliability of sulfur measurement in fuels *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 3 (130). P. 74–84. DOI:10.37128/2520-6168-2025-3-8. URL:<http://tetapk.vsau.org/>
6. Stadnik M., Shtuts A., Yaropud V., Kupchuk I. Development of an algorithm for power supply to a livestock farm using biogas *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*. 2025. Vol. 28. № 4. P. 1–26. DOI:10.33223/epj/208465.
7. Stadnik M.I., Shtuts A.A., Lypnyskyi R.M., Kogut V.M. Mechatronic Drive of a Scraper Conveyor as an Integrated Module of Power Engineering, Automated and Information-Control Systems. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 4 (131). P. 130–139. DOI:10.37128/2520-6168-2025-4-17. URL:<http://tetapk.vsau.org/>
URL:<http://socrates.vsau.edu.ua/repository/getfile.php/28846.pdf>
8. Voznyak O., Shtuts A. Investigation of the process of measurement control of the concentration of carbon dioxide. In: *Traditional and innovative approaches to scientific research: theory, methodology, practice: Scientific monograph*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2022. P. 1-27. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-241-8-1>.
9. Возняк О. М., Штуць А. А. Методи та засоби вимірювання параметрів потенційно нестійких НВЧ багатополосників. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ». 2022. 143 с. URL:<http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/30592.pdf>
10. Возняк О.М., Штуць А.А., Колісник М.А. Сучасні системи електроприводів. Теорія та практика (частина 1): навч. посіб. Вінницький національний аграрний університет. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ». 2021. 280 с.
11. Григор'єв Ю.І., Луценко С.О., Швец Є.М., Куроп'ятник І.П. Застосування неймережових технологій при проектуванні відкритих гірничих робіт. *Збірник наукових праць НГУ*. 2024. №76. С. 33–41.
12. Мацюк І., Федоскіна О., Соколов І. Обґрунтування раціональних конструктивних параметрів дробарки з двома рухомими щокми. *Науковий вісник НГУ*. 2024. №5. С. 45–50.
13. Пашенко О.В., Колісник М.А. Мехатронні підходи до модернізації приводів гірничих машин *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. №4. С. 71–79.
14. Собко Б.Ю., Чебанов М.О., Армановський О.Ю., Крячек В.П. Обґрунтування застосування фрезерних комбайнів на кар'єрах із видобутку нерудних корисних копалин. *Збірник наукових праць НГУ*. 2024. №76. С. 7–15.
15. Стаднік М., Штуць А., Колісник М., Григоренко Н. Дослідження мехатронних та робототехнічних систем інтелектуального керування електричними машинами в електротехнологіях. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2025. № 3 (118). С. 55–65. DOI: 10.37128/2306-8744-2025-3-6
16. Стаднік М.І., Штуць А.А., Колісник М.А. Теоретичні основи автоматики Теорія та практика. Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ. 2025. 356 с. URL:<https://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/40129.pdf>
17. Хілов В.С. Динамічні властивості приводу подачі кар'єрного бурового верстата. *Збірник наукових праць НГУ*. 2025. №80. С. 223–233.
18. Чеберячко С.І., Єременко Г.І., Тітов Д.А. Аналіз процесів утворення та поширення пилу при роботі гірничого комбайна. *Збірник наукових праць НГУ*. 2024. №76. С. 228–236.
19. Ярошенко Л. В., Штуць А. А., Колісник М.А. Електричні машини. Теорія та практика. Навч. посіб. Вінниця: ВНАУ, 2024. 468 с. URL:<http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/29968.pdf>

References

1. Kukhar, V., Vasylevskyi, O., & Shtuts, A. (2025). Investigation of the causes of operational breakdowns in metallurgical equipment and vehicle parts produced by open die forging. In M. Aikin et al. (Eds.), *Advanced and Novel Technologies: Interdisciplinary Collaboration in Materials Science (ANTICM 2025). Advances in Science, Technology & Innovation*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-00373-7_23
2. Kupchuk, I., Kolisnyk, M., Shtuts, A., Paladii, M., & Didyk, A. (2021). Experimental evaluation of stress–strain state for billets during rolling stamping by rollers. *Colloquium-Journal*, 16(103), 40–48. <https://colloquium-journal.org/wp-content/uploads/2022/05/Colloquium-journal-2021-103-2.pdf>
3. Shtuts, A., Kolisnyk, M., & Yavdyk, V. (2018). Improvement of processes of rolling stamping on the basis of investigation of technological parameters on the mechanics of workpieces formation. *Motrol*, 20(1), 19–25. <http://repository.vsau.vin.ua/getfile.php/16504.pdf>
4. Shtuts, A., & Saftiuk, Y. (2025). Infrared spectroscopy as a tool to improve the reliability of intelligent analysis of sulfur-containing compounds in petroleum fuels. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 359(6.2), 17–21. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-72>
5. Shtuts, A. A., & Saftiuk, Y. V. (2025). Intelligent systems for improving the reliability of sulfur measurement in fuels. *Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK*, 3(130), 74–84. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-3-8>
6. Stadnik, M., Shtuts, A., Yaropud, V., & Kupchuk, I. (2025). Development of an algorithm for power supply to a livestock farm using biogas. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, 28(4), 1–26. <https://doi.org/10.33223/epj/208465>
7. Stadnik, M. I., Shtuts, A. A., Lypnyskyi, R. M., & Kogut, V. M. (2025). Mechatronic drive of a scraper conveyor as an integrated module of power engineering, automated and information-control systems. *Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK*, 4(131), 130–139. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-4-17>
8. Voznyak, O., & Shtuts, A. (2022). Investigation of the process of measurement control of the concentration of carbon dioxide. In *Traditional and Innovative Approaches to Scientific Research: Theory, Methodology, Practice* (pp. 1–27). Baltija Publishing. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-241-8-1>
9. Vozniak, O. M., & Shtuts, A. A. (2022). *Metody ta zasoby vymiruvannia parametriv potentsiino nestiikykh NVCh bahatopolusnykyv*. Vinnytsia: TOV “ТВОРИ”. <http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/30592.pdf>
10. Vozniak, O. M., Shtuts, A. A., & Kolisnyk, M. A. (2021). *Suchasni systemy elektropyvodyv. Teoriia ta praktyka (Part I)*. Vinnytsia: Vinnytsia National Agrarian University.
11. Hryhoriev, Yu. I., Lutsenko, S. O., Shvets, Ye. M., & Kuropiatnyk, I. P. (2024). Application of neural network technologies in the design of open mining operations. *Zbirnyk Naukovykh Prats NHU*, 76, 33–41.
12. Matsiuk, I., Fedoskina, O., & Sokolov, I. (2024). Substantiation of rational design parameters of a crusher with two movable jaws.

Naukovyi Visnyk NHU, 5, 45–50.

13. Pashchenko, O. V., & Kolisnyk, M. A. (2024). Mechatronic approaches to modernization of mining machine drives. *Vibratsii v Tekhnitsi ta Tekhnolohiiakh*, 4, 71–79.

14. Sobko, B. Yu., Chebanov, M. O., Armanovskiy, O. Yu., & Kriachek, V. P. (2024). Substantiation of the use of milling combines in quarries for non-metallic mineral extraction. *Zbirnyk Naukovykh Prats NHU*, 76, 7–15.

15. Stadnik, M., Shtuts, A., Kolisnyk, M., & Hryhorenko, N. (2025). Research of mechatronic and robotic systems of intelligent control of electric machines in electrotechnologies. *Vibratsii v Tekhnitsi ta Tekhnolohiiakh*, 3(118), 55–65. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2025-3-6>

16. Stadnik, M. I., Shtuts, A. A., & Kolisnyk, M. A. (2025). *Teoretychni osnovy avtomatyky: Teoriia ta praktyka*. Vinnytsia: VNAU. <https://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/40129.pdf>

17. Khilov, V. S. (2025). Dynamic properties of the feed drive of a карьер drilling rig. *Zbirnyk Naukovykh Prats NHU*, 80, 223–233.

18. Cheberiyachko, S. I., Yeremenko, H. I., & Titov, D. A. (2024). Analysis of dust formation and propagation processes during operation of a mining combine. *Zbirnyk Naukovykh Prats NHU*, 76, 228–236.

19. Yaroshenko, L. V., Shtuts, A. A., & Kolisnyk, M. A. (2024). *Elektrychni mashyny. Teoriia ta praktyka*. Vinnytsia: VNAU. <http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/29968.pdf>