

Шапар Я.Р. , студент, II курс, ГГ-28м,
Панасюк А.В. , кандидат технічних наук, доцент
Державний університет «Житомирська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ГІРНИЧОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Гірничодобувна промисловість вступає в етап глибокої техніко-технологічної трансформації, у якій визначальною стає роль високошвидкісного та наднадійного зв'язку. Інтенсивна інтеграція штучного інтелекту, кіберфізичних систем та автономного технологічного транспорту формує нову парадигму видобутку, орієнтовану на підвищення безпеки, енергоефективності та операційної стійкості.

На середину 2024 року у світі експлуатувалося приблизно 2080 автономних вантажних самоскидів, а до 2026 року їхня кількість, згідно з прогнозом моделлю експоненціального зростання, має досягти близько 2800 одиниць. Динаміку збільшення кількості таких машин можна описати емпіричною формулою:

$$N(t) = N_0 \times e^{at}$$

де, $N(t)$ — кількість автономних транспортних засобів у момент часу (t);

N_0 — кількість на початковий момент;

e^{at} — коефіцієнт темпу цифрового впровадження.

Ключовим чинником успішного функціонування автономних систем є здатність обробляти та передавати великі масиви даних у реальному часі. Обсяг переданої інформації автономною машиною можна сформулювати як:

$$D = \sum_{i=1}^S k_i \times R_i$$

де, S — кількість сенсорів;

k_i — коефіцієнт чутливості або інформаційної щільності (i)-го сенсора;

R_i — частота дискретизації даних.

За умов взаємодії кількох автономних транспортних засобів додатково виникає потреба у забезпеченні наднизької затримки зв'язку. Основний критерій для систем рівня автономності 4–5 описують нерівністю:

$$Latency \leq 10\text{мс}$$

що відповідає вимогам до мереж 5G та перспективних 5G Advanced / 6G.

Пропускна здатність каналу, необхідна для стабільної роботи групи транспортних засобів, може бути оцінена через формулу Шеннона:

$$C = B \times \log_2(1 + SNR)$$

де, C — максимальна пропускна здатність каналу;

B — ширина смуги;

SNR — відношення сигнал/шум.

У низці гірничих регіонів пропускної здатності або ширини смуги (B) недостатньо, що призводить до перевантаження мережі та зростання латентності, наслідком чого є зменшення точності маневрування автономної техніки.

Відсутність належного зв'язку залишається однією з найбільш критичних проблем гірничодобувної індустрії, адже значна частина родовищ розташована у районах із нерозвинутою телекомунікаційною інфраструктурою. Це формує системні труднощі у розгортанні цифрових платформ, зокрема планувальників маршрутів, систем віддаленого керування та хмарних аналітичних модулів.

Водночас сучасні рішення на базі хмарно-мережових архітектур дозволяють створювати єдине «цифрове ядро» гірничого підприємства, що реалізує когнітивне управління транспортними потоками. Оптимізацію руху групи машин можна описати задачею мінімізації:

$$\min F = \sum_{i=1}^n (t_i + \beta \times E_i)$$

де, t_i — час проходження маршруту для (i)-го транспортного засобу;

E_i — його енергоспоживання;

β — ваговий коефіцієнт залежно від виробничих пріоритетів.

У складних геоморфологічних умовах (плато, круті укоси, звивисті виїзні траси) автономні системи використовують алгоритми адаптивного планування траєкторії. Їх можна формально подати як:

$$x_{t+1} = f(x_t, \nabla h, \theta).$$

де, x_t — положення транспортного засобу в момент часу (t);

∇h — градієнт рельєфу;

θ — параметри моделі навігації.

Такі алгоритми забезпечують точне маневрування та компенсацію впливу складної геометрії дороги.

Гаразд — нижче подаю науково відредаговану версію тексту в стилі академічної наукової статті: формулювання більш формальні, логічні зв'язки виражені чіткіше, усунено емоційність, введено терміни, структуру та відповідний стиль подачі.

Автоматизація гірничих робіт відіграє ключову роль у трансформації сучасних гірничодобувних підприємств, оскільки забезпечує зниження виробничих ризиків, оптимізацію технологічних процесів та підвищення ефективності використання трудових ресурсів. Впровадження автономних і дистанційно керованих систем сприяє скороченню кількості працівників, задіяних у небезпечних виробничих середовищах, що має виразний соціально-економічний ефект. Формування операторських центрів нового типу створює попит на високотехнологічні компетентності, частково компенсуючи дефіцит кваліфікованих кадрів у галузі.

Комплексна цифровізація гірничого виробництва, що включає використання віртуальних моделей родовищ, автономного транспорту, мобільних мереж п'ятого покоління (5G) та хмарної обробки даних, формує технічне підґрунтя для переходу до високопродуктивних та енергоефективних виробничих систем. Одним із визначальних факторів їх ефективного впровадження є стан інфраструктури передачі даних, що забезпечує комунікацію між обладнанням та центрами керування.

Автономні транспортні комплекси четвертого та п'ятого рівнів автономності потребують високошвидкісних мереж з мінімальною затримкою, гарантованою пропускнуою здатністю та стійкістю до втрат сигналу. Ці характеристики забезпечують можливість обробки великих обсягів сенсорної інформації в режимі реального часу та своєчасного прийняття коригуючих рішень. Таким чином, розбудова цифрової інфраструктури на базі технологій 4G/5G та периферійних обчислень (EDGE computing) є критичною умовою для повноцінного функціонування автономних систем.

Однак аналіз сучасного стану цифрової інфраструктури гірничодобувних підприємств засвідчує низку системних обмежень. Значна частина виробничих об'єктів розташована у віддалених регіонах із недостатнім покриттям мобільних мереж, обмеженою пропускнуою здатністю каналів зв'язку та відсутністю уніфікованих стандартів промислової комунікації. Фрагментованість систем збору та передачі даних ускладнює координацію між транспортними, навантажувальними та диспетчерськими підсистемами, що знижує якість оперативного керування та створює бар'єри для впровадження інтелектуальних технологій.

Проблеми зв'язку особливо проявляються в підземних умовах, де стабільна передача даних є технічно складною. У таких середовищах упровадження систем дистанційного керування та автономного пересування техніки часто унеможлиблюється через відсутність достатньо стійкої мережевої інфраструктури. Тому створення інтегрованої цифрової екосистеми з використанням технологій штучного інтелекту, універсальних стандартів передачі даних та мереж 4G/5G є необхідною передумовою для цифрової трансформації підприємств.

Застосування інтелектуальних виробничих систем відкриває можливість реалізації сценаріїв підвищеної складності, включаючи автономне транспортування в умовах кар'єрів із екстремальними температурними та геомеханічними параметрами, оптимізоване маршрутування змішаних колон транспортних засобів, а також хмарне керування розподілом машинно-тракторного парку. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє здійснювати динамічне планування траєкторій руху, вибір оптимальних режимів роботи та прогнозування можливих відхилень за допомогою аналізу потокових даних.

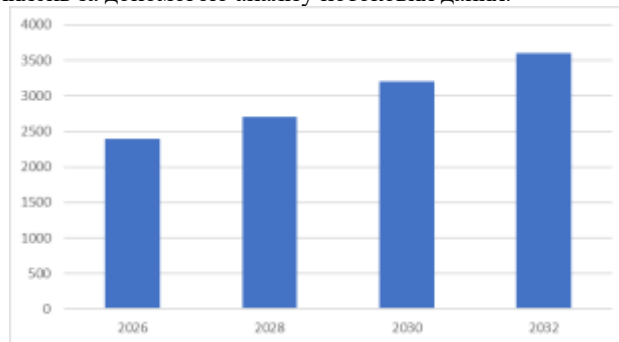


Рис. 1. Прогноз зростання автономних транспортних засобів у гірничодобувній промисловості

Автоматизація також виконує важливу компенсаторну функцію в умовах структурного дефіциту кадрів у гірничій промисловості. Перехід до дистанційних форм керування підвищує безпеку та привабливість професії для молодих фахівців, мінімізуючи ризики роботи в небезпечних виробничих середовищах та сприяючи формуванню нової моделі професійної підготовки, орієнтованої на компетентності у сфері робототехніки, автоматизації та аналітики даних.

Головними викликами для підприємств залишаються забезпечення технологічної безпеки, мінімізація операційних втрат та оптимізація виробничих процесів. Недостатня оперативність передачі даних, неузгодженість роботи транспортних та навантажувальних комплексів, а також надмірна витрата пального свідчать про необхідність подальшої інтелектуалізації виробництва. Технології нового покоління, що ґрунтуються на аналізі даних у реальному часі, відіграють ключову роль у формуванні ефективних і стійких виробничих систем.