

УДК 338.1:519.2
JEL Classification: C10, L10

DOI: <https://doi.org/10.37332/2309-1533.2025.4.34>

Новосад І.Я.,
канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедри прикладної математики,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5744-6095>,
Руська Р.В.,
канд. екон. наук, доцент,
доцент кафедри прикладної математики,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1854-9734>,
Пласконь С.А.,
канд. екон. наук, доцент,
доцент кафедри прикладної математики,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9013-4579>,
Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль

ІННОВАЦІЙНИЙ ПОТЕНЦІАЛ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У СТВОРЕННІ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Novosad I.Ya.,
cand.sc.(tech.), assoc. prof.,
associate professor at the department of applied mathematics,
Ruska R.V.,
cand.sc.(econ.), assoc. prof.,
associate professor at the department of applied mathematics,
Plaskon S.A.,
cand.sc.(econ.), assoc. prof.,
associate professor at the department of applied mathematics,
West Ukrainian National University, Ternopil

INNOVATIVE POTENTIAL OF RARE EARTH ELEMENTS IN CREATING ROBOTIC SYSTEMS

Постановка проблеми. У сучасному світі виділяють кілька стратегічних ресурсів, що відіграють визначальну роль у розвитку економіки, політичній стабільності, технологічному поступі й забезпеченні безпеки держав. Серед них – нафта і природний газ, рідкоземельні елементи, вода, різні метали, технології та інтелектуальна власність. Саме завдяки великому впливу на економіку, політику та технології ці ресурси перебувають у центрі уваги, а їхній контроль має значущі наслідки для держав і розвитку геополітичної ситуації.

Глобальні геополітичні та безпекові виклики – зокрема напруженість у відносинах між Китаєм і США, військові перевороти в країнах Африки, війна на Сході Європи та на Близькому Сході, а також енергетична та логістична криза в регіоні Червоного моря – зумовили переосмислення постачання рідкоземельних елементів як питання національної безпеки для більшості розвинених держав. Унаслідок цих факторів спостерігається стрімке зростання цін на рідкоземельні матеріали, що призвело до підвищення собівартості компонентів, обладнання та сировини в суміжних галузях промисловості [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Рідкоземельні метали охоплюють сімнадцять елементів: п'ятнадцять лантаноїдів, а також скандій і ітрій. Відкриття ітрію (Y) Й. Гадоліним у 1794 році стало відправною точкою для систематичних досліджень цієї групи. Завдяки сучасним технологіям значно вдосконалені процеси видобутку та переробки рідкоземельних металів, що забезпечує високий ступінь їх чистоти й ефективність виробництва. Сучасна наука стрімко розвивається, і з використанням штучного інтелекту та нових підходів дослідники досліджують увесь діапазон масштабів – від квантового рівня до макроскопічного. Це означає, що для прогнозування складу матеріалів залучають не лише квантову механіку, але й моделюють методи їх обробки та синтезу.

Значний внесок у розвиток сучасних наукових підходів до рідкоземельних матеріалів здійснили як зарубіжні, так і вітчизняні вчені (К. Г. Мосандер, Ф. Сьоренсен, Г. Т. Сейборг, Ю. Тсірлін та ін.), чий дослідження сформувавши основу для розуміння хімічних властивостей, структури, реакційної здатності й напрямків практичного використання рідкоземельних елементів у новітніх матеріалах для робототехніки, електроніки й екологічно чистих технологій. Науковці Карл Айвенсен, Габор Ковач, Іонела Карантоніс, Лі Чжао та ін. зосередили увагу на ринковому аналізі рідкоземельних металів, питаннях глобального розподілу, ланцюгах постачання та потенціалі їх застосування у високотехнологічному виробництві, зокрема постійних магнітів й акумуляторів [1]. У сфері робототехніки суттєвих результатів досягли Метін Сітті (дослідження магнітних м'яких композитів) та К'яра Дараіо (проектування інноваційних матеріалів для робототехнічних і біомедичних систем).

Сьогодні світова спільнота активно впроваджує енергетичний перехід на основі технологій чистої енергії, зокрема дешевої сонячної енергії, якої невдовзі може бути в надлишку. Її доступність значною мірою забезпечується використанням рідкоземельних елементів. Водночас, чимало трудових процесів залишаються важкими та небезпечними; проте розвиток штучного інтелекту й робототехніки дає змогу істотно знизити витрати на працю і видобуток сировини, а також знайти альтернативу рідкоземельним елементам, замінюючи їх на поширеніші – цирконій, кремній, графен. Сукупна дія цих чинників сприяє здешевленню та доступності більшості товарів [2].

Питання пошуку шляхів постачання рідкоземельних елементів, а також визначення майбутніх загроз і тенденцій розвитку конкуренції у сфері доступу до ресурсів залишаються недостатньо вивченими, що зумовлює необхідність їх подальшого наукового дослідження.

Постановка завдання. Метою статті є проведення ґрунтовного аналізу логістичних шляхів постачання рідкоземельних елементів у робототехнічний сектор і здійснення прогнозування динаміки ринку цих елементів з урахуванням впливу війни та інших сучасних обставин.

Виклад основного матеріалу дослідження. Рідкоземельні елементи, часто означувані як «метали майбутнього», є невід'ємним ресурсом для формування інноваційних рішень у робототехнічній галузі. Зростання масштабів їх використання зумовлене прогресом у сфері матеріалознавства та постійним підвищенням технологічної складності роботизованих систем.

Для створення сучасних промислових роботів необхідне використання низки рідкоземельних елементів, кількісний та якісний склад яких визначається конструктивними особливостями, функціональним призначенням і типом застосованих компонентів. Зазвичай, до складу сучасних роботизованих систем входять такі рідкоземельні елементи (РЗЕ): неодим (Nd), диспрозій (Dy), тербій (Tb), європій (Eu), ітрій (Y), гадоліній (Gd), лантан (La) та ін. У середньому промисловому роботі вміст РЗЕ коливається в межах від 500 г до 1 кг, зокрема неодиму – близько 300–500 г, диспрозю – 50–100 г, тербію – 10–30 г, тоді як інші елементи присутні у менших кількостях [3].

РЗЕ мають вирішальне значення для створення високоефективних і надійних промислових роботів, забезпечуючи високу магнітну потужність, термостійкість і стабільність сенсорних систем. У зв'язку з цим, провідні країни-виробники робототехніки – Японія, Китай, Німеччина та США – активно розробляють стратегії диверсифікації та пошуку альтернативних джерел постачання цих матеріалів.

Згідно зі звітом Міжнародної федерації робототехніки (IFR, International Federation of Robotics) за 2025 рік, Китай утримує провідні позиції на світовому ринку робототехніки, забезпечивши 54 % глобальних інсталяцій промислових роботів у 2024 році. Протягом цього періоду в країні було встановлено понад 295 тис. одиниць, що є рекордним показником за всю історію спостережень. Вперше частка вітчизняних виробників перевищила іноземних постачальників, досягнувши 57 % внутрішнього ринку. Очікується, що темпи зростання китайського виробництва зберігатимуться на рівні близько 10 % щорічно до 2028 року [4].

У 2024 році Японія зберегла статус другого за масштабами ринку промислових роботів, установивши 44,5 тис. одиниць, що на 4 % менше, ніж у попередньому році. Водночас у Європі кількість інсталяцій скоротилася на 8 % – до 85 тис. одиниць, із яких 80 % припадає на країни ЄС (67,8 тис. одиниць). Незважаючи на спад, попит у регіоні підтримується тенденцією до перенесення виробничих потужностей ближче до ринку споживання, а середньорічний темп зростання у 2019–2024 рр. становив 3 %. Німеччина залишається найбільшим ринком роботів у Європі та п'ятим у світі, із 26982 встановленими одиницями (32 % європейського ринку), що лише трохи менше рекордного рівня 2023 року [4].

На рис. 1 зображено щорічні установки промислових роботів у 2024 році на десяти найбільших ринках світу.

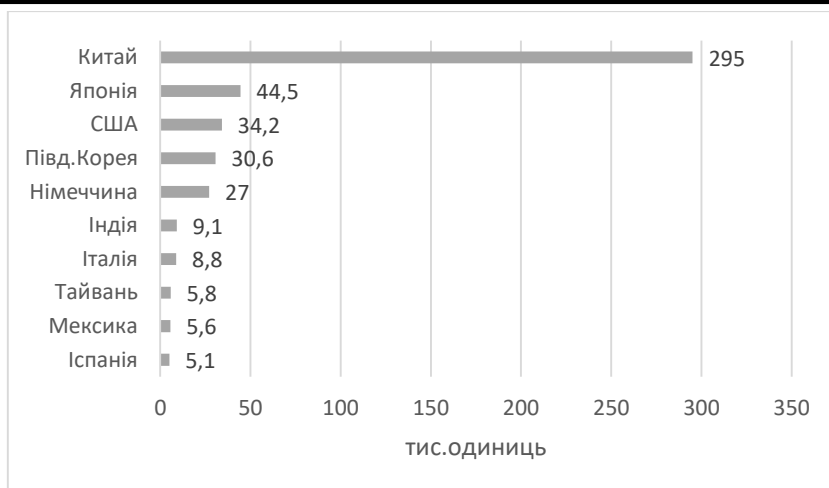


Рис. 1. Щорічні установки промислових роботів у 2024 році на десяти найбільших ринках світу

Джерело: [4]

У 2024 році в Північній Америці було встановлено 50100 промислових роботів, що на 10 % менше порівняно з 2023 роком; це четвертий рік поспіль, коли показник перевищує 50 тис. одиниць. На США припадало 68 % інсталяцій, кількість яких зменшилася на 9 % і склала 34200 одиниць; при цьому країна, маючи незначну кількість власних виробників, імпортує більшість роботів із Японії та Європи. Встановлення в Канаді скоротилося на 12 %, до 3800 одиниць, причому 47 % припадає на автомобільну промисловість, що зумовлено інвестиційними циклами цієї галузі [4].

Світовий ринок сервісних роботів продовжує демонструвати динамічне та стає зростання в усіх основних сегментах: професійних, медичних і споживчих. Зокрема, найбільш значущі прирости спостерігаються у сфері медичних роботів (+91 %), що свідчить про зростання попиту на автоматизацію в охороні здоров'я, у професійному сегменті (+9 %) та на ринку споживчих роботів (+11 %), що сигналізує про широку адаптацію роботів у повсякденному житті та виробництві [4].

На рис. 2 представлено динаміку щорічного встановлення промислових роботів у світі в період з 2010–2025 рр.

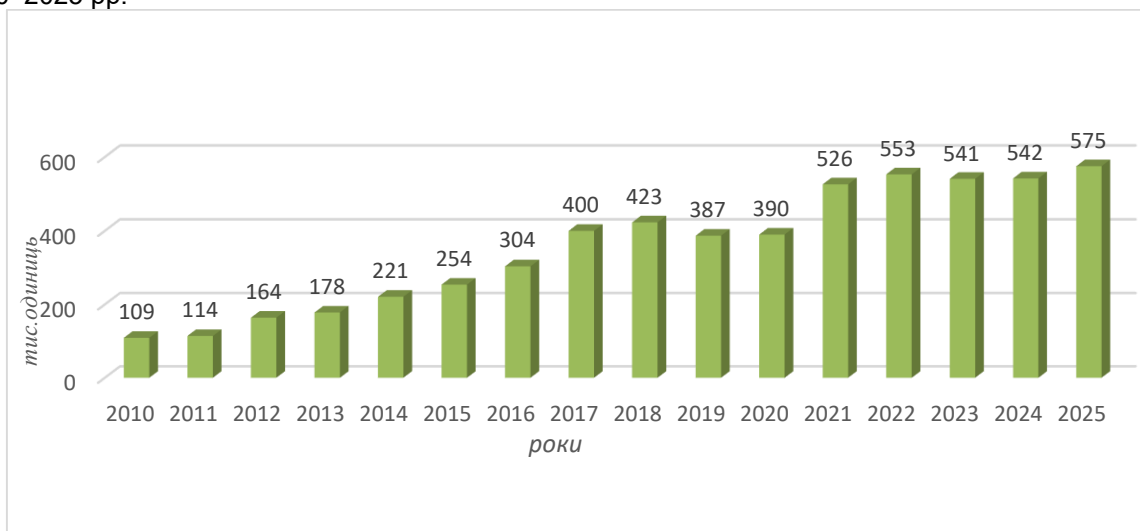


Рис. 2. Щорічне встановлення промислових роботів у світі в з 2010–2025 рр.

Джерело: [4]

Однією з ключових передумов для створення високотехнологічних, конкурентоспроможних сервісних роботів є гарантування безперебійного доступу до стратегічно важливих металів та матеріалів, що використовуються у виробництві робототехніки. Дефіцит таких ресурсів істотно впливає на інноваційний потенціал галузі та визначає майбутню динаміку її розвитку.

Подальший розвиток галузі сервісної робототехніки значною мірою обумовлений впровадженням ефективних, технологій видобутку і переробки сировини. Це становить стратегічний виклик у контексті забезпечення ресурсної незалежності та підвищення стійкості постачання матеріалів для робототехнічної індустрії.

Критично важливі сировинні матеріали визначають економічну стабільність і стратегічну автономію ЄС, будучи основою для ключових секторів – безвуглецевої промисловості, цифрових технологій, аерокосмічної галузі та оборони. Водночас ЄС значною мірою залежить від імпорту таких ресурсів, оскільки власне виробництво обмежується переважно переробкою, а не видобутком. У багатьох випадках імпорт здійснюється від одного-двох партнерів, що підвищує ризик перебоїв у постачанні для стратегічних технологічних галузей.

У 2022 році імпорт продуктів РЗЕ зріс, у 2023 році стабілізувався, а в 2024 році різко скоротився (рис. 3). У 2023 році ціни знизилися на 15 %, проте у 2024 році повернулися до рівня 2022 року. Співвідношення імпорту до експорту за обсягом у 2023 році становило 2,3, тобто на кожен експортовану тонну припадало 2,3 тонни імпорту. Основними постачальниками РЗЕ до ЄС були Китай (46 %), Росія (28 %) і Малайзія (20 %), а частка трьох провідних імпортерів перевищувала 90 % [1; 5; 6].

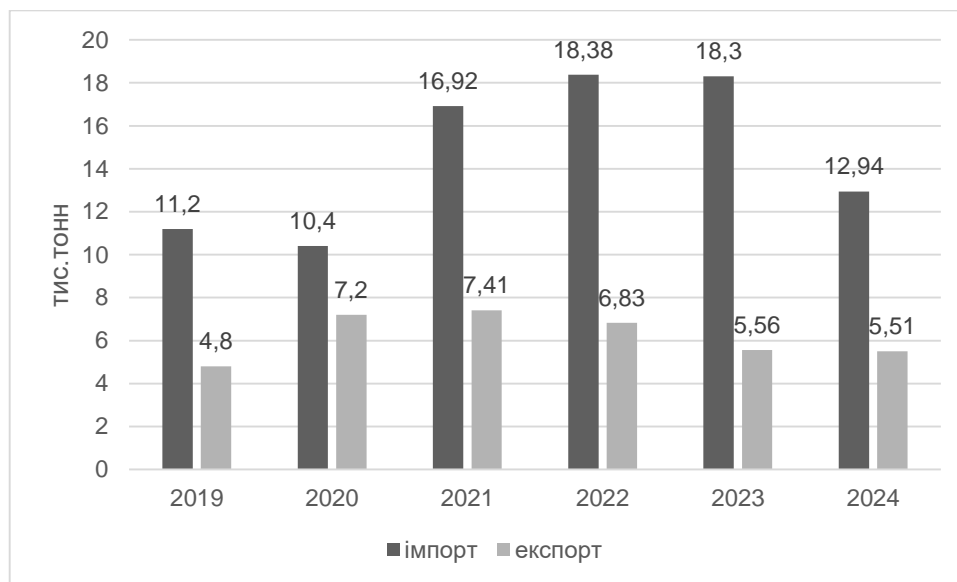


Рис. 3. Імпорт та експорт РЗЕ у ЄС, з 2010– 2024 рр.

Джерело: [1; 5; 6]

Імпорт критично важливої сировини до ЄС у 2019 (2021 для РЗЕ) – 2024 рр. скоротився, крім боратів (зростання між 2023 і 2024 рр.) та галію. Основними партнерами для магнію, феро-ніобію, боратів і галію залишалися постачальники, що забезпечували понад 70 % імпорту в ЄС. У 2024 р. зафіксовано зростання цін на імпорт РЗЕ, галію, сурми та природного графіту, тоді як вартість магнію, феро-ніобію й боратів зменшилася [5; 6].

ЄС продемонстрував значну імпорتنу залежність у 2024 році від Китаю щодо магнію та галію, від Бразилії – щодо фероніобію, від Туреччини – щодо боратів, а від Таджикистану – щодо сурми. Основну частину постачання РЗЕ забезпечували Китай, Малайзія та Росія, на яких разом припадало 95 % імпорту до ЄС [5].

Значна концентрація поставок критично важливих рідкоземельних елементів у кількох країнах-постачальниках поглиблює стратегічну залежність ЄС, що підсилює ризики виникнення перебоїв у ланцюгах постачання та критичної вразливості у випадку геополітичних чи економічних потрясінь.

Робототехніка – галузь, що поєднує механіку, електроніку, комп'ютерні науки та штучний інтелект, формуючи основу сучасних технологічних рішень. Її розвиток забезпечує автономність, точність, швидкість і здатність систем до адаптації, що робить можливим їх широке застосування у промисловості, медицині, сільському господарстві, транспорті, обороні та космічних дослідженнях. Світовий ринок поділяється на промислову (близько 80 %) та сервісну (приблизно 20 %) робототехніку, де остання демонструє найвищі темпи зростання, особливо в логістичному секторі. На відміну від уже консолідованої промислової робототехніки, сервісна залишається динамічною і перспективною сферою інноваційного розвитку [7].

Екзоскелети становлять перспективний напрям розвитку робототехніки, що поєднує медичні, промислові та оборонні застосування. Як біомеханічні системи, призначені для підтримки та посилення фізичних можливостей людини, вони активно впроваджуються у реабілітаційній медицині та важкій праці. Подальший розвиток технологій екзоскелетів сприятиме підвищенню ефективності та безпеки людської діяльності.

У сучасній робототехніці, зокрема в розробленні екзоскелетів, спостерігається тенденція до мінімізації розмірів і ваги ключових компонентів, таких як двигуни, шестерні та силові блоки. Високоточна електроніка та чутливі датчики залишаються критично важливими елементами систем.

Використання легких металевих сплавів і композитних матеріалів забезпечує оптимальне поєднання міцності, енергоефективності та ергономічності конструкцій.

На рис. 4 представлений огляд сировинних матеріалів, які використовуються в робототехніці.

Стратегічна сировина

Берилій використовується у сплавах, електрооптичних системах і роботизованих хірургічних пристроях
 Галій використовується для зв'язку, електрооптичних та енергетичних систем
 Титан використовується у сплавах і високоміцних конструкційних сталях для приводів і маніпуляторів роботів
 Індій використовується у сполуках для електрооптичних систем, сенсорів та шкіри для нош
 Ніобій застосовується як мікролегуючий елемент у високоміцній конструкційній сталі
 Бор використовується в неодим-залізо-бор (NdFeB) постійних магнітах або як мастило
 Диспрозій важлива добавка до постійних магнітів NdFeB
 Неодим у постійних магнітах NdFeB
 Празеодим разом з неодимом у постійних магнітах

Be

Ga

Ti

In

Nb

B

Dy

Nd

Pr



Cu

Al

Cr

Mn

Mo

Ni

Fe

Мідь широко використовується в дротах або в корозійностійких сплавах

Алюміній як легкий і високоефективний сплав у різних компонентах

Хром необхідний для нержавіючої сталі та інших сплавів у роботах

Марганець необхідний для сталі. Сплави, що використовуються для багатьох деталей роботів

Молібден використовується у нержавіючій сталі, сплавах для багатьох компонентів робота

Нікель в гальванічному покритті або в рамах, кріпленнях і з'єднувачах з нержавіючої сталі

Залізо у вигляді чавуну або сталевих сплавів для різних компонентів

Рис. 4. Матеріали, що використовується у робототехніці

Джерело: [7]

З усіх матеріалів, які зараз використовуються у робототехніці, бор, празеодим, диспрозій, ніобій, кобальт, індій, літій, галій, сурма, титан, тантал, стронцій, ванадій, вольфрам, вуглецевий графіт та платинові метали є критично важливими у списку. На рис. 5 показані ключові країни в логістичних мережах постачання сировини до роботів [7–9].

Загалом сорок чотири види сировини використовуються у сфері робототехніки. При цьому ЄС залишається повністю залежним від зовнішніх поставок 33 позицій. Китай домінує на ринку з часткою 52 %, далі за обсягами постачання йдуть Південно-Африканська Республіка та Російська Федерація. Власне виробництво в ЄС становить лише 2 % загального обсягу необхідних ресурсів. Майже чверть матеріалів, необхідних для робототехніки, надходить із широкого кола менших постачальницьких країн, що свідчить про високий потенціал диверсифікації джерел сировини. ЄС посідає провідні позиції серед виробників перероблених матеріалів (понад 20 % світового виробництва), разом із США та Китаєм. Але виробничі потужності залишаються повністю залежними від імпорту низки перероблених матеріалів, що застосовуються у сфері робототехніки, зокрема спеціальних алюмінієвих сплавів, напівпровідників та кевларового волокна. Основними постачальниками цих ресурсів є США, а також Індія – передусім у сегменті алюмінієвих сплавів. На даний час найбільшим центром виробництва й експорту компонентів є США, тоді як Китай і Японія посідають друге та третє місця відповідно.

ЄС залишається високозалежним від імпорту шести ключових компонентів для робототехніки – мікропроцесорів, редукторів, графічних процесорів, магнітів, літій-іонних батарей і частотних перетворювачів. США домінують у постачанні приводів, контролерів і GPU, Японія – у виробництві редукторів і датчиків, а Китай – у сегменті магнітів і літій-іонних акумуляторів. Серед інших важливих постачальників виокремлюються Ізраїль, Південна Корея та Канада, тоді як ЄС входить до трійки світових лідерів із виробництва датчиків і приводів. Загалом Азія (переважно Японія) утримує провідні позиції у виробництві промислових роботів (47 %), тоді як ЄС (41 %) та США зосереджуються переважно на секторі сервісної робототехніки [4; 7].

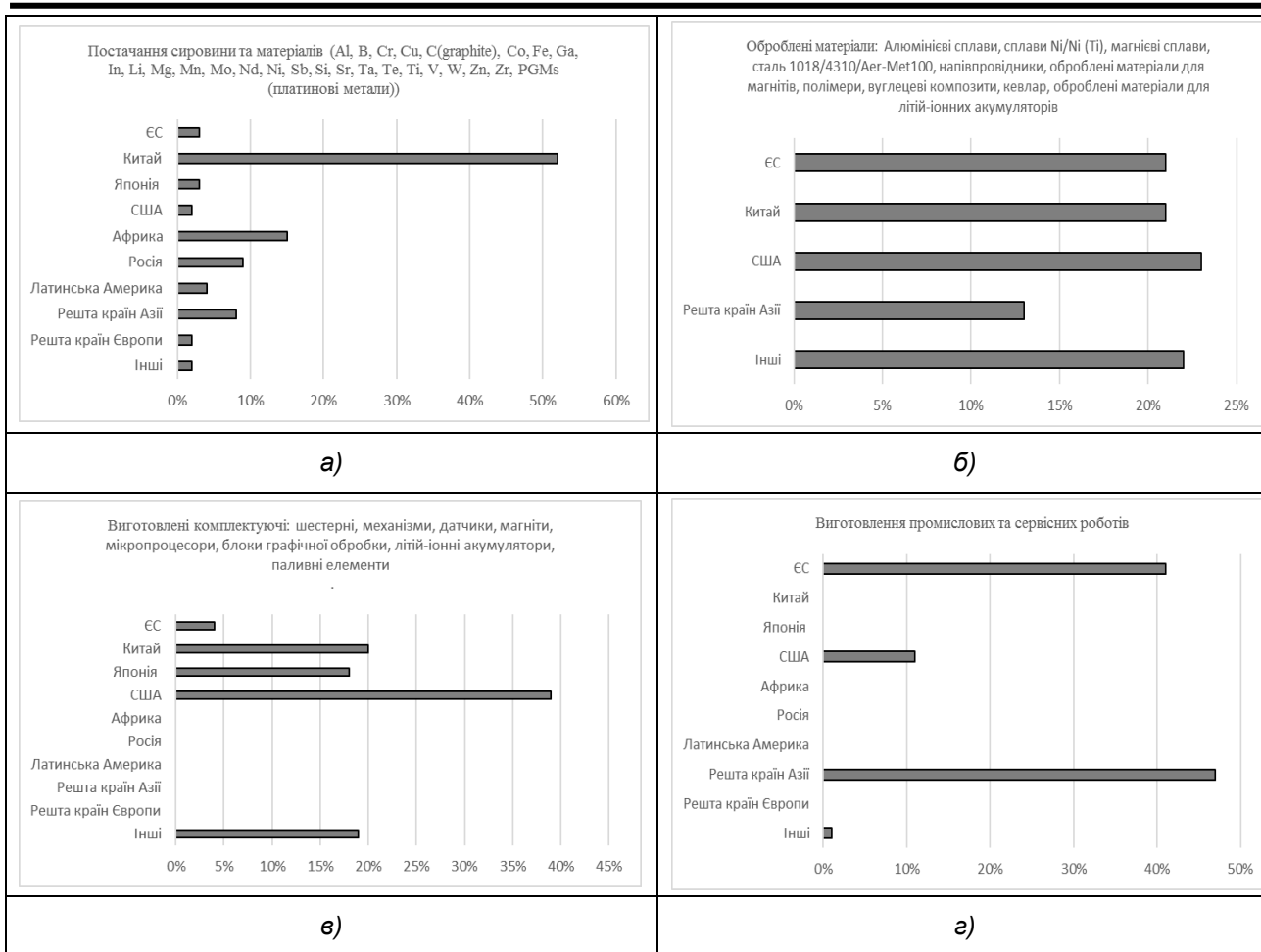


Рис. 5. Ключові країни в логістичних мережах постачання сировини до робототехніки: а) країни, які постачають критичну сировину та матеріали; б) країни, які виготовляють вузли; в) країни, які виготовляють комплектуючі; г) країни, які постачають виготовлені роботи

Джерело: [7–9]

Згідно зі звітом «World Robotics 2025», у 2024 році було встановлено 542 тис. промислових роботів, що більш ніж удвічі перевищує показник десятирічної давності. Встановлення понад півмільйона одиниць фіксується четвертий рік поспіль, причому Азія забезпечила 74 % нових інсталяцій, тоді як Європа та США – 16 % і 9 % відповідно. Активна цифровізація та автоматизація виробництва зумовили стабільне зростання попиту, унаслідок чого світовий парк промислових роботів у 2024 році досяг 4,66 млн одиниць, що на 9 % більше, ніж у попередньому році [4]. На рис. 6 показана частка країн у виробництві сервісних та промислових роботів.

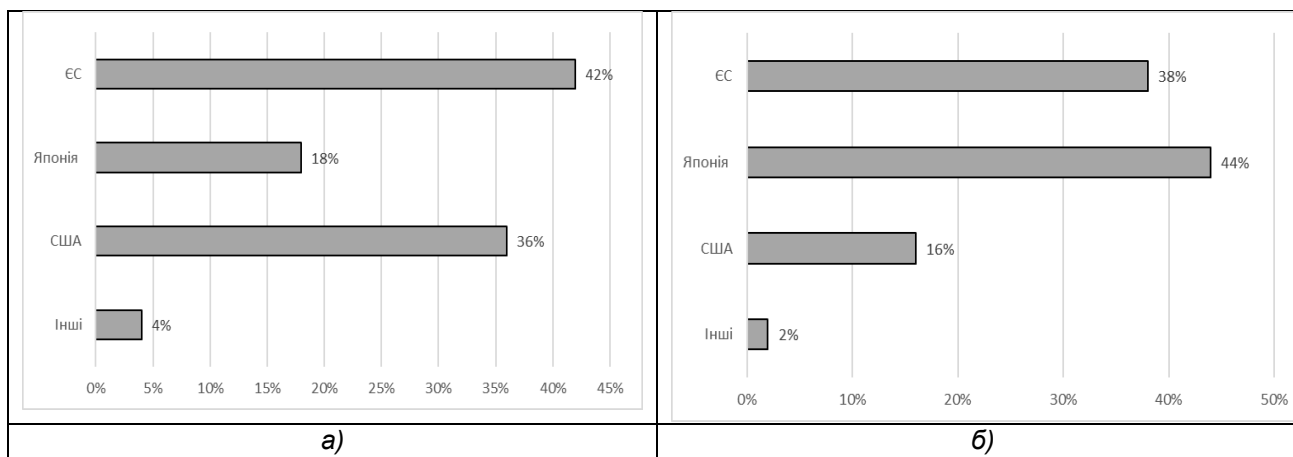


Рис. 6. Частка країн у виробництві сервісних та промислових роботів: а) країни, які виготовляють сервісні роботи; б) країни, які виготовляють промислові роботи

Джерело: [4; 7]

У найближчі роки для глобального ринку робототехніки прогнозується загальне зростання на рівні близько 11 %, при цьому середньорічний темп приросту очікується на рівні менше ніж 7 %, що свідчить про помірну, але стабільну динаміку розвитку галузі [4]. Експерти робототехнічної галузі відзначають значний потенціал зростання ринку сервісних роботів, на відміну від більш насиченого сегмента промислової робототехніки, що характеризується вищою конкуренцією та нижчими нормами прибутковості. Подальший розвиток ринку значною мірою залежатиме від створення й впровадження інноваційних матеріалів, тоді як кількісне прогнозування попиту на сировину залишається складним через високу мінливість технологічних і ринкових чинників [7; 10].

Згідно з прогнозами Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР) та Міжнародного валютного фонду (МВФ), у 2025–2026 роках очікується помірно глобальне економічне зростання в межах 2,9–3,1 %, хоча геополітична нестабільність, зокрема конфлікти у Східній Європі та на Близькому Сході, а також перебої в міжнародній торгівлі створюють суттєві ризики для світової економіки. Робототехнічна галузь, попри вплив макроекономічних чинників, зберігає позитивну динаміку розвитку. Очікується, що кількість нових інсталяцій роботів у світі зросте на 6 % – до 575 тис. одиниць у 2025 році, а до 2028 року перевищить 700 тис. одиниць, що підтверджує стійку тенденцію до розширення ринку [4].

Згідно зі звітом The Business Research Company про світовий ринок робототехніки за 2025 рік, світовий ринок робототехнічних технологій демонструє стійке зростання: обсяг у 2024 році становив 95,87 млрд доларів, з прогнозом досягти 108,03 млрд у 2025 році (CAGR 12,7 %) і 193,9 млрд доларів у 2029 році (CAGR 15,7 %). Драйверами розвитку залишаються впровадження сенсорних систем, промислова автоматизація, попит на ефективні та людиноподібні рішення, поширення колаборативної та побутової робототехніки, інтеграція 5G. Ключові технологічні тенденції – інновації у сфері ШІ, розвиток м'якої робототехніки, моделі RaaS, посилення співпраці людини та машини. Незначне зниження прогнозу (на 0,7 %) обумовлене впливом тарифних бар'єрів і торговельної напруженості, що негативно впливають на інноваційність та конкурентоспроможність сектору. Азіатсько-Тихоокеанський регіон залишається лідером і демонструватиме найвищі темпи зростання у середньостроковій перспективі [8].

Опубліковані дані дають змогу перевірити їхню точність і достовірність шляхом авторського прогнозування. Прогнозування кількості промислових роботів на наступні три роки здійснювали із застосуванням методів аналізу часових рядів у програмному середовищі Statistica, а розрахункові результати подано в таблиці 1.

Таблиця 1

Модель для визначення прогнозу кількості встановлених промислових роботів у світі

CaseNo.	Forecasts; Model:(1,0,0) Seasonal lag: 2 Input: кіл. встанов. промисл. роботів у світі (тис. шт) Start of origin: 1 End of origin: 16			
	Forecast	Lower 90,0000	Upper 90,0000	Std.Err.
2026	574,8044	471,9413	677,6675	58,6766
2027	574,6089	429,1633	720,0545	82,9672
2028	574,4134	396,3099	752,5169	101,5963

Примітка. 1 стовбець – це прогноз; 2 – нижня межа прогнозу; 3 – верхня; 4 – стандартна похибка.

Джерело: складено за результатами авторського моделювання

За результатами моделі (1,0,0) очікується зменшення кількості встановлених промислових роботів приблизно на 33 тис. одиниць протягом аналізованого періоду (див. табл. 1). Світовий ринок промислових роботів, згідно з прогнозом на три роки, зазнає незначного зниження рівня інсталяцій – на 0,07 %, однак залишиться на достатньо високому рівні, характерному для 2025 року (574 тис. одиниць на рік), з яких частка виробництва ЄС становитиме 14 % світового обсягу. Найвищі темпи зростання очікуються у сегменті сервісних роботів (до 10 %): це логістичні, медичні роботи та роботи для обслуговування. Європейський ринок демонструє динамічну сталість (очікуване зростання – до 4 % до 2028 року). Регіональні тенденції зростання суттєво відрізняються, на рис. 7 показані щорічні установки промислових роботів за регіонами у 2023–2025 роках із прогнозом на 2026–2028 роки.

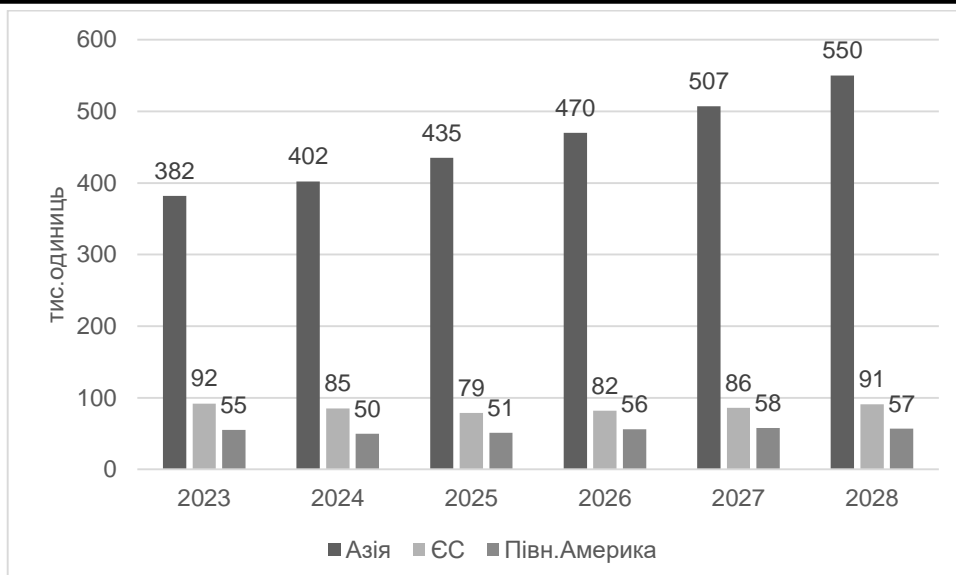


Рис. 7. Щорічні установки промислових роботів за регіонами у 2023–2025 роках із прогнозом на 2026–2028 роки

Джерело: [4]

Ринок робототехніки й далі залишається чутливим до впливу світових макроекономічних чинників, які залишаються нестабільними. Поряд із цим, актуальними залишаються проблеми геополітичної напруженості, збройних конфліктів і торговельних обмежень. На тлі збільшення витрат на робочу силу в багатьох країнах, очікується зниження темпів зростання світової економіки. Незважаючи на суттєві регіональні відмінності, глобальна динаміка галузі зростає; Азіатсько-Тихоокеанський регіон зберігає лідерство й забезпечуватиме найвищі темпи зростання у світі.

Робототехніка є однією з ключових технологій сучасності, що має значний потенціал для подальшого розвитку та широкого застосування. Її еволюція потребує комплексних досліджень у галузях матеріалознавства, електроніки, дизайну та програмного забезпечення, спрямованих на подолання технологічних викликів як апаратного, так і програмного рівнів.

Із 44 видів сировини, що застосовуються у робототехніці, 19 мають статус критично важливих для економіки ЄС. Китай забезпечує понад 40 % світових поставок, тоді як Південна Африка та Росія постачають відповідно 10 % і 9 %. Хоча точні темпи зростання важко прогнозувати через різноманітність секторів, очікується, що найдинамічніше розвиватиметься ринок сервісної робототехніки, зокрема логістичні роботи та екзоскелети, для яких прогнозуються середньорічні темпи зростання до 30–40 % протягом наступних кількох років.

На рівні сировинного забезпечення пріоритетним завданням ЄС є гарантування доступу та диверсифікація постачань критично важливих матеріалів, зокрема хрому, кобальту, молібдену, графіту, нікелю, магнію, ванадію, міді, олова, сурми та вісмуту, для яких внутрішнє виробництво є обмеженим або відсутнім.

Для зміцнення ланцюга постачання у сфері робототехніки необхідно реалізувати комплекс взаємопов'язаних заходів, спрямованих на диверсифікацію джерел сировини, підвищення виробничих потужностей ЄС, а також розвиток переробки, повторного використання та матеріального заміщення. Важливим напрямом є підтримка наукових досліджень і розробок, зокрема у сфері створення легких і високоміцних конструкційних матеріалів, а також удосконалення технологій, програмного забезпечення та інженерних рішень. Особливу увагу слід приділити підтримці малих і середніх підприємств як рушійної сили інновацій та зростання європейського ринку цивільної й оборонної робототехніки, а також забезпеченню достатньої кількості висококваліфікованих фахівців для підтримки технологічної спроможності галузі.

Висновки з проведеного дослідження. Робототехнічна галузь використовує сорок чотири види рідкоземельних елементів, з яких дев'ятнадцять є критично важливими; основне постачання забезпечують Китай, ПАР, Росія та інші країни, що створює потенціал для диверсифікації. Виробництво галузі зберігає суттєву імпортозалежність від спеціалізованих матеріалів і компонентів, зокрема напівпровідників і акумуляторів; США, Японія й Китай домінують у провідних виробничих сегментах, а ЄС утримує позиції в сенсорних рішеннях. Світовий ринок демонструє динамічне зростання (очікуване – до 11 % до 2030 року), стимульоване автоматизацією та інноваціями, причому Азіатсько-Тихоокеанський регіон є лідером цього процесу. Водночас, тарифні обмеження між США та іншими країнами становлять значний ризик для галузі, уповільнюючи інновації та знижуючи глобальну конкурентоспроможність на тлі зростаючої торговельної напруженості.

Критично важливі рідкоземельні елементи є основою розробки й виробництва високотехнологічних компонентів для робототехніки – зокрема високопотужних магнітів, напівпровідників, електроніки та спеціальних сплавів, що забезпечують ефективність, точність і довговічність робототехнічних систем. Їхній дефіцит або перебої в поставках можуть призвести до уповільнення темпів упровадження інновацій, зростання витрат і підвищення стратегічної вразливості галузі. Висока імпортозалежність вимагає активного пошуку шляхів диверсифікації джерел, розвитку технологій рециклінгу та локалізації виробництва для підвищення стійкості сектору.

Література

1. Новосад І. Я., Руська Р. В., Пласконь С. А. Рідкоземельні метали: ключові компоненти сучасних технологій. *Інноваційна економіка*. 2024. № 1[97]. С. 222-238.
2. Kurzweil R. Ray Kurzweil on how AI will transform the physical world. *The Economist*. 2024. URL: <https://www.economist.com/by-invitation/2024/06/17/ray-kurzweil-on-how-ai-will-transform-the-physical-world> (дата звернення: 27.09.2025).
3. Vasileios R., Edoardo R., Amin Kassab. Developing a supply chain for recycled rare earth permanent magnets in the EU. *CEPS in depth analysis*. 2023. URL: https://cdn.ceps.eu/wp-content/uploads/2023/07/CEPS-In-depth-analysis-2022-07_Supply-chain-for-recycled-rare-earth-permanent-magnets-1.pdf (дата звернення: 27.09.2025).
4. Global Robot Demand in Factories Doubles Over 10 Years. *International Federation of Robotics*. 2025. URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-robot-demand-in-factories-doubles-over-10-years> (дата звернення: 27.09.2025).
5. International trade in critical raw materials. *European Commission*. 2025. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=International_trade_in_critical_raw_materials (дата звернення: 27.09.2025).
6. Trade in rare earth elements increases in 2022. *European Commission*. 2023. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/w/ddn-20231113-1?language=uk&etrans=uk> (дата звернення: 27.09.2025).
7. Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU. *European Commission*. 2020. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8e167f11-077c-11eb-a511-01aa75ed71a1/language-en> (дата звернення: 27.09.2025).
8. Robotics Technology Global Market Report 2025. *The Business Research Company*. 2025. URL: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/robotics-technology-global-market-report> (дата звернення: 27.09.2025).
9. Tercero L. Report on the future use of critical raw materials (SCRREEN Project, Deliverable D2.3). *European Commission*. 2019. URL: <https://screen.eu/wp-content/uploads/2020/01/SCRREEN-D2.3-Report-on-the-Future-Use-of-CRM.pdf> (дата звернення: 27.09.2025).
10. Global spending on robotics from 2000 to 2025. *Statista*. 2025. URL: https://www.statista.com/statistics/943113/spending-on-robotics-worldwide-by-category/?utm_source=chatgpt.com%20%22Global%20robotics%20market%20by%20category%202000-2025 (дата звернення: 27.09.2025).

References

1. Novosad, I.Ya., Ruska, R.V. and Plaskon, S.A. (2024), "Rare earth metals: key components of modern technologies", *Innovatsiina ekonomika*, no. 1[97], pp. 222-238.
2. Kurzweil, R. (2024), "Ray Kurzweil on how AI will transform the physical world", *The Economist*, available at: <https://www.economist.com/by-invitation/2024/06/17/ray-kurzweil-on-how-ai-will-transform-the-physical-world> (access date September 27, 2025).
3. Vasileios, R., Edoardo, R. and Amin, Kassab (2023), "Developing a supply chain for recycled rare earth permanent magnets in the EU", *CEPS in depth analysis*, available at: https://cdn.ceps.eu/wp-content/uploads/2023/07/CEPS-In-depth-analysis-2022-07_Supply-chain-for-recycled-rare-earth-permanent-magnets-1.pdf (access date September 27, 2025).
4. International Federation of Robotics (2025), Global Robot Demand in Factories Doubles Over 10 Years, available at: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-robot-demand-in-factories-doubles-over-10-years> (access date September 27, 2025).
5. European Commission (2025), International trade in critical raw materials, available at: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=International_trade_in_critical_raw_materials (access date September 27, 2025).
6. European Commission (2023), Trade in rare earth elements increases in 2022: <https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/w/ddn-20231113-1?language=uk&etrans=uk> (access date September 27, 2025).

7. European Commission (2020), Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU, available at: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8e167f11-077c-11eb-a511-01aa75ed71a1/language-en> (access date September 27, 2025).

8. The Business Research Company (2025), Robotics Technology Global Market Report 2025, available at: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/robotics-technology-global-market-report> (access date September 27, 2025).

9. Tercero, L. (2019), Report on the future use of critical raw materials (SCRREEN Project, Deliverable D2.3), *European Commission*, available at: <https://screen.eu/wp-content/uploads/2020/01/SCRREEN-D2.3-Report-on-the-Future-Use-of-CRM.pdf> (access date September 27, 2025).

10. Statista (2025), Global spending on robotics from 2000 to 2025, available at: https://www.statista.com/statistics/943113/spending-on-robotics-worldwide-by-category/?utm_source=chatgpt.com%20%22Global%20robotics%20market%20by%20category%202000-2025 (access date September 27, 2025).

Новосад І.Я., Руська Р.В., Пласконь С.А.

ІННОВАЦІЙНИЙ ПОТЕНЦІАЛ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У СТВОРЕННІ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Мета. Проведення ґрунтового аналізу логістичних шляхів постачання рідкоземельних елементів у робототехнічний сектор і здійснення прогнозування динаміки ринку цих елементів з урахуванням впливу війни та інших сучасних обставин.

Методика дослідження. У дослідженні використано системний та порівняльний аналіз для оцінки ролі рідкоземельних елементів у робототехнічному секторі, економіко-статистичні методи та аналіз часових рядів - для визначення динаміки попиту й пропозиції та формування прогнозів, а також графічні методи візуалізації для узагальнення та інтерпретації отриманих результатів.

Результати дослідження. Проаналізовано структурні характеристики глобального ринку робототехніки та визначено масштаби використання рідкоземельних елементів, яких у галузі зафіксовано сорок чотири, з них дев'ятнадцять ідентифіковано як критично важливі. Встановлено, що імпортозалежність виробництва залишається високою, зокрема у сфері напівпровідників, акумуляторів і спеціалізованих сплавів. Обґрунтовано, що домінування Китаю, ПАР, Росії та інших країн у постачанні ключових рідкоземельних ресурсів зумовлює потребу в диверсифікації ланцюгів постачання та посилює геоекономічні ризики.

Визначено, що технологічне лідерство США, Японії, Китаю та ЄС у різних сегментах робототехніки супроводжується стійким зростанням виробництва, обумовленим інтенсивною автоматизацією та впровадженням інновацій. Доведено, що критично важливі рідкоземельні елементи істотно впливають на технологічну спроможність сектору та формують його стратегічну вразливість у контексті глобальних торговельних напружень і тарифних бар'єрів. Узагальнено, що зазначені чинники визначають перспективи розвитку галузі та окреслюють необхідність розроблення адаптивних політик ресурсної безпеки.

Наукова новизна результатів дослідження. Вперше комплексно обґрунтовано інтегровану роль рідкоземельних елементів у технологічному розвитку та стратегічній стійкості сектору робототехніки, встановлено механізми формування імпортозалежності й ключові вразливості ланцюгів постачання, що, на відміну від існуючих підходів, дає змогу розробити цільові заходи диверсифікації та політики ресурсної безпеки.

Практична значущість результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути застосовані для удосконалення процесів забезпечення рідкоземельними матеріалами, а також для розроблення рішень, спрямованих на ефективну відповідь майбутнім викликам і підсилення конкурентних позицій на ринку стратегічних ресурсів.

Ключові слова: рідкоземельні елементи (РЗЕ), критично важливий матеріал, робототехніка, статистичний метод, прогнозування.

Novosad I.Ya., Ruska R.V., Plaskon S.A.

INNOVATIVE POTENTIAL OF RARE EARTH ELEMENTS IN CREATING ROBOTIC SYSTEMS

Purpose. Conducting a thorough analysis of logistics routes for supplying rare earth elements to the robotics sector and forecasting market dynamics for these elements, taking into account the impact of the war and other current circumstances.

Methodology of research. The study uses systematic and comparative analysis to assess the role of rare earth elements in the robotics sector, economic and statistical methods and time series analysis to determine the dynamics of supply and demand and make forecasts, as well as graphical visualization methods to summarize and interpret the results obtained.

Findings. The structural characteristics of the global robotics market have been analysed and the scale of use of rare earth elements, of which there are forty-four in the industry, nineteen of which have been identified as critically important, has been determined. It has been established that production remains highly

dependent on imports, particularly in the field of semiconductors, batteries and specialised alloys. It has been argued that the dominance of China, South Africa, Russia and other countries in the supply of key rare earth resources necessitates the diversification of supply chains and increases geo-economic risks.

It has been determined that the technological leadership of the United States, Japan, China and the EU in various segments of robotics is accompanied by steady growth in production, driven by intensive automation and innovation. It has been proven that critically important rare earth elements significantly affect the technological capacity of the sector and shape its strategic vulnerability in the context of global trade tensions and tariff barriers. It has been summarised that these factors determine the prospects for the development of the industry and outline the need to develop adaptive resource security policies.

Originality. For the first time, the integrated role of rare earth elements in the technological development and strategic sustainability of the robotics sector has been comprehensively substantiated, and the mechanisms of import dependency and key vulnerabilities in supply chains have been identified, which, unlike existing approaches, enables the development of targeted diversification measures and resource security policies.

Practical value. The results of the study can be used to improve the processes of supplying rare earth materials, as well as to develop solutions aimed at effectively responding to future challenges and strengthening competitive positions in the strategic resources market.

Key words: rare earth elements (REE), critical material, robotics, statistical method, forecasting.

Дата надходження рукопису: 06.11.2025

Дата прийняття рукопису до друку: 11.12.2025

Дата публікації: 26.12.2025