

Мехович Сергій Анатолійович, д.е.н., професор кафедри менеджменту інноваційного підприємництва та міжнародних економічних відносин, (050)402-62-12, sm261245@gmail.com, ORCID:0000-0001-7080-7609

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

Потапов Федір Вікторович, інженер-конструктор, аспірант кафедри економіки бізнесу і міжнародних економічних відносин, (068)307-38-43, potapovf333@gmail.com

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

Тюфанов Георгій Леонідович, інженер-конструктор, аспірант кафедри економіки бізнесу і міжнародних економічних відносин, (066)229-49-21, lone-wolftgl@ukr.net ("Георгій Про").

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

ВПЛИВ ПРОЦЕСІВ ДІДЖИТАЛІЗАЦІЇ НА КОНСТРУКТОРСЬКУ ДІЯЛЬНІСТЬ ВИРОБНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВ

Анотація. У статті проаналізовано сучасні процеси, що характерні для конструювання інноваційної техніки у машинобудівній галузі. Основні-це питання, що пов'язані з наслідками цифровізації. Розкрито вплив *Generative Design* і *Digital Twins* на організацію праці конструктора. Показано, що реально у нього зміниться у технічному оснащенні, як воно буде інтегровано у загальну систему конструкторської підготовки підприємства і які додаткові знання потрібні конструктору. Окремо розглянуто питання впливу системи діджиталізації на якість конструкторської діяльності. Проаналізовано показники ефективності реалізації інноваційної політики держави та її місце у глобальних рейтингах. Результати оцінювання науково-інноваційної спроможності України свідчать про потребу в розробці та впровадженні єдиної, узгодженої науково-технічної та інноваційної політики. Вони також вказують на необхідність здійснення конкретних кроків у напрямі реалізації важливих структурних змін в економіці та науці, а також технологічної модернізації виробництва та стимулювання бізнесу до інновацій, що тісно пов'язано із дослідницькою та конструкторською діяльністю. Машинобудування демонструє нижчі темпи зростання виробництва порівняно з іншими галузями. Обґрунтовано характерні тенденції, які слід очікувати в організації праці конструктора. На думку авторів, у найближчі п'ять років конструктори поступово відмовлятимуться від традиційних методів проектування, оскільки *Generative Design* та *Digital Twins* дозволяють значно скоротити час розробки нових виробів. Обґрунтовано основні напрями впливу впровадження *Generative Design* і *Digital Twins* на організацію праці конструктора, показано, що реально у нього зміниться у технічному оснащенні, як воно буде інтегровано у загальну систему конструкторської підготовки підприємства і які додаткові знання йому потрібні.

Ключові слова: конструктор, проектування, діджиталізація, генеративний дизайн, цифрові двійники.

Mekhovich Sergiy, D.E.Sc., professor of the department of management of innovative entrepreneurship and international economic relations, (050)402-62-12, sm261245@gmail.com, ORCID:0000-0001-7080-7609

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".

2, Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002.

Potapov Fedir, Design Engineer, Postgraduate Student Department of Business Economics and International Economic Relations, (068)307-38-43, potapovf333@gmail.com

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".

2, Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002.

Tyufanov Georgy, Design Engineer, Postgraduate Student, Department of Business Economics and International Economic Relations, (066)229-49-21, lone-wolftgl@ukr.net ("Georgy Pro").

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".

2, Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002.

THE IMPACT OF DIGITALIZATION PROCESSES ON THE DESIGN ACTIVITIES OF MANUFACTURING ENTERPRISES

Abstract. *The article analyzes modern processes that are characteristic of the design of innovative equipment in the machine-building industry. The main issues are related to the consequences of digitalization. The impact of Generative Design and Digital Twins on the organization of the designer's work is revealed. It is shown what will actually change in his technical equipment, how it will be integrated into the general system of design training of the enterprise and what additional knowledge the designer needs. The issue of the influence of the digitalization system on the quality of design activities is separately considered. The indicators of the effectiveness of the implementation of the state's innovation policy and its place in global rankings are analyzed. The results of the assessment of Ukraine's scientific and innovative capacity indicate the need to develop and implement a single, coordinated scientific, technical and innovation policy. They also indicate the need to take specific steps towards implementing important structural changes in the economy and science, as well as technological modernization of production and stimulating business to innovation, which is closely related to research and design activities. Mechanical engineering demonstrates lower production growth rates compared to other industries. The characteristic trends that should be expected in the organization of the designer's work are substantiated. According to the authors, in the next five years, designers will gradually abandon traditional design methods, since Generative Design and Digital Twins allow significantly reducing the time for developing new products. The main areas of influence of the implementation of Generative Design and Digital Twins on the organization of the designer's work are substantiated, it is shown what will actually change in his technical equipment, how it will be integrated into the general system of design training of the enterprise and what additional knowledge he needs.*

Keywords: *designer, design, digitalization, generative design, digital twins.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню стану машинобудівного комплексу України та визначенню тенденцій його розвитку присвятили свої праці такі вітчизняні науковці, як О. С. Другова, С. Т. Зарічна, Ю. В. Короткий, О. В. Люльов, В. А. Кучинський, С. А. Мехович, Н. Г. Пігуль,

О. В. Попов, Н. М. Покровська, С. В. Салоїд, Л. В. Соколова, Р. М. Стрільчук та інші. Найбільш суттєвою публікацією останніх років з цієї тематики, на наш погляд, слід визнати секторальний аналіз машинобудування України (2024 р.), виконаний в Інституті економічних досліджень та політичних консультацій фахівцями Є. Ангел та О. Бетлій, який ґрунтується на результатах спеціального опитування підприємств в межах Програми «Конкурентоспроможна економіка України» [1]. У аналізі висвітлено оцінку попиту серед підприємств машинобудівної галузі, яка відображає тренди інших виробничих показників галузі, зростання обсягів продажів, використання потужностей, експорт машинобудівного галузі, перешкоди для діяльності та інше. Аналіз побудовано на великому статистичному матеріалі.

Діагностичне дослідження вітчизняної промисловості було підготовлено в рамках програми ЮНІДО з зеленого промислового відновлення України [2]. Висновки, отримані з усіх розділів діагностики індустріальних країн, ґрунтуються на кількісній та якісній інформації про різні рівні економічної системи (макро-, мезо-, мікро-, продукція) і різні виміри стійкості (економічні, соціальні та екологічні). У дослідженні підтверджено важливість промислової політики в порядку денному уряду, щоб змінити тенденцію деіндустріалізації.

Л. В. Соколова представила дослідження сучасного стану машинобудівної галузі України (2019) [3]. В статті проаналізовано галузеву структуру економіки, динаміку обсягів виробництва машинобудівної галузі за ряд років у її зіставленні з промисловий комплексом у цілому. На основі даних про динаміку індексів конкурентоспроможності машинобудування України на зовнішньому ринку зроблено висновки про відсутність її конкурентних переваг. Окреслено основні фактори, що стримують розвиток та модернізацію досліджуваної галузі, визначено основні проблеми її функціонування. Приведено орієнтовний перелік можливих напрямків стабілізації негативної ситуації, яка склалася у машинобудівній галузі. Встановлено, що адекватний комплекс заходів повинен бути проведений не лише на макрорівні, але й на рівні підприємств. Дослідник зробила висновок, що для постійної модернізації виробничих фондів потрібен

притік інвестицій. Незважаючи на те, що в Україні майже третя частина іноземних інвестицій спрямована у промисловість, фінансуються переважно низькотехнологічні та сировинні виробництва (металургія, загальна хімія, харчова промисловість). Вітчизняне машинобудування стає все менш привабливим для закордонних інвесторів.

О. С. Свістунов у своїй статті здійснив аналіз показників українських підприємств машинобудівної промисловості порівняно з основними індикаторами розвитку світового ринку (2020) [4]. За результатами проведеного аналізу встановлено, що світова промисловість характеризується різким зростанням рівня застосування цифрових технологій, нарощуванням технологічності та спеціалізованості виробництв. Виявлено, що Четверта промислова революція призводить до необхідності впровадження потужних змін у машинобудівній індустрії. У світовому економічному просторі галузь машинобудування впродовж останніх років займала перші позиції за величиною капіталовкладень у наукові дослідження, розробки та інновації. При цьому сектор із виробництва машин та устаткування залишається аутсайдером за цим напрямом. Окреслено проблемні питання вітчизняного машинобудування та шляхи їх вирішення.

У публікації Національного інституту стратегічних досліджень зазначено, що машинобудівна промисловість в Україні є стратегічно важливою галуззю для підтримки обороноздатності країни, її технологічного та інноваційного розвитку, долучення до глобальних ланцюгів створення продукції (2023) [5]. Автори публікації вважають, що українські виробники мають відповідні обладнання та досвід, щоб долучитися до ланцюгів виробництва енергетичного машинобудування – обладнання для відновлюваної енергетики, розроблення та впровадження розумних енергоощадних приладів та інших рішень, потрібних для зменшення залежності від імпорту викопного палива й досягнення чистого нульового викиду в найближчі декілька десятиліть. Слід погодитись з авторами, що для підтримки цих напрямів важливо масштабувати проекти виробництва критично важливих видів машинобудівної продукції: спецтехніки, будівельної техніки, транспортних засобів, тощо, у спосіб налагодження співпраці між

державними, місцевими органами влади і виробниками, зосередитися на пошуку й реалізації оригінальних ідей щодо створення вітчизняних брендів відповідно до сучасних потреб та ін.

Дослідники Є. М. Травніков, В. С. Лазебний та інші у своїй праці значну увагу приділили організації процесу конструювання, забезпеченню надійності апаратури реєстрації інформації, розробленню друкованих плат різного рівня складності, конструюванню й реалізації ліній електричних з'єднань, забезпеченню електромагнітної сумісності розробленої апаратури та взаємозамінності окремих складових конструкції [7].

О. О. Ходирєва, доповнюючи наведені вище тенденції розвитку, дослідила інноваційну активність машинобудівних підприємств та капітальні інвестиції в основне виробництво, згідно чого зроблено висновок про втрату конкурентоспроможності, відсутності інноваційного потенціалу та економічної й господарської їх стійкості [8].

С. Пермінова, Н. Ситник та М. Чупріна порушили питання державних стимулів інноваційної діяльності [9].

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Незважаючи на велику увагу до машинобудування, певні аспекти його сучасного стану у частині конструкторської діяльності інноваційної техніки залишаються недостатньо дослідженими.

Постановка завдання. Ціль статті – проаналізувати сучасні процеси, що характерні для організаційно-економічних засад конструювання інноваційної техніки у машинобудівній галузі. Перш за все, це питання, що пов'язані з наслідками цифровізації: як вплине впровадження, наприклад, Generative Design і Digital Twins у найближчі роки на організацію праці конструктора, що реально у нього зміниться у технічному оснащенні, як воно буде інтегровано у загальну систему конструкторської підготовки підприємства і які додаткові знання йому потрібні? Як все це вплине на якість конструкторської діяльності?

Виклад основного матеріалу дослідження. Підвищення якості і ефективності конструкторської діяльності, з одного боку, залежить від вирішення

проблем формування стратегії інноваційного розвитку економіки, інноваційної спроможності держави, з іншого – прямо впливає на соціально-економічний рівень держави [10].

Один з визначальних показників ефективності реалізації інноваційної політики держави – це її місце у глобальних рейтингах. Україна представлена у декількох міжнародних рейтингах, які оцінюють її інноваційний потенціал, інноваційну спроможність та результативність інноваційної політики. Їх всебічну характеристику дають Глобальний індекс інновацій – ГІІ (The Global Innovation Index), Глобальний індекс стійкої конкурентоспроможності – ГІСК (The Global Sustainable Competitiveness Index), Глобальний індекс конкурентоспроможності талантів – ГІКТ (The Global Talent Competitiveness Index), Зведений Інноваційний Індекс – ЗІІ (Summary Innovation Index – SII). Динаміка рейтингів України за чотирма найбільш популярними підходами до оцінки інноваційної спроможності за 2015-2023 рр. демонструє, що країна займає скромні місця, хоча періодично спостерігається тенденція до покращення деяких позицій. З рис.1 видно, що у міжнародних рейтингах ГІІ та ГІКТ у 2023 р. Україна покращила свої показники (55 місце та 64 відповідно) порівняно з 2022 р. (57 місце та 66 відповідно) [10].

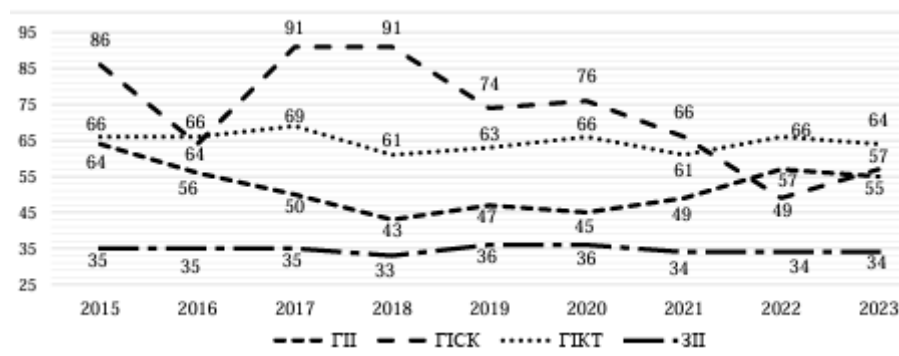


Рисунок 1 – Рейтинги України за індексами інноваційної спроможності.

У 2023 р. 21 економіка показала кращі інноваційні результати (знання і технологічні результати, креативні результати) порівняно з їх інноваційними ресурсами (інфраструктура, інституції, складність ринку та бізнесу, людський

капітал і дослідження) – це так звані країни інноваційних досягнень. До цієї групи входить і Україна. Рейтинги України за цими блоками ГІІ відображає рис. 2.

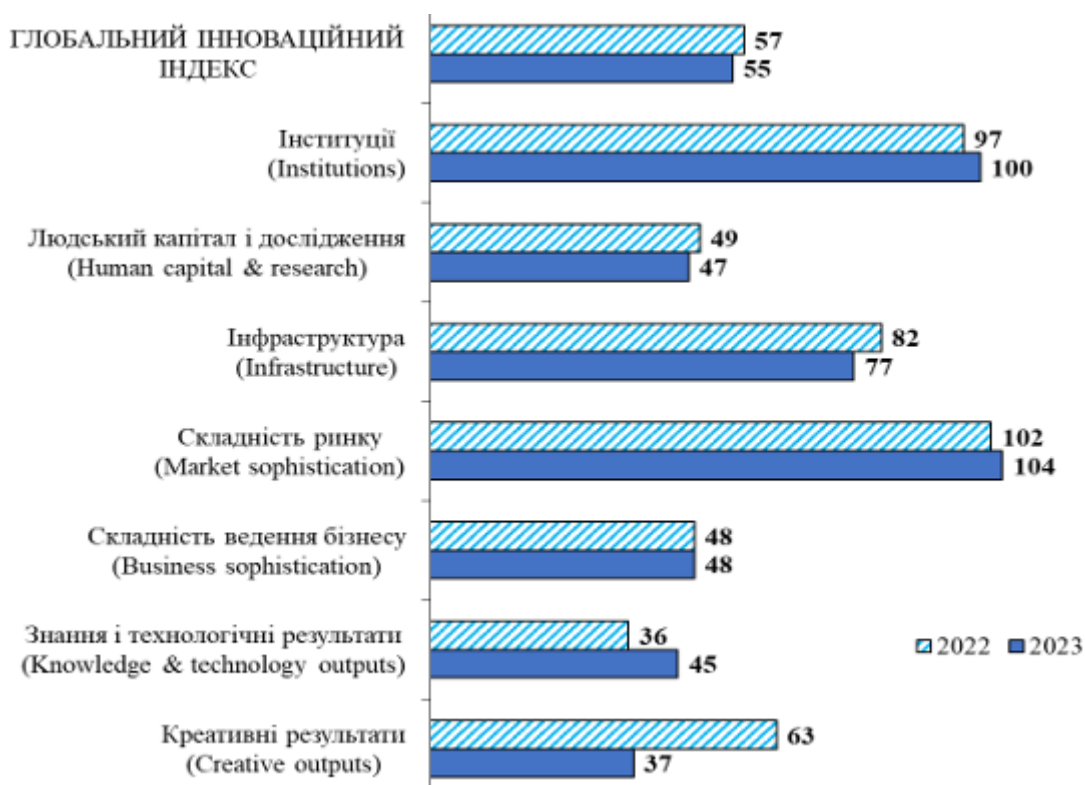


Рисунок 2 – Рейтинги України за 7 блоками показників глобального інноваційного індексу (ГІІ) у 2022 та 2023 рр.

Джерело: *The Global Innovation Index 2023*.- <https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo-pub-2000-2023-en-mainreport-global-innovation-index-2023-16th-edition.pdf>

Вцілому позиції України в міжнародних рейтингах інноваційного розвитку підтверджують наявність високого рівня науково-освітнього потенціалу, який є ключовим фактором конкурентоспроможності української науково-інноваційної сфери, основою для наукових розробок, інновацій, нової техніки та технологій. У той же час, результати оцінювання науково-інноваційної спроможності України свідчать про потребу в розробці та впровадженні єдиної, узгодженої науково-технічної та інноваційної політики. Вони також вказують на необхідність здійснення конкретних кроків у напрямі реалізації важливих структурних змін в економіці та науці, а також технологічної модернізації виробництва та стимулювання бізнесу до інновацій, що тісно пов'язано із дослідницькою та конструкторською діяльністю. Машинобудування демонструє нижчі темпи зростання виробництва порівняно з іншими галузями. Машинобудування від

початку війни залишалося однією з проблемних галузей, де спостерігалися низькі темпи відновлення виробництва. Індекс змін виробництва в серпні 2024 для машинобудівної галузі становив 0,03 (0,02 у липні, 0,15 у червні та -0,03 у травні). Для порівняння, на рівні країни Індекс змін виробництва знизився з 0,26 у квітні до 0,12 у серпні, при цьому демонструючи переважно вищий результат порівняно з машинобудуванням. Частка підприємств машинобудування, які нарощували обсяги виробництва, у серпні 2024 року становила 32,4 %, водночас, частка тих, хто скоротив обсяги виробництва – 29,7 %, а не змінювали обсяги виробництва – 37,8 % представників галузі. Машинобудування, перебуваючи в кризовому стані, могло менше відчути відключення електропостачання, які більш суттєво вдарили на темпи росту виробництва влітку 2024 року в інших галузях [1].

На рис. 3 представлено Індекс змін виробництва машинобудування у 2022-2024 рр. Значення Індексу змін продажів для машинобудування становить 0,05 (було 0,05 у квітні, -0,05 у травні, 0,15 у червні, але 0 у липні). Для порівняння, на рівні країни Індекс змін продажів знизився з 0,26 у квітні до 0,12 у серпні. Тобто в цілому машинобудування демонструвало нижчі темпи зростання реалізації порівняно з усією переробною промисловістю. Частка підприємств галузі, які нарощували обсяги продажів, у серпні 2024 року становила 35,1 %, водночас, частка тих, хто скоротив обсяги виробництва – 29,7 %, а не змінювали обсяги виробництва – 35,1 % представників галузі [1].

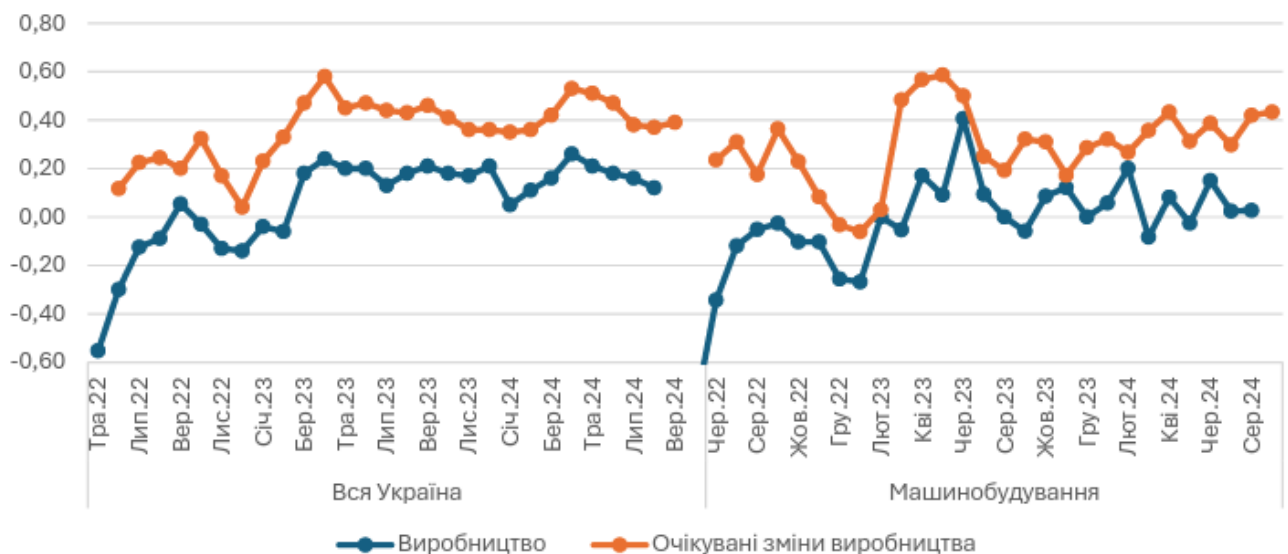


Рисунок 3 – Індекс змін виробництва у 2022-2024 рр.

Індекс очікуваних змін продажів для машинобудування становить 0,47, що є найвищим результатом від літа 2023 року. Результат машинобудівної галузі вищий від показника на рівні країни (0,39). У серпні 2024 року очікували зростання обсягів виробництва в найближчі три місяці 53,3 % представників галузі, а скорочення – лише 6,7 % (відповідно 39,5 % та 6 % на рівні країни) (див там же). Зміни у виробництві обумовлюють експортні можливості (рис. 4) [1].

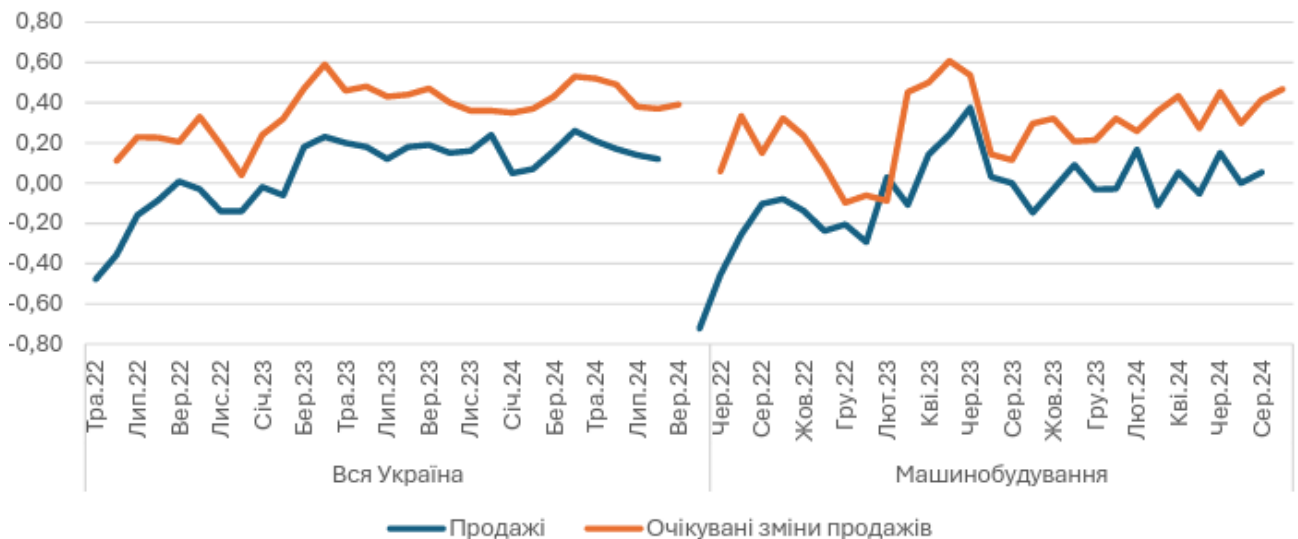


Рисунок 4 – Порівняльна характеристика індексу змін експорту у 2022-2024 рр.

Станом на серпень 2024 року більшість експортерів машинобудівної галузі продовжували зовнішньоекономічну діяльність за останній рік. Аналіз підтвердив, що 78,6 % підприємств практично не змінили довоєнний обсяг і продовжували експортувати впродовж останніх 12-ти місяців (81,4 % на рівні країни). Ще 3,6 % почали експортувати впродовж останніх 12 місяців (1,8 % на рівні країни). 17,9 % підприємств галузі не експортували впродовж останніх 12 місяців, хоча робили це до війни (16,8 % на рівні країни) [1]. Таким чином ситуація в галузі в цілому віддзеркалює тенденції щодо відновлення експорту в цілому по країні. Український бізнес досягнув певної планки відновлення експортної діяльності, адже частина бізнесу не може побороти нові виклики для відновлення експорту. Як видно з рис. 5, у серпні 2024 головним напрямком експорту для машинобудівних підприємств, як і для всіх галузей в цілому,

залишався Європейський Союз. До ЄС експортували 73,9 % підприємств машинобудування (85,7 %).

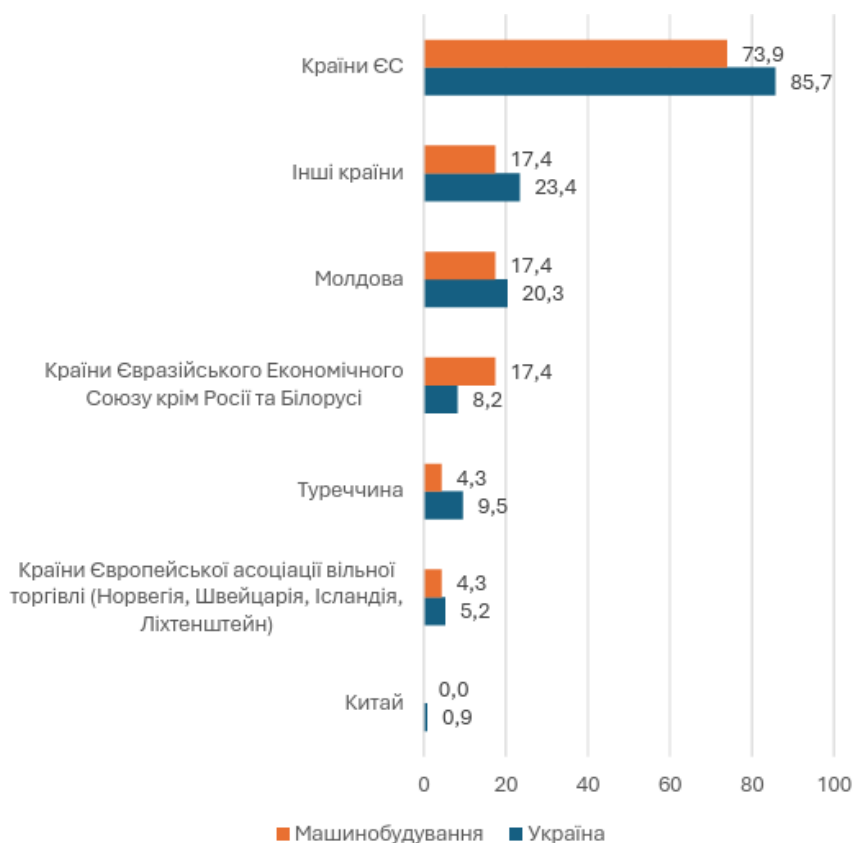


Рисунок 5 – Індекс змін продажів продукції машинобудування у 2022-2024 р.р.

Окрім цього, ще 4,3 % експортують до країн Європейської асоціації вільної торгівлі (Норвегії, Швейцарії, Ісландії, Ліхтенштейну). Багато підприємств галузі продовжують експорт до країн Євразійського Економічного Союзу (крім Росії та Білорусі) – всього 17,4 %, що більш як в два рази вище ніж для інших галузей. Серед інших важливих напрямків для машинобудування – це Молдова (17,4 %), Туреччина (4,3%). При цьому відсутні підприємства, які експортують до Китаю.

Наведені на рисунках 3-5 окремі характеристики галузі машинобудування та її місця в економіці України, свідчать про те, що це провідна галузь, яка заслуговує особливої підтримки з боку держави. У той же час, прогнози підприємців на найближчий час щодо фінансово-економічного стану залишаються гіршими від загальноукраїнських тенденцій. Значення індексу очікуваних змін фінансово-економічної ситуації на підприємстві для галузі становить 0,25, тоді як було взагалі на рівні «нуль» у липні. На рівні країни цей

показник знизився з 0,55 у червні до 0,30 у серпні, але переважно залишається вищим від очікувань машинобудування [1].

Враховуючи місце конструкторської діяльності в економіці країни, розглянемо сучасні процеси, що характерні для організаційно-економічних засад конструювання інноваційної техніки у машинобудівній галузі. Саме від цієї спроможності галузі залежать і обсяги продукції і конкурентоспроможність країни на світових ринках. Перш за все, це питання, що пов'язані з наслідками глобальної цифровізації: як вона вплине на організацію праці конструктора, що реально у нього зміниться у технічному оснащенні, як воно буде інтегровано у загальну систему конструкторської підготовки виробництва і які додаткові знання йому потрібні, які зміни вплинуть на технічне оснащення конструкторських бюро, як ці технології будуть інтегровані в загальну систему конструкторської діяльності на підприємстві, які додаткові знання будуть необхідні конструкторам і як це все вплине на якість конструкторської діяльності та, відповідно, на ефективність всієї економіки.

За нашим прогнозом, до значних змін у конструкторській діяльності приведе розвиток технологій. Розглянемо у цій статті один напрямок-впровадження *Generative Design* (генеративного дизайну) [11] і *Digital Twins* (цифрових двійників) [12] у машинобудуванні, що приведе до значних змін у діяльності конструктора. Ці інструменти дозволяють автоматизувати процеси проектування, аналізу та оптимізації виробів, що не тільки підвищує продуктивність, а й змінює роль конструктора в інженерному процесі. Головна відмінність від традиційного проектування полягає в тому, що *Generative Design* використовує алгоритми штучного інтелекту (ШІ) для автоматичного створення оптимальних конструкцій, враховуючи обмеження та вимоги до виробу (міцність, маса, вартість тощо), а *Digital Twins* створює цифрову копію фізичного об'єкта, що дозволяє тестувати його поведінку в реальному часі, імітуючи експлуатаційні умови ще до фактичного виготовлення. Обидві технології дозволяють конструкторам зміщувати фокус із рутинної роботи на стратегічне ухвалення рішень.

Які характерні тенденції слід очікувати в організації праці конструктора. На нашу думку, у найближчі п'ять років конструктори поступово відмовлятимуться від традиційних методів проектування, оскільки Generative Design та Digital Twins дозволяють значно скоротити час розробки нових виробів. Очікувані основні зміни такі: від ручного моделювання до управління параметричними алгоритмами, зменшення кількості ітерацій при розробці, зміна підходу до тестування виробів, інтеграція з виробничими процесами, інтеграція з виробничими процесами, вплив на командну роботу. Якщо традиційно конструктор вручну створював деталі у CAD-системах, то тепер він буде налаштовувати алгоритми генеративного дизайну, які самостійно розраховуватимуть найкращі варіанти конструкції. Конструктор стає більше аналітиком та оператором інтелектуальних систем, а не просто дизайнером деталей. Generative Design одразу генерує десятки або навіть сотні варіантів конструкцій, що значно скорочує кількість ітерацій при розробці. Це дозволяє швидше перейти до стадії тестування та виробництва. Digital Twins дозволяє перевірити міцність, аеродинаміку, поведінку матеріалів у різних умовах ще до фізичного виготовлення. Це значно знижує потребу у фізичних прототипах, скорочуючи витрати та терміни розробки. Дані з Digital Twins можуть передаватися безпосередньо у виробничі системи (наприклад, у роботизовані комплекси, або 3D-друк). Це дасть можливість здійснювати гнучке виробництво та швидко адаптувати конструкцію під потреби ринку. Співпраця між конструкторами, інженерами, технологами та ІТ-фахівцями стане тіснішою. Тобто, конструктор має працювати в мультидисциплінарних командах, оскільки впровадження цих технологій вимагає глибокого розуміння цифрових процесів.

З впровадженням Generative Design і Digital Twins технічне оснащення конструктора суттєво зміниться. Основні процеси оновлення включають: потужні робочі станції з високопродуктивними процесорами та відеокартами, інтеграцію з віртуальної реальності (VR) та доповненою реальністю (AR), автоматизовані інструменти перевірки та валідації конструкцій, системи зворотного зв'язку з виробництвом. Generative Design вимагає великих обчислювальних ресурсів,

особливо при складних розрахунках. Використання хмарних обчислень також стане стандартною практикою. Конструктори зможуть віртуально перевіряти свої моделі в 3D-просторі за допомогою окулярів доповненої реальності (HoloLens, Meta Quest тощо), що дозволить краще оцінювати ергономіку, доступність компонентів для обслуговування та монтажу. Спеціальні алгоритми будуть проводити аналіз міцності, оптимізації форми та матеріалів ще на етапі проєктування, у той час, як Digital Twins будуть постійно отримувати оновлення від датчиків на виробничих лініях, що дозволить конструкторам швидко адаптувати проєкти у разі змін у технологічному процесі.

Як це буде інтегровано у систему конструкторської підготовки підприємства? Перехід до використання Generative Design і Digital Twins потребує змін у конструкторській підготовці підприємства. Перш за все – це розробка нових навчальних програм для конструкторів: введення курсів із машинного навчання, алгоритмів оптимізації, роботи з цифровими двійниками та використання симуляційних програм у процесі навчання. По-друге – Інтеграція з PLM (Product Lifecycle Management) системами. *Product Lifecycle Management* переводиться як управління життєвим циклом продукції. Життєвий цикл продукції (виробу) – сукупність процесів, які виконуються від моменту виявлення потреб суспільства в певній продукції до моменту задоволення цих потреб і утилізації продукту. Конструктори повинні вміти працювати з комплексними платформами управління життєвим циклом продукту. По-третє – оновлення стандартів конструкторської документації: необхідно змінити підхід до оформлення проєктної документації з урахуванням автоматизованого проєктування.

Але це не все. Щоб ефективно працювати з новими технологіями, конструкторам знадобляться такі знання: алгоритми машинного навчання (для роботи з Generative Design), Симуляційне моделювання (цифрові двійники), програмування (Python, MATLAB, Grasshopper), робота з хмарними платформами, основи обробки даних (Big Data, IoT), взаємодія із системами автоматизованого виробництва (CNC, 3D-друк) та деякі інші.

Розглянемо кожен із цих напрямів, що вони собою представляють, які в них задачі і як вони пов'язані із конструкторською діяльністю.

1. *Алгоритми машинного навчання (для роботи з Generative Design)*. Generative Design використовує алгоритми штучного інтелекту (ШІ), зокрема машинного навчання (ML), для автоматичного створення оптимізованих конструкцій. Основні алгоритми наступні:

- генетичні алгоритми (Genetic Algorithms, GA) – наслідують принципи природного добору для еволюційного пошуку оптимальних конструкцій;
- баєсова оптимізація (Bayesian Optimization) – ефективно знаходить найкращі параметри конструкції на основі попередніх результатів;
- нейронні мережі (Neural Networks, GANs) – здатні створювати нові форми конструкцій на основі тренувальних даних.

Ці алгоритми виконують наступні задачі у конструкторській діяльності:

- автоматизоване створення та оптимізація конструкцій (наприклад, деталей літаків або механізмів);
- підбір оптимальних матеріалів, враховуючи механічні навантаження та вартість;
- зменшення ваги та витрат на виготовлення за рахунок оптимальної топології.

Як це працює на практиці. Конструктор задає вихідні вимоги (міцність, вага, обмеження виробництва), а алгоритм пропонує сотні варіантів, вибираючи найкращі.

2. *Симуляційне моделювання (цифрові двійники)*. Цифрові двійники (Digital Twins) – це віртуальні моделі фізичних об'єктів, які оновлюються в реальному часі на основі даних із сенсорів. Основні методи симуляційного моделювання:

- метод скінченних елементів (Finite Element Method, FEM) – використовується для аналізу напружень, деформацій та термічного впливу;
- моделювання динамічних процесів (Multi-body dynamics, MBD) – аналізує рух та взаємодію механічних частин;

- обчислювальна гідродинаміка (Computational Fluid Dynamics, CFD) – моделює поведінку рідин і газів (важливо для авіації та автомобілебудування).

Виділимо задачі цифрових двійників у конструкторській діяльності:

- віртуальне тестування конструкцій перед виробництвом;
- оцінка поведінки механізмів у реальному часі (наприклад, робота двигуна або літака);
- виявлення слабких місць конструкції без дорогих фізичних експериментів.

Як це працює на практиці. Інженер створює цифровий двійник продукту, запускає симуляції в різних умовах, а результати допомагають вдосконалити конструкцію ще до її виготовлення.

3. *Програмування (Python, MATLAB, Grasshopper)*. Сучасні конструктори використовують програмування для автоматизації, аналізу даних та розширення можливостей САПР-систем. Основні мови та їх застосування наступні.

Python: автоматизація проектування та симуляцій, обробка даних та навчання ML-моделей (TensorFlow, PyTorch, Scikit-learn), робота з цифровими двійниками (інтеграція з IoT, симуляції).

MATLAB: аналіз сигналів та систем (контрольні системи, оптимізація), використання FEM, CFD та інших симуляційних методів, розробка алгоритмів керування (наприклад, для робототехніки).

Grasshopper (для Rhino 3D): параметричне моделювання складних форм, генеративний дизайн для архітектури та механічних конструкцій, автоматизація розробки моделей та експорту в САПР.

Як це працює на практиці. Конструктори можуть писати скрипти для автоматичного тестування параметрів або створювати складні геометричні об'єкти, які неможливо змоделювати вручну. Ці технології формують нову роль конструктора – тепер він не лише розробник деталей, а й аналітик, що працює із симуляціями, ШІ та алгоритмами оптимізації. Щоб управляти цим процесом, конструкторам знадобляться додаткові знання з основ машинного навчання та оптимізаційних алгоритмів, з основ симуляційного моделювання (FEM, CFD,

MBD), програмування (Python для аналізу даних, MATLAB для матмоделювання, Grasshopper для параметричного дизайну).

Змінюючи роботу конструкторів, Generative Design, Digital Twins та інші сучасні підходи потребують інтеграції з хмарними платформами, обробкою великих даних і автоматизованим виробництвом. Давайте розглянемо кожен напрямок детальніше. Що означають для конструктора робота з хмарними платформами, основи обробки даних (Big Data, IoT) та взаємодія із системами автоматизованого виробництва (CNC, 3D-друк). Які в них задачі і що вони привносять у конструкторську діяльність.

Робота з хмарними платформами. Хмарні платформи – це сервіси для зберігання, обробки та аналізу даних у віддалених дата-центрах. Вони дають конструкторам можливість працювати з важкими 3D-моделями, симуляціями та колективними проектами без потреби в потужному локальному обладнанні. Основними платформами для конструкторів є Autodesk Fusion 360 – інтегрована CAD/CAM/CAE-система з хмарними обчисленнями для Generative Design, симуляцій, виробництва; PTC Onshape – хмарний CAD із можливістю командної роботи в реальному часі; Siemens NX Cloud – для високотехнологічного машинобудування та промислового дизайну; Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE – екосистема для роботи з цифровими двійниками та PLM (Product Lifecycle Management) та Google Cloud. AWS, Microsoft Azure – використовуються для зберігання та обробки великих даних, навчання моделей машинного навчання.

Ці платформи пропонують конструкторам не просто інструменти для 3D-моделювання, а комплексні рішення, які включають аналіз, симуляції, автоматизацію виробництва та хмарні обчислення, тому розглянемо їх докладніше.

1. *Autodesk Fusion 360 – Інтегрована CAD/CAM/CAE-система.* Fusion 360 – це єдина платформа, яка об'єднує CAD (проектування), CAM (підготовку до виробництва), CAE (аналіз та симуляції), а також Generative Design. Вона працює в хмарі, що дає змогу використовувати потужні обчислювальні ресурси без навантаження на комп'ютер конструктора. Основні можливості цієї платформи:

- Generative Design-автоматично створює оптимізовані конструкції з урахуванням міцності, ваги та матеріалу;
- аналіз методом скінченних елементів (FEM) дозволяє перевірити напруження, деформації та теплові ефекти в конструкції;
- Інтеграція з CAM (Computer-Aided Manufacturing) забезпечує генерацію кодів для ЧПУ (CNC) верстатів;
- симуляції фізичних процесів потрібні для аналізу аеродинаміки (CFD), механічних навантажень, термічних ефектів;
- робота в хмарі дозволяє відкривати моделі з будь-якого пристрою та працювати спільно над проектами;
- підтримка 3D-друку представляє вбудовані інструменти для підготовки моделей до адитивного виробництва.

Переваги для конструктора наступні. Можливість швидко тестувати різні варіанти конструкцій без фізичних прототипів. Не потрібно потужного комп'ютера – складні симуляції виконуються на серверах Autodesk. Зручна інтеграція в процес виробництва дозволяє створювати код для CNC безпосередньо в програмі. Гнучка система ліцензій надає можливість працювати в підписці (не потрібно купувати дороге ПЗ). Платформа використовується, в основному, у машинобудуванні, авіації, автомобілебудуванні, виробництві інструментів, 3D-друку, робототехніці.

2. *PTC Onshape – Хмарний CAD для командної роботи.* Onshape – це перша повністю хмарна CAD-платформа, яка працює без встановлення програмного забезпечення. Це означає, що вся робота відбувається в браузері – немає необхідності в оновленнях або складній ІТ-інфраструктурі. Основні можливості цієї платформи.

Спільна робота в режимі реального часу – кілька конструкторів можуть одночасно редагувати модель.

Контроль версій і історії змін – можна переглядати кожну зміну в моделі та повертатися до попередніх версій.

Підтримка параметричного моделювання – зміни в одній частині моделі автоматично оновлюють всі пов'язані деталі.

Інтеграція з PLM-системами – дозволяє легко керувати життєвим циклом продукту.

Безпечне зберігання в хмарі звільняє конструктора від хвилювань про втрату даних через збій жорсткого диска.

Доступ із будь-якого пристрою дає можливість працювати на Windows, Mac, Linux, планшетах і навіть смартфонах.

Переваги для конструктора полягають у відсутності необхідності в потужному ПК – все працює в браузері; командна робота без конфліктів файлів – моделі автоматично оновлюються в реальному часі; безпека даних – вся інформація захищена на рівні корпоративних хмарних серверів; ідеальне рішення для розподілених команд – немає потреби передавати файли через пошту або FTP. Використовується у промисловому дизайні, машинобудуванні, стартапах, спільній розробці складних механізмів.

3. *Siemens NX Cloud – Професійний CAD/CAM/CAE для високотехнологічного виробництва.* Siemens NX – одна з найпотужніших CAD/CAM/CAE-систем, що використовується в авіаційній, автомобільній, медичній та високоточній інженерії. Siemens NX Cloud – це хмарна версія, що дозволяє працювати над складними проєктами без встановлення локального ПЗ. Її основні можливості полягають у наступному.

- Продвинутий CAD для складних механізмів забезпечує моделювання високотехнологічних виробів із сотнями взаємодіючих компонентів.

- Інтеграція з цифровими двійниками (Digital Twins) – розробка моделей, що відображають реальну поведінку фізичних об'єктів.

- Потужні симуляційні інструменти (CAE) – механічні, теплові, аеродинамічні розрахунки.

- Автоматизація підготовки до виробництва (CAM) – генерація кодів для верстатів ЧПУ, 3D-друку.

- Інтеграція з PLM (Teamcenter) – управління життєвим циклом продукту на всіх стадіях.

- Підтримка гібридного виробництва – комбінація традиційних методів (фрезерування, токарна обробка) з адитивними технологіями.

Переваги для конструктора полягає у тому, що вона забезпечує роботу над надскладними механізмами – Siemens NX використовується у Boeing, NASA, BMW; точний контроль над усіма етапами розробки – від креслення до виробництва; широкий вибір аналізів і симуляцій – FEM, CFD, аналіз динаміки механізмів; робота в хмарі – немає потреби в суперкомп'ютерах для обробки складних моделей. Використовується в аерокосмічній галузі, автомобілебудуванні, медичній техніці, складних виробничих процесах.

4. *Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE* – Платформа для цифрових двійників і PLM. 3DEXPERIENCE – це хмарна платформа, яка об'єднує конструкторські, інженерні, виробничі та бізнес-процеси в єдиному цифровому середовищі. Це не просто набір програм для CAD/CAE/CAM, а повноцінна екосистема, яка охоплює весь життєвий цикл продукту (PLM – Product Lifecycle Management). Платформа об'єднує такі інструменти, як CATIA – професійна система для 3D-моделювання складних виробів; SIMULIA – пакет для складних інженерних розрахунків (FEM, CFD, електромагнетизм); DELMIA – моделювання виробничих процесів і цифрових двійників виробництва; ENOVIA – управління даними та співпраця в реальному часі (PLM). Основні можливості платформи – створення віртуальних копій виробів і процесів для тестування перед виробництвом із застосуванням Цифрових двійників (Digital Twins); повний контроль над всіма етапами розробки, від концепції до експлуатації на основі PLM (Product Lifecycle Management); хмарна співпраця – команда може працювати над проєктами з будь-якого місця в режимі реального часу; автоматизоване тестування і симуляції – перевірка конструкцій на міцність, аеродинаміку, теплові навантаження; інтеграція з IoT – моніторинг стану обладнання та зворотний зв'язок від сенсорів; готовність до Industry 4.0 – інтеграція з роботизованими лініями, адитивним виробництвом (3D-друк). Переваги для конструктора у наступному.

- Комплексне рішення для розробки, тестування та виробництва.
- Спрощена робота з цифровими двійниками – не потрібно створювати фізичні прототипи для більшості тестів.
- Автоматизовані розрахунки та симуляції – швидше прийняття рішень.
- Доступ до потужних хмарних обчислень – для складних симуляцій та обробки великих моделей.

Зручне управління даними – можна працювати над складними виробами із сотнями деталей без втрати зв'язків між елементами.

Використовується у аерокосмічній галузі (Boeing, Airbus), автомобільній промисловості (Tesla, BMW, Toyota), важкому машинобудуванні, робототехніці, промислового дизайну.

5. Google Cloud, AWS, Microsoft Azure – Хмарні платформи для обробки великих даних і машинного навчання. Це хмарні платформи, які надають конструкторам потужні обчислювальні ресурси, зберігання даних і засоби для аналітики. Вони дозволяють запускати складні симуляції, працювати з великими даними (Big Data) та застосовувати штучний інтелект (AI, ML) для оптимізації конструкторських рішень. Основні можливості:

- Обчислювальні ресурси (HPC – High-Performance Computing) забезпечують використання віртуальних серверів для проведення складних розрахунків і симуляцій (наприклад, аеродинамічні тести).

- Зберігання та обробка Big Data надають можливість роботи з великими масивами даних, отриманими від IoT-сенсорів, виробничих ліній або цифрових двійників.

- Штучний інтелект та машинне навчання (ML/AI) забезпечують оптимізацію конструкцій за допомогою AI (Generative Design, прогнозування несправностей), а Google Cloud AI, AWS SageMaker, Azure Machine Learning – сервіси для навчання та тестування AI-моделей.

- Обробка даних із цифрових двійників забезпечує постійний моніторинг стану обладнання, аналіз поведінки виробів у реальних умовах (Predictive Maintenance) та підтримку роботи з CAD/CAE.

Ця платформа забезпечує також віддалений запуск Fusion 360, Siemens NX, CATIA, SolidWorks на потужних хмарних серверах без потреби у дорогому залізі.

Переваги для конструктора.

- Можливість працювати зі складними симуляціями без потреби в суперкомп'ютері.
- Оптимізація конструкцій за допомогою AI – автоматичний пошук найкращих рішень.
- Спрощене управління великими даними – швидкий аналіз та прийняття рішень.
- Гнучкість у виборі ресурсів – можна масштабувати потужності в залежності від задачі.
- Підтримка цифрових двійників – моделювання роботи обладнання в реальному часі.

Використовується у високоточному машинобудуванні, аерокосмічній галузі, медицині, інтелектуальному виробництві, а також у стартапах, які не мають доступу до дорогого обладнання, але потребують потужних обчислень.

Для успішного використання Digital Twins разом із VR/AR на підприємстві необхідно створити комплексну інфраструктуру, яка включає сучасне обладнання, програмне забезпечення, організаційні зміни та фінансові стимули.

Технічні умови – установка IoT-датчиків, високопродуктивних серверів, VR/AR-гарнітур.

Технологічні умови – впровадження платформ Siemens NX, PTC ThingWorx, AI-аналітики.

Організаційні умови – створення цифрових відділів, навчання персоналу, кооперація між підрозділами.

Економічні умови – залучення інвестицій, грантів, скорочення витрат на фізичні випробування.

Головна перевага у тому, що підприємство, яке впровадить Digital Twins + VR/AR, отримає гнучку, прогнозовану та ефективну систему управління виробництвом.

Ці платформи відкривають для конструкторів нові можливості в цифровому моделюванні, управлінні даними та автоматизації розробки. Вони дозволяють працювати з цифровими двійниками, спрощують командну роботу, забезпечують обчислювальні ресурси для складних симуляцій і використовують штучний інтелект для оптимізації проєктів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Ангел Є., Бет О. Секторальний аналіз: машинобудування вересень 2024 року .URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.ier.com.ua/files/Projects/2024/CEP/Sectoral_report_machine_building_UKR.pdf
2. Діагностика промисловості України: Україна, 2023. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.unido.org/sites/default/files/unido-publications/2024-08/UKR_Executive%20summary_UNIDO
3. Соколова Л. В. Сучасний стан машинобудування України та тенденції його розвитку за умов незбалансованої економіки. URL:chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.economy.nauka.com.ua/pdf/11_2019/7.pdf
4. Свістунов О. С. Світові та вітчизняні тенденції розвитку машинобудівної галузі. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. Випуск 34 • 2020.С.173-179. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/34_2020ua/31.pdf
5. Напрями розбудови машинобудування в Україні як драйвера економічного розвитку під час війни та у повоєнний період. Національний інститут стратегічних досліджень, 2024. URL: https://niss.gov.ua/doslidzhennya/ekonomika/napryamy-rozbudovy-mashynobuduvannya-v-ukrayini-yak-drayvera-ekonomichnoho
6. Спроможності українського ОПК зросли втричі проти минулого року. URL: https://ukroboronprom.com.ua/news/spromoznosti-ukrayinskogo-opk-zrosli-vtrici-proti-minulogo-roku
7. Конструювання та технологія виробництва техніки.: У 3-х кн. Кн. 2. Основи конструювання : Навч. посіб. / Є. М. Травніков, В. С. Лазебний, Г. Г. Власюк, В. В. Пілінський, В. М. Співак, В. Б. Швайченко. За загальною редакцією В. С. Лазебного. Київ : «Кафедра», 2015.с.: іл. ISBN 966-8934-05-9 (кн. 1) ISBN 966-8934-21-0
8. Ходирева О. Сучасний стан та проблеми розвитку машинобудівних підприємств України. *Економічний аналіз*. 2021. Том 31. № 1. С. 227–238. DOI: https://doi.org/10.35774/econa2021.01.227.
9. Пермінова, С., Ситник, Н., Чупріна, М. (2024). Інноваційна діяльність України в період воєнної агресії: тенденції та перспективи. *Економіка та суспільство*. Випуск № 59 / 2024. С.6. URL: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-59-62.
10. Наукова, науково-технічна та інноваційна діяльність в Україні у 2023 році: науково-аналітична доповідь / Т.В. Писаренко, Т.К. Куранда та ін. Київ : УкрІНТЕІ, 2024. 108 с.
11. Целікова А. С., Місько Є. М. Сучасний стан та проблеми розвитку машинобудівних підприємств України. *Український журнал прикладної економіки та техніки*. 2024. Том 9. № 2. С. 228–235.

REFERENCIS:

- 1.Anhel Ye., Bet O.Sektoralnyi analiz: mashynobuduvannia veresen 2024 roku .URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.ier.com.ua/files/Projects/2024/CEP/Sectoral_report_machine_building_UKR.pdf

2. Diahnostyka promyslovosti Ukrainy: Ukraina, 2023. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.unido.org/sites/default/files/unido-publications/2024-08/UKR_Executive%20summary_UNIDO%20Diagnostic%20Study_Ukraine_2024.pdf
3. L. V. Sokolova, doktor ekonomichnykh nauk, profesor, Kharkivskiy natsionalnyi universytet radioelektroniky ORCID:0000-0001-8106-1523 O. V. Stoika, mahistrant, Kharkivskiy natsionalnyi universytet radioelektroniky ORCID: 0000-0003-3460-9933 Suchasnyi stan mashynobuduvannia Ukrainy ta tendentsii yoho rozvytku za umov nezbalansovanoi ekonomiky. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/11_2019/7.pdf
4. Svistunov O. S. Svitovi ta vitchyzniani tendentsii rozvytku mashynobudivnoi haluzi. Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu Vypusk 34, 2020. S. 173–179. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/34_2020ua/31.pdf
5. Napriamy rozbudovy mashynobuduvannia v Ukraini yak draivera ekonomichnoho rozvytku pid chas viiny ta u povoiennyi period. Natsionalnyi instytut stratehichnykh doslidzhen. 2024. URL: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/ekonomika/napriamy-rozbudovy-mashynobuduvannya-v-ukrayini-yak-drayvera-ekonomichnoho>
6. Spromozhnosti ukrainskoho OPK zrosly vtrychi proty mynuloho roku. URL: <https://ukroboronprom.com.ua/news/spromozhnosti-ukrayinskogo-opk-zrosli-vtrici-proti-minulogo-roku>
7. Konstruiuvannia ta tekhnolohiia vyrobnytstva tekhniky.: U 3-kh kn. Kn. 2. Osnovy konstruiuvannia.: Navchalnyi posibnyk / Ye. M. Travnikov, V. S. Lazebyni, H. H. Vlasiuk, V. V. Pilinskyi, V. M. Spivak, V. B. Shvaichenko. Za zahalnoiu redaktsiieiu V. S. Lazebnoho. Kyiv : «Kafedra», 2015. s.: il. ISBN 966-8934-05-9 (kn. 1) ISBN 966-8934-21-0
8. Khodyrieva O. Suchasnyi stan ta problemy rozvytku mashynobudivnykh pidpriemstv Ukrainy. *Ekonomichnyi analiz*. 2021. Tom 31. № 1. S. 227–238. DOI: <https://doi.org/10.35774/econa2021.01.227>.
9. Perminova, S., Sytnyk, N., Chuprina, M. (2024). Innovatsiina diialnist Ukrainy v period voiennoi ahresii: tendentsii ta perspektyvy. *Ekonomika ta suspilstvo*. Vypusk № 59, 2024. S.6. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-59-62>.
10. Naukova, naukovo-tekhnichna ta innovatsiina diialnist v Ukraini u 2023 rotsi: naukovo-analitychna dopovid / T.V. Pysarenko, T.K. Kuranda ta in. Kyiv : UkrINTEI, 2024. 108 s.
11. Tselikova A. S., Misko Ye. M. Suchasnyy stan ta problemy rozvytku mashynobudivnykh pidpriemstv Ukrainy. *Ukrainskyi zhurnal prykladnoi ekonomiky ta tekhniky*, 2024. Tom 9. № 2. S. 228–235.

Надійшла до редакції 07.10.2024 р.