

Федорова Н.Є.

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри підприємництва, організації виробництва
та теоретичної і прикладної економіки
Навчально-наукового інституту
«Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1693-6260>

Кудрявцев І.Д.

аспірант
Навчально-наукового інституту
«Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7610-5599>

Fedorova Natalia, Kudriavtsev Ivan

Educational and Scientific Institute
"Ukrainian State University of Chemical Technology"
Ukrainian State University of Science and Technology

ПРОРИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ОСНОВА ПОСТІНДУСТРІАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАЦІЙ В ЕПОХУ ІНДУСТРІЇ 4.0: ЇХ СУТНІСТЬ І ХАРАКТЕРИСТИКИ

DISRUPTIVE TECHNOLOGIES AS THE BASIS OF POST-INDUSTRIAL TRANSFORMATIONS IN THE ERA OF INDUSTRY 4.0: THEIR ESSENCE AND CHARACTERISTICS

У статті здійснено комплексне дослідження концепції проривних технологій як одного з ключових рушіїв четвертої промислової революції (Індустрії 4.0). Ґрунтовно проаналізовано теоретичні основи поняття «проривні технології» та його принципові відмінності від підтримуючих і сприятливих технологій. З'ясовано, що проривні технології здатні радикально трансформувати бізнес-моделі, ринкові структури та виробничі процеси, ініціюючи формування нових технологічних циклів розвитку. Окреслено їхній багатовимірний вплив на економічні системи, конкурентну динаміку ринків, соціальні структури та стратегічні орієнтири розвитку. Акцентовано на важливості їх раннього виявлення для забезпечення максимізації позитивних ефектів та зниження можливих ризиків. Особливу увагу приділено ролі державної підтримки та адаптації інноваційних екосистем як критичних чинників сталого й довготривалого зростання в умовах технологічних зрушень.

Ключові слова: Індустрія 4.0, проривні технології, проривні інновації, виникаючі технології, сприятливі технології.

The article examines disruptive technologies as a key driver of the Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0). The study provides a comprehensive analysis of the concept, focusing on its theoretical foundations and distinguishing it from sustaining and enabling technologies. Disruptive technologies are characterized by their ability to radically transform traditional business models, market structures, and production processes, leading to the formation of new technological cycles. Drawing on key works of C. Christensen and other leading scholars, the article highlights the transformative impact of these technologies, which can foster the emergence of innovative industries, create new markets, and significantly enhance competitive advantage. A critical aspect of the study involves identifying the characteristics of disruptive technologies, including their high novelty, developmental momentum, and potential to influence both industrial ecosystems and broader socio-economic systems. The article underscores the paradox of disruptive technologies: despite their long-term productivity gains, they often face challenges in early implementation stages due to high development costs, risk, and limited

immediate profitability. This paradox, known as the “Innovator’s Dilemma,” is illustrated through cases such as Tesla, Amazon Web Services, and Netflix. The authors argue that early identification of disruptive technologies is crucial for developing effective strategies that can mitigate risks and maximize their economic and technological benefits. The role of governments and businesses in fostering favorable regulatory environments and innovation ecosystems is emphasized as a way to promote sustainable development. Moreover, investing in domestic disruptive technologies can enhance national resilience and geopolitical positioning, reducing external dependencies. The article concludes that distinguishing between disruptive and sustaining technologies is essential for strategic decision-making, allowing businesses and governments to adapt effectively to rapid technological shifts and achieve long-term socio-economic stability.

Keywords: Industry 4.0, disruptive technologies, disruptive innovations, emerging technologies, enabling technologies.

Постановка проблеми. У сучасних умовах світ переживає масштабну трансформацію, зумовлену кардинальними змінами економічних, соціальних і політичних основ функціонування суспільства. Ми є свідками четвертої промислової революції, або Індустрії 4.0, яка розглядається як фінальна фаза цифрової трансформації у виробничому секторі. Як зазначив К. Шваб, засновник концепції Індустрії 4.0, «з усіх викликів, з якими ми стикаємося сьогодні, найглибшим і найважливішим є розуміння та формування нової технологічної революції, яка передбачає фундаментальні зміни для людства. Ми перебуваємо на початку революції, що змінює наше життя, роботу і взаємодію одне з одним. За масштабом, розмахом і складністю те, що ми називаємо четвертою промисловою революцією, не має аналогів у попередній історії» [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Численні наукові роботи, доповіді міжнародних організацій та практичний досвід підтверджують актуальність досліджень, пов’язаних із концепцією Індустрії 4.0. Водночас ця сфера залишається недостатньо вивченою та потребує подальшого теоретичного осмислення й систематизації основних понять. Дослідники, починаючи з К. Крістенсена – теоретика в сфері управління, інновацій та бізнес-стратегій, розробника концепції «руйнівних інновацій» (disruptive innovations) [2–8], а також інші сучасні дослідники [9–10; 12–13; 16–27; 29–42], наголошують на важливості новітніх технологій у процесі розгортання Індустрії 4.0. Водночас концепція Індустрії 4.0 та визначення її базових технологій залишаються суперечливими й вимагають подальшого теоретичного уточнення та узгодження. Так, А. Перейра та Ф. Ромеро [9] наголошують на необхідності чіткого визначення базових понять Індустрії 4.0, а М. Црняк та ін. [10] зазначають, що виділення ключових технологій Індустрії 4.0 залишається дискусійним питанням. Ці методологічні проблеми позначаються на ефективності управління інноваціями як на рівні окремих підприємств, так і держави загалом. Відсутність чіткого

розуміння проривного потенціалу технологій ускладнює формування довгострокових стратегій розвитку, які б враховували швидкість технологічних змін і забезпечували адаптацію бізнес-моделей до нових реалій.

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування поняття «проривні, руйнуючі, або дизруптивні технології» (disruptive technologies) та визначення їх основних характеристик та параметрів проривності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Інноваційна теорія вказує на те, що технологічні зміни – це вдосконалення технологій, що змінюють співвідношення між витратами й результатами у виробничому процесі. У цьому сенсі «технологічний прогрес» розглядають як збільшення випуску продукції, пов’язане з певними технологічними змінами. За Й. Шумпетером [11] подібні зміни можуть бути спричинені «творчим руйнуванням», яке є наслідком радикальних нововведень і здійснюється періодично, змінюючи статус-кво та формуючи нову ринкову рівновагу. Водночас, відповідно до еволюційного підходу, технологічний прогрес може відбуватися як поступовий процес накопичення змін, що стають результатом довготривалих траєкторій навчання інноваторів і користувачів [12]. Внаслідок цього в економічних системах можуть паралельно існувати дві групи технологій: перша – та, що розвивається поступово, і друга – така, що виникає раптово й якісно переформатує ринкове середовище. Так, за К. Крістенсеном, який увів в економічний дискурс термін «проривні технології» у статті «Проривні технології: ловля хвилі» [2], технології поділяються на дві групи: технології підтримки та проривні технології (sustaining technology and disruptive technology). Якщо проривна технологія спричиняє докорінні зміни в традиційних методах господарювання й бізнес-структурах, то підтримуюча передбачає лише поступове вдосконалення вже існуючої та усталеної технології. Отже, їхня відмінність полягає в масштабі змін, які вони приносять, і в тому, як вони впливають на існуючі бізнес-моделі та ринки.

Відокремлення проривних технологій від інших видів технологій передбачає перш за все термінологічне оформлення вказаного поняття, відносно чого в науковому колі існують неабиякі розбіжності. Так, одні й ті самі ключові технології Індустрії 4.0 в науковій літературі іменуються як: «популярні технологічні механізми Індустрії 4.0» [13]; «технології, що забезпечують просування на цифрових кордонах» [14]; «технологічні рушії змін» [15]; «найкорисніші технології Індустрії 4.0» [16]; «сприятливі технології (enabling technologies)» [17]; «найновітніші, виникаючі (emerging) технології» [18; 19; 37]; «виникаючі руйнівні (emerging disruptive)» [20; 21], і, нарешті, руйнівні, проривні (disruptive) технології [2; 7; 22–28; 31–32; 38–39]. На наш погляд, таке різноманіття термінів, що описують технології Індустрії 4.0, свідчить про активну технологічну еволюцію й водночас демонструє відсутність єдиної міжнародно визнаної таксономії цієї сфери. Така термінологічна неузгодженість, на нашу думку, ускладнює розуміння фундаментальної сутності технологій, перешкоджає науковій і технологічній співпраці та гальмує міждисциплінарні дослідження. Крім того, вона заважає стратегічній координації інноваційних процесів на рівні держави й окремих підприємств. Як наслідок, відсутність належного категоріального оформлення може призводити до неправильних оцінок потенціалу технологій Індустрії 4.0, ускладнюючи їхнє впровадження й належну підтримку.

З нашої точки зору, найбільш адекватним відображенням специфіки Індустрії 4.0 є поняття «проривні, руйнівні (disruptive) технології» як рушійні сили її розвитку. Цей термін акцентує трансформаційний вплив технологій на економіку й суспільство, підкреслює радикальність змін, а також відокремлює їх від підтримуючих технологій, що не руйнують існуючих структур, а лише слугують їх доповненням. Натомість поняття «сприятливі технології (enabling technologies)», зазвичай, зосереджує увагу на створенні нових можливостей та інструментів для вдосконалення системи, а термін «виникаючі технології (emerging technologies)» передусім відображає новизну технології, не завжди гарантуючи її проривний характер.

Отже, попри те, що категорія «проривні, руйнівні, дизруптивні технології (disruptive technologies)» ще не стала повністю усталеною в науковому дискурсі, вона поступово набуває визнання як найбільш точний концепт, що підкреслює революційну сутність Індустрії 4.0.

Проблема виокремлення проривних технологій Індустрії 4.0 потребує їх чіткої ідентифікації, у зв'язку з чим необхідно визначити їх сутність та характерні особливості, тобто

з'ясувати критерії їх проривності. Переважна більшість дослідників слідом за К. Крістенсен визначає проривні технології як такі, що, ґрунтуючись на радикально нових підходах, здатні суттєво реструктурувати звичайні бізнес-моделі, докорінно змінити структуру ринку і технологічні процеси та створювати нові ринки [4], взаємодії між людьми [22], а також інші аспекти, включаючи транспорт і зв'язок [21]. З того часу цей термін застосовувався до багатьох аспектів повсякденного життя, включаючи освіту, транспорт, фінансові послуги, охорону здоров'я, дослідження та розробки. Як стверджують К. Крістенсен та його колеги: «нові комбінації існуючих стандартних компонентів, вміло застосовані до невеликої новоствореної мережі цінностей, можуть мати потужний і далекосяжний ефект» [8].

Деякі вчені ототожнюють проривні технології з інноваціями вже існуючих технологій [23; 26], тобто визначають їх як «інновації, які суттєво змінюють спосіб роботи споживачів, галузей чи підприємств», або як «технологічну інновацію, що відкриває новий технологічний цикл розвитку виробничих систем» [27], «інноваційні винаходи чи вдосконалені сучасні технології, які змінюють спосіб поведінки, мислення чи взаємодії суспільства, а також спосіб роботи підприємств і галузей» [23; 28]. Вчені цієї групи аргументують подібне ототожнення тим фактом, що технології як такі не можуть розглядатися винятково руйнівними: справжній проривний ефект виникає лише тоді, коли вони застосовуються у принципово новій бізнес-моделі. Вони наголошують, що навіть найпрогресивніші й найефективніші технології можуть залишитися нішевим рішенням, якщо не знайти способу використовувати їх у рамках інноваційних практик. Так, К. Крістенсен у подальшій спільній праці з М. Рейнором «Рішення інноватора» [5] замінив термін «проривна технологія» на «проривна інновація». Він дійшов висновку, що більшість технологій не є за своєю природою руйнівними чи стабільними – вирішальне значення має бізнес-модель, яка вивільняє потенційний ринковий успіх і породжує «творче руйнування».

Водночас ми вважаємо, що такі аргументи не скасовують самоцінності проривних технологій у вдосконаленні суспільної системи. Попри тісний взаємозв'язок із проривними інноваціями, ці два явища не слід ототожнювати. Проривні технології можна визначити як такі технічні досягнення, що радикально впливають на майбутній розвиток галузей або відкривають якісно нові підходи до розв'язання проблем. Натомість проривні інновації – це конкретні продукти, послуги чи бізнес-моделі,

що змінюють ринок, витісняючи традиційні рішення й інтегруючи проривні технології у свою основу.

Проривна технологія може існувати й без трансформації в інновацію, якщо бракує умов для її адаптації до реальних потреб чи комерціалізації. Тоді вона зберігатиме цінність в якості науково-технічного досягнення й потенційної платформи для майбутніх проєктів, проте її впровадження може відкладатися на роки чи навіть десятиліття. Наприклад, технології холодного ядерного синтезу потенційно здатні повернути уявлення про енергетику, але поки що не стали комерційним продуктом; можливість серійного виробництва електромобілів існувала вже на початку XX століття, проте інфраструктурні обмеження стримали їхній розвиток до недавнього часу; доповнена реальність була відома задовго до появи апаратних засобів, здатних забезпечити зручність її використання; квантові комп'ютери володіють колосальним потенціалом, але вивести їх на масовий ринок нині заважає висока собівартість. Відповідно, з нашої позиції, руйнівний характер технології не завжди пов'язаний із її швидким упровадженням, а вимірюється насамперед її здатністю якісно змінити поточні зв'язки всередині суспільної системи. Визначальним чинником для визнання технології проривною є доведена можливість «підриву» встановлених технологічних чи соціальних парадигм, навіть якщо її реалізація відкладається на майбутнє. Така технологія, навіть залишаючись без негайного застосування, може впливати на уявлення про реальність у науці, бізнесі чи суспільстві, позначаючись на довгострокових стратегіях, напрямках досліджень і проєктуванні майбутнього. Звідси випливає, що проривні технології мають і автономне значення в соціально-економічному розвитку, оскільки вони формують його нові вектори через прогрес науки та індустрій.

З іншого боку, проривна інновація не обов'язково базується на справді проривній технології. Іноді вона постає внаслідок переосмислення способів застосування наявних технічних засобів, перегляду бізнес-моделі або адаптації до нових ринкових умов. Головною ознакою проривної інновації є її здатність трансформувати ринок чи створити новий, не залежно від того, чи спирається вона на технологічний прорив. У сучасній науковій літературі виділяють чотири основні типи інновацій: продуктні, процесні, організаційні та маркетингові [29]. Отже, проривні інновації часто передбачають зміни не лише в технологічній площині, а й в організаційній, соціальній чи економічній. Цим самим вони охоплюють ширше коло питань, тоді як проривні технології головним

чином визначають виробничий аспект і є фундаментальною базою для багатьох інноваційних рішень. Водночас обидва явища відіграють визначальну роль у соціально-економічному розвитку, адже вони стимулюють зміни в ринкових структурах, породжують нові галузі й підвищують конкурентоспроможність господарюючих суб'єктів.

Як відзначають дослідники, до характеристик проривних технологій відносять те, що вони: мають високу новизну, потужний імпульс розвитку та великий вплив [30]; викликають збір домінант компанії на ринку [4], сприяючи отриманню великої конкурентної переваги [31]; породжують простіші, зручніші та доступніші продукти та послуги [4; 5] і нову ціннісну пропозицію [2; 32]; вимагають значних і тривалих інвестицій, перш ніж вони окупляться [33], тому на початкових етапах розвитку, як правило, є ризикованими інвестиціями [4; 8; 34]; мають обмежену або повністю відсутню цільову аудиторію, тобто вони можуть ще не мати перевіреного практичного застосування [35]; як правило, розробляються через мережу взаємодіючих компаній та окремих осіб [36]; мають нижчу собівартість і одночасно меншу норму прибутку при виробництві продуктів та послуг [5; 9; 32]; виробляють продукти та послуги з нижчою продуктивністю [35].

Суперечливість характеристик проривних технологій вперше відмітив К. Крістенсен в роботі «Дилема інноватора: Коли нові технології спричиняють крах великих фірм» [4], де вони розглядаються як синонім нових видів технологій, які мають нижчу вартість і продуктивність, виміряну за традиційними критеріями, але вищу допоміжну продуктивність. Суть парадоксу проривних технологій полягає у тому, що, попри суттєве підвищення продуктивності у довгостроковій перспективі (завдяки автоматизації, аналітиці, оптимізації процесів і зниженню витрат), на початкових стадіях впровадження їхня ефективність може бути обмеженою з кількох причин.

По-перше, ранні фази розвитку таких технологій не дають змоги досягти ефекту масштабу та супроводжуються високими витратами на адаптацію або вдосконалення продукту, навчання персоналу і перебудову процесів. Це означає, що за низької собівартості загальна рентабельність може залишатися скромною, а операційні витрати – високими. Прикладом цього є діяльність компанії Tesla, яка на початку виробництва електромобілів зазнавала низької норми прибутку через значні інвестиції у виробничі потужності та розробку акумуляторів.

По-друге, компанії, які впроваджують проривні технології, часто орієнтуються на нові

ринкові сегменти, залучаючи клієнтів із нижчою платоспроможністю і пропонуючи конкурентну ціну. Знижена ринкова вартість продукту допомагає швидше завойовувати нові сегменти, однак водночас обмежує рівень прибутковості. Так, Amazon Web Services (AWS) на старті пропонував свої хмарні послуги за суттєво нижчим тарифом порівняно з усталеними ІТ-рішеннями, а Netflix на початкових етапах функціонування надавала послуги за вартістю, помітно нижчою за стандартну ціну кабельного телебачення.

По-третє, проривні технології часто починають свій життєвий цикл як менш досконалі чи менш ефективні, ніж усталені аналоги, що змушує знижувати вартість, аби конкурувати, особливо в умовах посиленої боротьби за новий ринок. Це додатково зменшує маржинальність.

У підсумку виникає парадоксальна ситуація: собівартість виробництва може скорочуватися завдяки інноваційним рішенням, але продуктивність і прибутковість – знижуватися через слабку економію від масштабу, високі операційні витрати та дію ринкової конкуренції. Зрештою, якщо рівень собівартості залежить від технологічного розвитку, то ціна на продукт і відповідно фінансовий результат компанії формуються під впливом конкурентного середовища та споживчого попиту.

На нашу думку, поєднання низької собівартості та помірного рівня прибутковості на початкових етапах впровадження є характерною стратегією проривних технологій. Така технологія дає змогу новим учасникам ринку займати нішу із нижчим рівнем платоспроможності, яку чинні лідери зазвичай ігнорують через низьку маржинальність. Із подальшим розвитком революційних рішень якість продукту зростає, витісняючи провідних виробників навіть у високоприбутковому сегменті [7]. Водночас проривні технології спонукають споживачів переоцінювати цінність товарів і послуг, а товари, що колись вважалися провідними, стають неконкурентоспроможними через зміну параметрів, на яких раніше базувався їхній успіх [27]. Після масштабування та оптимізації такі технології здатні принести високі показники прибутковості, ставши рушієм конкурентоспроможності й інноваційності у виробничій сфері. Це створює вагомую перевагу для компаній, які першими реалізують подібні рішення, тоді як колишні лідери можуть зазнати кризи або навіть витіснення [3; 37].

Сукупність означених чинників формує так звану «дилему інноватора» (англ. Innovator's Dilemma), детально описану К. Крістенсеном [4]. Цей феномен пояснює, чому великі та успішні компанії, які домінують у власних

галузях, часто не встигають адаптуватися до радикальних технологічних чи бізнес-модельних змін. Вони орієнтуються на потреби основних клієнтів та вдосконалюють уже наявні продукти, інвестуючи в технології з більшою окупністю, що видається логічним із погляду їхньої бізнес-стратегії. Як наслідок, інновації, які на перший погляд виглядають неприбутковими або радикальними, залишаються поза увагою. Коли ж ринок нової технології починає зростати, компанії-першопрохідці, які її впровадили, міцнішають, а традиційні лідери вже не мають достатніх ресурсів, експертизи чи часу, щоб упевнено вийти на новий ринок. До прикладу, Kodak, пануючи в сегменті плівкової фотографії, запізнилася з впровадженням цифрових технологій, попри те, що сама винайшла першу цифрову камеру. Nokia, яка довгий час очолювала ринок мобільних телефонів, у критичний момент не вклалася у сегмент смартфонів із сучасними операційними системами й втратила домінуючі позиції.

На нашу думку, виправданим у цьому контексті є визначення проривної технології, яке сформулював К. Крістенсен: «Проривні технології – це технології, що докорінно змінюють підходи до отримання вигід та формування ціни [4]. На переконання Е. Деннілса, вони переформатовують конкурентне середовище, адже вносять новий вимір продуктивності, у якому продукти раніше не суперничали [38]. За Р. Аднером, зі зростанням таких революційних технологій вони можуть змінювати межі галузі, витісняючи усталені рішення із центральних сегментів [39]. К. Крістенсен наголошує, що основні гравці галузі, як правило, перемагають у боротьбі за підтримку зрілих інновацій, тоді як фірми-початківці отримують перевагу під час появи проривних, «дизруптивних» інновацій [6]. С. Хардман і співавтори зауважують, що лідери ринку часто недооцінюють загрозу нових рішень, оскільки якість проривної технології на перших етапах поступається існуючим аналогам, проте вона пропонує «додану вартість» для окремих користувачів [40].

Всі перелічені чинники формують складне й невизначене середовище, в якому організації змушені шукати ефективні методи реагування на технологічні виклики. За Ф. Міллікеном [41] «невизначеність середовища» відображає ситуацію, коли передбачити подальші події з високою точністю неможливо, а зовнішні умови зазнають швидких змін. На початкових етапах технологічного зрушення важко передбачити його конкретні наслідки й оптимальні способи пристосування, тому організації мають бути готовими до ризику, швидкого пошуку інноваційних стратегій і розбудови складних

комбінацій ресурсів та компетенцій [42]. Дж. Бауер і К. Крістенсен вказують на важливість стратегічного управління проривними технологіями в організаційному контексті, зокрема гнучкої структури витрат і можливості невеликих, проте швидких експериментів на невизначених ринках [2].

Отже, проривні технології вже стали своєрідним універсальним терміном, попри численні визначення, і відображають стратегічний напрям розвитку високих технологій. Вони започаткували новий тип виробництва з фундаментальними вдосконаленнями у використанні матеріалів, дизайні, процесах управління життєвим циклом і ланцюгами постачання. Завдяки інтеграції віртуальної та фізичної складових виробничі процеси стали більш контрольованими, гнучкими та адаптивними. Важливо підкреслити, що не всі технології, пов'язані з Індустрією 4.0, на конкретному етапі є проривними: деякі з них відіграють допоміжну роль і не чинять значного впливу на галузь у своєму нинішньому вигляді.

Висновки з проведеного дослідження.

Аналіз показав, що під проривними технологіями розуміють такі технології, які змінюють виробничі системи та бізнес-моделі настільки радикально, що це призводить до формування нового технологічного циклу. Вони виступають причиною переходу до принципово нових методів виробництва й споживання, змінюють саму сутність продуктів і комунікацій, трансформують знання та навички персоналу. Як наслідок, відбувається докорінна руйнація попередньої технологічної парадигми

з поступовим утвердженням нової. З огляду на це, науковцям, урядам і бізнесу особливо важливо визначити, які саме сфери досліджень можна вважати актуальними й здатними генерувати «наукові прориви». Усі ці особливості технологічного розвитку підкреслюють важливість виявлення потенційно руйнівних рішень на ранніх стадіях. Без розуміння відмінностей між підтримуваними й проривними технологіями стратегічні рішення на рівні бізнесу й держави можуть бути малоефективними або призвести до дисбалансів. Виокремлення проривних технологій у момент їхньої «точки імпульсу» дозволяє суспільству підготуватися до впливу на ринкові інститути, соціальну структуру й інноваційну екосистему. Це дає змогу не лише отримати максимальні переваги від проривних рішень, а й забезпечити стабільність і стійкість інфраструктури, необхідної для їх успіху. У такий спосіб держава здатна створити відповідне регуляторне середовище, що сприятиме інноваціям і мінімізуватиме соціально-економічні ризики, пов'язані з появою нових технологій. Зрештою, інвестиції у власні проривні технології підвищують незалежність країни від зовнішніх впливів і зміцнюють її геополітичну позицію. Для компаній же це відкриває широкі перспективи в формуванні нових продуктів, скороченні витрат і досягненні конкурентних переваг. Тому визначення проривних технологій у момент їхньої ранньої реалізації – це не лише питання науково-технологічного прогресу, а й дієвий підхід до забезпечення сталого, етичного та інноваційного розвитку.

References:

1. Schwab K. (2016). The Fourth Industrial Revolution. World Economic Forum. Cologny, Geneva: Switzerland. World Economic Forum REF 231215, 172 p.
2. Bower J. L. and Christensen C. M. (1995). Disruptive Technologies: Catching the Wave. *Harvard Business Review*, no. 73, pp. 43–53.
3. Christensen C. M., Rosenbloom R. S. (1995). Explaining the attacker's advantage: technological paradigms, organizational dynamics, and the value network. *Res. Policy*, no. 24(2), pp. 233–257. DOI: [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(93\)00764-K](https://doi.org/10.1016/0048-7333(93)00764-K).
4. Christensen C. M. (1997 and 2003). The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail. Boston, Massachusetts: Harvard Business Review Press.
5. Christensen C. M., Raynor M. E. (2003). The Innovator's Solution: Creating and Sustaining Successful Growth. Harvard Business Press.
6. Christensen C. M. (2005). The ongoing process of building a theory of disruption. *J. Prod. Innov. Manag.* no. 31(1), pp. 39–55. DOI: <https://doi.org/10.1111/jpim.12076>
7. Christensen C. M., Baumann H., Ruggles R. (2007). Disruptive innovation for social change. *Harv. Bus. Rev.*, no. 84(12), pp. 94–101.
8. Christensen C. M., Raynor M. E., McDonald R. (2015) What is disruptive innovation. *Harvard Business Review*, pp. 44–53.
9. Pereira A., Romero F. (2017). A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*, no. 13, pp. 1206–1214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.032>
10. Crnjac M., Ivica V., Banduka N. (2017). From concept to the introduction of Industry 4.0. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, no. 8(1), pp. 21–30. DOI: <https://doi.org/10.24867/IJIEEM-2017-1-103>

11. Schumpeter J. A. (1942). *Capitalism, Socialism and Democracy*. New York: Harper & Brothers.
12. Nelson R. R., and Winter S. G. (1977). In search of a useful theory of innovation. *Research Policy*, no. 6, pp. 36–76. DOI: [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(77\)90029-4](https://doi.org/10.1016/0048-7333(77)90029-4)
13. Elnadi M., Abdallah Y. O. (2024). Industry 4.0: critical investigations and synthesis of key findings. *Management Review Quarterly*, no. 74, pp. 711–744. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11301-022-00314-4>
14. Technology and Innovation report 2021. Catching technological waves. Innovation with equity. United Nations Conference On Trade And Development (UNCTAD), 2021. United Nations. Available at: <https://unctad.org/page/technology-and-innovationreport-2021>
15. World Economic Forum (WEF), 8e Future of Jobs, Employment, Skills and Workforce Strategy for the Fourth Industrial Revolution. World Economic Forum (WEF), Geneva, Switzerland. (2016). Available at: <https://www.weforum.org/reports/the-future-of-jobs>
16. Bhadu J., Bhamu J., Saraswat P. (2023). An Analytic Hierarchy Process (AHP) Approach for Prioritizing the Industries 4.0 Technologies (I4.0T). *EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, no. 10(02), pp. 667–675. DOI: <https://doi.org/10.5109/6792813>
17. De Andrade Lucizano C., Gomes de Freitas A. (December 20–21, 2022). Mapping of 4.0 Industry Revolution Enabling Technologies. Proceedings of the First Australian International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Sydney, Australia, pp. 2606–2614. DOI: <https://doi.org/10.46254/AU01.20220557>
18. Cozzens S., Gatchair S., Kang J., Kim L., Hyuck J., Ordóñez G. and Porter A. (2010). Emerging technologies: quantitative identification and measurement. *Technology Analysis & Strategic Management*, no. 22(3), pp. 361–376. DOI: <https://doi.org/10.1080/09537321003647396>
19. Lewallen J. (2021). Emerging Technologies and Problem Definition Uncertainty: The Case of Cybersecurity. *Regulation & Governance*, no. 15(4), pp. 1035–1052. Emerald Publishing Limited 2515–8961. DOI: <https://doi.org/10.1108/INMR-03-2018-0013>
20. Sreedharan R., Unnikrishnan A. (2017). Moving Towards Industry 4.0: A Systematic Review. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, no. 117(20), pp. 929–936.
21. Ab Rahman A., Abdul Hamid U. Z., Chin Th. A. (2017). Emerging Technologies With Disruptive Effects: A Review. *PERINTIS eJournal*, no. 7(2), pp. 111–128.
22. Gawanmeh A., and Al-Karaki J. N. (2021). Disruptive Technologies for Disruptive Innovations: Challenges and Opportunities. 18th International Conference on Information Technology-New Generations, Advances in Intelligent Systems and Computing 1346. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-70416-2_55
23. Pan D., Ren X., Zhang L., Song Z., Nie Y., Zhang L., Ma M., Han D. (2023). A Disruptive Technology Identification Method for New Power Systems Based on Patent Evolution Analysis. *Electronics*. No. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12092045>
24. Bongomin O., Ocen G. G., Nganyi E. O., Musinguzi A., Omara T. (2020). Exponential Disruptive Technologies and the Required Skills of Industry 4.0. *Hindawi Journal of Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/4280156>
25. Manyika, J.M. Chui, J., Bughin, R., Dobbs, Bisson, P., Marrs, A. (2013). Disruptive Technologies: Advances that Will Transform Life, Business, and the Global Economy. Available at: <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/disruptive-technologies>
26. Wang C., Ma M., Li S. S., Xia D., Yu J. F., Xu H. Y. (2022). Research on the social impact detection of disruptive technology from altmetrics perspective. *Inf. Theory Pract*, no. 45, pp. 93–104.
27. Melnyk L., Dehtyarova I., Kubatko O., Karintseva O., Derykolenko A. (2019). Disruptive technologies for the transition of digital economies towards sustainability. *Economic Annals-XXI*, no. 179 (9–10), pp. 22–30. DOI: <https://doi.org/10.21003/ea.V179-02>
28. Top 5 Disruptive Technologies That Are Changing the World. MIT Professional Education 2024. Available at: <https://professionalprograms.mit.edu/blog/technology/top-disruptive-technologies/>
29. Teece D. J. (2002). *Managing Intellectual Capital: Organizational, Strategic, and Policy Dimensions*. Oxford: Oxford University Press.
30. Wu F., Luan J., Huang L., Zhang Y. (2016). Knowledge frontier patent recognition based on novelty and domain intersection: A case study of elderly welfare technology. *J. Inf.*, no. 35, pp. 85–90.
31. Kassieh S. K., Kirchhoff B. A., Walsha S. T. McWhorter P. J. (2002). The role of small firms in the transfer of disruptive technologies. *Technovation*, no. 22(11), pp. 667–674. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-4972\(01\)00064-5](https://doi.org/10.1016/S0166-4972(01)00064-5)
32. Sainio L. M. (2004). A framework for analyzing the effects of new, potentially disruptive technology on a business model case – bluetooth. *International Journal of Electronic Business*, no. 2 (3), pp. 255–273.
33. Soares O. D. (1997). *Innovation and technology: Strategies and policies*. Dordrecht: Kluwer Academic.
34. Day G., Schoemaker P. J. H. (2000). Avoiding the Pitfalls of Emerging Technologies. *California Management Review*, Winter Issue, no. 42(2), pp. 8–33.
35. King A. A., Baatartogtokh B. (2015). How Useful Is the Theory of Disruptive Innovation? *57MIT Sloan Management Review*, pp. 77–90. Available at: <http://mitsmr.com/1LezH20t>

36. Hamilton W. F. (1985). Corporate strategies for managing emerging technologies. *Technology in Society*, no. 7(2), pp. 197–212.
37. Schiavi G. S., Behr A. (2018). Emerging technologies and new business models: a review on disruptive business models. *Innovation & Management Review*, no. 15(4), pp. 338–355. DOI: <https://doi.org/10.1108/INMR-03-2018-0013>.
38. Danneels E. (2010). Disruptive technology reconsidered: a critique and research agenda. *J. Prod. Innov. Manag.*, no. 21(4), pp. 246–258.
39. Adner R., Zemsky P. (2005). Disruptive technologies and the emergence of competition. *RAND J. Econ.*, no. 36, pp. 229–254. <https://doi.org/10.2139/ssrn.293686>
40. Hardman S., Steinberger-Wilckens R., Dan V. (2013). Disruptive innovations: the case for hydrogen fuel cells and battery electric vehicles. *Int. J. Hydrog. Energy*, no. 38(35), pp. 15438–15451.
41. Milliken F. J. (1987). Three types of perceived uncertainty about the environment: State, effect, and response uncertainty. *Academy of Management Review*, no. 12, pp. 133–143.
42. Amit R., Shoemaker P. (1993). Strategic Assets and Organizational Rent. *Strategic Management Journal*, no. 14, pp. 33–46.