

КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИНГУЛЯРНОСТІ

Ключові слова: технологічна сингулярність, інтелектуальний вибух, штучний інтелект, великі дані, машинне навчання, квантовий комп'ютер, нейросинаптичні системи.

Keywords: technological singularity, intelligent explosion, artificial intelligence, big data, machine learning, quantum computer, neurosynaptic systems

Вступ

Поняття штучного інтелекту (ШІ) було сформульовано в середині ХХ століття і розглядалося найбільш часто як здатність комп'ютерів думати, як людина [1]. Очевидно, таке визначення ШІ підкріплювалося знаменитим тестом Тьюрінга [2], завданням якого було визначення здатності інформаційної системи (ІС) створювати інтелектуальний відгук на повідомлення, який неможливо відрізнити від реакції людини.

Питання про те, чи може машина думати, як людина, має довгу історію і сягає корінням у дуалістичну і матеріалістичну філософські теорії. Перша оперує дуальністю світу, в якому думка не є матеріальною і тому не може бути пояснена і, отже, змодельована виключно фізичними, механічними сутностями і поняттями. Друга теорія говорить про фізичну сутність думки, що дозволяє судити про можливість існування і рукотворного створення розуму, тобто ШІ як на обчислювальному рівні — вузького ШІ, так і на рівні повного моделювання роботи мозку людини — загального ШІ.

Основна відмінність сильного (загального) ШІ та штучного суперінтелекту від слабкого (вузького) полягає в їхній можливості суттєво перевищити можливості людини. Передбачається, що здійсниться перехід від слабкого до сильного ШІ і, в певний момент, який називають інтелектуальним вибухом, як результат самовдосконалення сильний ШІ трансформується в суперінтелект, після чого людство вже не зможе контролювати його розвиток [3]. Ідея інтелектуального вибуху була описана І. Гудом у 1965 р. [4] та знайшла продовження в концепції технологічної сингулярності, якій присвячена велика кількість робіт, що як носять чисто теоретичний характер та розглядають питання можливості феномену сингулярності, так і представляють практичні дослідження експертних думок щодо стану та перспектив інтелектуального вибуху.

У роботі [5] розглянуто підходи теорії метасистемних переходів і технологічна сингулярність визначається як момент, у який закономірності, що спостерігалися раніше, а саме: зменшення часу між метасистемними переходами та часу подвоєння потужності кібернетичних систем у межах одного рівня, перестають виконуватися. Автор робить дуже глибокий аналіз феномену технологічної сингулярності з технологічних та філософських точок зору, та розглядає існуючі омані в різноманітних трактуваннях сингулярності, в тому числі ідею її настання як слідства створення сильного ШІ, описуючи технологічну сингулярність у термінах метасистемних переходів як об'єктивного феномену.

У роботі [6] автор прогнозує настання інтелектуального вибуху саме з погляду розроблення суперінтелекту, але за різними сценаріями (шляхами), включаючи інтелектуальні мережі. Великий акцент робиться на розвитку потужного апаратного забезпечення, за рахунок якого можливий прорив у ШІ. Однак слід зазначити, що апаратне забезпечення — це лише один із факторів впливу на процеси інтелектуалізації технологій.

Робота [7] цікава з точки зору розгляду суперінтелекту не тільки як програмно-апаратного забезпечення, а й як філософсько-психологічного феномену, думки, яку автори даної статті цілком поділяють і розвивають у своїх дослідженнях. Автори роботи [7] ставлять під сумнів настання технологічної сингулярності з поглядів розвитку ШІ до рівня суперінтелекту в зв'язку із складністю реалізації таких феноменів людської психіки, як: цікавість, уява, інтуїція, емоції, пристрасть, бажання, задоволення, естетика, радість, мета, цілі, цінності, мораль, досвід, мудрість, судження і навіть гумор.

У роботі [8] автор розглядає складну системну теорію еволюції людини — теорію метасистемного переходу людини, — засновану на появі вищої організації управління через стабілізацію зворотного зв'язку між виникаючими інформаційно-енергетичними системами. Якщо ця теорія точно відображає теорію еволюції людини, поява та створення нових інформаційних та енергетичних систем повинні дати сигнал людству, що поточні структури контролю будуть потенційно замінені в цьому столітті. В якості таких інформаційних систем можливо розглядати системи ШІ, або суперінтелекту, але, на думку авторів даної статті, наступний метасистемний перехід, очевидно, буде поєднанням еволюції людини та комп'ютерного суперінтелекту.

У роботі [9] автори роблять детальний аналіз за матеріалами конференцій та досліджень у галузі ШІ про досяжність описаних експертами цілей щодо розроблення суперінтелекту. Феномен суперінтелекту розглядається також з погляду екстраполяції даних та думок.

Робота [10] цікава з погляду надання прогнозів щодо розвитку певних галузей. Так, за думкою авторів, ШІ перевершать людей у таких галузях, як: машинний переклад (до 2024 р.), написання рефератів для середньої школи (до 2026 р.), водіння вантажівки (до 2027 р.), робота в роздрібній торгівлі (до 2031 р.), написання книги-бестселера (до 2049 р.) і робота хірургом (до 2053 р.). Дослідники вважають, що існує 50 % ймовірність того, що ШІ перевершить людей у всіх завданнях за 45 років і автоматизує всі роботи людини за 120 років.

Таким чином, виходячи з аналізу літератури за тематикою дослідження, тематика технологічної сингулярності, як правило, розглядається з експертних позицій, які можна розділити на декілька напрямів: екстраполяція кривих складності або продуктивності різноманітних систем (комп'ютерних, енергетичних тощо) та якісний опис можливих сценаріїв розвитку технологій.

У статті авторів поєднано теоретичні обґрунтування та практичні дослідження, метою яких є побудова загальної моделі кількісного оцінювання поточного стану та подальшого прогнозування моменту інтелектуального вибуху шляхом вирішення наступних завдань досліджень:

- аналіз відповідності структур експертних систем розробленим структурній моделі інтелекту людини, відповідності сучасних систем ШІ вимогам загального ШІ або суперінтелекту;
- розгляд та систематизація інструментарію ШІ;
- аналіз підходів ШІ, які можуть впливати на досягнення стану технологічної сингулярності;
- формалізація та побудова загальної математичної моделі технологічної сингулярності, аналіз та оцінювання її складових.

Автори переводять якісні дискусії на тему технологічної сингулярності в кількісне русло, систематизувавши знання та підходи з різних галузей досліджень, пов'язаних із ШІ, в єдину структурну модель факторів впливу, які представляють собою стани розвитку різних теорій, методів, програмних та апаратних комплексів, ІС з погляду реалізації ними принципів загального ШІ.

1. Структурна модель інтелекту людини та сучасні межі реалізації ШІ в інформаційних системах

Перш за все розглянемо основні терміни та їх значення для розуміння, якими «здібностями» має володіти ІС, щоб її можна було віднести до технології ШІ.

Інтелект (від лат. *Intellectus* — «сприйняття», «розуміння», «поняття», «розсуд»), або розум, — якість психіки, що складається із здатності усвідомлювати нові ситуації, здатності до навчання і запам'ятовування на основі досвіду, розуміння і застосування абстрактних концепцій і використання своїх знань для управління навколишнім середовищем. Іншими словами, це здатність вчитися, набувати, адаптувати, модифікувати і поповнювати знання з метою вирішення завдань. Таким чином, інтелект людини може бути охарактеризований рядом основних параметрів, серед яких обсяг робочої пам'яті, здатність до прогнозування, мислення, пізнання, розуміння, свідомість і пам'ять.

Обсяг робочої пам'яті — когнітивна система обмеженої ємності, що забезпечує тимчасове зберігання інформації, доступної для безпосереднього оброблення.

Здатність до прогнозування — здатність до побудови причинно-наслідкових зв'язків, тобто логічного мислення. Здатність обґрунтовувати судження про можливі стани об'єкта в майбутньому і (або) про альтернативні шляхи і строки їх здійснення, використовуючи логіку — науку про правильне мислення.

Мислення — сукупність розумових процесів, які лежать в основі пізнання (розуміння), що включає в себе базові операції аналізу і синтезу, на основі яких мозок реалізує інші типологічні одиниці: порівняння, класифікацію, узагальнення, конкретизацію і абстрагування, які, в свою чергу, забезпечують реалізацію активної сторони пізнання: увага, сприйняття, асоціації, створення понять і суджень як результат розуміння.

Розуміння — універсальна операція мислення, пов'язана з засвоєнням нового змісту, на основі досвіду, існуючих знань і навичок та із включенням його в систему усталених ідей і уявлень про навколишній світ [11].

Пізнання — сукупність процесів, процедур і методів придбання знань про явища і закономірності об'єктивного світу.

Свідомість — стан психічного життя організму, що виражається в суб'єктивному переживанні подій зовнішнього світу і тіла організму, а також у відповідній реакції на ці події. Свідомість як стан психіки пов'язана також з феноменом інтуїції і багатьох інших явищ, таких як [12]: здатність розрізняти та класифікувати подразники навколишнього середовища, а також реагувати на них; інтеграція інформації когнітивною системою; моніторинг і самоаналіз психічних станів; здатність системи одержувати доступ до своїх внутрішніх станів; фокус уваги; свідомий контроль поведінки; різниця між неспанням і сном.

Інтуїція — здатність, властивість людини розуміти і формувати сенс подій та об'єктів, а також проникати в нього за допомогою несвідомого виведення, заснованого на уяві і попередньому досвіді.

Пам'ять — одна з властивостей нервової системи, що полягає в здатності якийсь час зберігати інформацію про події зовнішнього світу та реакції організму на ці події, а також багаторазово відтворювати і змінювати цю інформацію [13].

Результатом пізнання є знання, які з філософської точки зору можна логічно або фактично обґрунтувати і емпірично або практично перевірити. У теорії ШІ і експертних систем (ЕС) знання — це сукупність тверджень про характеристики об'єктів та закономірності поведінки системи, а також правил логічного висновку тверджень на підставі правил та інших тверджень з метою прийняття рішень [14].

На рис. 1 представлена спрощена структурна модель інтелекту людини та її зв'язок з найбільш поширеною структурною моделлю ЕС як однієї з областей досліджень ШІ.

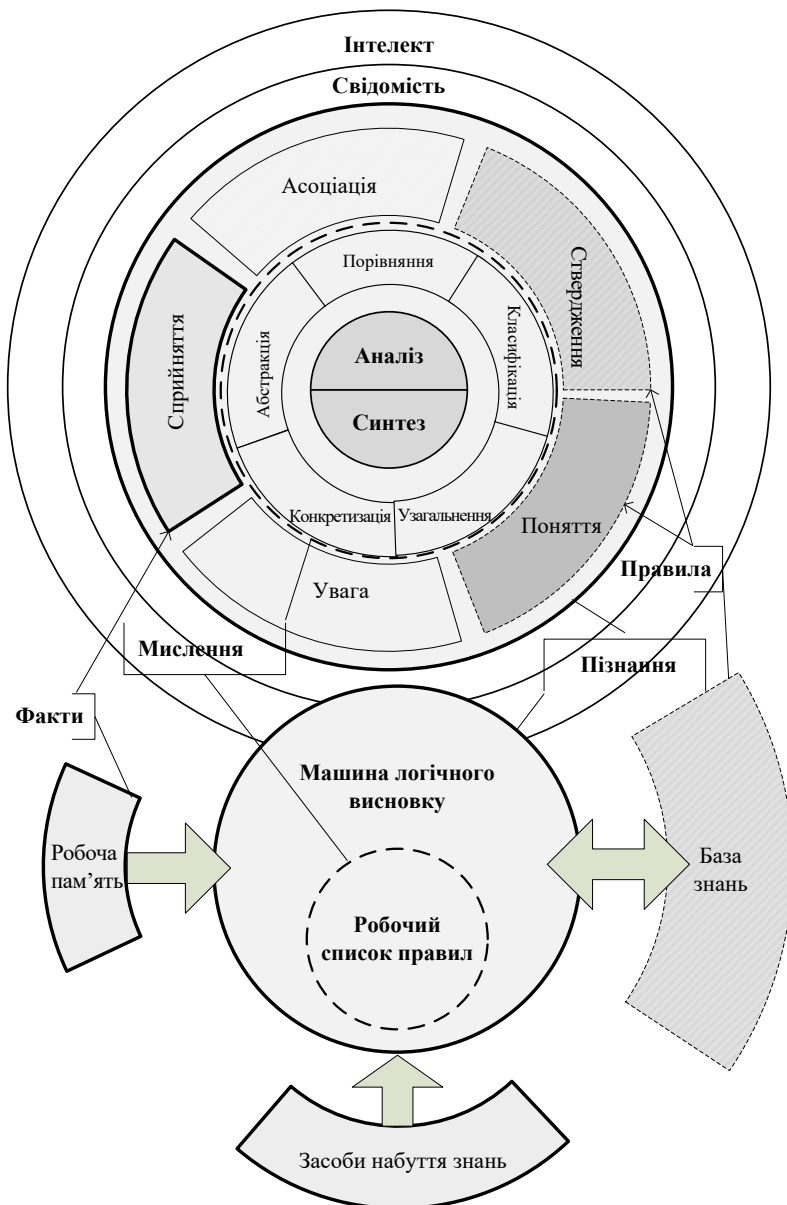


Рис. 1

Як видно з рис. 1, технології ЕС обмежуються реалізацією механізмів пізнання (мислення) як одного з базових елементів інтелекту. Рівнем вище знаходиться свідомість, механізми якої виходять далеко за межі класичної логіки, де сучасні інтелектуальні системи стикаються з труднощами і практично не реалізовані.

Сучасні ІС з великими обсягами оперативної пам'яті та обчислювальними можливостями дозволяють реалізувати практично всі основні елементи інтелекту людини: робочу пам'ять, довгострокову пам'ять, процеси мислення та прогнозування за винятком свідомості та інтуїції. Слід відзначити, що процес пізнання інтелектуальних ІС також обмежений на сучасному етапі їх розвитку лише логічним пізнанням, тобто через чітко структуровані правила і логіку. Але процес пізнання людини може здійснюватися за інтуїтивним принципом, тобто знанням про якість явище без розуміння, як це знання отримане.

Багато ІС мають засоби набуття знань шляхом виводу правил за методом індукції на основі прикладів, тобто навчання з учителем. Для розроблення правил

у машинному навчанні використовується низка методів, наприклад ID3, C4.5 та C5.1, штучні нейронні мережі та генетичні алгоритми [15]. Особливістю розроблення правил методами машинного навчання є неможливість пояснити, чому вони були створені. На перший погляд це дуже схоже на процес інтуїтивного пізнання людини, але це лише поверхневий погляд без урахування несвідомості виведення у випадку людини [16].

Отже, штучний інтелект може бути визначений як здатність системи набувати, адаптувати та модифікувати знання з метою вирішення практичних задач, а відповідно експертна система — це система, яка відтворює здатність експерта приймати рішення в певних предметних областях знань. Очевидно, що поняття ШІ, закладене в 50-х рр. минулого століття, розглядалося в перспективі розвитку цієї галузі науки з кінцевою метою реалізації в ІС фундаментального елементу інтелекту людини — його свідомості, або так званого сильного ШІ (strong AI) чи загального ШІ (general artificial intelligence — GAI). Наразі мова повинна йти про штучне мислення та логічне пізнання, що відображає реальні межі процесів сучасних «інтелектуальних» систем, або, як прийнято в науковій літературі, — слабкий ШІ (weak AI — WAI), або вузький ШІ (artificial narrow intelligence — ANI). Визначимо цей стан речей як відправний пункт на тернистому шляху до інтелектуального вибуху.

2. Інструментарій штучного інтелекту

Як кожна галузь наук, ШІ має свій інструментарій, який динамічно розвивається, що призводить до появи кожних 2–5 років нових понять та визначень, які або доповнюють, або розширюють попередні. Використання терміну «штучний інтелект» у кожному новому методі отримання знань або звичайного оброблення інформації та її класифікації існуючими алгоритмами дещо заплутує читачів та дослідників щодо коректного використання цих методів для вирішення задач їх досліджень.

Тематика представлення знань (knowledge representation — KR) з самого початку досліджень ШІ є одним з основних напрямків робіт у цій галузі наук у зв'язку з великою важливістю саме вибору представлення знань для успішної реалізації інтелектуальної ІС. Очевидно, що саме коректність набуття та представлення знань, можливість їх оновлення та модифікації відіграє суттєву роль у роботі алгоритмів, які реалізують логіку роботи систем ШІ. З формальної точки зору логіка — це наука про формування дійсних логічних виводів, висновків [17], тобто правила представлення знань, які використовуються в ЕС. Формування логічних висновків — це формальний термін для опису міркувань спеціального типу, побудованих на правилах формальної (символічної) логіки, які не опираються на семантику.

Дуже узагальнено можна сказати, що знання відрізняються від інформації та даних систематизацією, яка дозволяє їх обґрунтувати, у випадку ЕС — у вигляді правил. Інформація в широкому сенсі — це відомості незалежно від форми їх представлення, в свою чергу дані — це представлення інформації в формалізованому вигляді, придатному для її передавання або оброблення [18]. Тобто інформація та дані — це різні терміни по суті, але неформально ці два поняття використовують практично як синоніми. Область інформації, яка включає як неструктуровані, так і структуровані дані, отримані з попередніх методами обробки, наприклад, машинного навчання (machine learning — ML), отриманням даних (data minding, deep minding — DM) тощо, описується терміном «великі дані» (big data — BD), який став популярним у 2010 р.

Поняття «великі дані» використовується для характеристики структурованих та неструктурованих даних великих обсягів та різноманіття [19]. Основні методи та техніки роботи з великими даними детально розглянуті в звіті [20] та систематизовані авторами на (рис. 2).

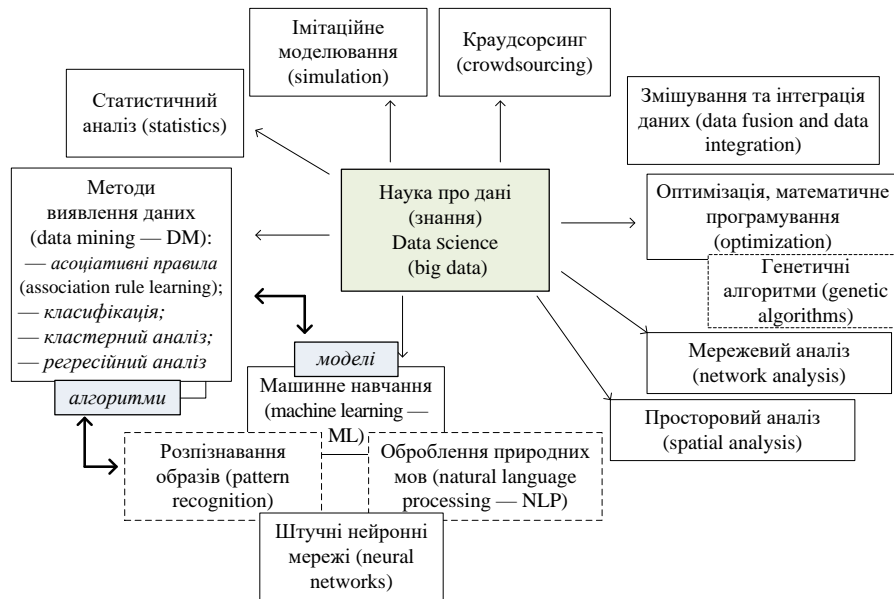


Рис. 2

Методи виявлення даних (data mining — DM) — сукупність методів виявлення в даних раніше невідомих, нетривіальних знань. Метою методів виявлення даних є побудова алгоритмів. Машинне навчання (machine learning — ML) — розділ науки, що займається дослідженням та розробкою алгоритмів, які дозволяють моделювати поведінку на основі емпіричних даних з метою прийняття рішення або прогнозування без явного програмування [21]. Модель — центральна концепція машинного навчання, оскільки в результаті навчання створюються, як правило, геометричні, ймовірнісні та логічні моделі з метою вирішення поставлених завдань. Машинне навчання часто розглядається як окремий розділ комп'ютерних наук, хоча він нерозривно пов'язаний із методами виявлення даних data mining. До машинного навчання також відносять розпізнавання образів (pattern recognition), оброблення природних мов (natural language processing — NLP), та штучні нейронні мережі.

Відсутність сталої класифікації методів роботи з даними в BD пояснюється постійним розвитком науки в цій галузі знань та еволюцією відповідних понять, наприклад data mining — концепція, яка зародилася та була дуже популярна в 1990-х рр., була змінена поняттям Big data, яке з'явилося приблизно в 2010 р. Наразі набуває популярності термін «наука про знання, дані» (data science — DS).

Найбільша кількість методів DS відноситься до двох великих груп (виявлення даних та машинне навчання), які можна характеризувати з погляду наявності або відсутності навчальних даних та дескриптивним або прогностичним характером моделі (табл. 1, класифікація методів DM та ML).

Таблиця 1

Вид навчання	Прогностична модель	Дескриптивна модель
Використання навчальних даних — навчання з учителем, supervised learning	Класифікація (дискримінантний аналіз), регресія (канонічний аналіз)	Виявлення підгруп
Навчальні дані не використовуються — навчання без учителя, unsupervised learning	Прогностична кластеризація (кластерний аналіз)	Дескриптивна кластеризація, виявлення асоціативних правил, зменшення розмірності (факторний аналіз)

Межа між концепціями DM та ML дуже тонка та умовно може бути розглянута з погляду прогностичності отриманих моделей виходячи з того, що основним об'єктом DM є алгоритми для виявлення раніше невідомих шаблонів, а ML вирішує завдання побудови моделей на основі алгоритмів навчання з метою прогнозування даних, тобто, іншими словами, DM розглядають як набір підходів для систематизації знань та пошуку раніше невиявлених зв'язків для побудови шаблонів, а ML використовує знайдені закономірності для побудови моделей та прогнозування рішень з новими вхідними даними. З урахуванням наведених визначень інформації та даних представимо структурно-функціональну модель отримання знань у системах ІІІ (рис. 3).

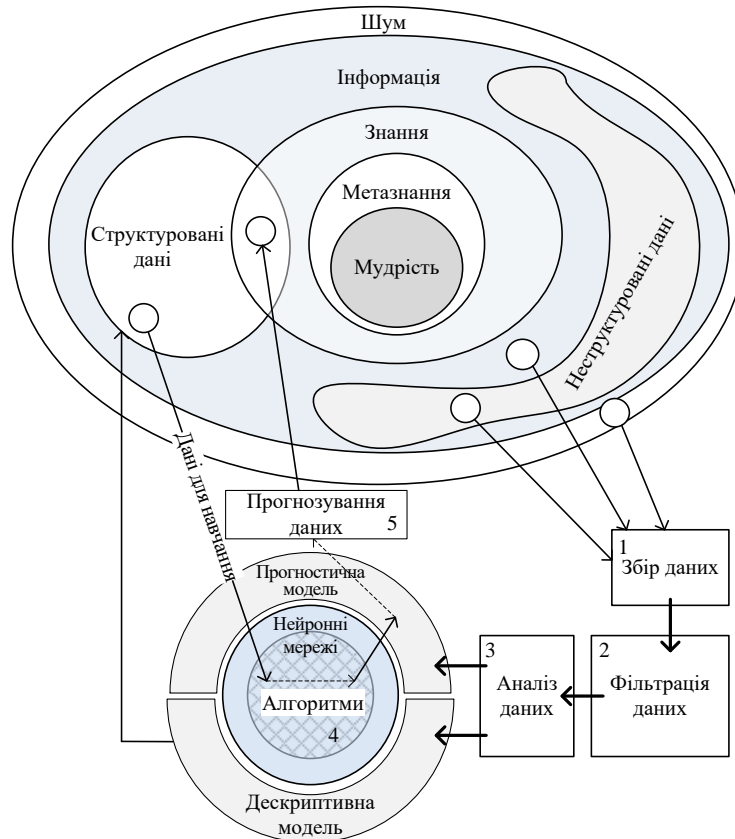


Рис. 3

Функції (блоки) 1–4 відносяться до концепції DM, яка разом з функцією 5 входить у концепцію ML, кінцева мета якого — використання даних для навчання без явного програмування систем. Блок 4 в частині штучних нейронних мереж та блок 5 формують концепцію глибокого навчання (deep learning — DL). В свою чергу алгоритми, моделі, прогнозування даних та область знань (інтелектуальний агент) можуть бути розглянуті як система «штучного» інтелекту.

3. Підходи та концепції, які впливають на розвиток загального штучного інтелекту. Модель технологічної сингулярності

Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених дослідженню ІІІ, наразі відсутні чітко формалізовані вимоги до сильного ІІІ. Як зазначалося в попередньому викладені (п. 1), ідея ІІІ зароджувалася саме з погляду можливості виконання творчих функцій людини із залученням свідомості, самосвідомості, інтуїції та мудрості. Таким чином, загальний ІІІ повинен охоплювати всі функції вузького інтелекту та додатково бути здатним: приймати рішення та діяти в умовах невизначеності; аналізувати та мати уявлення про

існуючу об'єктивну реальність; планувати діяльність, здійснювати постановку цілей; навчатися та генерувати нові знання про навколишнє середовище; спілкуватися природною мовою та поєднувати всі зазначені можливості для досягнення запланованих цілей.

Даний перелік не є ані вичерпним, ані мінімально необхідним для того, щоб можна було стверджувати, що система досягла рівня загального ШІ. Можливо зробити лише висновок про те, що ІС повинна охопити зону свідомості (див. рис. 1), а саме: узагальнювати та цілеспрямовано відображати дійсність, попередньо в «думках» будувати дії та прогнозувати їх результат, регулювати свою поведінку та здійснювати самоконтроль за рахунок саморефлексії.

Більшість фахівців у галузі ШІ згідно з експертним опитуванням [22] вважає, що суперінтелект буде розроблено до 2040–2050 рр. Результатом опитування є рейтинг підходів, представлених авторами на рис. 4, які, на думку експертів, найбільше впливають на терміни розроблення систем із загальним ШІ.

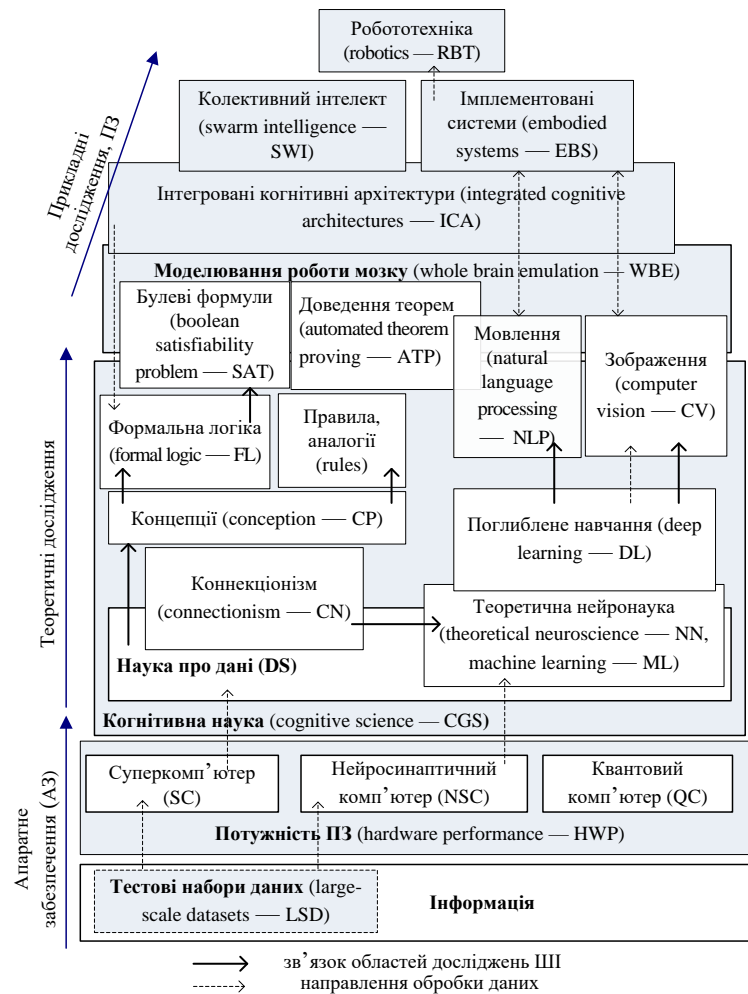


Рис. 4

Оцінювання впливу зазначених підходів на розвиток загального ШІ відокремлено, очевидно, не зовсім коректно, оскільки практично всі вони взаємно пов'язані та впливають один на одного, що знайшло відповідне відображення (див. рис. 4), після об'єднання деяких підходів у логічні групи напрямів досліджень. По суті, всі підходи можуть бути зведені до восьми великих напрямів досліджень — елементів впливу — з урахуванням їх взаємного зв'язку: когнітивна наука, інтегровані когнітивні системи, моделювання роботи мозку, ко-

лективний інтелект, набори великих даних, імплементовані системи, робототехніка та, відповідно, апаратне забезпечення з максимальною продуктивністю для реалізації методів та підходів.

Основою всіх напрямів є когнітивна наука — міждисциплінарне дослідження мозку (розуму) та інтелекту, що охоплює філософію, психологію, ШІ, нейронауку, лінгвістику та антропологію [23]. Дослідження в галузі когнітивних наук базуються на обробці великої кількості даних з використанням методів та підходів науки про дані з метою представлення даних (знань) (рис. 5).

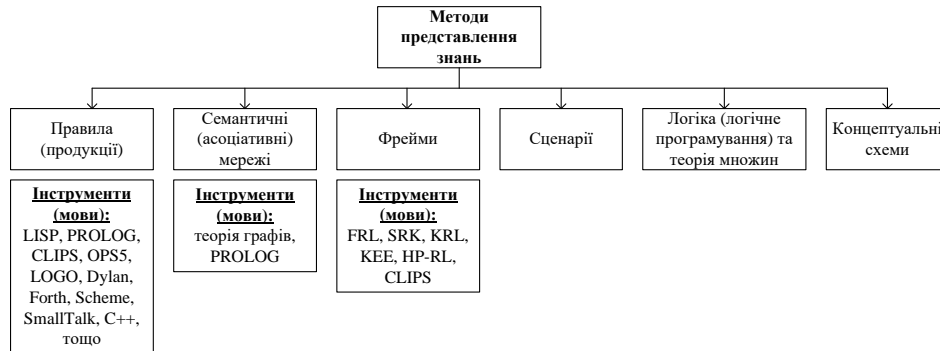


Рис. 5

Апаратне забезпечення — це прикладна галузь досліджень, основною метою якої є досягнення обчислювальної потужності, яка відповідає б можливостям людського мозку як з погляду продуктивності (кількості операцій в секунду), так і енергетичної ефективності.

Темі сингулярності присвячено багато робіт видатних вчених, починаючи з робіт Ф. Енгельса, В.І. Вернадського, Д. фон Неймана про прискорення росту наукових знань та технологічного прогресу і закінчуючи ідеями С. Лема про ймовірну еволюцію комп'ютерів, одним з індикаторів якої, як правило, вважають їх обчислювальну потужність. На думку авторів, прив'язка технологічної сингулярності лише до продуктивності комп'ютерів як індикатору їх еволюції не відображає коректно стан справ і, швидше за все, є лише невеликою складовою серед множини різних факторів, розглянутих у статті.

Аналіз основних показників (орієнтовних) роботи мозку людини та сучасних і перспективних ІС, як з погляду їх потужності, так і з погляду архітектурних рішень, наведений у табл. 2.

Таблиця 2

Показник	Мозок людини	Суперкомп'ютер (архітектура фон Неймана)	Нейросинаптичні системи (IBM TrueNorth NS16e-4)	Квантовий комп'ютер (Sycamore)
Кількість нейронів, млрд	≈ 80–100	–	0,064	64 qubit
Кількість синапсів, трлн	> 200	–	0,016	–
Тактова частота, Гц	≈ 10	до 10*10 ⁹ (можлива)	–	–
Споживча потужність, Вт	≈ 10–30	28*10 ⁶ (Fugaku)	70	25*10 ⁶
Обчислювальна потужність, FLOPS, QV* (quantum value)	≈ 10 ¹⁸ –10 ²⁰	0,513*10 ¹⁸ (Fugaku)	0,7*10 ¹³	2*10 ¹⁷
Енергоефективність, FLOPS/Вт	≈ 5*10 ¹⁶ –5*10 ¹⁸	14,66*10 ⁹	10 ¹¹	10 ¹⁰

Велика різниця в енергоефективності мозку людини та комп'ютерних систем пояснюється двома факторами: технологією та архітектурою. Мозок людини в якості елементної бази використовує органічні нейрони (біологічна система), а процесори (мікропроцесори) — неорганічні кремнієві транзистори, тобто технологію, розвиток якої обмежений мінімальним розміром транзистору.

Очевидно, що суперкомп'ютери підходять до межі продуктивності з погляду як технології, так і архітектури. Їхні можливості будуть остаточно вичерпані, коли розмір кремнієвого транзистору досягне мінімального з погляду технології розміру та, відповідно, квантових ефектів впливу, а рух у напрямку паралельно розподілених операцій на тисячах процесорів буде вимагати збільшення споживчої потужності та розмірів комп'ютерів.

Мозок людини працює по-іншому: паралельно обробляє сенсорні сигнали та видає команди. Саме таким шляхом йде розроблення нейросинаптичних процесорів для формування висновків на основі масово-паралельної мережі, яка складається з мільйонів нейронів та мільярдів синапсів [24].

Ще один напрям розвитку обчислювальної техніки — розвиток квантових комп'ютерів, принцип дії яких заснований на використанні законів квантової механіки, зокрема принципу суперпозиції та квантової запутаності [25]. Слід відмітити, що розвиток такого класу комп'ютерів йде за двома напрямками: спеціалізовані системи для вирішення окремих завдань, наприклад завдань оптимізації, та універсальні системи, які зможуть реалізовувати будь-які квантові алгоритми (Шора, Гровера тощо).

Очевидно, що розвиток апаратного забезпечення йде декількома напрямками з метою подолання технологічних обмежень. Враховуючи особливості реалізації та коло задач, які вирішуються кожною технологією, що доповнюють та розширюють можливості одна одної, можливо зробити висновок про паралельне використання зазначених технологій у системах ШІ в майбутньому (рис. 6).

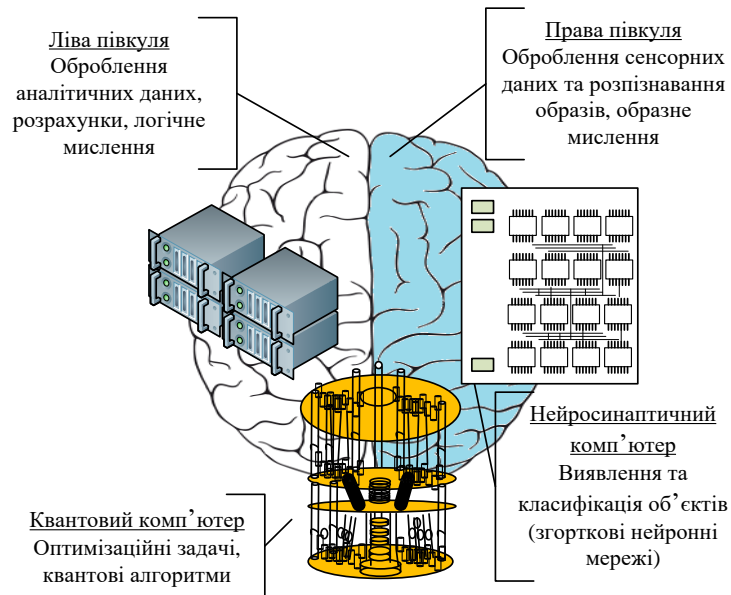


Рис. 6

Слід відмітити окремо важливу роль наборів великих даних (баз, даних або знань), які необхідні для моделювання та навчання систем зі ШІ з метою оцінювання рівня їх відповідності «інтелектуальності».

4. Формалізація та побудова математичної моделі технологічної сингулярності, аналіз та оцінювання її складових

Очевидно, що момент настання інтелектуального вибуху або технологічної сингулярності визначається низкою факторів, а саме — станом та темпами розвитку підходів, зазначених на рис. 4, та потужністю комп'ютерних систем, яка забезпечує реалізацію даних підходів на рівні показників роботи мозку.

Таким чином, технологічна сингулярність (technological singularity — S), а точніше — її стан в певний момент часу (t_i), може бути описана функцією виду (1):

$$S_{t_i} = f\{D_{t_i}, I_{t_i}\}, \quad (1)$$

$$D_{t_i} = \sum_{n=1}^N \omega_n A_n^{t_i}, \quad (2)$$

де D_{t_i} — прямий (direct) комплексний показник, який описує стан факторів (підходів, див. рис. 4) впливу на досягнення моменту сингулярності в певний момент часу, наприклад генерація та оброблення комп'ютерних зображень, імплементований (комп'ютерний) зір, семантична сегментація тощо; I_{t_i} — непрямий (indirect) комплексний показник, який описує стан індикаторів, що опосередковано характеризують розвиток прямих факторів через динаміку в області досліджень ШІ, наприклад кількість наукових статей, досліджень, інвестицій в галузь ШІ, кількість вчених, задіяних в галузі, тощо; ω_n — ваговий коефіцієнт n -го фактору $A_n^{t_i}$; t_i — i -й момент часу оцінювання стану сингулярності; $n \in [CGS^{t_i}, ICA^{t_i}, LSD^{t_i}, WBE^{t_i}, EBS^{t_i}, SWI^{t_i}, RBT^{t_i}, HWP^{t_i}]$ — фактори (елементи) впливу; виходячи з аналізу п. 3, розглядаємо вісім показників, кількість яких може уточнюватися в результаті досліджень; $A_n^{t_i}$ — оцінка n -го фактору впливу в момент часу t_i як функція прямих та непрямих індикаторів відповідно.

Аналіз звіту [26] дозволив розбити всі показники (індикатори) на певні тематичні групи. З метою уніфікації кожному показнику було присвоєно код.

Розділ «Дослідження та розробки» (research and development — R&D) розглядається як основа побудови та сталого розвитку систем ШІ. Основні індикатори даного розділу пов'язані, як правило, з теоретичними напрацюваннями у вигляді наукових праць (статей, конференцій тощо) та інтелектуальною власністю, оформленням відповідних патентів (табл. 3).

Таблиця 3

№	Показник, шт.	Цільове значення	Розділ (див. рис. 4)	Код
1	Кількість публікацій у виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах (Scopus)	↑	COM*	RD.01.00
2	Кількість публікацій у спеціалізованих журналах, присвячених ШІ	↑	COM	RD.02.00
3	Кількість публікацій на конференціях	↑	COM	RD.03.00
4	Кількість патентів в галузі ШІ	↑	COM	RD.04.00
5	Кількість публікацій в онлайн-репозиторії arXiv:	↑	COM	RD.05.00
6	за тематикою ШІ	↑	COM	RD.05.01
7	за тематикою розрахунків та мов (computation and language)	↑	CGS, NLP	RD.05.02
8	за тематикою роботи з комп'ютерними зображеннями (computer vision)	↑	CGS, CV	RD.05.03
9	за тематикою машинного навчання та комп'ютерних наук (machine learning in computer science)	↑	CGS, ML	RD.05.04
10	за тематикою нейронних мереж та еволюційних розрахунків (neural and evolutionary computing)	↑	CGS	RD.05.05
11	за тематикою робототехніки (robotics)	↑	RBT	RD.05.06
12	за тематикою машинного навчання в статистиці (machine learning in statistics)	↑	CGS, ML	RD.05.07
13	за тематикою поглибленого навчання (deep learning)	↑	CGS, DL	RD.05.08
14	Кількість учасників конференцій	↑	COM	RD.06.00
15	Кількість розміщень програмного забезпечення на платформі GitHub	↑	COM	RD.07.00

* COM (common) відноситься до всіх галузей досліджень.

Розділ «технічні показники» (technical performance — TP) присвячено аналізу показників, які характеризують прогрес у практичній реалізації теоретичних досліджень у різноманітних технічних сферах впровадження ІІІ (табл. 4).

Таблиця 4

№	Показник	Одиниця виміру	Цільове значення	Розділ (див. рис. 4)	Код
1	Результат класифікації зображення за тестом ImageNet: Top-1 Accuracy. Наскільки добре система може присвоїти мітку зображенню	%	100	CGS, CV	TP.01.00
2	Результат класифікації зображення за тестом ImageNet: Top-5 Accuracy, який оцінює, чи правильно присвоєна мітка хоча б у п'яти прогнозах класифікатора	%	≥ 94,9*	CGS, CV	TP.02.00
3	Час, необхідний для тренування системи до стандартного (заданого) рівня розпізнавання	с	↓	CGS, WBE	TP.03.00
4	Початкова відстань (fréchet insertion distance), тобто експертна оцінка відмінності (наближення) між штучно згенерованим зображенням та реальним, оціненим нулем	б/р	↓(0)	CGS, CV	TP.04.00
5	Ймовірність визначення фейкових зображень	б/р	↓(0)	CGS, CV	TP.05.00
6	Середня точність визначення пози людини з тестового набору	%	100	CGS, CV	TP.06.00
7	Середня точність побудови 3D-моделі об'єкта з його 2D-зображення з використанням тестового набору	%	100	CGS, CV	TP.07.00
8	Індекс перетину об'єктів (intersection-over-union (IoU) metric)	%	100	CGS, CV	TP.08.00
9	Імплементований зір (Embodied vision — EV)	–	–	CGS, CV,EBS	TP.09.00
10	Якість розпізнавання активності в часовому проміжку	%	100	CGS, CV	TP.10.00
11	Точність (якість) виявлення об'єктів з використанням навчального набору тестових відеофрагментів	%	100	CGS, CV	TP.11.00
12	Якість розпізнавання та виявлення облич з використанням тестового набору	б/р	↓(0)	CGS, CV	TP.12.00
13	Продуктивності та якості виконання завдань на розуміння англійської мови з використанням тестових наборів завдань	%	≥ 89,8*	CGS, NLP	TP.13.00
14	Здатність NLP системи давати короткі відповіді на запитання по тестовим наборам текстів	%	≥ 91,21*	CGS, NLP	TP.14.00
15	Кількість комерційних систем машинного перекладу	шт.	↑	CGS	TP.15.00
16	Точність генерування різних текстів (глибока мовна модель штучного інтелекту GPT-3)	%	100	CGS, WBE	TP.16.00
17	Точність надання відповідей системою на питання у вигляді зображень або поставлених усно	%	≥ 80,8*	CGS, WBE	TP.17.00
18	Точність розмірковування системи «на основі здорового глузду» та надання відповіді і його обґрунтування щодо наданого зображення	%	≥ 85*	CGS, WBE	TP.18.00
19	Якість розпізнавання мовлення (рівень помилок)	%	↓(0)	CGS, NLP	TP.19.00
20	Загальний час (продуктивність), необхідний для вирішення 400 тестових формул	–	↓	CGS, SAT	TP.20.00
21	Автоматизоване доведення теорем	%	100	CGS, ATP	TP.21.00

* Рівень показника людини.

У розділі «Економічна діяльність» (economy activity — EA) характеризується вплив ІІІ на ринок праці та інвестиції, які виділяються для розвитку систем ІІІ в індустрії (табл. 5).

Таблиця 5

№	Показник	Одиниця виміру	Цільове значення	Розділ (див. рис.4)	Код
1	Індекс найму за даними LinkedIn	рази	↑	COM	EA.01.00
2	Глобальна (загальна) потреба в робочій силі	%	↑	COM	EA.02.00
3	Потреба в робочій силі за кластерами навичок (7 кластерів), 01.02.02.(01-07):	%	↑	COM	EA.03.00
	машинне навчання (ML)	%	↑	CGS, ML	EA.03.01
	штучний інтелект (AI)	%	↑	COM	EA.03.02
	нейронні мережі (NN)	%	↑	CGS, NN	EA.03.03
	штучне мовлення (NLP)	%	↑	CGS, NLP	EA.03.04
	робототехніка (RBT)	%	↑	RBT	EA.03.05
	розпізнавання віртуальних образів (VIR)	%	↑	CGS,CV	EA.03.06
	автоматизований рух (AD)	%	↑	COM	EA.03.07
4	Глобальні інвестиції в розвиток ІІІ	млн у.о.	↑	COM	EA.04.00
5	Впровадження в промисловість (за галузями та областями) (10 областей) 03.00.01.(01-10)	%	↑	COM	EA.05.00
6	Впровадження робототехніки в промисловість	тис. од.	↑	RBT	EA.06.00
7	Кількість згадувань ІІІ в корпоративних звітах про прибутки та збитки (3 області), 03.00.03.(01-03)	тис. од.	↑		EA.07.00
	великі дані (BD)	тис. од.	↑	COM	EA.07.01
	машинне навчання (ML)	тис. од.	↑	CGS, ML	EA.07.02
	штучний інтелект (AI)	тис. од.	↑	COM	EA.07.03

У розділі «Освіта» (education — ED) описується стан освіти в галузі ІІІ (табл. 6).

Таблиця 6

№	Показник	Один. виміру	Цільове значення	Код
1	Кількість програм (курсів) у навчальних закладах вищої освіти освітнього рівня «бакалавр»	шт.	↑	ED.01.00
2	Кількість студентів освітнього рівня «бакалавр», які відвідали зазначені програми (курси)	тис. шт.	↑	ED.02.00
3	Кількість програм (курсів) у навчальних закладах вищої освіти освітнього рівня «магістр»	шт.	↑	ED.03.00
4	Кількості факультетів, які спеціалізуються на ІІІ	шт.	↑	ED.04.00
5	Кількість осіб з науковим ступенем PHD	шт.	↑	ED.05.00
6	Кількість осіб з науковим ступенем PHD, залучених у промисловість	шт.	↑	ED.06.00
7	Кількість осіб з науковим ступенем PHD, залучених в освітній процес	шт.	↑	ED.07.00

У розділі «Етичні питання» (Ethics in AI) характеризується активність у суспільстві з питань етики та нормативних актів у галузі ШІ (табл. 7).

Таблиця 7

№	Показник	Одиниця виміру	Цільове значення	Код
1	Кількість нормативних документів, які регламентують етичні питання в ШІ	шт.	↑	01.00.01.00
2	Кількість згадувань тематики ШІ у засобах масової інформації	шт.	↑	02.00.01.00
3	Кількість конференцій з питань етичних проблем у ШІ	шт.	↑	03.00.01.00

Всі розглянуті показники можна об'єднати в три великі групи.

Група 1. Розділи 1, 4, 5 — непрямі показники, які характеризують інтенсивність досліджень у галузі ШІ, розвиток тематики ШІ в освітніх та наукових закладах та увагу суспільства до проблематики використання ШІ. Очевидно, зростання значень таких показників говорить про збільшення активності в галузі ШІ з погляду змісту, хоча без врахування якості такої активності.

Група 2. У розділі 2 описано прямі показники, які характеризують успіхи суспільства в практичній реалізації теоретичних напрацювань (показники розділів 1, 4, 5) в галузі ШІ у вигляді прикладних рішень — інформаційно-комунікаційних систем ШІ.

Група 3. У розділ 3 включено непрямі показники, які характеризують інвестиції в галузь досліджень ШІ, а також практичну реалізацію розроблених прикладних рішень, теорій та підходів у галузі ШІ в промисловість. Іншими словами, у групі 3 описано масштаб практичного впровадження технологій ШІ в індустрію.

Таким чином, три групи поєднанні логікою причино-наслідкових зв'язків: теоретичні дослідження → прикладні рішення → практична реалізація. В такому випадку зазначені показники повинні впливати один на одного, тобто характеризуватися відповідними коефіцієнтами кореляції (рис. 7).

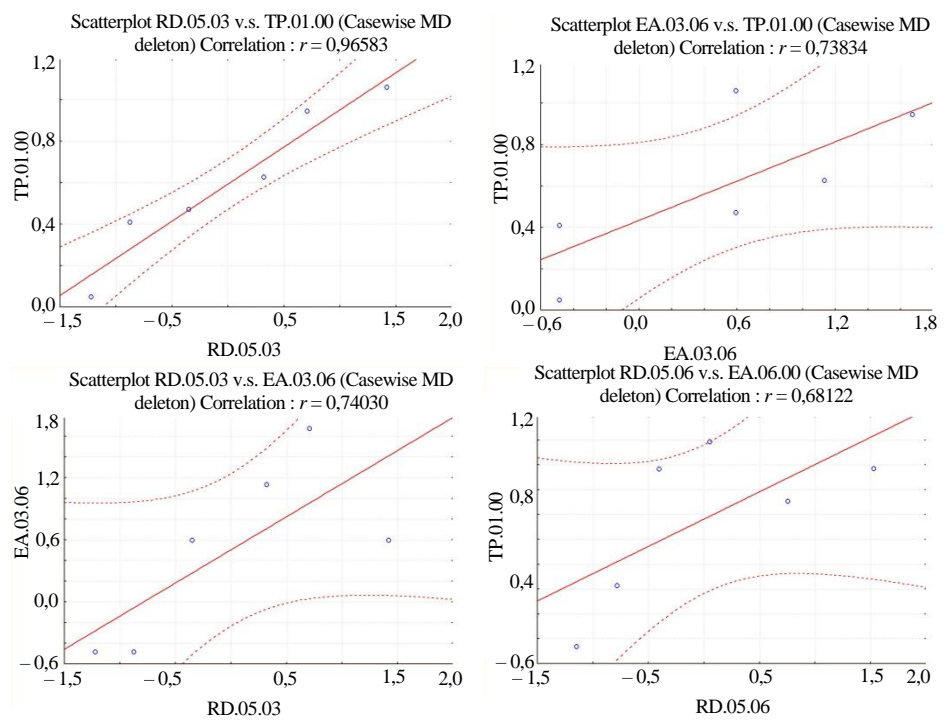
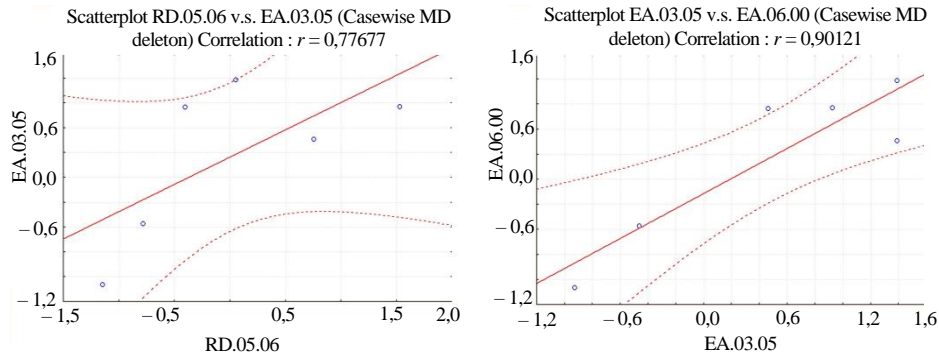


Рис. 7



Дані статистичного аналізу (див. рис. 7) підтверджують високу кореляцію в трійках (на прикладі): дослідження (оброблення зображень) → розроблення прикладних рішень (розпізнавання віртуальних зображень) → потреба в робочій силі. Також на високому рівні знаходиться кореляція між індикаторами в галузі робототехніки (RD.05.06–EA.03.05(EA.06.00)).

Розглянемо детально одну із складових моделі (2) «когнітивна наука» (CGS), яка може бути представлена відповідними індикаторами у загальному вигляді в частині роботи з зображеннями (3):

$$A_n^{(t_i)} = f a_n^{z(t_i)}; a_n^{x(t_i)}; a_n^{y(t_i)}, \quad (3)$$

де $a_n^{z(t_i)}; a_n^{x(t_i)}; a_n^{y(t_i)}$ — індикатори (показники) відповідно з трьох груп (x — 1, 4, 5; z — 2; y — 3); розраховується як середнє значення відповідних індикаторів.

Використовуючи (3), елемент $A_{CGS}^{t_i}$ може бути представлений як

$$A_{CGS}^{t_i} = f \left\{ \begin{matrix} TP.01.00 \\ TP.02.00 \\ TP.03.00 \\ TP.06.00 \\ TP.07.00 \\ TP.08.00 \\ TP.10.00 \\ TP.11.00 \\ TP.12.00 \end{matrix} \right\}; a_{CGS}^{z(t_i)} \left\{ \begin{matrix} RD.05.03 \\ RD.05.04 \\ RD.05.05 \\ RD.05.07 \end{matrix} \right\}; a_{CGS}^{y(t_i)} [EA.03.06] \}. \quad (4)$$

Результати розрахунків фактору «когнітивна наука» (CGS) (рис. 8, фактор «когнітивна наука» в просторі прямих та непрямих індикаторів) дають підстави стверджувати про постійне зростання показника (4) протягом 2015–2020 рр.

Таким чином, постійне зростання значення прямого індикатору в частині складової «розпізнавання віртуальних зображень» вказує на «відстань», яку суспільство пройшло за цей час та яка залишилася, в умовних одиницях (шкала z приведена до 10) до настання технологічної сингулярності в частині лише деяких елементів однієї області дослідження з восьми виділених як таких, що суттєво впливають на розвиток ІІІ на його шляху до технологічної сингулярності.

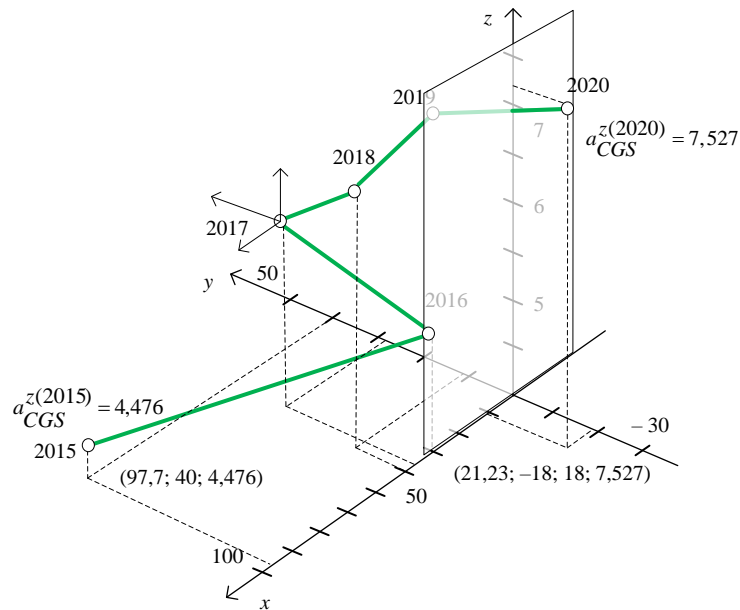


Рис. 8

Величини кутів нахилу прямої до відповідних площин між оцінюваннями можуть розглядатися як показник ефективності наукових досліджень, інвестицій в ІІІ тощо в досягненні сингулярності. Непрямі фактори можливо розглядати як додаткові характеристики динаміки активності в області ІІІ, які корелюють з прямими факторами стану сингулярності. Наприклад, протягом 2016–2019 рр. можемо відмітити уповільнення темпів публікацій результатів наукових досліджень $a_n^{x(t_i)}$ та зменшення попиту на фахівців у галузі оброблення віртуальних зображень $a_n^{y(t_i)}$; як наслідок у 2020 р. приріст прямого показника $a_n^{z(t_i)}$, який характеризує ступінь практичної реалізації питання оброблення зображень у вигляді прикладних рішень та систем, досягнув мінімального за п'ять років рівня, хоча і був позитивним.

Висновок

Здійснений аналіз та систематизація завдань, які вирішуються сучасними системами ІІІ, інструментарію великих даних та сучасних концепцій, які впливають на розвиток загального ІІІ, дозволив розробити узагальнену модель оцінювання стану технологічної сингулярності з відповідними припущеннями та спрощеннями та зробити наступні загальні висновки.

1. Область застосування сучасних ІС, підходів та принципів, які декларують підтримку та реалізацію ІІІ, обмежена на рівні реалізації процесів логічного пізнання або мислення. Тобто мова йде про реалізацію слабкого або вузького ІІІ на сучасному рівні розвитку систем такого класу. Реалізація ж процесів свідомості залишається перспективним завданням на шляху до загального ІІІ та активно розвивається в межах таких областей досліджень, як інтегровані когнітивні системи, моделювання роботи мозку, колективний інтелект, імплементовані системи тощо.

2. Інструментарій ІІІ є об'єктом дослідження науки про дані (DS) або великих даних (BD). В основному методи DS, які впливають на розвиток ІІІ, розподіляються в межах двох великих груп — виявлення даних та машинне навчання, — межа між якими дуже тонка та може бути визначена їх об'єктами: в разі DM це

алгоритми для виявлення раніше невідомих шаблонів, для ML — вирішення завдання побудови моделей на основі алгоритмів навчання з метою прогнозування даних. За даними експертів, вага інструментарію DS серед підходів, які впливають на розвиток ШІ до рівня інтелектуального вибуху, складає не менше 25 %, оскільки саме методи DM та ML лежать в основі виявлення об'єктів, розпізнавання зображень, оброблення природного мовлення та аналізу і написання текстів.

3. З метою переходу від експертних (якісних) оцінок до ідеї кількісної оцінки моменту розроблення суперінтелекту було проаналізовано експертні дані щодо методів та підходів, які можуть впливати на темпи розвитку загального ШІ, та виділено вісім головних областей досліджень — факторів впливу, які потребують детального вивчення та розроблення шкал для оцінок їхнього стану та динаміки розвитку у рамках загальної моделі оцінювання.

4. Модель оцінювання технологічної сингулярності розглянута з погляду двох великих груп факторів: прямих та непрямих. Прямі фактори описують безпосередньо стан прикладних досліджень та досягнень у реалізації ІС на шляху до загального ШІ. Непрямі фактори поділяються на дві підгрупи: перша описує динаміку активності в галузі теоретичних, наукових досліджень ШІ та стандартизації галузі на нормативно-законодавчому рівні, друга — інвестицій в їх розвиток, зайнятість фахівців зі ШІ в різних галузях економіки тощо, тобто практичну реалізацію прикладних інформаційних систем.

У результаті статистичного аналізу була виявлена кореляція між показниками всіх трьох груп на рівні 0,6–0,9, що підтверджує коректність логіки їх побудови і класифікації за принципом причино-наслідкових зв'язків: теоретичні дослідження → прикладні рішення → практична реалізація.

5. В якості практичного прикладу застосування розробленої моделі технологічної сингулярності було деталізовано до індикаторів та їх значень одну з восьми ключових областей досліджень — оброблення зображень. Результати розрахунків, представлені графічно в просторі прямих та непрямих індикаторів, дозволяють зробити висновок про кількісний стан питання та його позитивну динаміку протягом останніх п'яти років (збільшення прямого показника з 4,476 до 7, 523 за 10-бальною шкалою). Запропоноване графічне представлення результатів досліджень має велике практичне значення з погляду можливості аналізувати і прогнозувати динаміку прямих індикаторів та їх залежність (кореляцію) від динаміки непрямих. Так, зменшення темпів приросту непрямих показників протягом 2–3 років призвело до уповільнення темпів росту прямого показника.

Запропонована авторами модель потребує деталізації на рівні кожного фактору (області дослідження) з погляду уточнення показників (індикаторів) шляхом залучення фахівців з відповідних галузей досліджень: когнітивна наука, інтегровані когнітивні системи, моделювання роботи мозку, колективний інтелект, набори великих (тестових) даних, імплементовані системи, робототехніка та апаратне забезпечення.

О.В. Заріцький, О.В. Пономаренко

КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИНГУЛЯРНОСТІ

Розглянуто актуальне питання кількісного оцінювання технологічної сингулярності. Авторами зроблено аналіз інструментарію штучного інтелекту та підходів, які впливають на розвиток суперінтелекту, що дозволило вперше розробити загальну багатофакторну модель технологічної сингулярності та представити її графічно в просторі прямих та непрямих індикаторів розвит-

ку. Розроблений підхід дозволяє перейти від експертних суджень щодо питання технологічної сингулярності у формі екстрапольованих кривих складності різноманітних систем, або якісного опису можливих сценаріїв розвитку технологій, до кількісної оцінки стану технологічної сингулярності. Формалізовано зв'язки між відповідними функціональними областями інтелекту людини та сучасних експертних систем, розроблено структурно-функціональну модель отримання знань. Зроблено висновок щодо реальних меж процесів сучасних «інтелектуальних» систем на рівні штучного мислення та логічного пізнання, що відповідає слабкому штучному інтелекту. Проаналізовано стан і шляхи розвитку апаратного забезпечення, що дозволило зробити висновок про комплексне використання різних апаратних архітектур та принципів оброблення інформації: суперкомп'ютера, нейросинаптичного та квантового комп'ютерів для реалізації концепції технологічної сингулярності. У вигляді структурної моделі формалізовано області досліджень, які найбільше впливають на розвиток штучного інтелекту, та їх зв'язок з існуючими підходами і методами оброблення великих даних. Вперше запропоновано класифікацію індикаторів розвитку штучного інтелекту в межах двох класів, прямих та непрямих, об'єднаних у три групи (інтенсивність наукових досліджень і суспільна активність; рівень прикладних (технологічних) рішень; практична реалізація), які найбільше впливають на розвиток загального штучного інтелекту. Виявлено кореляцію між формалізованими групами індикаторів, що підтверджує коректність гіпотези про причинно-наслідковий зв'язок між групами (теоретичні дослідження → прикладні рішення → практична реалізація) та їх взаємний вплив.

O.V. Zaritskyi, O.V. Ponomarenko

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF TECHNOLOGICAL SINGULARITY

The article deals with the topical issue of quantitative assessment of technological singularity. The authors made an analysis of artificial intelligence tools and approaches affecting the development of superintelligence, which allowed for the first time to develop a general multifactor model of technological singularity and present it in the space of direct and indirect indicators of development. The developed approach makes it possible to move from expert judgments on the issue of technological singularity in the form of extrapolated complexity curves of various systems or qualitative description of possible scenarios of technological development to quantitative assessment of the state of technological singularity. The links between the relevant functional areas of human intelligence and modern expert systems are formalized, a structural-functional model of knowledge acquisition is developed. A conclusion is made about the real limits of the processes of modern "intelligent" systems at the level of artificial thinking and logical cognition, which corresponds to a weak artificial intelligence. The state and ways of hardware development were analyzed, which allowed making a conclusion about the complex use of different hardware architectures and information processing principles: supercomputer, neurosynaptic and quantum computers to implement the concept of technological singularity. Formalized in the form of a structural model the areas of research most influential in the development of artificial intelligence, and their relationship to existing approaches and methods of processing big data. For the first time proposed the classification of indicators of development of artificial intelligence within two classes: direct and indirect, grouped into three groups: the intensity of research and public activity; the level of applied (technological) solutions; practical implementation, most affecting the development of general artificial intelligence. The correlation between the formalized groups of indicators was revealed, which confirms the correctness of the hypothesis about the cause-effect relationship between the groups: theoretical research → applied solutions → practical implementation and their mutual influence.

1. Джарратано Дж., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование, 4-е издание: Пер. с англ. М. : ООО «И.Д. Вильямс», 2007. 1152 с.
2. James H. Moor. The status and future of the turing test. *Minds and Machines*. 2001. **11**, N 1. P. 77–93. <https://doi.org/10.1023/A:1011218925467>.
3. Wikipedia: Technological singularity. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Technological_singularity. (Дата звернення: 10.01.2022.)
4. Good I.J. Speculations concerning the first ultra intelligent machine. *Advances in Computers*. 1966. **6**. P. 31–88. [https://doi.org/10.1016/S0065-2458\(08\)60418-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2458(08)60418-0).

5. Потапов А.С. Технологическая сингулярность в контексте теории метасистемных переходов. *Компьютерные инструменты в образовании*. 2017. № 6. С. 12–24.
6. Vinge V. The coming technological singularity: how to survive in the post-human Era. Vision–21: interdisciplinary science and engineering in the era of cyberspace. San Diego: San Diego State University. 1993. P. 11–22. DOI:10.5040/9781474248655.0037.
7. Braga A., Logan R.K. The emperor of strong AI has no clothes: limits to artificial intelligence. *Information*. Switzerland. 2017. 8 (4). P. 156. <https://doi.org/10.3390/info8040156>.
8. Bostrom N. How long before superintelligence? *Linguistic and Philosophical Investigations*. 2006. 5, 1. P. 11–30.
9. Baum S., Goertzel B., Goertzel T. How long until human-level AI? Results from an expert assessment. *Technological Forecasting and Social Change*. 2011, 78, N 1. P. 185–195.
10. Grace K. et al. When will AI exceed human performance? Evidence from AI Experts. arXiv:1705.08807. 2018.
11. Воскобойников А.Э. Монолог о диалоге и понимании. *Знание. Понимание. Умение*. 2006. № 1. С. 22–27.
12. David J. Chalmers. Facing up to the problem of consciousness. *Journal of Consciousness Studies*. 1995. 2, N 3. P. 200–219.
13. Craig A. Anderson. *Encyclopedia of Psychology*. 2012. 8. DOI:10.1037/10523-068.
14. Jeckson P. Expert systems introduction. 3 edition. *Addison Wesley Publishing Company*. 1998. 542 p.
15. Nils J. Nilsson. Introduction to machine learning an early draft of a proposed. Textbook. Stanford University, Stanford. 2005. 188 p.
16. Конверский А.Е. Логика. Учебник для студентов юридических факультетов. М. : Идея-Пресс, 2012. 324 с.
17. ISO/IEC 2382:2015 Information technology — Vocabulary. 2015. Technical Committee ISO/IEC JTC 1. Information technology. 46 p.
18. Томас Эрл. Основы Big Data: концепции, алгоритмы и технологии. Баланс. Бизнес. Букс, 2018. 320 с.
19. Manyika James. Big Data: the next frontier for innovation, competition and productivity. McKinsey Global Institute. 2011. 156 p.
20. Jure Leskovec. Mining of massive datasets. Stanford University. 2019. 603 p.
21. Flach P. Machine learning. The art and science of algorithms that make sense of data. *Cambridge University press*. 2012. 400 p.
22. Müller Vincent C., Bostrom N. Future progress in artificial intelligence: a survey of expert opinion. Fundamental issues of artificial intelligence. 2016. Syntheses Library, Berlin : Springer. P. 553–571. <http://orcid.org/0000-0002-4144-4957>.
23. Cognitive science. The Stanford encyclopedia of philosophy. Substantive revision Sept. 2018. URL: <https://plato.stanford.edu/entries/cognitive-science/>. (Дата звернення: 14.11.2021.)
24. TrueNorth: от нуля к 64 миллионам нейронов. Открытые системы. СУБД. Издательство «Открытые системы», 2021. URL: <https://www.osp.ru/os/2019/03/13055127>. (Дата звернення: 14.11.2021.)
25. Нильсон М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. Пер. с англ. М. : Мир, 2006. 824 с.
26. Artificial intelligence. Index Report 2021. URL: The AI Index Report — Artificial Intelligence Index (stanford.edu). (Дата звернення: 14.11.2021.)

Отримано 30.11.2021
Після доопрацювання 12.01.2022