
СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 004.89:617.3

О. О. СИДОРУК, Л. Г. КОВАЛЬ

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ПІДБОРУ ІМПЛАНТІВ КОЛІННОГО СУГЛОБА: ОГЛЯД І ПЕРСПЕКТИВИ

*Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе 95, 21021, Вінниця,
Україна, e-mail: sydoruk.oleh@gmail.com*

Анотація. В статті аналізується сучасний стан та перспективи розвитку автоматизованих систем для підбору імплантів колінного суглоба. Підкреслено важливість точного підбору імпланту для успішного ендопротезування, а також зростаючу роль технологій, таких як роботизовані хірургічні системи, інструменти на основі штучного інтелекту та машинного навчання, системи комп'ютерної хірургії та пацієнт-специфічні імпланти. Детально описано роботизовані системи, їхні характеристики та порівняльні аспекти. Розглянуто застосування штучного інтелекту та машинного навчання в прогнозуванні розмірів імплантів, 3D-плануванні та розробці пацієнт-специфічних імплантів. Окрему увагу приділено системам комп'ютерної хірургії поза робототехнікою, ролі передопераційного планування та 3D-моделювання. Наведено огляд новітніх технологій та майбутніх напрямків у цій галузі.

Ключові слова: автоматизована система, колінний суглоб, імплант, ендопротезування, роботизована хірургія, штучний інтелект, машинне навчання, комп'ютерна хірургія, пацієнт-специфічний імплант, передопераційне планування.

Abstract. The article discusses the current state and future prospects of automated systems for knee implant selection. It emphasizes the importance of precise implant matching for successful total knee arthroplasty, as well as the increasing role of technologies such as robotic surgical systems, artificial intelligence and machine learning-based tools, computer-assisted surgery systems, and patient-specific implants. Various robotic systems, their characteristics, and comparative aspects are described in detail. The application of artificial intelligence and machine learning in predicting implant sizes, 3D planning, and the development of patient-specific implants is examined. Special attention is paid to computer-assisted surgery systems beyond robotics, the role of preoperative planning, and 3D modeling. An overview of emerging technologies and future directions in this field is provided.

Keywords: automated system, knee joint, implant, arthroplasty, robotic surgery, artificial intelligence, machine learning, computer-assisted surgery, patient-specific implant, preoperative planning.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-50-2-162-171

ВСТУП

Точний підбір імпланту колінного суглоба відіграє вирішальну роль в успіху тотального ендопротезування колінного суглоба (ТЕКС), забезпечуючи належну біомеханічну надійність, довговічність та задоволеність пацієнта. Неправильний вибір імпланту може призвести до субоптимальних результатів, включаючи біль, нестабільність та необхідність ревізійної операції. Біомеханічна організація руху колінного суглоба досить складна, і імплант повинен відповідати анатомічній будові та кінематичним характеристикам пацієнта, щоб функціонувати належним чином. Неправильно підібраний або встановлений імплант може порушити цей делікатний баланс, спричиняючи ускладнення. Незважаючи на значні досягнення в дизайні імплантів, хірургічних техніках та програмах реабілітації, рівень незадоволеності пацієнтів після ТЕКС залишається стабільно високим і, за даними багатьох досліджень, сягає 20 % [1]. Причиною є проблеми з функціональною взаємодією тіла пацієнта з імплантом. Незадоволеність пацієнтів найчастіше пов'язана з функціональними скаргами, такими як персистуючий біль, відчуття нестабільності, обмеження діапазону рухів або невідповідність попереднім очікуванням

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Історично, для підбору імплантів використовувалися ручні методи, але з накопиченням досягнень у галузі робототехніки, комп'ютерного зору та штучного інтелекту все частіше застосовуються автоматизовані системи. Цей перехід відображає ширшу тенденцію в хірургії до використання технологій для підвищення точності, персоналізації лікування та покращення результатів для пацієнтів. Ручні методи значною мірою покладаються на досвід та судження хірурга, що може призвести до варіабельності. Автоматизовані системи пропонують потенціал для більшої послідовності та точності, надаючи об'єктивні дані та рекомендації.

Автоматизовані системи для підбору імплантів колінного суглоба можна поділити на кілька категорій:

- роботизовані хірургічні системи, які допомагають у точному розміщенні імпланту;
- інструменти на основі штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН) для передопераційного планування та прогнозування розміру імпланту;
- системи комп'ютерної хірургії (CAS) для навігації та покращеної візуалізації;
- технології для розробки та виробництва пацієнт-специфічних імплантів.

Нині зростає інтерес до персоналізованої артропластики та допоміжних технологічних інструментів, таких як навігація, робототехніка та пацієнт-специфічні інструменти (PSI), для покращення якості імплантації [2]. Прагнення до персоналізованої артропластики свідчить про відхід від універсального підходу до ендопротезування колінного суглоба, визнаючи унікальні анатомічні варіації серед пацієнтів. Традиційні серійні імпланти можуть не ідеально відповідати анатомії кожного пацієнта, що потенційно призводить до субоптимального прилягання та функціонування. Автоматизовані системи полегшують створення та встановлення імплантів, які краще підходять конкретній особі.

1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ

На світовому ринку представлено певна кількість автоматизованих систем для підбору та встановлення імплантів колінного суглоба, які використовуються в процесі ендопротезування.

OMNIBotics (Corin Group) [3] – це роботизована технологія, яка використовується для тотального ендопротезування колінного суглоба. Її основними компонентами є BalanceBot для вимірювання натягу зв'язок, роботизований ріжучий інструмент OMNIBot та робоча станція OMNIBotics. Система функціонує шляхом інтраопераційного планування на основі даних про баланс зв'язок у реальному часі, забезпечуючи точне позиціонування стегнового ріжучого інструменту та сумісність з різними типами імплантів, такими як Apex Knee, Unity Knee та HLS Kneetec. Система OMNIBotics робить акцент на балансуванні зв'язок як на вирішальному факторі при виборі та встановленні імпланту. Забезпечуючи вимірювання натягу м'яких тканин до виконання кісткових розрізів, система спрямована на досягнення оптимального балансу та стабільності, потенційно зменшуючи потребу у вивільненні м'яких тканин та покращуючи функціональні результати. Техніка Predictive Balance, що використовується в системі, здатна прогнозувати натяг зв'язок до виконання розрізів, що потенційно зменшує травматизацію та прискорює подальше відновлення.

VELYS Knee Solutions (Johnson & Johnson MedTech) [4] включає роботизоване рішення VELYS Robotic-Assisted Solution, хмарний портал VELYS Insights та автоматизовану хірургічну систему KINCISE 2 для ревізійного ТЕКС. Роботизована система VELYS використовує безтомографічну технологію для отримання інтраопераційних кісткових орієнтирів, надаючи інформацію в режимі реального часу для персоналізованої хірургії. Система пропонує варіанти для кінематичного відновлення та фіксації компонентів SIGMA HP Partial Knee при однокомпонентному ендопротезуванні колінного суглоба. VELYS Insights дозволяє хірургам аналізувати інтраопераційні дані для вдосконалення хірургічних підходів. VELYS зосереджується на інтраопераційних даних та персоналізованій хірургії без потреби в передопераційних КТ-скануваннях. Відсутність КТ-сканувань зменшує радіаційне опромінення та спрощує робочий процес. Система в цілому реалізує підхід, спрямований на кінематичне відновлення природної рухливості коліна пацієнта.

CORI Surgical System (Smith+Nephew) [4] – це ручна роботизована система, яка використовується при ендопротезуванні колінного суглоба. Її ключовими компонентами є ручний роботизований пристрій та система цифрового 3D-моделювання. Система створює індивідуалізовану 3D-модель коліна пацієнта без використання КТ/МРТ, допомагаючи хірургу в плануванні та виконанні операції з високою точністю. CORI сумісна з широким спектром імплантів Smith+Nephew, включаючи імпланти на основі цирконію за технологією OXINIUM. CORI пропонує ручний роботизований підхід з акцентом на інтраопераційному плануванні та широкому виборі імплантів. Ручний пристрій забезпечує хірургу тактильний зворотний зв'язок та контроль, а відмова від передопераційних КТ-

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

сканувань подається як відчутна перевага. Система CORI здатна створювати 3D-модель без КТ-сканувань та сумісна з різноманітними імплантами [5].

NextAR Knee (Medacta) [6] – це хірургічний додаток з доповненою реальністю, розроблений для допомоги хірургам при виконанні тотального ендопротезування колінного суглоба. Система використовує окуляри доповненої реальності NextAR Augmented Reality Glasses та оптичні треки для надання хірургу даних про анатомічну структуру коліна пацієнта в режимі реального часу під час операції. NextAR працює в поєднанні з колінним протезом GMK Sphere. NextAR використовує доповнену реальність для забезпечення візуального контролю, ґрунтованого на попередньому хірургічному досвіді. Під час AR-сеансу система може виводити важливу інформацію безпосередньо в поле зору хірурга, що потенційно покращує прийняття рішень та точність виконання операційного втручання. Крім того, окуляри AR дозволяють покращити характеристики зору хірурга та адаптуватися до нових даних у реальному часі.

MyKnee (Medacta) [7] – це технологія, яка використовує пацієнт-специфічні хірургічні інструменти для ендопротезування колінного суглоба. Вона передбачає створення 3D-друкованого хірургічного інструменту, спеціально розробленого під анатомічні особливості коліна пацієнта на основі КТ або МРТ-сканувань. MyKnee представляє підхід, що полягає у використанні індивідуалізованого хірургічного інструменту, зокрема на основі 3D-друку. Індивідуальні інструменти можуть потенційно покращити точність та відтворюваність кісткових розрізів та встановлення імпланту.

Persona IQ (Zimmer Biomet) – технологія, що відома як розумний колінний імплант, призначена для забезпечення інтелектуалізованого підходу до відновлення рухливості після ендопротезування колінного суглоба [8]. Persona IQ поєднує персоналізовану посадку імпланту Persona Knee з розумним подовжувачем стрижня, який містить датчики для збору даних про рух після операції. Persona IQ – це «розумний» імплант, який зосереджується на післяопераційному моніторингу та зборі даних, а не на інтраопераційному підборі імпланту. Ця технологія надає цінну інформацію про прогрес відновлення пацієнта та може допомогти виявити проблеми на ранній стадії. Імплант здатний збирати та передавати дані про рух після операції.

MAKO SmartRobotics (Stryker) використовує роботизовану руку, 3D-планування на основі КТ, технологію зворотного зв'язку AccuStop та імпланти Stryker Triathlon Knee System [9]. Система забезпечує передопераційне планування з використанням 3D-КТ-зображень для віртуального розміщення імпланту, інтраопераційну оцінку та коригування натягу м'яких тканин, а також тактильний зворотний зв'язок для точної резекції кістки та динамічний аналіз натягу зв'язок. MAKO поєднує детальне передопераційне планування з інтраопераційними коригуваннями та тактильним керуванням для оптимізації розміщення імпланту та балансу зв'язок. Поєднання передопераційного планування та зворотного зв'язку в реальному часі спрямоване на максимізацію точності та функціональних результатів. Використання технології AccuStop підкреслює увагу до безпеки та точності при видаленні кістки.

ROSA Knee (Zimmer-Biomet) [10] – це напівактивна роботизована система, яка може використовувати беззображувальне планування або планування на основі рентгенівських знімків, а також інтраопераційне відображення за допомогою ручного зонда. Вона забезпечує як передопераційне, так і інтраопераційне планування, оцінку вирівнювання та стабільності коліна в діапазоні рухів, а роботизована рука допомагає в позиціонуванні ріжучих елементів при ручній підготовці кістки. ROSA Knee пропонує гнучкість у вимогах до візуалізації та дозволяє як передопераційне, так й інтраопераційне планування. Здатність використовувати рентгенівські знімки як альтернативу КТ-скануванню може бути вигідною за певних умов. Поєднання передопераційного та інтраопераційного планування дозволяє вносити корективи на основі оцінки ситуації хірургом під час процедури.

За підсумками огляду технологій автоматизації планування ТЕКС в хірургії можна виділити тенденцію, яка полягає в більшій інтеграції інтраопераційних даних та контролю хірурга, а також широке використання візуалізації. Як бачимо, деякі системи значною мірою покладаються на передопераційні КТ-сканування, тоді як інші використовують інтраопераційне відображення для розробки хірургічного планування. Ця варіація свідчить про співіснування різних підходів до вибору оптимального часу та джерела анатомічних даних для планування. Оцінки точності можуть відрізнятися в різних роботах, що підкреслює важливість розуміння конкретної технології та її впливу на хірургічну точність. Хоча всі роботизовані системи спрямовані на підвищення точності, рівень автоматизації та методи, що використовуються для резекції кістки та розміщення імпланту, відрізняються, що призводить до відмінностей в оцінюванні точності. Також суттєвим бар'єром для широкого впровадження роботизованої хірургії залишається вартість, зі значними відмінностями в орієнтовних цінах різних систем. Високі капітальні інвестиції, необхідні для закупівлі цих систем, можуть впливати на рішення лікарень щодо їх придбання і, зрештою, на доступ пацієнтів до цих технологій.

2. ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ ТА МАШИННЕ НАВЧАННЯ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ ПІДБОРІ ІМПЛАНТІВ

Інструменти на основі штучного інтелекту (ШІ) використовуються для прогнозування оптимальних розмірів імплантів на основі рентгенівських та КТ-зображень [11]. Також поширеним є використання згорткових нейронних мереж (CNN) для прогнозування розмірів імплантів на основі рентгенівських знімків [12]. ШІ здатний аналізувати медичні зображення для виділення складних анатомічних ознак та прогнозування відповідних розмірів імплантів, потенційно зменшуючи потребу в ручному шаблонуванні. CNN є потужними інструментами розпізнавання образів, які можуть навчитися співвідношенню між рентгенографічними ознаками та розмірами відповідних імплантів. Обчислювальний інструмент, що використовує CNN для автоматичного підбору розміру імпланту на основі рентгенівських знімків, досяг високої точності прогнозування [12–13]. Окрім CNN, впроваджуються й інші архітектури, такі як візуальні трансформери, які завдяки механізмам уваги здатні краще охоплювати глобальний контекст зображення, та рекурентні нейронні мережі, що знаходять застосування в аналізі послідовностей, наприклад, у відеоаналізі рухів або на етапах хірургічного планування [14].

Системи ШІ також використовують дані КТ для 3D-планування та підбору імплантів [15]. Алгоритми ШІ можуть обробляти дані 3D-візуалізації для створення детальних передопераційних планів, включаючи оптимальний розмір, положення та вирівнювання імпланту. КТ-сканування надають вичерпну інформацію про тривимірну анатомічну організацію, яку ШІ може використовувати для виконання складних завдань хірургічного планування. Дослідження, що порівнює традиційні вимірювання за шаблоном з передопераційним плануванням за допомогою ШІ, показало покращену точність та результати при використанні ШІ [15–16]. Моделі машинного навчання, що враховують переваги участі хірурга в цьому процесі, використовуються для вдосконалення передопераційних планів. ШІ може навчатися на попередніх рішеннях хірургів для створення більш персоналізованих та точних передопераційних планів, потенційно зменшуючи потребу в інтраопераційних коригуваннях. Аналізуючи закономірності в тому, як хірурги змінюють плани виробника імпланту за замовчуванням, ШІ може розробляти алгоритми, які краще прогнозують бажаний для хірурга підхід [17–18].

ШІ відіграє важливу роль у розробці пацієнт-специфічних імплантів. Повністю автоматизовані робочі процеси використовуються для розробки індивідуальних імплантів на основі КТ-зображень з використанням ШІ та статистичних моделей форми [2]. ШІ здатний автоматизувати складний процес розробки колінних імплантів, які ідеально відповідають унікальним анатомічним параметрам пацієнта. Аналізуючи КТ-сканування та використовуючи такі методи, як статистичне моделювання форми, ШІ може створювати високоточні 3D-моделі кісток пацієнта та допомагати в проектуванні імплантів в автоматизованому режимі, які забезпечують оптимальну посадку та покриття [2], що забезпечує створення біомеханічно оптимізованих імплантів.

ШІ може вийти за межі простого відтворення анатомічних особливостей та розробляти імпланти, оптимізовані для конкретних навантажень та напружень, які вони відчуватимуть. Алгоритми генеративного дизайну можуть досліджувати величезний простір варіантів, враховуючи біомеханічні параметри, такі як вага та рівень активності, для створення імплантів, які є легшими, міцнішими та довговічнішими. Відома технологія використання генеративного дизайну з ШІ для створення пацієнт-специфічних колінних імплантів з урахуванням близько 70 біомеханічних параметрів [2]. При цьому машинне навчання використовується для автоматизованої кастомізації імплантів на основі даних КТ. Використовуються різні методи машинного навчання для обробки зображень, сегментації та генерації 3D-моделей, що забезпечує створення індивідуального дизайну імплантів [19].

ШІ демонструє багатообіцяючу точність у прогнозуванні розмірів імплантів, часто порівнянну або навіть вищу за ручні методи, що може призвести до ефективніших передопераційних робочих процесів. Автоматизація процесу підбору розміру імпланту може заощадити час та ресурси, потенційно зменшуючи ризик людської помилки, пов'язаної з ручним шаблонуванням. Інтеграція ШІ з 3D-плануванням дозволяє застосовувати більш комплексний та персоналізований підхід до ТЕКС, враховуючи численні анатомічні та біомеханічні фактори.

Системи комп'ютерної навігації надають хірургам рекомендації в режимі реального часу за допомогою оптичних або магнітних трекерів, надаючи дані про вирівнювання кінцівок та положення імпланту [4]. Комп'ютерна навігація покращує представлення хірургічного поля та підвищує точність розміщення імпланту порівняно з традиційними ручними методами [19]. Забезпечуючи постійний зворотний зв'язок щодо положення інструменту та імпланту, навігаційні системи допомагають хірургам

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

під час операції не виходити за межі запланованих параметрів і точно позиціонувати елементи при ендопротезуванні колінного суглоба.

Технологія пацієнт-специфічного інструментарію (PSI) передбачає використання шаблонів для різання, створених методом 3D-друку, які розроблені відповідно до анатомічних параметрів пацієнта на основі передопераційних КТ або МРТ-сканувань, які дозволяють зорієнтувати розрізи кісток для відповідності серійним імплантам [20]. PSI спрямована на покращення точності кісткових розрізів, що призводить до кращого вирівнювання імпланту, але не дозволяє використовувати індивідуальні імпланти. Хоча PSI пропонує персоналізований підхід до підготовки кістки, вона все ще обмежена наявними розмірами та формами стандартних імплантів [21].

Ручні навігаційні пристрої включають датчики тиску для оцінювання положення імпланту та ручні пристрої з гіроскопами для вирівнювання кінцівок [2]. Ці пристрої пропонують хірургам додаткові інструменти для інтраопераційної оцінки та оптимізації розташування імпланту. Вони надають дані в режимі реального часу, які можуть допомогти хірургам приймати більш обґрунтовані рішення під час операції.

Технології CAS, включаючи навігацію та PSI, надають спектр підходів для підвищення хірургічної точності, причому роботизована хірургія є найпрогресивнішою формою автоматизації операцій. Кожне нове покоління цих технологій пропонує все вищий рівень точності та автоматизації. Хоча в наявних роботах показано покращене вирівнювання при встановленні імплантів за допомогою CAS, довгострокові клінічні переваги порівняно з традиційними методами все ще потребують підтверджень, адже покращена точність у розміщенні імпланту не завжди безпосередньо призводить до кращих функціональних результатів або довговічності імпланту.

Усереднені характеристики точності та тривалості процедур, що використовуються при заміні колінного суглоба, наведено на рис. 1.

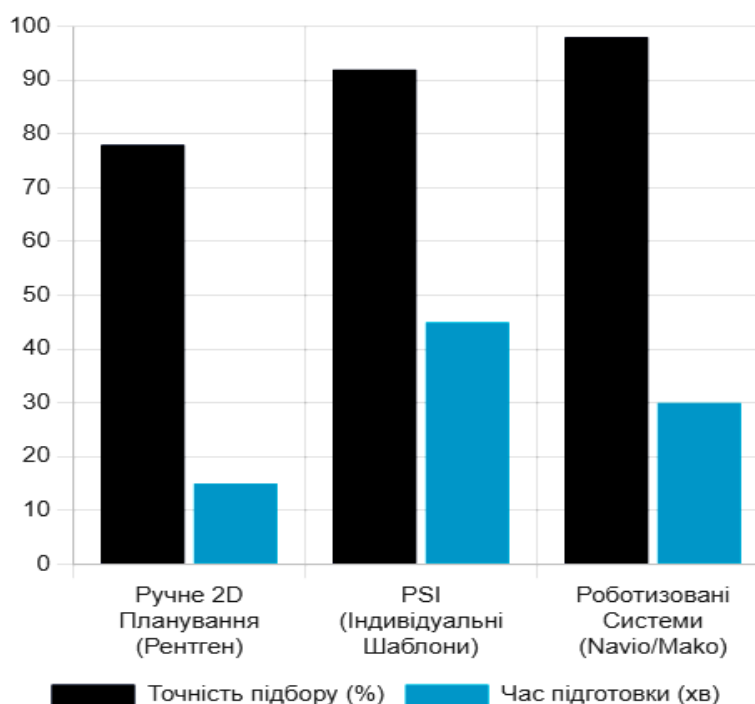


Рисунок 1 – Порівняння узагальнених характеристик точності підбору імплантів та часу підготовки до операції при застосуванні різних підходів

Технологія безперервного анатомічного автоматичного відстеження (CAAT) від VISIE Inc. [18] забезпечує відстеження руху стегнової та великої гомілкової кісток у реальному часі без використання штифтів під час роботизованої хірургії, з метою синхронізації роботизованих рук з рухом коліна. Технологія CAAT має потенціал усунути потребу в трекінгових штифтах при роботизованому ендопротезуванні колінного суглоба, що потенційно спростить процедуру та зменшить її інвазивність. Безштифтове відстеження може призвести до менш травматичного хірургічного втручання та потенційно швидшого відновлення.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

3. ОБГОВОРЕННЯ ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ПІДБОРУ

Основою будь-якої автоматизованої системи планування є точна та надійна інтерпретація медичних зображень пацієнта, таких як рентгенографія, комп'ютерна томографія (КТ) та магнітно-резонансна томографія (МРТ). Штучний інтелект, і зокрема методи глибокого навчання, стали ключовою технологією для автоматизації цього процесу.

Десятиліття проведення операцій з заміни колінного суглоба доводять, що детальне передопераційне планування з використанням КТ або МРТ-сканувань є надзвичайно важливим для кінцевого успіху артропластики [22]. Планування включає створення віртуальних 3D-моделей анатомічних структур коліна пацієнта, моделювання операції та оптимізацію розміру, положення та вирівнювання імпланту. Комплексне передопераційне планування має вирішальне значення для досягнення точного та персоналізованого ендопротезування колінного суглоба, незалежно від конкретної технології, що використовується під час процедури. Добре розроблений хірургічний план дозволяє хірургу передбачити потенційні проблеми та оптимізувати результат для кожного пацієнта.

Автоматизовані системи інтегрують такі моделі для віртуального підбору імплантів та хірургічного моделювання [11]. Комп'ютеризована роботизована хірургія використовує 3D-моделі для відслідковування рухів хірурга або керування роботом та для забезпечення точності. Віртуальне моделювання дозволяє хірургам перевірити прилягання імпланту та функціонування суглоба до виконання будь-яких кісткових розрізів. Автоматизовані системи підвищують цінність передопераційного планування, надаючи інструменти для точного виконання хірургічного плану на основі 3D-моделі [2]. Інтеграція планування та виконання за допомогою наведених технологій забезпечує більш контрольований та точний хірургічний процес.

Якість передопераційної 3D-моделі безпосередньо впливає на ефективність автоматизованого підбору імплантів та хірургічного планування. Точні та детальні дані візуалізації є важливими для створення надійного представлення анатомії пацієнта. Можливості віртуального моделювання дозволяють хірургам проактивно вирішувати потенційні проблеми та оптимізувати хірургічний підхід до фактичної процедури, що потенційно зменшує ускладнення та покращує результати.

Моделі ШІ та глибокого навчання застосовуються для вирішення кількох фундаментальних завдань: проведення автоматичної сегментації та забезпечення автоматизованих вимірювань. ШІ-інструменти здатні точно виявляти та окреслювати анатомічні структури (дистальний відділ стегнової кістки, проксимальний відділ великогомілкової кістки, хрящові поверхні) та патологічні ділянки. Процес також включає ідентифікацію наявних в доступі імплантів, наявних в базі даних, що є критично важливим для планування ревізійних втручань. Системи на основі CNN використовуються для автоматичного розрахунку ключових кутових параметрів, необхідних для планування ТЕКС, таких як механічний медіальний проксимальний кут великогомілкової кістки (mMPTA), механічний латеральний дистальний кут стегнової кістки (mLDFA) та механічний латеральний дистальний кут великогомілкової кістки (mLDTA) [14].

Трендовою інновацією є розробка інструментів на основі машинного навчання, здатних генерувати точні 3D-моделі кісток пацієнта на основі стандартних, біпланарних двовимірних 2D-рентгеновських знімків. Цей процес, який описується як створення 3D-репродукцій, подібних до КТ, використовує 2D-3D конвеєр на основі ШІ для прогнозування 3D-геометрії стегнової та великогомілкової кістки [23]. Дослідження показали високу точність цього підходу, адже 3D-моделі, отримані з 2D-рентгеновських знімків, продемонстрували середню абсолютну похибку менше 2 мм для більшості анатомічних параметрів. Водночас ШІ не дозволяє надійно вимірювати складні кутові параметри [24]. Ці параметри важливі для планування операції, тому мусимо зробити висновок, що на даному етапі ШІ слід розглядати як ефективний інструмент вимірювання для рутинних завдань, а не як автономного планувальника, здатного приймати складні рішення. Кінцеве судження та верифікація ключових кутів, що визначають план операції, залишаються за хірургом.

Наступним кроком після створення 3D-моделі кістки є автоматизація вибору оптимального розміру та початкового положення імпланту. Цей процес, який традиційно виконується хірургом вручну і є чутливим до суб'єктивності та неточностей, є ідеальним кандидатом для систем підтримки прийняття рішень на основі ШІ [25-32].

За підсумками аналізу літературних джерел можна виділити два основні підходи до автоматизованого підбору імплантів: віртуальне примірювання та персоналізація на основі рішень хірурга. Опишемо їх детальніше.

1. Віртуальне примірювання та оптимізація прилягання.

Більшість систем використовують 3D-моделі кісток (отримані з КТ або 2D-3D-реконструкції) для проведення віртуального примірювання доступних імплантів з каталогу виробника. Система

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

автоматично тестує різні розміри та положення, розраховуючи для кожного варіанту специфічні параметри прилягання [23], серед яких використовують:

- глобальне прилягання, що визначається як середньоквадратична похибка (RMSE), яка відповідає евклідовій відстань між поверхнею компонента та кісткою:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|x_i - \hat{x}_i\|^2}, \quad (1)$$

де N – кількість точок на поверхні імпланту/кістки,

x_i – координата точки на поверхні кістки,

$\hat{x}_i$ – координата відповідної точки на поверхні імпланту після вирівнювання,

$\|\dots\|$ – Евклідова відстань між точками;

- локальне прилягання, що визначається як максимальне нависання або недостатнє покриття компонента. Така оцінка критично важлива, оскільки нависання є відомою причиною післяопераційного болю та подразнення м'яких тканин [23]. Цей параметр часто розраховується як відстань Гаусдорфа між краями імпланту та краями кістки[^]

$$d = \min_{b \in B} \|c - b\|, \quad (2)$$

де d – відстань до найближчої точки кістки,

$c \in C$ – координата точки на краю імпланту,

$b \in B$ – координата точки на краю кістки,

Задачею автоматизованої системи у випадку використання віртуального примірювання є запропонувати хірургу варіант, який мінімізує обидві похибки прилягання.

2. Персоналізація на основі рішень хірурга.

Цей підхід визнає, що оптимальний план не є універсальним математичним мінімумом, а залежить від загального плану операції, досвіду та хірургічного стилю конкретного лікаря. Стандартний план виробника, що генерується базовим алгоритмом, часто вимагає значних корекцій з боку досвідченого хірурга [19].

Сучасні ШІ-системи вирішують цю проблему, навчаючись на попередніх рішеннях хірурга. Вони використовують моделі машинного навчання (наприклад, нелінійні регресійні моделі, методи вибору ознак, такі як Lasso, та методи регресії). Модель аналізує великий набір даних, що складається з початкового плану виробника та остаточних планів, скоригованих хірургом [19]. В результаті ШІ генерує персоналізований передопераційний план, який вже враховує індивідуальні вподобання хірурга.

Узагальнена схема процесів планування операції по встановленню імпланту колінного суглоба наведено на рис. 2.



Рисунок 2 – Узагальнені етапи планування операції по встановленню імпланту колінного суглоба

Таким чином, в цілому зростає інтеграція ШІ на всіх етапах процедури ТЕКС. ШІ використовується для відбору пацієнтів, передопераційної оцінки ризиків, інтраопераційної підтримки прийняття рішень (наприклад, балансування зв'язок) та післяопераційного моніторингу. ШІ готовий відігравати все більш значну роль в оптимізації різних аспектів ендопротезування колінного суглоба, від початкової оцінки пацієнта до довгострокового відновлення. Здатність ШІ аналізувати великі набори

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

даних та виявляти закономірності може надати цінну інформацію для покращення прийняття клінічних рішень та догляду за пацієнтами.

Розробляються більш складні пацієнт-специфічні рішення, включаючи імпланти та хірургічні шаблони. Вдосконалюється аналіз інтраопераційних даних за допомогою датчиків та ШІ для забезпечення зворотного зв'язку в реальному часі та оптимізації розміщення імпланту. В майбутньому розвиток автоматизованого підбору імплантів колінного суглоба може характеризуватися більшою синергією між робототехнікою, ШІ та передовими технологіями візуалізації. Ці технології є взаємодоповнюючими та можуть бути об'єднані для створення більш потужних та універсальних систем для персоналізованого та точного ендопротезування колінного суглоба. Таким чином реалізовується тенденція до більш цілісного підходу до ТЕКС, де автоматизовані системи не лише допомагають у підборі та встановленні імплантів, але й сприяють оптимізації всього шляху пацієнта, що включає передопераційне опрацювання ризиків, інтраопераційну підтримку прийняття рішень, а також післяопераційну реабілітацію та моніторинг.

ВИСНОВКИ

Сучасний стан автоматизованих систем для підбору імплантів колінного суглоба характеризується різноманітністю доступних технологій. Ці системи пропонують значні переваги з точки зору точності, персоналізації та потенціалу для покращення результатів лікування пацієнтів та довговічності імплантів. До гострих викликів у цій сфері можна віднести високу вартість обладнання, складні криві навчання та необхідність подальших довгострокових клінічних досліджень. Водночас, автоматизовані системи мають трансформаційний потенціал у еволюції ендопротезування колінного суглоба та покращенні якості життя пацієнтів із захворюваннями колінного суглоба.

Здатність ШІ обробляти великі обсяги складних даних може допомогти хірургам приймати більш обґрунтовані рішення щодо вибору імпланту та хірургічної техніки. Здатність ШІ навчатися дозволяє передбачати, що ці інструменти ставатимуть дедалі більше адаптованими до індивідуальних хірургічних стилів та потреб пацієнтів. Ця персоналізація може підвищити впевненість хірурга в планах, створених ШІ, та потенційно покращити загальний хірургічний досвід. Пацієнт-специфічні імпланти, розроблені ШІ, мають потенціал значно покращити прилягання імпланту, рухові характеристики та, зрештою, задоволеність пацієнта та довговічність імпланту. Краще прилягання може зменшити навантаження на імплант та навколишню кістку, потенційно знижуючи ризик розхитування та зносу. Оптимізована біомеханічна конструкція забезпечує більш природну рухливість коліна. Автоматизація процесу розробки за допомогою ШІ може подолати затримки та складності, пов'язані з традиційними методами створення індивідуальних імплантів, роблячи їх більш доступними. Це може перетворити галузь ендопротезування колінного суглоба, уможлививши широке використання персоналізованих імплантів. Інтеграція біомеханічних підходів у розробку імплантів на основі ШІ дозволило досягти прогресу, що виходить за межі чисто анатомічної сумісності. Цей цілісний підхід має потенціал для створення імплантів, які не тільки добре відповідають геометрично, але й оптимально функціонують при навантаженнях, що виникають під час щоденної діяльності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Siddiqi, A., Horan, T., Molloy, R. M., Bloomfield, M. R., Patel, P. D., & Piuze, N. S. (2021). A clinical review of robotic navigation in total knee arthroplasty: historical systems to modern design. *EFORT Open Reviews*, 6(4), 252-269. <https://doi.org/10.1302/2058-5241.6.200071>
2. Guezou-Philippe, A., Clavé, A., Maguet, E., Maintier, L., Garraud, C., Fouefack, J.-R., ... & Stindel, E. (2025). Fully automated workflow for designing patient-specific orthopaedic implants: Application to total knee arthroplasty. *PLoS ONE*, 20(6), e0325587. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0325587>
3. Koenig, J. A., & Plaskos, C. (2019). Total knee arthroplasty technique: OMNIBotics. In *Robotics in Knee and Hip Arthroplasty: Current Concepts, Techniques and Emerging Uses* (pp. 167-183). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16593-2_17
4. Walgrave, S., & Oussedik, S. (2023). Comparative assessment of current robotic-assisted systems in primary total knee arthroplasty. *Bone & joint open*, 4(1), 13-18. <https://doi.org/10.1302/2633-1462.41.BJO-2022-0070.R1>
5. Bagaria, V., Nadange, S., & Tiwari, A. (2025). A case series of robotic TKA in stiff knees using the imageless CORI system: technical strategies and early functional results. *Musculoskeletal surgery*, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s12306-025-00931-8>

6. Sabatini, L., Ascani, D., Vezza, D., Massè, A., & Cacciola, G. (2024). Novel Surgical Technique for Total Knee Arthroplasty Integrating Kinematic Alignment and Real-Time Elongation of the Ligaments Using the NextAR System. *Journal of Personalized Medicine*, 14(8), 794. <https://doi.org/10.3390/jpm14080794>
7. Drynan, D., Rasouli, R. F., Williams, J. W., & Balalla, B. (2021). Measured Resection Techniques Do Not Align to the Cylindrical Axis in Kinematic Total Knee Arthroplasty. *Arthroplasty Today*, 8, 157-162. <https://doi.org/10.1016/j.artd.2021.02.014>
8. Kelmers, E., Szuba, A., King, S. W., Palan, J., Freear, S., Pandit, H. G., & van Duren, B. H. (2023). Smart knee implants: an overview of current technologies and future possibilities. *Indian Journal of Orthopaedics*, 57(5), 635-642. <https://doi.org/10.1007/s43465-022-00810-5>
9. Grutter, P., & Trained, J. H. F. (2022). Mako SmartRobotics™ for total knee replacement. URL: <https://gruttermd.com/robotic-knee-replacement-dr-paul-grutter-md>
10. Batailler, C., Hannouche, D., Benazzo, F., & Parratte, S. (2021). Concepts and techniques of a new robotically assisted technique for total knee arthroplasty: the ROSA knee system. *Archives of orthopaedic and trauma surgery*, 141(12), 2049-2058. <https://doi.org/10.1007/s00402-021-04048-y>
11. Roche, M. (2021). The MAKO robotic-arm knee arthroplasty system. *Archives of orthopaedic and trauma surgery*, 141(12), 2043-2047. <https://doi.org/10.1007/s00402-021-04208-0>
12. Burge, T. A., Jones, G. G., Jordan, C. M., Jeffers, J. R., & Myant, C. W. (2022). A computational tool for automatic selection of total knee replacement implant size using X-ray images. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 971096. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.971096>
13. Pichler, L., Klein, L., Perka, C. F., Gwinner, C., & El Kayali, M. K. (2024). The accuracy of preoperative implant size prediction achieved by digital templating in total knee arthroplasty is not affected by the quality of lateral knee radiographs. *Journal of Experimental Orthopaedics*, 11(3), e12102. <https://doi.org/10.1002/jeo2.12102>
14. Bertolino, L., Ranzini, M. B. M., Favaro, A., Bardi, E., Ronzoni, F. L., & Bonanzinga, T. (2025). Use of Artificial Intelligence on Imaging and Preoperative Planning of the Knee Joint: A Scoping Review. *Medicina*, 61(4), 737. <https://doi.org/10.3390/medicina61040737>
15. Min, M., Wang, X., Urba, R., Zhang, W., Gao, J., & Fan, L. (2025). Comparison of traditional template measurements and artificial intelligence preoperative planning in total knee arthroplasty. *Frontiers in Surgery*, 12, 1573148. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2025.1573148>
16. Salman, L. A., Khatkar, H., Khaleel, A., & Jones, G. (2024). Reliability of artificial intelligence in predicting total knee arthroplasty component sizes: A systematic review. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, 34(2), 747–756. <https://doi.org/10.1007/s00590-023-03784-8>
17. Batailler, C., Shatrov, J., Sappey-Mariniere, E., Servien, E., Parratte, S., & Lustig, S. (2022). Artificial intelligence in knee arthroplasty: Current concept of the available clinical applications. *Arthroplasty*, 4, Article 17. <https://doi.org/10.1186/s42836-022-00119-6>
18. Lambrechts, A., Wirix-Speetjens, R., Maes, F., & Van Huffer, S. (2022). Artificial intelligence based patient-specific preoperative planning algorithm for total knee arthroplasty. *Frontiers in Robotics and AI*, 9, 840282. <https://doi.org/10.3389/frobt.2022.840282>
19. Nguyen, V. D., LaCour, M. T., & Komistek, R. D. (2024). Enhanced Knee Kinematics: Leveraging Deep Learning and Morphing Algorithms for 3D Implant Modeling. *arXiv preprint arXiv:2408.01557*. <https://arxiv.org/pdf/2408.01557?>
20. Enam, S., Seng, G. H., & Ramlee, M. H. (2024). Patient-Specific Design of Knee and Ankle Implant: A Short Review on the Design Process, Analysis, Manufacturing, and Clinical Outcomes. *Malaysian Journal of Medicine & Health Sciences*, 20(2). <https://doi.org/10.47836/mjmh.20.2.40>
21. Dunka, V., Punukollu, P., Punukollu, M., Burugu, S., Yemeni, R. P., & Kodali, S. (2021). AI-Based Biomechanical Modeling for Personalized Orthopedic Implants: Leveraging Machine Learning for Patient-Specific Design, Material Selection, and Post-Surgical Outcome Prediction. *Essex Journal of AI Ethics and Responsible Innovation*, 1, 358-397. <https://ejaeai.org/index.php/publication/article/view/65>
22. Ciliberti, F. K., Guerrini, L., Gunnarsson, A. E., Recenti, M., Jacob, D., Cangiano, V., ... & Aubonnet, R. (2022). CT-and MRI-based 3D reconstruction of knee joint to assess cartilage and bone. *Diagnostics*, 12(2), 279. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12020279>
23. Burge, T. A., Jones, G. G., Jordan, C. M., Jeffers, J. R., & Myant, C. W. (2022). A computational tool for automatic selection of total knee replacement implant size using X-ray images. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 971096. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.971096>
24. Heller, M. T., Maderbacher, G., Schuster, M. F., Forchhammer, L., Scharf, M., Renkawitz, T., & Pagano, S. (2025). Comparison of an AI-driven planning tool and manual radiographic measurements in total knee arthroplasty. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 28, 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2025.04.009>

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

25. Romanyuk O.N., Romanyuk O.V., Babiy B.V., Maidanyuk V.P., Kotlyk S.V. "Game mechanics using neuro-headsets", in Proceedings of the conference "Computer games and multimedia as an innovative approach to communication – 2025", Odesa, Ukraine, 2025, pp. 377–378.
26. Romanyuk O.N., Pavlov S.V., Maidanyuk V.P., Titova N.V., Romanyuk S.O., "Use of neuro-headsets for diagnosing diseases", in Proceedings of the International Scientific and Technical Conference on Opto-Electronic Information Technologies "PHOTONICS – ODS 2025", Vinnytsia, Ukraine, 2025, 3 p.
27. Romanyuk O.N., Titova N.V., Romanyuk S.O., "The use of neuro-headsets for computer diagnostics of diseases", in Automation and biomedical and computer technologies: abstracts of the reports of the All-Ukrainian scientific and technical internet conference, Dnipro, Ukraine: State Higher Educational Institution "PDTU", 2025, pp. 186–189.
28. Romanyuk O.N., Pavlov S.V., Titova N.V., Romanyuk S.O., Maidanyuk V.P., "The use of neuro-headsets for diagnostics of diseases", Optical-electronic information and energy technologies, vol. 49, No. 1, p. 168–177, 2025.
29. Romanyuk O.N., Pavlov S.V., "Development of implantable neurointerfaces", in Collection of Abstracts of the IV International Scientific and Technical Conference "Prospects for the Development of Mechanical Engineering and Transport – 2025" [Electronic edition], Vinnytsia, Ukraine: VNTU, 2025, pp. 403–405.
30. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
31. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.
32. Y. Pylypets, S. Pavlov, Y. Yaroslavsky, S. Kostyuk, and M. Ursan, "Features of the application of telemedical technologies based on artificial intelligence in disaster medicine," Opt-el. inf-energ. tech., vol. 48, no. 2, pp. 190–195, Nov 2024.

Надійшла до редакції 12.11.2025 р.

СИДОРУК ОЛЕГ ОЛЕКСАНДРОВИЧ – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, [email: sydoruk.oleh@gmail.com](mailto:sydoruk.oleh@gmail.com)

КОВАЛЬ ЛЕОНІД ГРИГОРОВИЧ – к. т. н., доцент, завідувач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, [email: koval.k@vntu.edu.ua](mailto:koval.k@vntu.edu.ua)

O.O. SYDORUK, L.G. KOVAL AUTOMATED KNEE IMPLANT SELECTION SYSTEMS: REVIEW AND PROSPECTS

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine