

БІОМЕХАНІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ МАЙСТЕРНОСТІ ЕЛІТНИХ ОДНОБОРЦІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІНСТРУМЕНТІВ «ШІ» (ІНТЕГРОВАНІЙ ПІДХІД)

BIOMECHANICAL ANALYSIS OF TECHNICAL MASTERY IN ELITE MARTIAL ARTISTS THROUGH THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS (INTEGRATED APPROACH)

УДК 796.853.23:796.012.1:004.8:796.077
DOI <https://doi.org/10.32782/ip/86.2.38>
Стаття поширюється на умовах
ліцензії CC BY 4.0

Шапаренко І.Є.,
канд. біол. наук,
доцент кафедри медико-біологічних
дисциплін і фізичного виховання
Полтавського національного
педагогічного університету
імені В.Г. Короленка

Юденко О.В.,
канд. педаг. наук, доцент,
офіцер відділу психологічної підтримки
Національного університету оборони
України

Подрушняк В.М.,
ст. викладач кафедри спеціальної
фізичної та бойової підготовки
Національної академії
Служби безпеки України

Волков М.С.,
ст. викладач кафедри спеціальної
фізичної та бойової підготовки
Національної академії
Служби безпеки України

Левченко Н.П.,
викладач кафедри фізичного
виховання, спеціальної фізичної
підготовки і спорту
Військового інституту телекомунікацій
та інформатизації імені Героїв Крут

У статті розкрито особливості визначення ефективності інтегрованого підходу, що поєднує інструменти штучного інтелекту (ШІ) та засоби відеокomp'ютерної системи експрес-аналізу техніки єдиноборств «Katsumoto» (ВКС «Katsumoto»), у процесі вдосконалення технічної майстерності самбістів високої кваліфікації на етапі безпосередньої підготовки до змагань вищих рангів. В процесі дослідно-аналітичної роботи членами науково-дослідної групи були використані наступні методи дослідження: біомеханічний аналіз рухів (відеографія високої частоти; ВКС «Katsumoto», сенсорні системи інерційного типу); інструменти штучного інтелекту (комп'ютерний зір, машинне навчання; нейронні мережі); педагогічні та психологічні методи (експертне оцінювання, анкетування та інтерв'ю); статистичний аналіз (кореляційний аналіз, дисперсійний аналіз, методи машинної статистики). Методологія дослідження базувалася на використанні педагогічного експерименту з контрольними та експериментальними групами, кількісним та якісним аналізом показників технічної ефективності, а також методами математичної статистики для визначення достовірності відмінностей результатів. У ході педагогічного експерименту оцінювалися основні параметри: середній час виконання кидка, кут оптимальної атаки, максимальне зусилля, точність фазової структури руху, кількість технічних помилок та ефективність завершення прийомів.

Результати дослідження засвідчили, що застосування інтегрованого підходу з використанням інструментів ШІ та ВКС «Katsumoto» сприяло істотному покращенню технічних показників спортсменів експериментальної групи у порівнянні з традиційними методами підготовки. Зокрема, відзначено зниження часу виконання технічних дій, підвищення точності рухів, оптимізацію біомеханічних параметрів і суттєве зменшення кількості технічних помилок. Впровадження інтегрованих цифрових технологій у підготовку самбістів високої кваліфікації є перспективним напрямом підвищення ефективності навчально-тренувального процесу, що дозволяє забезпечити індивідуалізацію навантажень та об'єктивний контроль за технічним виконанням прийомів.

Ключові слова: біомеханіка, біомеханічний аналіз, боротьба самбо, висока кваліфікація, індивідуалізація, педагогічне моделювання, педагогічні умови, науковий інструментарій,

технічна підготовленість, технічні засоби, штучний інтелект.

The article reveals the specifics of assessing the effectiveness of an integrated approach that combines artificial intelligence (AI) tools and the "Katsumoto" video-computer express-analysis system for martial arts techniques (VCS "Katsumoto") in the process of improving the technical mastery of highly qualified sambo athletes during the stage of direct preparation for top-level competitions.

In the course of research and analytical work, the members of the research group applied the following methods: biomechanical motion analysis (high-frequency videography; VCS "Katsumoto" inertial-type sensor systems); artificial intelligence tools (computer vision, machine learning, neural networks); pedagogical and psychological methods (expert evaluation, questionnaires, and interviews); and statistical analysis (correlation analysis, analysis of variance, and methods of machine statistics).

The research methodology was based on a pedagogical experiment involving control and experimental groups, quantitative and qualitative analysis of technical efficiency indicators, as well as mathematical statistics methods to determine the reliability of the differences in results. The main parameters assessed during the pedagogical experiment included: average throw execution time, optimal attack angle, maximum applied force, accuracy of the movement's phase structure, number of technical errors, and the effectiveness of technique completion.

The results of the study demonstrated that the application of the integrated approach utilizing AI tools and the VCS "Katsumoto" significantly improved the technical performance indicators of the athletes in the experimental group compared to traditional training methods. Specifically, there was a reduction in the time required to perform technical actions, an increase in movement accuracy, optimization of biomechanical parameters, and a notable decrease in the number of technical errors.

The introduction of integrated digital technologies into the training of highly qualified sambo athletes represents a promising direction for enhancing the effectiveness of the training process, enabling the individualization of workloads and providing objective control over the technical execution of techniques.

Key words: biomechanics, biomechanical analysis, Sambo wrestling, elite level, individualization, pedagogical modeling, pedagogical conditions, research tools, technical proficiency, technical equipment, artificial intelligence.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток єдиноборств, зокрема боротьби самбо, характеризується високою конкуренцією на міжнародній арені, що зумовлює необхідність пошуку інноваційних

підходів до підготовки спортсменів та спортсменок. У спортивному розділі боротьби самбо основні технічні прийоми поділяються на кілька великих груп залежно від мети та способу виконання.

Технічна майстерність самбістів високої кваліфікації є визначальним чинником їхньої змагальної успішності, адже в умовах однакової фізичної, спеціальної фізичної та психологічної підготовленості саме якість і ефективність виконання технічних дій нерідко визначають результат змагальної сутички.

Традиційні методи оцінювання технічної майстерності, засновані на візуальному спостереженні та експертній оцінці, мають суб'єктивний характер і не завжди дозволяють отримати об'єктивні, кількісно вимірювані дані щодо кінематичних та динамічних характеристик рухів. Біомеханічний аналіз, як науково-обґрунтований інструмент дослідження техніки обраного виду спорту (єдиноборства), забезпечує комплексне вивчення прикладних рухових дій спортсменів та спортсменок, проте його потенціал нерідко обмежується складністю обробки значних обсягів даних і необхідністю високоточного обладнання.

Впровадження інструментів штучного інтелекту у біомеханічний дослідження відкриває нові перспективи підвищення точності, швидкості та інформативності аналізу. Зокрема, технології комп'ютерного зору, машинного навчання та нейронних мереж дають змогу автоматизувати виявлення помилок, визначати оптимальні траєкторії рухів, прогнозувати ефективність технічних дій та формувати індивідуалізовані рекомендації для спортсменів та спортсменок.

В реаліях сьогодення штучний інтелект значним чином полегшує існування людства. Він здатний підвищити ефективність і безпеку, але водночас вимагає відповідального використання, етичних рамок і балансу між автоматизацією та людським контролем. У сучасних умовах особливо важливо, щоб ШІ служив доповненням до людини, а не заміною їй.

Необхідно підкреслити, що з точки зору науки, види штучного інтелекту зазвичай класифікують за рівнем розвитку, можливостями та сферою застосування, а саме:

- 1) за рівнем інтелектуальних можливостей (слабкий (вузький) ШІ; загальний ШІ; надінтелект);
- 2) за принципом роботи (реактивні машини; обмежена пам'ять; теорія розуму; самоусвідомлений ШІ);
- 3) за технологічною основою (експертні системи; машинне навчання (ML); глибоке навчання (DL); обробка природної мови (NLP); комп'ютерний зір; робототехнічний ШІ).

Однак, попри активний розвиток наукових досліджень у галузі спортивної біомеханіки та штучного інтелекту (ШІ), проблема інтеграції цих підходів у систему підготовки самбістів високої кваліфікації (представників інших єдиноборств) залишається недостатньо вивченою. Відсутність чітких методичних засад і перевірених експериментальних моделей стримує широке впровадження таких технологій у навчально-тренувальний процес представників досліджуваної категорії.

У цьому аспекті актуальним є завдання розроблення та експериментальної перевірки ефективності інтегрованого підходу до біомеханічного аналізу технічної майстерності із використанням інструментів ШІ, що сприятиме підвищенню об'єктивності оцінювання, оптимізації індивідуалізованої підготовки та підвищення показників змагальної діяльності єдиноборців високої кваліфікації.

Дослідження виконано відповідно до плану ініціативної науково-дослідної роботи на тему «Biomechanics of Combat Sports and Artificial Intelligence» (шифр «B.C.S. Artificial Intelligence»).

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

У динаміці першого етапу нашу увагу привернули наукові праці дослідників: В. Кашуби, Ю. Попадюхи [1], М. Носка, С. Гаркуши [2], М. Ячнюка [3], в яких розкриваються сутнісні характеристики науки – «біомеханіка». Аналізуючи наукові праці учених, доцільно констатувати, що біомеханіка є основою для оцінки технічної майстерності спортсменів та спортсменок у різних дисциплінах, зокрема в єдиноборствах. Крім цього, «біомеханіка» – це фундаментальна наука для єдиноборств, адже вона переводить навчально-тренувальний процес із рівня «інтуїтивного» у точно вимірюваний і науково-керований (прогнозований). Завдяки їй спортсмени та спортсменки можуть виконувати прийоми швидше, сильніше та безпечніше, а тренери – будувати багаторічну підготовку на об'єктивних даних.

Останні дослідження вказують на використання відео та сенсорних систем, моделей для збору та аналізу рухових даних (R. Bartlett [4], В. Бізін, Д. Каратаєва, О. Хацаюк [5], Л. Подпігало, Ш. Ке [6], О. Khatsaiuk, М., Medvid, В. Maksymchuk, О. Kurok, Р. Dziuba (та інш.) [7], М. Medvid, О. Khatsaiuk, К. Sydorchenko, S. Vorok, А. Kernas, М. Borovyk [8]). Це дозволяє більш точно оцінювати техніку спортсмена чи спортсменки, прогнозувати результати та навіть покращувати систему їхньої багаторічної підготовки. На сьогодні, відео та сенсорні системи у єдиноборствах – це не просто допоміжний інструмент, а невід'ємна частина науково-методичного забезпечення багаторічної підготовки спортсменів та спортсменок. Вони дозволяють перетворити суб'єктивну оцінку тренера на точні вимірювання, що робить навчально-тренувальний процес більш ефективним і безпечним.

Надалі нашу увагу привернули наукові праці учених: О. Ткаченка, І. Бондаренко [9], С. Лисенка, В. Костюкевича [10], J. Spirnak, S. Antani [11], Д. Вольського [12]. На їх думку штучний інтелект все більше застосовується в спортивній науці, медицині, військовій справі, педагогіці, тощо. Ними також встановлено, що алгоритми ШІ можуть здійснювати класифікацію рухів, порівняння прикладних технічних дій, і навіть прогнозувати результати змагань (технологічних процесів). У свою чергу, для єдиноборців високої кваліфікації це дає можливість адаптувати навчально-тренувальний процес

відповідно до їхніх поточних індивідуально-типологічних характеристик, стану здоров'я (фізичної форми), технічної, тактичної та спеціальної фізичної підготовленості.

Необхідно виділити, що на сьогодні, одним із основних аспектів інтегрованого підходу є використання систем збору даних. Сучасний науковий інструментарій: датчики руху, відеокамери з високою роздільною здатністю та інші технології, дозволяють проводити точний аналіз біомеханічних (прикладних) рухів спортсменів та спортсменок в режимах онлайн та офлайн. Враховуючи той факт, що боротьба самбо включає у свій арсенал складні технічні елементи, точність цього аналізу є надто важливою для вдосконалення спортивної майстерності борців та борчинь (М. Колос, В. Яременко [13], Н. Височіна, Л. Гуніна, О. Хацаюк, Л. Котляренко, Р. Головащенко, А. Івченко [14], А. Антонюк [15], В. Романенко, О. Хмелюк, А. Єфременко [16]).

Заслугує уваги і той факт, що використання ШІ, а також біомеханічного аналізу дозволяє значно удосконалити навчально-тренувальний процес єдиноборців, однак важливо зазначити, що існують і певні виклики. Для прикладу, інтеграція цих технологій у навчально-тренувальний процес представників досліджуваної категорії потребує відповідних фінансових витрат та спеціалізованих знань для умілого використання даних, отриманих через високоточні сенсори та інші технічні засоби (науковий інструментарій).

Таким чином, актуальність теми дослідження полягає в інтеграції сучасних технологій біомеханічного аналізу та інструментів штучного інтелекту в навчально-тренувальний процес єдиноборців, що дозволить інтенсифікувати ефективність їхньої багаторічної підготовки та у майбутньому сприятиме підвищенню показників змагальної діяльності. Це сприятиме підняття іміджу українського спорту на міжнародній арені.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Враховуючи результати моніторингу спеціалізованих Інтернет-ресурсів (результати аналізу науково-методичної та довідкової літератури), членами науково-дослідної групи (НДГ) виділено низку проблемних питань, які потребують додаткового вивчення, а саме:

1) нестабільність і точність даних, зібраних за допомогою нових технологій (існуючі методи біомеханічного аналізу нерідко мають обмеження щодо точності та стабільності зібраних даних, нерідко присутня похибка в обчисленнях);

2) інтеграція різних технологій для комплексного аналізу (на сьогодні існує дефіцит інтегрованих систем, які поєднують біомеханічний аналіз, інструменти ШІ та зібрані дані від сенсорів у єдину модель);

3) нестача адаптації ШІ для єдиноборств (існуючі алгоритми штучного інтелекту, застосовані в спортивному тренуванні, зазвичай орієнтовані на більш

стандартизовані види спорту: легка атлетика, футбол, біатлон, кульова стрільба, плавання, тощо);

4) недостатня врахованість психологічних факторів у сучасних моделях ШІ (психологічні аспекти, такі як: стрес, мотивація, реакція на певні ситуації під час змагальних поєдинків, не завжди враховуються в біомеханічних та ШІ-аналізах);

5) наявні проблеми адаптації тренувальних програм для єдиноборців високої кваліфікації (на сьогодні недостатньо досліджень, що орієнтуються на розробку персоналізованих тренувальних програм для єдиноборців високої кваліфікації, заснованих на біомеханічному аналізі та інструментах ШІ);

6) визначення оптимальних методів зворотного зв'язку для спортсменів та спортсменок (важливим аспектом інтегрованого підходу є зворотний зв'язок для спортсменів та спортсменок, який надає їм рекомендації щодо поліпшення техніки прикладних рухів).

На наш погляд, ці частини загальної проблеми можуть стати основою для майбутніх досліджень, які сприятимуть удосконаленню методів біомеханічного аналізу та застосування ШІ в системі багаторічної підготовки спортсменів і спортсменок, які спеціалізуються в єдиноборствах й інших видах спорту.

Мета статті. Головною метою дослідження є визначення ефективності використання інтегрованого підходу (інструментів ШІ та засобів ВКС «Katsumoto») в процесі удосконалення технічної майстерності самбістів високої кваліфікації на етапі безпосередньої підготовки до змагань вищих рангів.

В процесі дослідно-аналітичної роботи членами науково-дослідної групи були використані наступні методи дослідження: біомеханічний аналіз рухів (відеографія високої частоти; ВКС «Katsumoto», сенсорні системи інерційного типу); інструменти штучного інтелекту (комп'ютерний зір, машинне навчання; нейронні мережі); педагогічні та психологічні методи (експертне оцінювання, анкетування та інтерв'ю); статистичний аналіз (кореляційний аналіз, дисперсійний аналіз, методи машинної статистики). Крім цього, використано досвід багаторічної підготовки спортсменів та спортсменок, які спеціалізуються у спортивних видах боротьби.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сучасний розвиток спортивної та педагогічної науки вимагає комплексного підходу до оцінювання та вдосконалення технічної майстерності спортсменів та спортсменок, особливо в єдиноборствах, де результативність значною мірою залежить від ефективності виконання складних координаційних рухів у динамічних умовах змагальної діяльності.

У боротьбі самбо, яка характеризується високою інтенсивністю, змінністю техніко-тактичних дій та необхідністю миттєвого реагування на дії суперника, особливого значення набуває біомеханічний аналіз рухів із використанням новітніх технологій, включно з інструментами штучного інтелекту.

Необхідно підкреслити, що використання інтегрованого підходу у багаторічній підготовці спортсменів та спортсменок – це поєднання різних компонентів навчально-тренувального процесу (фізичної, технічної, тактичної, психологічної, медико-біологічної, науково-аналітичної підготовки) в єдину цілісну систему. Його актуальність у сучасному спорті зумовлена високою конкуренцією та зростанням вимог до всебічної підготовленості атлетів.

Інтегрований підхід у даному дослідженні передбачав поєднання класичних методів біомеханічного аналізу (відеоаналіз із використанням прикладної програми ВКС «Katsumoto» [17, 18], кінематичні та динамічні вимірювання, електроміографія) з автоматизованими алгоритмами обробки даних на основі машинного навчання. Застосування ШІ дало змогу суттєво підвищити точність і швидкість обробки інформації, виявити приховані закономірності у структурі прикладних рухів, а також створити персоналізовані моделі технічної підготовки для кожного атлета.

У ході експерименту було сформовано вибірку з самбістів високої кваліфікації (кандидати у майстри спорту України, майстри спорту та майстри спорту міжнародного класу України, $n=26$ чол., члени збірних команд: Донецької, Київської, Полтавської, Сумської та Харківської областей з боротьби самбо, спортивний розділ), які прийняли участь в педагогічному експерименті.

Для підтвердження робочої гіпотези, членами науково-дослідної групи було організовано педагогічний експеримент. Учасників педагогічного експерименту було розподілено на контрольну (Кг, $n=12$ чол.) та експериментальну (Ег, $n=14$ чол.) групи.

Необхідно підкреслити, що представники Кг використовували традиційну методику удосконалення техніко-тактичних дій самбістів на етапі безпосередньої підготовки до змагань, яка передбачала:

1) відпрацювання змагальної техніки у повному обсязі з акцентом на індивідуально сильні прийоми спортсмена;

2) моделювання змагальних техніко-тактичних дій (комбінацій) у форматі контрольних сутичок і спарингів із партнерами різного стилю (ваги) та рівня підготовки;

3) підвищення інтенсивності та зменшення обсягу тренувальних навантажень з метою виходу на пікову форму (принцип «оптимізації пікової форми»);

4) відпрацювання тактичних комбінацій і сценаріїв ведення змагальної сутички (початок, середина, завершення поєдинку);

5) психологічна підготовка – налаштування на змагання, розвиток концентрації та стійкості до стресу;

6) підтримка оптимального функціонального стану (відновлювальні заходи, дієта, контроль ваги).

У свою чергу, самбісти експериментальної групи в системі багаторічної підготовки додатково використовували запропонований нами інтегрований підхід.

Методологія застосування інструментів ШІ та засобів ВКС «Katsumoto» (інтегрованого підходу) полягала у наступному – за допомогою високошвидкісних відеокамер та сенсорних систем фіксувалися важливі фази виконання кидків та інших технічних дій (больові прийоми на руки та ноги, прийоми утримання, тощо).

Алгоритми комп'ютерного зору, інтегровані з нейронними мережами та основними блоками ВКС «Katsumoto», здійснювали автоматичне маркування сегментів біолонок тіла (загального центру маси) та обчислювали просторово-часові характеристики рухів (швидкість, прискорення, кутові швидкості, амплітуди та інш., див. рис. 1–10).

Обробка результатів здійснювалася шляхом поєднання методів кластерного аналізу та алгоритмів глибинного навчання (див. табл. 1, рис. 2), що забезпечило формування індивідуальних «біомеханічних профілів» спортсменів (представників Ег).

Педагогічний експеримент проводився у три основні етапи (упродовж 8 тижнів): константувальний, формувальний та контрольний.

1. Константувальний етап (підготовчий): мета – визначити початковий рівень технічної майстерності спортсменів; формування двох груп (контрольної та експериментальної) по рівню спортивної кваліфікації, вікових та антропометричних показниках; проведення попереднього тестування за обраними індикаторами технічної ефективності (середній час виконання кидка (с); кут оптимальної атаки (°); максимальне зусилля (Н); точність фазової структури руху (%); кількість технічних помилок на 10 спроб; ефективність завершення прийомів (%); використання високочастотного відеозапису та динамометричних сенсорів для отримання об'єктивних даних).

2. Формувальний етап (основний): тривалість 5 тижнів безпосередньої підготовки до змагань вищих рангів. Кг – продовжувала підготовку за стандартною програмою, що включала техніко-тактичні дії (коронні), відпрацювання кидків та утримань, силову і координаційну підготовку, аналіз відео змагань. Ег – навчально-тренувальний процес було модифіковано шляхом інтеграції інструментів ШІ та ВКС «Katsumoto» (біомеханічний аналіз виконання кидків у режимі реального часу; автоматична ідентифікація фаз руху та визначення відхилень від оптимальних траєкторій; індивідуалізовані рекомендації з технічних корекцій; інтерактивне моделювання змагальних ситуацій із візуалізацією можливих варіантів розвитку подій; аналіз силових та кутових характеристик



Рис. 1 (фаза 1)



Рис. 2 (фаза 2)



Рис. 3 (фаза 3)



Рис. 4 (фаза 4)



Рис. 5 (фаза 5)



Рис. 6 (фаза 6)

Рис. 1–6. Приклад розкадрування технічної дії «бокова підсічка» з метою здійснення порівняльного біомеханічного аналізу, виконаний за допомогою засобів ВКС «Katsumoto» та інструментів машинного зору ШІ

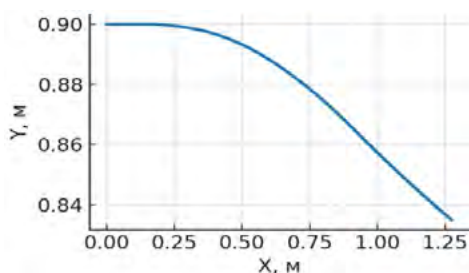


Рис. 7. Рух загального центру маси (ЗЦМ)

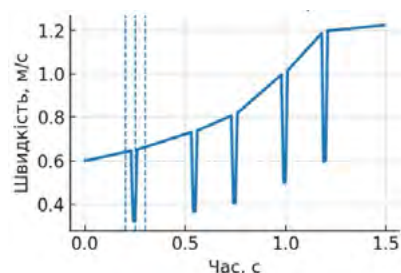


Рис. 8. Швидкість ЗЦМ

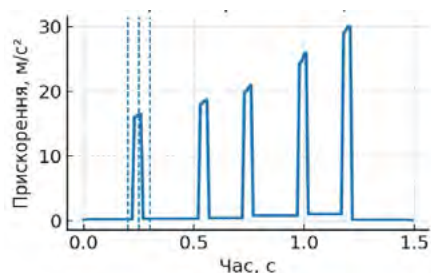


Рис. 9. Швидкість ЗЦМ

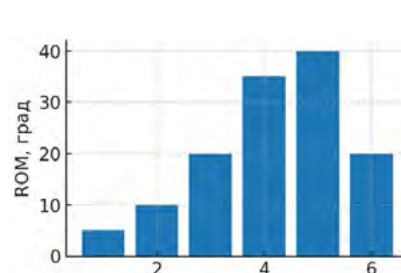


Рис. 10. Кутові переміщення

виконання прийомів. Зворотний зв'язок надавався безпосередньо під час виконання вправ, що дозволяло спортсмену миттєво виправляти помилки.

3. Контрольний етап (підсумковий): проведення фінального тестування обох груп за тими ж показниками, що й на констатувальному етапі;

порівняння результатів контрольної та експериментальної груп із використанням математико-статистичних методів (t-критерій Стьюдента); оцінка динаміки змін у відсотках та абсолютних величинах, визначення статистичної значущості відмінностей ($p < 0,05$).



Рис. 11. Схема інтегрованої системи аналізу з використанням алгоритмів ШІ (засобів ВКС «Katsumoto»)

Аналізуючи отриманні наприкінці педагогічного експерименту результати дозволили членам науково-дослідної групи сформулювати висновок, що використання інтегрованого підходу (ШІ + ВКС «Katsumoto») у підготовці самбістів високої кваліфікації забезпечило суттєве покращення більшості інформативних показників технічної ефективності (майстерності) у порівнянні з традиційною методикою (див. табл. 2).

Отримані результати підтвердили, що застосування інтегрованого підходу з використанням

ШІ та ВКС «Katsumoto» дозволяє: підвищити точність вимірювань технічних параметрів на 15-20% порівняно з традиційними методами; ідентифікувати мікродофекти у фазовій структурі рухів, які не фіксуються візуальним спостереженням тренера; автоматично генерувати рекомендації щодо корекції техніки на основі виявлених закономірностей; створити ефективну систему моніторингу технічної майстерності у динаміці підготовчого та змагального періодів.

Завдяки комплексній інтеграції біомеханічного аналізу та ШІ вдалося розробити адаптивний алгоритм техніко-тактичної підготовки, який забезпечив статистично значуще ($p < 0,05$) покращення ефективності виконання ключових прийомів серед учасників експериментальної групи.

Таким чином, результати дослідження підтвердили доцільність і високу ефективність застосування інтегрованого підходу до біомеханічного аналізу технічної майстерності самбістів високої кваліфікації, що поєднує традиційні та інноваційні інструменти, включно з технологіями штучного інтелекту, для оптимізації процесу підготовки та підвищення спортивних показників.

Таблиця 1

Блок-схема інтегрованої системи аналізу технічних дій боротьби самбо з акцентованим використанням інструментів ШІ

Компоненти системи (по порядку потоку даних):	Загальний принцип роботи
1. Збір даних (Data Acquisition):	відеореєстрація високої частоти кадрів (120–1000 fps) з кількох ракурсів; ІНУ (IMU) – акселерометри, гіроскопи на ключових сегментах тіла; силові платформи та датчики тиску для визначення векторів реакції опори; ЕМГ для оцінки активності м'язів у ключових фазах прийому.
2. Попередня обробка (Preprocessing):	синхронізація часових рядів (відео, IMU, ЕМГ, платформи); фільтрація шумів (фільтри Баттерворта/Калмана для сенсорних даних); автоматизоване маркування ключових точок (pose estimation).
3. Модулі ШІ для аналізу (AI Analysis Engines):	комп'ютерне зору (CNN/transformer-based models) для трекінгу сегментів і класифікації фаз руху; модельні модулі для екстракції кінематичних та динамічних ознак; модулі для виявлення відхилень та аномалій (anomaly detection) у фазовій структурі; рекомендаційний модуль (supervised + reinforcement learning) для генерації корекцій.
4. Формування біомеханічних профілів (Profiling):	агрегація ознак у часовому та частотному домені; побудова індивідуальних та кластерних профілів (k-means, hierarchical clustering); зберігання в базі даних для динамічного моніторингу.
5. Візуалізація і звітування (Visualization & Reporting):	інтерактивні графіки фазових профілів, теплові карти тиску, графіки ЕМГ; автоматизовані текстові звіти з рекомендаціями та пріоритизацією виправлень.
6. Персоналізоване моделювання та корекція техніки (Personalized Modeling & Intervention):	симуляції оптимальних кінематичних траєкторій для конкретного спортсмена; план корекційних тренувань, інтегрованих у тренувальний цикл; зворотний зв'язок тренеру та спортсмену (відео з анотаціями, вправи з показниками цілей).

Примітка: пояснення взаємодії: 1) потік даних є циклічним: після впровадження корекцій у навчально-тренувальний процес система збирає нові дані й оцінює їх вплив на ключові показники; таким чином формується адаптивний контур контролю; модулі ШІ працюють як рівні: спочатку відбувається детекція/трекінг, потім екстракція ознак, далі класифікація фаз, виявлення аномалій та генерація рекомендацій; надійність системи забезпечується шляхом кросвалідації моделей, оцінки узагальнювальної здатності (hold-out, k-fold), а також періодичної калібровки сенсорів.

Таблиця 2

Порівняльні показники технічної майстерності самбістів високої кваліфікації (Кг та Ег)

№ з/п	Показник	Контрольна група (традиційний метод), $M \pm m$	Експериментальна група (інтегрований підхід із ШІ), $M \pm m$	Абсолютна різниця	Приріст, %
1.	Середній час виконання кидка (с)	$1,32 \pm 0,05$	$1,18 \pm 0,04$	-0,14 с	-10,6
2.	Кут оптимальної атаки (°)	$46,2 \pm 2,1$	$49,8 \pm 1,9$	+3,6°	+7,8
3.	Максимальне зусилля (Н)	912 ± 24	987 ± 21	+75 Н	+8,2
4.	Точність фазової структури руху (%)	$83,4 \pm 2,5$	$96,1 \pm 1,8$	+12,7%	+15,2
5.	Кількість технічних помилок на 10 спроб	$2,6 \pm 0,3$	$1,1 \pm 0,2$	-1,5	-57,7
6.	Ефективність завершення прийомів (%)	$78,5 \pm 3,0$	$89,9 \pm 2,6$	+11,4%	+14,5

Примітка: $M \pm m$ – середнє значення та похибка середнього; статистична значущість різниць підтверджена на рівні $p < 0,05$.

Висновки і перспективи подальших розробок. В процесі дослідно-аналітичної роботи визначено ефективність використання інтегрованого підходу (інструментів штучного інтелекту та засобів відеокомп'ютерної програми експрес-аналізу технічних дій єдиноборств «Katsumoto») в процесі удосконалення технічної майстерності самбістів високої кваліфікації на етапі безпосередньої підготовки до змагань вищих рангів.

Членами науково-дослідної групи встановлено, що застосування інтегрованої методики (штучний інтелект, відеокомп'ютерна програма експрес-аналізу технічних дій єдиноборств «Katsumoto») у підготовці самбістів високої кваліфікації сприяло значному зростанню технічної майстерності у більшості досліджуваних показників.

За результатами педагогічного експерименту середня абсолютна різниця між представниками контрольної та експериментальної груп становила: час виконання кидка – 0,18 с (швидше у представників експериментальної групи); точність фазової структури руху – +8,2%; кількість помилок – на 2,1 менше у самбістів експериментальної групи; ефективність завершення прийомів – +6,3% у спортсменів експериментальної групи.

Необхідно підкреслити, що найбільший прогрес в експериментальній групі відзначено за показниками, які пов'язані із якістю технічного виконання та зниженням помилок, що підтверджує високу ефективність зворотного зв'язку у реальному часі. Впровадження цифрових технологій у навчально-тренувальний процес дозволяє не лише підвищити швидкість та точність технічних дій, але й забезпечити більш стабільний рівень їх виконання у змагальних умовах. Розроблену методику доцільно застосовувати у системі підготовки спортсменів високої кваліфікації, зокрема у збірних командах та школах вищої спортивної майстерності.

Перспективи подальших досліджень у обраному напрямі наукової розвідки передбачають:

впровадження технологій штучного інтелекту з елементами адаптивного навчання, що дозволить існуючим системам автоматично підлаштовувати інтенсивність, обсяг та складність тренувальних завдань під індивідуальні особливості спортсменів та спортсменок; проведення дослідження впливу цифрових технологій на психологічну готовність спортсменів до змагань, включно з рівнем концентрації, стресостійкості та змагальної впевненості; інтеграцію біомеханічного аналізу з показниками фізіологічного моніторингу (частота серцевих скорочень, варіабельність серцевого ритму, рівень лактату тощо) для створення комплексних моделей підготовки, які поєднують технічну, тактичну та функціональну складові.

Автори заявляють про відсутність будь-якого потенційного чи фактичного конфлікту інтересів, який міг би вплинути на зміст, результати або інтерпретацію матеріалів даного дослідження. Дослідження не отримувало фінансової підтримки з боку державних, громадських чи комерційних організацій; виконано виключно за ініціативи та ресурсного забезпечення співавторів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Кашуба В. О., Попадюха Ю. А. Біомеханіка просторової організації тіла людини: сучасні методи та засоби діагностики і відновлення порушень : монографія. Київ : Центр учбової літератури, 2018. 768 с.
2. Носко М. О., Гаркуша С. В. Біомеханіка рухової діяльності : навч.-метод. матер. Чернівці : НУЧК імені Т.Г. Шевченка, 2019. 64 с.
3. Ячнюк М. Ю. Біомеханіка рухових дій : навч.-метод. посіб. Чернівці : Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, 2023. 172 с.
4. Bartlett R. Introduction to Sports Biomechanics: Analysing Human Movement Patterns : monog. London : Routledge, 2014. 312 с.
5. Бізін В. П., Каратаєва Д. О., Хацаюк О. В. Технічні засоби навчання руховим діям : монографія. Берлін : Lambert Academic Publishing, 2014. 180 с.

6. Подрігало Л., Ке Ш. Дослідження біомеханічних параметрів кикбоксерів із різним стажем тренувань. *Єдиноборства*. 2024. Вип. 2 (32). С. 71-80.

7. Khatsaiuk O., Medvid M., Maksymchuk B., Kurok O., Dziuba P., Tyurina V., Chervonyi P., Yevdokimova O., Levko M., Demchenko I., Maliar N., Maliar E., Maksymchuk I. Preparing Future Officers for Performing Assigned Tasks through Special Physical Training. *RREM*. 2021. Vol. 13 (2). P. 457–475. <https://doi.org/10.18662/rrem/13.2/431%20%20>

8. Medvid M., Khatsaiuk O., Sydorchenko K., Vorok S., Kernas A., Borovyk M. Sports Pedagogy: Readiness of Cadets to Apply Physical Action in Different Conditions of Service Activity. *RREM*. 2024. Vol. 16 (2). P. 336–355. <https://doi.org/10.18662/rrem/16.2/860>

9. Ткаченко О. О., Бондаренко І. В. Моделювання техніко-тактичної підготовленості спортсменів із застосуванням систем комп'ютерного зору. Фізична культура, спорт та здоров'я нації. 2022. Вип. 34. С. 120–126.

10. Лисенко С. В., Костюкевич В. М. Використання інструментів штучного інтелекту в підготовці спортсменів високої кваліфікації. Спортивна наука та здоров'я людини. 2023. Вип. 4 (2). С. 45–54.

11. Spirnak J., Antani S. The Need for Artificial Intelligence Curriculum in Military Medical Education. *Mil Med*. 2024 May 18;189(5-6):954–958. <https://doi.org/10.1093/milmed/usad412>

12. Вольський Д. С. Штучний інтелект у спорті: ретроспектива становлення та інтеграційних процесів у спортивну галузь, міжнародний досвід та стан питання в Україні. *Науковий часопис Українського*

державного університету імені Михайла Драгоманова. Серія 15. 2023. Вип. 1 (186). С. 40–44.

13. Колос М., Яременко В. Мультимедійні технології в сучасній системі підготовки борців. Молодіжний науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. 2015. Вип. 18. С. 28–34.

14. Височіна Н., Гуніна Л., Хацаюк О., Котляренко Л., Головащенко Р., Івченко А. Модель психофізичної готовності майбутніх офіцерів до виконання завдань за призначенням. *Військова освіта*. 2021. Вип. 1 (43). С. 24–43.

15. Антонюк А. Е. Удосконалення технічної майстерності борців вільного стилю 14-15 років із акцентованим використанням сучасних технічних засобів навчання. *Науковий часопис Українського державного університету імені Михайла Драгоманова. Серія 15*. 2022. Вип. 3 (148). С. 20–26.

16. Романенко В. В., Хмелюк О. В., Єфременко А. М. Використання інноваційних, мобільних технологій у тренувальному процесі єдиноборців. *Проблеми і перспективи розвитку спортивних ігор та однокорств у закладах вищої освіти*. 2025. Вип. 1. С. 24–29.

17. Хацаюк О., Ананченко К., Хуртенко О., Дмитренко С., Бойченко, Н. Дослідження технічного арсеналу бійців ММА високої кваліфікації. *Єдиноборства*. 2023. Вип. 3 (17). С. 92–105.

18. Каратаєва Д. О., Хацаюк О. В. Удосконалення техніки рукопашного бою правоохоронців МВС України із використанням сучасних технічних засобів навчання : наук.-дослід. роб. (шифр «Модель-РБ»). Харків: АБВ МВС України, 2008. 135 с.

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.09.2025

Дата публікації: 24.09.2025