



” Сидорова Т., Горіна В., Гриньова Т., Пруднікова М., Єфременко А. Цифровий зворотний зв'язок у циклічних видах спорту як ключ до якісного навчання та тренувань. *Освіта. Інноватика. Практика*, 2025. Том 13, № 7. С. 135-144. <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol13i7-019>.
 Sidorova T., Horina V., Hrynova T., Prudnikova M., Yefremenko A. Tsyfrovyy zvorotnyi zv'yazok u tsyklichnykh vyдах sportu yak kluch do yakisnoho navchannia ta trenuvan [Digital feedback in cyclic sports as a key to quality learning and training]. *Osvita. Innovatyka. Praktyka – Education. Innovation. Practice*, 2025. Vol. 13, No 7. S. 135-144. <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol13i7-019>.

УДК 796.015:004.9:37.01

DOI: 10.31110/2616-650X-vol13i7-019

**Тетяна СИДОРОВА¹, Вікторія ГОРИНА², Тетяна ГРИНЬОВА³,
 Марина ПРУДНІКОВА⁴, Андрій ЄФРЕМЕНКО⁵**

¹⁻⁵ Харківська державна академія фізичної культури, Україна

¹ <https://orcid.org/0009-0006-7871-0717>
 sidorova.tetyana@gmail.com

² <https://orcid.org/0009-0001-3949-7507>
 gorinaviktoriya2015@gmail.com

³ <https://orcid.org/0000-0002-8768-0672>
 tgrynova88@gmail.com

⁴ <https://orcid.org/0000-0002-9510-3963>
 marinaprudnikova72@gmail.com

⁵ <https://orcid.org/0000-0003-0924-0281>
 literasearchukr@gmail.com

ЦИФРОВИЙ ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК У ЦИКЛІЧНИХ ВИДАХ СПОРТУ ЯК КЛЮЧ ДО ЯКІСНОГО НАВЧАННЯ ТА ТРЕНУВАНЬ

Анотація. Швидкий розвиток технологій зумовлює вдосконалення методології навчання та тренування у спорті, де цифровий зворотний зв'язок є наріжним каменем, надаючи об'єктивну інформацію для покращення процесу підготовки спортсменів. Незважаючи на широке впровадження цифрових інструментів в підготовці спортсменів циклічних видів спорту, існує потреба у цілісному розумінні та систематизації оптимального використання зворотного зв'язку, оскільки швидке поширення технологій випереджає їхнє осмислення, а тренери часто стикаються з переважанням даними та труднощами в інтерпретації. Метою дослідження стало виявлення ключових напрямків застосування цифрового зворотного зв'язку в підготовці спортсменів циклічних видів спорту. Дослідження проводилося шляхом бібліометричного аналізу публікацій з бази даних *Web of Science* за період 2015-2025 років, з використанням розширеного пошукового запиту. Були включені лише рецензовані статті та огляди. Картування за ключовими словами за допомогою *VOSviewer* (v.1.6.19) дозволило кластеризувати досліджуване поле. Із 206 знайдених публікацій, після перевірки та фільтрації за критеріями включення/виключення, до подальшого аналізу було відібрано 53 релевантних джерела. Результати кластеризації зосереджені на виокремленні 6 взаємопов'язаних кластерів, що відображають різні напрямки застосування цифрового зворотного зв'язку: фізіологічний моніторинг, показники продуктивності та силові тренування, біомеханіка та оптимізація техніки, профілактика травм та управління ризиками, енергетична ефективність та серцево-судинна діяльність, а також управління тренувальним навантаженням та відновленням. Цифровий зворотний зв'язок виявився центральним елементом моніторингу та оптимізації тренування у видах на витривалість, відіграє важливу роль у процесі контролю втоми та покращенні ефективності силового тренування, надає об'єктивні дані для корекції техніки руху, допомагає моніторити тренувальне навантаження для профілактики травм та забезпечує визначення оптимального співвідношення навантаження і відновлення. Загалом, цифровий зворотний зв'язок у циклічних видах спорту є ключовим фактором як для якісного навчання через можливості корекції техніки руху, так і для якісних тренувань у контексті оптимізації адаптації та відновлення спортсменів. Перспективи подальших досліджень включають подальшу інтеграцію різних типів цифрових даних, розробку інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів та вдосконалення алгоритмів штучного інтелекту для більш точних та індивідуалізованих рекомендацій, а також проведення довгострокових досліджень впливу цифрового зворотного зв'язку.

Ключові слова: цифровізація; зворотний зв'язок; мобільні технології; витривалість; навчання; тренування; травматизм; управління навантаженням.

**Tetiana SIDOROVA¹, Victoria GORINA², Tetiana HRYNOVA³,
 Maryna PRUDNIKOVA⁴, Andrii YEFREMENKO⁵**

¹⁻⁵ Kharkiv State Academy of Physical Culture, Ukraine

¹ <https://orcid.org/0009-0006-7871-0717>
 sidorova.tetyana@gmail.com

² <https://orcid.org/0009-0001-3949-7507>
 gorinaviktoriya2015@gmail.com

³ <https://orcid.org/0000-0002-8768-0672>
 tgrynova88@gmail.com

⁴ <https://orcid.org/0000-0002-9510-3963>
 marinaprudnikova72@gmail.com

⁵ <https://orcid.org/0000-0003-0924-0281>
 literasearchukr@gmail.com

DIGITAL FEEDBACK IN CYCLIC SPORTS AS A KEY TO QUALITY LEARNING AND TRAINING

Abstract. The rapid development of technology is leading to improvements in the methodology of teaching and training in sports, where digital feedback is a cornerstone, providing objective information to improve the process of training athletes. Despite the widespread introduction of digital tools in the training of athletes in cyclic sports, there is a need for a holistic understanding and systematization of the optimal use of feedback, as the rapid spread of technologies outpaces their comprehension, and athletes and coaches often face data overload and difficulties in interpretation. The aim of the study was to identify key areas of application of digital feedback in the training of athletes in cycling sports. The study was conducted through a bibliometric analysis of publications from the Web of Science database for the period 2015-2025, using an advanced search query. Only peer-reviewed articles and reviews were included. Keyword mapping using VOSviewer (v.1.6.19) allowed clustering the studied field. From the 206 publications found, after screening and filtering according to inclusion/exclusion criteria, 53 relevant sources were selected for further analysis. The clustering results focused on identifying 6 interconnected clusters that reflect different areas of application of digital feedback: physiological monitoring, performance indicators and strength training, biomechanics and technique optimization, injury prevention and risk management, energy efficiency and cardiovascular activity, as well as training load management and recovery. Digital feedback has proven to be a central element in monitoring and optimizing training in endurance sports, plays an important role in the process of fatigue control and improving the effectiveness of strength training, provides objective data for correcting movement technique, helps monitor training load for injury prevention, and ensures the determination of the optimal load-recovery ratio. Overall, digital feedback in cyclic sports is a key factor for both quality learning through the ability to correct movement techniques and for quality training in the context of optimizing adaptation and recovery of athletes. Future research prospects include further integration of different types of digital data, development of intuitive interfaces and improvement of artificial intelligence algorithms for more accurate and individualized recommendations, as well as conducting long-term studies of the impact of digital feedback.

Keywords: digitalization; feedback; mobile technologies; endurance; training; learning; injuries; training load management.

Постановка проблеми. Швидкий розвиток технологій сприяє вдосконаленню методології навчання та тренування в спорті, заснованої на даних. У цій мінливій парадигмі цифровий зворотний зв'язок став наріжним каменем, який визначається як об'єктивна інформація, отримана з цифрових пристроїв та представлена спортсменам або тренерам для сприяння покращенню результатів, навчання та тренувань. Він може проявлятися в різних формах, включаючи візуальні, слухові сигнали та тактильні відчуття, забезпечуючи негайне або післятренувальне об'єктивне розуміння фізіологічних та біомеханічних параметрів спортсмена [1]. Циклічні види спорту, що охоплюють такі дисципліни, що характеризуються повторюваними руховими моделями, критичною залежністю від витривалості та від технічної ефективності [2]. Характерним для цієї групи видів спорту є точне вимірювання параметрів, пов'язаних з результативністю та ефективністю, зокрема, за допомогою цифрових інструментів [3, 4, 5]. Значення цифрового зворотного зв'язку в циклічних видах спорту пов'язане з доведеною здатністю покращувати рухове навчання, розвиток навичок та адаптації до тренувань, тим самим безпосередньо сприяючи покращенню спортивних результатів [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Незважаючи на широке впровадження та визнані переваги цифрового зворотного зв'язку у спорті, спостерігається неоднозначність цілісного розуміння того, як і якою мірою він пов'язаний з результативністю навчання та тренувань [7]. Швидке поширення інструментів цифрового зворотного зв'язку, включаючи носимі датчики, мобільні додатки та системи віртуальної/доповненої реальності, випереджає систематичне розуміння їх оптимального використання для досягнення конкретних результатів у циклічних видах спорту [8]. Значна частина існуючої літератури, як правило, зосереджена на розробці або застосуванні конкретних технологій або на окремих показниках ефективності, часто не відображаючи цілісність уявлень з позицій педагогіки та сталих змін у методології тренування [9]. Нагальна проблема полягає не в простому наданні цифрових даних, а в їх ефективній інтерпретації та практикоорієнтованості на сполучену діяльність тренерів і спортсменів (включаючи саморегуляцію) [10, 11]. Спортсмени та тренери часто стикаються з проблемами перевантаження даними, труднощами в інтерпретації складних показників та встановлення зв'язку між кількісною інформацією та якісним покращення результативності або ефективності тренувального процесу [12]. Зазначають потенційне неправильне використання технологій або недостатнє його розуміння [13, 14]. Проблема цифрового зворотного зв'язку також пов'язана з доступністю та безпечністю даних, конфіденційністю обміну інформацією між тренером і спортсменом, а також третіми особами [15, 16].

Без чіткої, заснованої на доказах основи застосування, потенціал цифрового зворотного зв'язку може бути підірваний, що призведе до неоптимальних результатів або навіть негативних наслідків, таких як надмірна залежність або зниження мотивації спортсменів. Існує потреба узагальнення уявлень та визначення сталих тенденцій застосування цифрового зворотного зв'язку в циклічних видах спорту – для подолання розриву між технологічними можливостями та потенціалом для оптимізації педагогічної складової підготовки спортсменів.

Мета – виявлення ключових напрямків застосування цифрового зворотного зв'язку в підготовці спортсменів циклічних видів спорту.

Методи дослідження. Первинні дані були зібрані за допомогою інструментів розширеного пошуку в базі наукової інформації Web of Science. Для забезпечення максимальної релевантності та охоплення цільової області було використано ретельно розроблений розширений пошуковий запит обмежений 2015-2025 роками, що пов'язано з інтенсивним впровадження технологій у підготовку

основні фізіологічні концепції тренування вимірюються та використовуються в підготовці спортсменів сполучено з розвитком цифрових технологій.

Кластер 2 містить ключові слова пов'язані з показниками продуктивності та значенням силових тренувань для представників циклічних видів спорту: «фізичні вправи», «втома», «сила», «потужність», «надійність». Тут спостерігається розширення уявлень про застосування цифрового зворотного зв'язку в управлінні тренувальним процесом. Він відіграє важливу роль у моніторингу рівня втоми та покращення силових характеристик, що є вирішальним для запобігання перетренованості та забезпечення адекватного відновлення, тим самим сприяючи якості тренувань шляхом оптимізації адаптації та мінімізації ризику травм.

Кластер 3 містить ключові слова пов'язані з біомеханікою та оптимізацією техніки спортсменів: «біомеханіка», «кінематика», «кінетика», «сила», «продуктивність», «швидкість». Цифровий зворотний зв'язок, завдяки таким технологіям, як захоплення руху та носимі датчики, надає об'єктивні дані про готовність спортсмена, що дозволяє своєчасно корегувати навчальний процес. В результаті створюються умови для своєчасної корекції техніки руху, що є критично важливим для підвищення економічності та швидкості пересування спортсмена. Цікаво, що усереднений діапазон згадувань у публікаціях свідчить про стійкий та відносно недавній дослідницький інтерес до використання цифрових інструментів для біомеханічного аналізу, що є неочікуваним результатом попри їх поширеність в сфері спортивного тренування.

Кластер 4 містить ключові слова пов'язані з профілактикою травм та управлінням ризиками: «травми», «травми від перенавантаження», «фізична активність», «ризик», «спортивні травми». У циклічних видах спорту повторювані рухи часто призводять до травм від перенавантаження. Системи цифрового зворотного зв'язку допомагають моніторити тренувальне навантаження, сприяючи виявленню ранніх ознак стомлення в контексті зниження ризику травматизації. Цифровий зворотний зв'язок дозволяє створити умови довгострокового розвитку спортсменів, зменшуючи ризик невиправданих рішень в тренувальному процесі. Середня кількість публікацій за останні роки щодо травматизації в циклічних видах спорту свідчить про зростаючий інтерес дослідників до профілактичних можливостей цифрового зворотного зв'язку.

Кластер 5 містить ключові слова пов'язані з енергетичною ефективністю та серцево-судинною діяльністю в циклічних видах спорту: «економія», «витрати енергії», «частота серцевих скорочень», «споживання кисню». Хоча ці поняття передують поширенню цифрового зворотного зв'язку, їх виокремлення свідчить про важливість даних чинників для підготовки спортсменів в сучасному вимірі. Цифровий зворотний зв'язок якісно змінив уявлення про вимірювання та застосування цих показників у реальному часі в контексті практичного застосування в умовах спортивного тренування.

Кластер 6 містить ключові слова пов'язані з управлінням тренувальним навантаженням та відновленням працездатності: «здатність», «тренування на витривалість», «відновлення». Означені ключові слова зустрічаються передусім в публікаціях після 2020 років, наголошуючи про актуальність цього напрямку застосування цифрового зворотного зв'язку в підготовці спортсменів циклічних видів спорту. Цифровий зворотний зв'язок є центральним важелем оптимізації тренувального навантаження, забезпечуючи спортсменам достатній стимул для адаптації, не перевищуючи їхню здатність до відновлення. Моніторинг відновлення за допомогою цифрових показників дозволяє динамічно коригувати плани тренувань, збільшуючи адаптивні реакції та запобігаючи перетренованості. Цей кластер безпосередньо стосується удосконалення методології тренування в контексті індивідуалізації підготовки спортсменів, що базується на належному де зворотному зв'язку.

Таким чином, цифровий зворотний зв'язок у циклічних видах спорту не застосовується в циклічних видах спорту єдинопроводжено. Він поєднує тематику біомеханічного аналізу, фізіологічної оптимізації, запобігання травмам та управління тренувальним навантаженням. Часові зміни уваги дослідників стосовно окремих тем визначають акценти – від фізіологічного моніторингу до аналізу характеристик тренування спортсменів в реальному часі для створення раціонального співвідношення навантаження та відпочинку, щоб ефективно запобігати перетренованості та підвищенню ризиків травматизації. Цифровий зворотний зв'язок служить ключовим фактором як для якісного навчання, через можливості корекції техніки руху, так і для якісних тренувань, в контексті оптимізації адаптації та відновлення спортсменів.

В результаті проведеного бібліографічного аналізу вдалося зосередитися на ключових напрямках застосування цифрового зворотного зв'язку в підготовці спортсменів циклічних видів спорту.

Фізіологічний моніторинг для оптимізації продуктивності

Фізіологічний моніторинг є центральним поняттям для вивчення, розуміння та оптимізації спортивної продуктивності в циклічних видах спорту. Він дозволяє зрозуміти вимоги змагальної діяльності, ідентифікувати особливості організму спортсменів, відстежувати довгострокові зміни у фізіологічних параметрах спортсменів, ефективно планувати тренувальний процес та мінімізувати

негативний вплив зовнішніх факторів [17]. Серед ключових фізіологічних параметрів, що підлягають моніторингу, виділяють максимальне та пікове споживання кисню, частоту серцевих скорочень, концентрацію лактату в крові, м'язову оксигенацію, загальний вміст гемоглобіну, показники газового складу крові та її кисневого вмісту, коефіцієнт дихального обміну, варіабельність серцевого ритму, параметри пульсової хвилі, пікову швидкість окислення жирів та інтенсивність навантаження, що її супроводжує, а також склад тіла [18]. Застосування методів штучного інтелекту та машинного навчання, таких як дерева рішень, дозволяє створювати моделі морфо-функціонального стану спортсменів різної кваліфікації та прогнозувати успішність спортивної діяльності [19]. Методи та інструменти, що використовуються для фізіологічного моніторингу, включають ергометричні тести (велоергометр, лижний ергометр), Вінгейт-тест, двоенергетичну рентгенівську абсорбціометрію для вимірювання складу тіла, автоматизовані онлайн-системи для газообміну (Quark CPET, Cosmed), монітори ЧСС (Polar S610i, Garmin Vivoactive, Polar RS800), аналізатори крові (ABL 80 Flex CO-OX, Super GL ambulance) та спектроскопію ближнього інфрачервоного діапазону (NIRS) (Моху Muscle Oxygen Monitor) [20, 21, 22, 23]. Для аналізу даних застосовується програмне забезпечення, таке як IBM SPSS, R з пакетом «metafor», GraphPad Prism, та методи штучного інтелекту/машинного навчання (наприклад, дерева рішень у Python з модулем Skelit) [24]. Таким чином, фізіологічний моніторинг є критично важливим інструментом для всебічного розуміння адаптації спортсменів до навантажень, прогнозування успішності та розробки індивідуалізованих, високоякісних тренувальних програм, спрямованих на досягнення максимальної продуктивності у циклічних видах спорту.

Продуктивність та силові тренування

Показники продуктивності є критично важливими для елітних спортсменів на витривалість. Ключовими детермінантами продуктивності вважаються максимальне споживання кисню, його фракційне використання, а також здатність ефективно перетворювати метаболічну енергію в потужність та швидкість [25, 26]. Дослідження демонструють, що такі показники, як пікова швидкість при максимальному споживанні кисню та пікова вихідна потужність, є найкращими предикторами продуктивності в елітних спортсменів на витривалість [27, 28]. Силові тренування відіграють значну роль у розвитку витривалих спортсменів, оскільки вони покращують нервово-м'язову ефективність. Для елітної групи спортсменів-лижників близько граничні силові тренування рекомендується включати приблизно двічі на тиждень у підготовчий період для нарощування сили та один раз на тиждень для її підтримки у змагальний період [29]. Дослідження демонструють, що тренування максимальної, вибухової та реактивної сили можуть покращити нервово-м'язову здатність, впливаючи на морфологічні фактори, жорсткість м'язів і сухожиль, рекрутування рухових одиниць та внутрішньо-/міжм'язову координацію [30, 31]. Метою таких програм є покращення техніки пересування, економічності/ефективності рухів та відтермінування втоми. Індивідуалізація силових тренувань є ключовою, з урахуванням уникнення можливої «інтерференції» між силовими та тренуваннями на витривалість, що виникає при високих обсягах тренувань на витривалість [32]. Дослідження показують, що, незважаючи на потенційний ефект інтерференції, комбіновані тренування можуть бути корисними для збільшення силових можливостей та витривалості у спортсменок [33, 34]. Важливість оптимізації технічного виконання під час кожної силової сесії, а також психологічної підготовки та максимальної мобілізації спортсменів під час тренувань, також підкреслюється як фактор, що відрізняє тих, хто досягає високих результатів. Проте, більшість досліджень ефективності силових тренувань є короткостроковими [35]. Цифрові інструменти зворотного зв'язку можуть покращити розуміння взаємовпливу тренувань на силу та витривалість в циклічних видах спорту. Наприклад, використання безмаркерових систем захоплення руху на основі глибокого навчання дозволяє відстежувати зміни в техніці лижних гонок та їхній вплив на економічність і максимальну продуктивність. Вони надають автоматичні результати щодо положення суглобів, кутів суглобів, положення тіла та нахилу вперед, що є цінним інструментом для тренерів у реальному часі для корекції техніки [36]. Більш того, самоспостереження за допомогою відеозаписів, особливо з підказками, може бути ефективним засобом для підвищення індивідуального зворотного зв'язку, особливо при роботі з великими групами спортсменів, сприяючи покращенню їхньої технічної майстерності та продуктивності [25, 30, 35]. У підсумку, інтеграція силових тренувань, моніторингу ключових показників продуктивності та використання цифрових інструментів зворотного зв'язку є важливим напрямком для оптимізації тренувального процесу та досягнення високих результатів у циклічних видах спорту.

Біомеханіка та оптимізація техніки

Саме цей напрямок грає основну роль у використанні цифрового зворотного зв'язку у підвищенні спортивної майстерності в циклічних видах спорту. Дослідження в цьому напрямку підкреслюють надважливе значення кількісних методів для аналізу рухів та оптимізації техніки. Значна частина досліджень зосереджена на зниженні аеродинамічного та гідродинамічного опору, що є ключовим для високошвидкісних дисциплін циклічних видів спорту [37]. Оптимізація спортивного одягу, обладнання та позиції тіла за допомогою вітротунельних досліджень коли їх доповнюють

кінематичні оцінки на трасі сприяють більшому розумінню сутності циклічної рухової діяльності. Технологічне є майбутнє пов'язане з використанням відеоекранів у вітротунелі та проєкційних дисплеїв в окулярах спортсменів для покращення зворотного зв'язку для спортсменів зимових видів спорту [38]. У плаванні, метод обчислювальної гідродинаміки використовується для кількісного визначення компонентів опору, що є основою для розуміння та оптимізації рухів у воді [7]. Ряд досліджень присвячений розробці та застосуванню інноваційних систем для кількісного аналізу біомеханіки руху [39]. Системи на основі GPS, датчиків осьового навантаження та інерційного вимірювального блоку надають точні дані для оптимізації показників продуктивності та запобігання травмам спортсменів. Вони є потужним інструментом для перетворення якісних описів техніки на кількісно вимірювані показники, що забезпечує кількісний зворотний зв'язок і сприяє створенню інтуїтивно зрозумілих засобів тренування [40]. Інтеграція датчиків для зворотного зв'язку в реальному часі є провідним напрямком [41]. Розробка вимірювальної системи з мініатюрною електронікою та бездротовою передачею даних через Bluetooth Low Energy на смартфон дозволяє вимірювати деформацію лижної палиці та її положення, забезпечуючи онлайн-візуалізацію та аналіз даних для негайного коригування техніки [42]. В біатлоні, комбіновані датчики пульсу та акселерометрів використовуються для об'єктивної оцінки зовнішнього тренувального навантаження, яка часто відрізняється від внутрішнього, що дозволяє краще планувати тренування [16]. Дослідження кінематичних ефектів перенесення гвинтівки у біатлоні за допомогою 3D-системи захоплення руху сприяє кращому розумінню індивідуальних особливостей техніки спортсменів, що підкреслює потребу в високочутливих системах для польових умов [21]. Поєднання відеоаналізу, тривимірних кінематичних даних та силових датчиків, дозволяє проводити точний аналіз навантаження на суглоби в реалістичних умовах, що є критичним для запобігання травмам та оптимізації техніки [43, 44]. Таким чином, біомеханічний аналіз та оптимізація техніки в циклічних видах спорту значно виграють від впровадження цифрового зворотного зв'язку. Дослідження демонструють перехід від якісних оцінок до об'єктивних, вимірюваних показників. Розробка мініатюрних, бездротових датчиків та їх інтеграція зі смартфонами та комп'ютерними моделями дозволяє отримувати зворотний зв'язок у реальному часі та проводити детальний післятренувальний аналіз.

Профілактика травм та управління ризиками

Травматизм у циклічних видах спорту залишається значною проблемою, що потребує поглиблених досліджень та розробки превентивних заходів. Попри їх загальну користь для здоров'я та високу популярність, особливо серед дітей та підлітків, ризики отримання травм є помітними, а їх частота демонструє тенденцію до зростання [9]. Ризик травматизму в циклічних видах спорту є багатофакторним, охоплюючи як внутрішні, так і зовнішні чинники: вік, рівень майстерності та досвіду; втома; неправильно підібране або відрегульоване спорядження; зіткнення та падіння; умови середовища [11]. Систематична розробка профілактичних програм, що залучає спортсменів, тренерів та фахівців суміжних спеціальностей є ключовою. Основні напрямки профілактики включають освіту, інструктаж, використання відповідного спорядження, фізичну підготовку та управління ризиками середовища [15]. В контексті підвищення ефективності навчання та тренування, а також зниження травматизму, цифровий зворотний зв'язок відіграє ключову роль. Він дозволяє перетворити традиційні методи профілактики на більш точні, індивідуалізовані та інтерактивні інструменти [10]. Одним із головних технічних факторів, що спричиняють травми, є відхилення у виконанні технічних дій. Цифровий зворотний зв'язок, отриманий за допомогою датчиків руху, відеоаналізу та спеціалізованого програмного забезпечення, може забезпечити спортсменам та тренерам деталізовану інформацію про їхні рухи, швидкість, кути згинання суглобів та розподіл навантаження [13]. Надмірна втома та занадто висока інтенсивність/обсяг навантаження тренувань є важливими фізіологічними факторами ризику. Цифровий зворотний зв'язок через носимі пристрої, що відстежують серцевий ритм, потужність, швидкість відновлення та якість сну, дозволяє точно моніторити фізіологічний стан спортсмена [12]. Цифровий зворотний зв'язок може допомогти у зміцненні вразливих частин тіла, зокрема колінного суглоба. Вимірювання м'язової сили, балансу та гнучкості за допомогою цифрових інструментів дозволяє створювати індивідуальні програми фізичної підготовки, які націлені на конкретні слабкі місця спортсмена [9, 14]. Цифрові системи можуть надавати об'єктивні дані про швидкість та траєкторію руху, допомагаючи спортсменам контролювати надмірну швидкість та уникати «самовпевненості», формуючи «самозахисну свідомість» та навички контролю технічних дій, що є рекомендованими профілактичними заходами [11, 15]. Інтерактивні платформи доступні через смартфони та комп'ютери, можуть значно підвищити мотивацію спортсменів до дотримання превентивних заходів. Вони дозволяють надавати рекомендації та покрокові інструкції щодо профілактики. Впровадження цифрового зворотного зв'язку дозволить збирати більш точні та повні дані про механізми травм, включаючи ті, що відбуваються поза змаганнями та тренуваннями. Таким чином, інтеграція цифрового зворотного зв'язку в процеси навчання та тренування у циклічних видах

спорту представляє собою перспективний напрямок для якісного підвищення безпеки спортсменів сприяючи усвідомленій поведінці.

Управління тренувальним навантаженням та відновлення

Розподіл інтенсивності тренувань є ключовим чинником управління навантаженням. Численні дослідження тренувальних характеристик спортсменів національного або міжнародного рівня, які тренуються 10–13 разів на тиждень, свідчать про типовий розподіл інтенсивності, де близько 80% тренувальних занять виконуються з низькою інтенсивністю, а близько 20% домінують періоди високоінтенсивної роботи, наприклад, інтервальні тренування на рівні близько 90% від максимального споживання кисню [45]. Цей приблизний розподіл 80:20 (низькоінтенсивні тренування – порогові тренування/високоінтенсивні тренування) пов'язаний з довгостроковою результативністю серед спортсменів на витривалість [46]. Низькоінтенсивні тренування (що викликають стабільну концентрацію лактату в крові менше приблизно 2 ммоль) є ефективними для стимулювання фізіологічних адаптацій [47]. Регулярні тривалі тренування з низькою інтенсивністю ефективні для стимулювання фізіологічних адаптацій, дозволяючи поповнювати запаси глікогену між інтенсивнішими навантаженнями та зменшуючи загальний рівень стресу. Існують різні моделі розподілу інтенсивності, зокрема пірамідальна (Zone 1 > Zone 2 > Zone 3) та поляризована (Zone 1 > Zone 3 > Zone 2), де Zone 1 – низька інтенсивність, Zone 2 – помірна, а Zone 3 – висока. Більшість елітних спортсменів, за винятком велосипедистів, значну частину (понад 70,00%) тренувань проводять у Zone 1, при цьому плавці показують найнижче значення (71,70%), а лижники та біатлоністи – найвище (85,10%) [48]. Важливо відзначити, що результати щодо розподілу інтенсивності значно залежать від обраного методу кількісної оцінки, будь то на основі частоти серцевих скорочень, концентрації лактату в крові, швидкості чи потужності. Відновлення є невід'ємною частиною управління тренувальним навантаженням. Суміжні тренування, що поєднують силові та аеробні навантаження, можуть мати як переваги, так і ризики для управління навантаженням. Додавання протоколу силових тренувань до переважно аеробної програми може призвести до погіршення адаптації сили ніг порівняно з режимом тренувань лише силової спрямованості [49]. Однак, відповідне планування тренувань, зокрема достатній період відновлення (від 6 до 24 годин) між тренувальними режимами, може зменшити або зробити менш помітним ефект інтерференції. Особливе значення має індивідуалізація тренувальних планів та протоколів тестування, оскільки фізіологічні якості та реакції спортсменів значно різняться [50]. Загальний обсяг тренувань є первинною змінною, а надмірний обсяг високоінтенсивних тренувань може призвести до симптомів перетренованості та навіть погіршення продуктивності. Врахування біомеханічного навантаження на тіло, особливо в видах спорту з високим ударним навантаженням (як біг), є критично важливим для управління обсягом тренувань та запобігання травмам від перевантаження [51]. Застосування сенсорних технологій, машинного навчання та штучного інтелекту потенційно здатне покращити моніторинг навантаження та відновлення, надаючи більш точні та індивідуалізовані рекомендації [52]. Однак, не всі спортсмени почуваються комфортно, використовуючи датчики, а поточні носимі технології можуть не мати необхідного рівня точності для повного моніторингу навантаження [53]. Важливість безперервного моніторингу та поздовжнього тестування, коли одна й та сама батарея тестів проводиться багаторазово протягом тривалого часу, дозволяє відстежувати індивідуальний прогрес та виявляти ключові змінні продуктивності для кожного спортсмена.

Висновки і перспективи подальших досліджень. На основі проведеного бібліографічного аналізу, зосередженого на застосуванні цифрового зворотного зв'язку в циклічних видах спорту, виявлено ключові напрямки, які пов'язані з перспективою покращення навчання та тренувань. Цифровий зворотний зв'язок є інструментом, який пов'язаний з поняттям моніторингу в підготовці спортсменів, включаючи біомеханічний аналіз, фізіологічну оптимізацію, зниження ризику травматизації та управління тренувальним навантаженням. Таким чином, цифровий зворотний зв'язок є ключовим чинником для вдосконалення навчання в циклічних видах спорту, що пов'язано з можливостями корекції техніки руху, а також тренувального процесу, в контексті оптимізації адаптації та відновлення спортсменів. Спостерігається зміщення акцентів від суто фізіологічного моніторингу до аналізу характеристик тренування спортсменів в умовах реального часу для визначення раціонального співвідношення навантаження та відпочинку, ефективного запобігання перетренованню та зниження факторів ризику для здоров'я, що зумовлює перспективи подальших досліджень в напрямку вивчення особливостей розбудови цифрового зворотного зв'язку в циклічних видах спорту.

Конфлікт інтересів. Автори підтверджують відсутність фінансових, особистих чи інших інтересів, що можуть розглядатися як потенційний конфлікт інтересів щодо публікації цієї статті.

Фінансування. Робота виконана за відсутності фінансової підтримки з боку будь-яких організацій.

Доступність даних. Це теоретичне дослідження не передбачає використання додаткових наборів даних.

Використання штучного інтелекту. Інструменти штучного інтелекту не використовувались при написанні цієї роботи.

Список використаних джерел / References

1. Abut, F. A. T. İ. H., Akay, M. F., Daneshvar, S., Özcan, A. L. P. E. R., & Heil, D. (2023). Non-exercise-based racing time prediction of cross-country skiers using machine learning methods combined with Relief-F feature selection. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 17543371231194011. <https://doi.org/10.1177/17543371231194011>
2. Boulay, M., Serresse, O., Almeras, N., & Tremblay, A. (1994). Energy-expenditure measurement in male cross-country skiers - comparison of 2 field methods. *Medicine and science in sports and exercise*, 26(2), 248–253. <https://doi.org/10.1249/00005768-199402000-00017>
3. Herzig, D., Testorelli, M., Olstad, D. S., Erlacher, D., Achermann, P., Eser, P., & Wilhelm, M. (2017). Heart-Rate Variability During Deep Sleep in World-Class Alpine Skiers: A Time-Efficient Alternative to Morning Supine Measurements. *International journal of sports physiology and performance*, 12(5), 648–654. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2016-0257>
4. Schmitt, L., Regnard, J., Coulmy, N., & Millet, G. P. (2018). Influence of Training Load and Altitude on Heart Rate Variability Fatigue Patterns in Elite Nordic Skiers. *International journal of sports medicine*, 39(10), 773–781. <https://doi.org/10.1055/a-0577-4429>
5. Fruet, D., Zignoli, A., Modena, R., Pellegrini, B., Gastaldi, L., & Bortolan, L. (2024). Design and development of a feedback system for automatic treadmill speed adaptation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 17543371241257996. <https://doi.org/10.1177/17543371241257996>
6. Bray-Miners, J., Runciman, R. J., & Groendyk, N. (2014). Methods and instrumentation for the biomechanical analysis of slalom water skiing. *Proceedings of the institution of mechanical engineers part p-journal of sports engineering and technology*, 228(2), 75–85. <https://doi.org/10.1177/1754337113520150>
7. Hayati, A. N., Ghaffari, H., & Shams, M. (2016). Analysis of free-surface effects on swimming by the application of the computational fluid dynamics method. *Proceedings of the institution of mechanical engineers part p-journal of sports engineering and technology*, 230(3), 135–148. <https://doi.org/10.1177/1754337115598488>
8. Debertin, D., Haag, L., & Federolf, P. (2024). IMU Data-Driven and PCA-Based Approach to Establish Quantifiable and Practically Applicable Measures for V2 Technique Elements in Cross-Country Skiing. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 34(7), e14691. <https://doi.org/10.1111/sms.14691>
9. Meyers, M. C., Laurent, C. M., Higgins, R. W., & Skelly, W. A. (2007). Downhill ski injuries in children and adolescents. *Sports medicine*, 37(6), 485–499. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737060-00003>
10. Grimsmo, J., Maehlum, S., Moelstad, P., & Arnesen, H. (2011). Mortality and cardiovascular morbidity among long-term endurance male cross country skiers followed for 28-30 years. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 21(6), E351–E358. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2011.01307.x>
11. Barth, M., Platzer, H.-P., Giger, A., Nachbauer, W., & Schroecksadel, P. (2021). Acute on-snow severe injury events in elite alpine ski racing from 1997 to 2019: The Injury Surveillance System of the Austrian Ski Federation. *British journal of sports medicine*, 55(11), 589–595. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2020-102752>
12. Kemler, E., Valkenberg, H., & Gouttebauge, V. (2019). Stimulating injury-preventive behaviour in sports: The systematic development of two interventions. *BMC sports science medicine and rehabilitation*, 11(1), 26. <https://doi.org/10.1186/s13102-019-0134-8>
13. Nagle, K. B. (2015). Cross-Country Skiing Injuries and Training Methods. *Current sports medicine reports*, 14(6), 442–447. <https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000205>
14. Oh, H., Johnson, W., & Syrop, I. P. (2019). Winter Adaptive Sports Participation, Injuries, and Equipment. *Sports medicine and arthroscopy review*, 27(2), 56–59. <https://doi.org/10.1097/JSA.0000000000000236>
15. Zhao, Y., Zhao, W., Yin, X., Ma, X., & Qu, S. (2023). Sports knee joint injury in ski training and its prevention. *Revista brasileira de medicina do esporte*, 29, e2022_0217. https://doi.org/10.1590/1517-8692202329012022_0217
16. Karstrom, A., Swaren, M., & Bjorklund, G. (2024). Discrepancies in internal and external training load measurements during low-intensity biathlon training. *Frontiers in sports and active living*, 6, 1455900. <https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1455900>
17. Sandbakk, O., Rasdal, V., Braten, S., Moen, F., & Ettema, G. (2016). How Do World-Class Nordic Combined Athletes Differ From Specialized Cross-Country Skiers and Ski Jumpers in Sport-Specific Capacity and Training Characteristics? *International journal of sports physiology and performance*, 11(7), 899–906. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2015-0285>
18. Sandbakk, O., & Holmberg, H.-C. (2017). Physiological Capacity and Training Routines of Elite Cross-Country Skiers: Approaching the Upper Limits of Human Endurance. *International journal of sports physiology and performance*, 12(8), 1003–1011. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2016-0749>
19. Morawetz, D., Duennwald, T., Faulhaber, M., Gatterer, H., Hoellrigl, L., Raschner, C., & Schobersberger, W. (2020). Can Hyperoxic Preconditioning in Normobaric Hypoxia (3500 m) Improve All-Out Exercise Performance in Highly Skilled Skiers? A Randomized Crossover Study. *International journal of sports physiology and performance*, 15(3), 346–353. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2019-0016>
20. Romer, T., Hansen, M. T., Frandsen, J., Larsen, S., Dela, F., & Helge, J. W. (2020). The relationship between peak fat oxidation and prolonged double-poling endurance exercise performance. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 30(11), 2044–2056. <https://doi.org/10.1111/sms.13769>

21. Priymak, S., Krutsevich, T., Pangelova, N., Trachuk, S., Kravchenko, T., Stepanenko, V., & Ruban, V. (2021). Modeling of functional support of sports activities of biathletes of different qualifications. *Journal of human sport and exercise*, 16(1), 136–146. <https://doi.org/10.14198/jhse.2021.161.12>
22. Aalberg, M., Roaas, T. V., Aune, M. A., Bjerke, O., & Aune, T. K. (2022). In Pursuit of a Comprehensive Understanding of Expertise Development: A Comparison between Paths to World-Class Performance in Complex Technical vs. Endurance Demanding Sports. *Sports*, 10(2), 16. <https://doi.org/10.3390/sports10020016>
23. Solsona, R., Sabater Pastor, F., Normand-Gravier, T., Borrani, F., & Sanchez, A. M. (2024). Sprint training in hypoxia and with blood flow restriction: Controversies and perspectives. *Journal of sports sciences*, 1-15.. <https://doi.org/10.1080/02640414.2024.2416839>
24. Tonnessen, E., Sandbakk, O., Sandbakk, S. B., Seiler, S., & Haugen, T. (2024). Training Session Models in Endurance Sports: A Norwegian Perspective on Best Practice Recommendations. *Sports medicine*, 54(11), 2935–2953. <https://doi.org/10.1007/s40279-024-02067-4>
25. Beattie, K., Kenny, I. C., Lyons, M., & Carson, B. P. (2015). The Effect of Strength Training on Performance in Endurance Athletes. *Sports medicine*, 44(6), 845–865. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0157-y>
26. Ronnestad, B. R., Hansen, J., Thyli, V., Bakken, T. A., & Sandbakk, O. (2016). 5-week block periodization increases aerobic power in elite cross-country skiers. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 26(2), 140–146. <https://doi.org/10.1111/sms.12418>
27. Sandbakk, O. (2018). Practical implementation of strength training to improve the performance of world-class cross-country skiers. *Kinesiology*, 50, 155–162. <https://hrcak.srce.hr/ojs/index.php/kinesiology/article/view/6420/3389>
28. Sollie, O., Holmsen, K., Steinbo, C., Ommundsen, Y., & Losnegard, T. (2021). Observational vs coaching feedback on non-dominant whole-body motor skill performance—Application to technique training. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 31(11), 2103–2114. <https://doi.org/10.1111/sms.14030>
29. Stoeggel, T., & Holmberg, H.-C. (2022). A Systematic Review of the Effects of Strength and Power Training on Performance in Cross-Country Skiers. *Journal of sports science and medicine*, 21(4), 555–579. <https://doi.org/10.52082/jssm.2022.555>
30. Debertin, D., Wachholz, F., Mikut, R., & Federolf, P. (2022). Quantitative downhill skiing technique analysis according to ski instruction curricula: A proof-of-concept study applying principal component analysis on wearable sensor data. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 10, 1003619. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1003619>
31. Mikkonen, R. S., Ihalainen, J. K., Hackney, A. C., & Hakkinen, K. (2024). Perspectives on Concurrent Strength and Endurance Training in Healthy Adult Females: A Systematic Review. *Sports medicine*, 54(3), 673–696. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01955-5>
32. Belalcazar, C., Motz, D., Young, B. W., Rathwell, S., & Callary, B. (2024). Coach Mentorship Using the Adult-Oriented Sport Coaching Survey. *International Sport Coaching Journal*, 1(aop), 1–13. <https://doi.org/10.1123/iscj.2024-0038>
33. Wang, R., & Han, L. (2022). Influence of sports injuries and resistance training on skiers' bone mass. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, 29, e2022_0160. https://doi.org/10.1590/1517-8692202329012022_0160
34. Torvinen, P., Ruotsalainen, K. S., Zhao, S., Cronin, N., Ohtonen, O., & Linnamo, V. (2024). Evaluation of 3D Markerless Motion Capture System Accuracy during Skate Skiing on a Treadmill. *Bioengineering-basel*, 11(2), 136. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11020136>
35. Sarisik, D. C., & Sahin, F. N. (2024). Effects of a comprehensive warm-up program on performance parameters of elite and sub-elite male skiers. *SPORT TK-revista euroamericana de ciencias del deporte*, 13, 38. <https://digitum.um.es/digitum/bitstream/10201/147564/1/Effects%20of%20a%20comprehensive%20warm-up%20program%20on%20performance.pdf>
36. Sandbakk, O., Tonnessen, E., Sandbakk, S. B., Losnegard, T., Seiler, S., & Haugen, T. (2025). Best-Practice Training Characteristics Within Olympic Endurance Sports as Described by Norwegian World-Class Coaches. *Sports medicine-open*, 11(1), 45. <https://doi.org/10.1186/s40798-025-00848-3>
37. Federolf, P., Reid, R., Gilgien, M., Haugen, P., & Smith, G. (2015). The application of principal component analysis to quantify technique in sports. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 24(3), 491–499. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2012.01455.x>
38. Myklebust, H., Losnegard, T., & Hallen, J. (2015). Differences in V1 and V2 ski skating techniques described by accelerometers. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 24(6), 882–893. <https://doi.org/10.1111/sms.12106>
39. Kurpiers, N., McAlpine, P., & Kersting, U. G. (2020). A biomechanical field testing approach in snow sports: Case studies toward a detailed analysis of joint loading. *Proceedings of the institution of mechanical engineers part p-journal of sports engineering and technology*, 234(4), 337–346. <https://doi.org/10.1177/1754337120918037>
40. Hentschel, U., Steinbild, P. J., Dannemann, M., Schwaar, A., Modler, N., & Schuerer, A. (2021). Functional Design Employing Miniaturized Electronics with Wireless Signal Provision to a Smartphone for a Strain-Based Measuring System for Ski Poles. *Computers*, 10(6), 77. <https://doi.org/10.3390/computers10060077>
41. Brownlie, L. (2021). Aerodynamic drag reduction in winter sports: The quest for “free speed.” *Proceedings of The institution of mechanical engineers part p-journal of sports engineering and technology*, 235(4), 365–404. <https://doi.org/10.1177/1754337120921091>
42. Karstrom, M. J., Stoggl, T., Ohlsson, M. L., McGawley, K., & Laaksonen, M. S. (2023). Kinematical effects of rifle carriage on roller skiing in well-trained female and male biathletes. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 33(4), 444–454. <https://doi.org/10.1111/sms.14276>
43. Supej, M., & Holmberg, H. -c. (2021). Monitoring the Performance of Alpine Skiers with Inertial Motion Units: Practical and Methodological Considerations. *Journal of science in sport and exercise*, 3(3), 249–256. <https://doi.org/10.1007/s42978-021-00108-2>

44. Cross, M. R., Riviere, J. R., Van Hooren, B., Coulmy, N., Jimenez-Reyes, P., Morin, J.-B., & Samozino, P. (2021). The effect of countermovement on force production capacity depends on extension velocity: A study of alpine skiers and sprinters. *Journal of sports sciences*, 39(16), 1882–1892. <https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1906523>
45. Booth, F. W. (2015). Muscle adaptation to exercise: New Saltin's paradigms. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 25, 49–52. <https://doi.org/10.1111/sms.12595>
46. Stoeggl, T., Pellegrini, B., & Holmberg, H.-C. (2018). Pacing and predictors of performance during cross-country skiing races: A systematic review. *Journal of sport and health science*, 7(4), 381–393. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2018.09.005>
47. Berryman, N., Mujika, I., & Bosquet, L. (2019). Concurrent Training for Sports Performance: The 2 Sides of the Medal. *International journal of sports physiology and performance*, 14(3), 279–285. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2018-0103>
48. Parry, H., Buskqvist, A., Erlandsson, P., Ohrman, C., Lindblom, H., Ohlsson, M., & McGawley, K. (2021). The influence of a rocking-motion device built into classic cross-country roller-ski bindings on biomechanical, physiological and performance outcomes. *Sports engineering*, 24(1), 24. <https://doi.org/10.1007/s12283-021-00361-2>
49. Nunnikhoven, H. B., Snyder, C., Kipp, R. W., Decker, M. J., & Seifert, J. G. (2021). The Influence of Ski Type on Muscle Activity, Performance, and Self-Efficacy in Young Alpine Ski Racers. *Journal of science in sport and exercise*, 3(3), 312–319. <https://doi.org/10.1007/s42978-021-00123-3>
50. Sperlich, B., Matzka, M., & Holmberg, H.-C. (2023). The proportional distribution of training by elite endurance athletes at different intensities during different phases of the season. *Frontiers in sports and active living*, 5, 1258585. <https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1258585>
51. Walther, J., Haugen, T., Solli, G. S., Tonnessen, E., & Sandbakk, O. (2024). The Evolvement of Session Design From Junior Age to Senior Peak Performance in World-Class Cross-Country Skiers. *International journal of sports physiology and performance*, 19(10), 1097–1106. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2023-0541>
52. Oja, P., Memon, A. R., Titze, S., Jurakic, D., Chen, S.-T., Shrestha, N., Em, S., Matolic, T., Vasankari, T., Heinonen, A., Grgic, J., Koski, P., Kokko, S., Kelly, P., Foster, C., Podnar, H., & Pedisic, Z. (2024). Health Benefits of Different Sports: A Systematic Review and Meta-Analysis of Longitudinal and Intervention Studies Including 2.6 Million Adult Participants. *Sports medicine-open*, 10(1), 46. <https://doi.org/10.1186/s40798-024-00692-x>
53. Nilsson, R., Theos, A., Lindberg, A.-S., & Malm, C. (2025). Predicting competitive alpine skiing performance by multivariable statistics-the need for individual profiling. *Frontiers in sports and active living*, 6, 1505482. <https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1505482>

| Матеріал надійшов до редакції: 23.06.2025 р. | Прийнято до друку: 05.08.2025 р. | Опубліковано: 30.09.2025 р. |

