

## Використання систем моніторингу потужності для прогнозування спортивних результатів та оптимізації тренувальних програм у велоспорті

*Горкуша Андрій Анатолійович*

Опубліковано	Секція	УДК
24.09.2025	Освіта/Педагогіка	796.62:612.766:004.932.2

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17194101>

Ліцензовано за умовами Creative Commons BY 4.0 International license

**Анотація.** У сучасному велоспорті зростає потреба в точних інструментах контролю навантажень і передбачення результативності. Традиційні підходи, що ґрунтуються лише на суб'єктивних відчуттях або частоті серцевих скорочень, дедалі частіше поступаються місцем системам моніторингу потужності. Метою статті є з'ясування прогностичної цінності ключових показників, заснованих на вимірюванні потужності (power-based показники – FTP, NP, IF, TSS), та визначення їхнього місця в структурі сучасних тренувальних програм велосипедистів. Методологія дослідження ґрунтувалася на систематичному огляді та контент-аналізі наукових публікацій, що дало змогу визначити ключові power-based показники та оцінити їхню роль у прогнозуванні результатів. Для інтеграції отриманих даних було використано метод концептуального моделювання, за допомогою якого сформовано багаторівневу схему їх практичного застосування в тренувальному процесі велосипедистів. У роботі вперше здійснено узагальнення значення ключових метрик для різних дисциплін велоспорту – шосейні гонки, трекові дисципліни, гонка на час із роздільним стартом (individual time trial) – і запропоновано структуровану модель їх інтеграції в тренувальний процес. Модель охоплює етапи збору та валідації даних, аналітичної обробки, інтерпретації результатів, практичного застосування та зворотного зв'язку. Такий підхід дозволяє індивідуалізувати підготовку спортсменів, раціонально поєднувати навантаження та відновлення, а також формувати науково обґрунтовані стратегії розвитку в професійному велоспорті.

**Ключові слова:** індивідуалізація підготовки, витривалість, критична потужність, тренувальні цикли, цифрові технології, пейсинг, адаптивні стратегії, спортивне відновлення.

---

<sup>1</sup> Головний тренер (Шосе), Федерація велосипедного спорту України, м. Київ, Україна, <https://orcid.org/0009-0007-6056-101X>

## Use of Power Monitoring Systems for Predicting Sports Performance and Optimizing Training Programs in Cycling

**Annotation.** In contemporary cycling, there is a growing demand for precise tools that support load control and credible anticipation of performance outcomes. Traditional approaches based solely on subjective sensations or heart rate responses are increasingly being replaced by power-based monitoring, which provides objective, high-resolution data on external workload. The aim of this article is to clarify the prognostic value of the principal power metrics – Functional Threshold Power (FTP), Normalized Power (NP), Intensity Factor (IF), and Training Stress Score (TSS) – and to situate them within the structure of modern training programs for cyclists across disciplines.

A structured literature search and content analysis of peer-reviewed publications indexed in major databases were conducted, followed by conceptual modeling to synthesize the findings into an operational framework. Sources were classified both by discipline (road, track, individual time trial) and by the functional role of metrics (diagnostics, intensity prescription, performance prediction). The modeling stage translated the evidence into a multilayered scheme that encompassed data acquisition and validation, analytical processing, interpretation, practical decision-making, and feedback.

The study provides: (i) a discipline-specific synthesis of the prognostic roles of FTP, NP, IF, and TSS; (ii) a structured, full-cycle model that connects raw power data to concrete coaching decisions; and (iii) guidance on metric prioritization and use tailored to different cycling disciplines. For road events, FTP and relative power ( $W \cdot kg^{-1}$ ) serve as the basis for evaluating sustainable intensity and prescribing long-interval workloads. In track disciplines, peak and mean powers over 5–20 s and 30–60 s are emphasized for event-specific readiness. In time trials, stability of NP and IF informs pacing strategies with respect to route profile. The proposed framework illustrates how the integration of multiple metrics supports the definition of weekly and mesocycle objectives, the management of load–recovery balance, and the systematic adjustment of training plans through continuous feedback.

**Keywords:** individualized preparation, endurance capacity, critical power, training periodization, digital analytics, pacing strategies, adaptive modeling, recovery management.

### Вступ

*Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.* Сучасний велоспорт належить до тих видів спорту, де рівень результативності визначається здатністю спортсмена підтримувати високу інтенсивність роботи впродовж тривалого часу й водночас забезпечувати ефективне відновлення. Традиційні методи контролю тренувального процесу, що базуються переважно на вимірюванні частоти серцевих скорочень або суб'єктивних відчуттях спортсмена, не завжди забезпечують достатньо точну та оперативну інформацію для обґрунтованої оцінки очікуваних змагальних показників. Використання систем моніторингу потужності (power meters – вимірювачів потужності) відкрило нові можливості для кількісного аналізу виконаних навантажень, визначення індивідуальних зон інтенсивності та контролю за довгостроковими тенденціями в

підготовці. Попри це, відсутність уніфікованих методичних підходів до інтерпретації даних, а також недостатній рівень інтеграції таких показників у тренувальні програми обмежують практичний ефект цих технологій. Саме тому виникає потреба в узагальненні наукових і практичних підходів до застосування power-based показників і створенні моделі, яка б відображала їхню прогностичну цінність у різних дисциплінах велоспорту. З огляду на це, актуальним є комплексне вирішення низки важливих наукових і практичних завдань, серед яких: визначення найбільш інформативних показників потужності для об'єктивної оцінки рівня підготовленості спортсменів; розроблення методичних рекомендацій щодо їхнього застосування для обґрунтованої оцінки очікуваних змагальних показників, а також для індивідуального налаштування структури тренувального процесу.

Таким чином, дослідження використання систем моніторингу потужності у велоспорті має не лише теоретичне значення для розвитку спортивної науки, а й високу прикладну цінність для тренерської практики, адже воно дає змогу вдосконалити підходи до підготовки спортсменів і підвищити їхню конкурентоспроможність на міжнародній арені.

*Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми.* Попри значний прогрес у використанні систем моніторингу потужності у велоспорті, залишаються аспекти, які досі не отримали належного наукового та практичного розв'язання. По-перше, відсутня єдина методологія щодо визначення ключових показників потужності, що найбільш точно відображають рівень функціональної готовності спортсмена. По-друге, недостатньо розроблені підходи до інтеграції даних, отриманих за допомогою power meters, у комплексні моделі прогнозування спортивних результатів, які враховували б специфіку різних дисциплін велоспорту та індивідуальні особливості атлетів. По-третє, бракує практично орієнтованих методичних рекомендацій для тренерів і спортсменів щодо оптимізації тренувальних програм на основі аналізу потужності, що обмежує можливості широкого впровадження цих технологій у повсякденний тренувальний процес. Таким чином, існує потреба в подальших дослідженнях, спрямованих на стандартизацію методик, розроблення адаптивних моделей прогнозування та формування інструментарію для практичного застосування систем моніторингу потужності у велоспорті.

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* Метою цієї статті є обґрунтування прогностичної цінності ключових power-based показників (FTP, NP, IF, TSS) та розроблення концептуальної моделі їх інтеграції в тренувальний процес велосипедистів.

*Завдання статті:*

1. Визначити інформативність ключових показників потужності для практичної оцінки функціонального стану та рівня підготовленості велосипедистів.
2. Класифікувати ключові power-based метрики відповідно до їх значення в різних дисциплінах (шосейні гонки, трекові дисципліни, гонка на час із роздільним стартом).
3. Сформулювати структуровану модель інтеграції power-based показників у тренувальний процес з урахуванням збору, аналізу, інтерпретації та практичного застосування даних.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Сучасні наукові дослідження у сфері велоспорту насамперед зосереджуються на точності вимірювань і стандартизації даних потужності. Так, A. Bouillod, G. Soto-Romero, F. Grappe, W. Bertucci, E. Brunet і J. Cassirame [1] акцентують на критеріях валідності та надійності ватметрів, підкреслюючи важливість контролю місця встановлення сенсора, калібрування та зовнішніх чинників. У цьому контексті логічним продовженням є огляд P. Leo, J. Spragg, B. Shanahan, J. S. Lawley та I. Mujika [2], які систематизують підходи до профілю потужності (power

profiling) та аналіз кривої «потужність – тривалість», наголошуючи на значенні дво- і трипараметричних моделей для прогнозування результативності спортсменів.

Розвиток ідей індивідуалізації тренувань відображено в працях Ю. М. Коновала та В. І. Бобровника [3], які підкреслюють прикладну цінність інтеграції цифрових технологій у тренерську практику. Водночас J. A. Salas-Montoro та J. J. Pérez-Díaz [4] зосереджуються на термінологічній точності power-based аналізу, наголошуючи, що некоректне використання понять може призводити до хибних інтерпретацій у практиці. Натомість A. Sørensen, T. K. Aune, V. Ranguel і T. Dalen [5] доводять, що FTP і  $VO_{2max}$  залишаються надійними предикторами функціональної готовності навіть серед помірно тренуваних велосипедистів.

Особливий акцент робиться на значенні показників потужності для прогнозування змагальних результатів. Так, L. Vivan, V. R. A. Souza, P. Engelke, C. A. B. Lira, R. L. Vancini, K. Weiss, B. Knechtle та M. S. Andrade [6] підтверджують провідну роль відносної потужності та FTP у часі проходження велоетапів Ironman 70.3. Подібну залежність між спринтерською потужністю та результативністю в гонках на час із роздільним стартом показали C. F. J. Nooijen, R. Muchaño, J. Liljedahl, M. J. M. Hoozemans, T. W. J. Janssen і S. Groot [7] у дослідженнях пара-велоспорту. Ці висновки доповнюють M. Horvath та E. P. Andersson [8], які обґрунтовують доцільність мас-нормалізації (масштабування за масою тіла) потужності для підвищення точності моделей прогнозування.

Ще одним напрямом аналізу стали математичні моделі. У своєму дослідженні G. Vinetti, L. Pollastri, F. Lanfranconi, P. Bruseghini, A. Taboni та G. Ferretti [9] порівнюють дво- та трипараметричні моделі критичної потужності й доводять переваги багатопараметричних підходів у прогнозуванні результатів багатоденних перегонів. Водночас S. Sitko, R. Cirer-Sastre, F. Corbi та I. López-Laval [10] акцентують на ролі профілю потужності в шосейному велоспорті, де стратегія пейсингу (розподілу сил) і відновлення стають вирішальними для успіху.

Трекові дисципліни мають інші акценти. Так, A. K. Dunst і R. Grüneberger [11] пропонують модель прогнозування спринтерських результатів на основі пікових і середніх показників потужності, тоді як A. K. Dunst, C. Hesse та O. Ueberschär [12] аналізують концепт оптимальної динамічної частоти педалювання, пов'язуючи її з розвитком втоми та вихідною потужністю. Дослідження у сфері цифрової аналітики також розширюють можливості тренерів: A. Barsumyan, R. Shyla, A. Saukkonen, C. Soost, J. A. Graw і R. Burchard [13] доводять ефективність алгоритмів машинного навчання (machine learning, ML) в класифікації тренувальної відповіді, а D. Rize, P. Sinai, L. Holohan, P. Saldanha та R. Moskovitch [14] показують, як інтеграція об'єктивних і суб'єктивних даних може забезпечити візуалізацію тренувального процесу для командного аналізу.

Не менш важливим є питання відтворюваності методів і їх застосування в практиці. Зокрема E. McGrath, N. Mahony, N. Fleming і B. Donne [15] підтверджують високу надійність FTP-тесту як підґрунтя для визначення тренувальних зон. Натомість Ø. Sandbakk, E. Tønnessen, S. B. Sandbakk, T. Losnegard, S. Seiler і T. Haugen [16] описують найкращі практики періодизації у видах витривалості, які передбачають баланс низько- і високоінтенсивних «якірних» тренувань. Ці висновки узгоджуються з результатами G. Gallo, A. Bosio, M. Martin, A. Morelli, M. Azzolini, L. Ghercilena, J. Larrazabal, E. Rampinini [17], які виявляють залежність між тренувальною дозою та рекордними показниками потужності, наголошуючи на ризиках перевантаження. Насамкінець J. Iglesias-Pino, A. Herrero-Molleda, J. Fernández-Fernández, J. García-López [18] підтверджують необхідність стандартизації обладнання, показавши відмінності в даних різних ватметрів навіть під час одних і тих самих змагань.

Таким чином, узагальнення сучасних публікацій дає змогу дійти висновку, що системи моніторингу потужності є не лише надійним інструментом вимірювання та

прогнозування, а й комплексною основою для індивідуалізації тренувальних програм, інтеграції машинного навчання та цифрової аналітики, а також оптимізації стратегій підготовки в різних дисциплінах велоспорту.

*Методи дослідження* У роботі використано поєднання теоретичних та аналітичних методів. Основою став систематизований аналіз науково-методичної літератури та публікацій за період 2010–2025 років. До вибірки увійшли лише статті, що містили емпіричні дані або методичні узагальнення щодо застосування систем моніторингу потужності у велоспорті. Критеріями відбору джерел були:

- наявність ключових понять (power-based показники – FTP, NP, IF, TSS);
- орієнтація на велоспорт або інші циклічні види спорту з використанням ватметрів;
- наявність опису методики вимірювання та аналізу даних.

Після первинного пошуку здійснено аналіз обраних публікацій, що дало змогу визначити найбільш інформативні показники потужності та оцінити їх прогностичну цінність у різних дисциплінах велоспорту.

Для інтеграції результатів було застосовано метод концептуального моделювання, за допомогою якого побудовано багаторівневу схему використання показників потужності в тренувальному процесі.

### Результати

Системи моніторингу потужності у велоспорті є сучасним інструментом кількісної оцінки зовнішнього навантаження спортсмена, що дає змогу безпосередньо вимірювати його роботу у ватах і, на відміну від традиційних показників, забезпечує високу точність та об'єктивність даних. Потужність відображає миттєву реакцію організму на навантаження і не залежить від таких зовнішніх чинників, як температура повітря чи рівень гідратації, що робить її надійним критерієм для оцінки функціонального стану. Використання цих технологій дало змогу перейти від загальних моделей тренувань до індивідуалізованого підходу, коли тренер має можливість не лише контролювати виконання плану, а й своєчасно коригувати інтенсивність та обсяг навантаження залежно від адаптаційних реакцій спортсмена.

Таким чином, у сучасному велоспорті постає потреба не лише у використанні систем моніторингу потужності для контролю тренувального процесу, а й у визначенні їхніх фізіологічних основ і ключових показників, які дають змогу комплексно оцінювати рівень підготовленості спортсменів.

Вимірювання механічної потужності у велосипедистів ґрунтується на реєстрації сили, що прикладається до педалей, і частоти обертання шатунів. Потужність як інтегральний показник зовнішньої роботи відображає взаємодію нервово-м'язової системи, енергетичних механізмів і біомеханічних характеристик педалювання. Надійність і валідність сучасних ватметрів підтверджена численними дослідженнями, однак точність результатів залежить від місця встановлення датчика (педаль, шатун, втулка), оскільки втрати на трансмісію можуть сягати 2–3 % [1, с. 20]. У поєднанні з польовими випробуваннями це дає змогу отримувати достовірні дані щодо функціонального стану спортсменів [2, с. 304].

Серед головних інтегральних метрик, що застосовуються у велоспорті, найбільш поширеним є Functional Threshold Power (FTP) – потужність, яку спортсмен здатен підтримувати протягом близько години і яка використовується як базовий орієнтир для визначення тренувальних зон. Похідними від FTP є Training Stress Score (TSS), що характеризує сумарне навантаження тренування, та Intensity Factor (IF), який відображає відносну інтенсивність з урахуванням індивідуального FTP. Показник Normalized Power (NP) дає змогу коректніше оцінити фізіологічний стрес під час

нерівномірної роботи в порівнянні з середньою арифметичною потужністю [2, с. 309]. Використання цих показників забезпечує тренера та спортсмена інструментами для кількісного аналізу виконаного навантаження та надає можливість ефективно поєднувати дані лабораторних і польових тестів [3, с. 7].

Узагальнюючи наведене, можна стверджувати, що показники FTP, TSS, IF та NP формують взаємопов'язану систему оцінки тренувального навантаження у велоспорті. Вони відображають як миттєві, так і інтегральні характеристики фізіологічних реакцій організму, що дає змогу кількісно оцінювати інтенсивність, обсяг і «вартість» виконаної роботи. Водночас у науковій літературі наголошується, що для об'єктивного аналізу необхідно розглядати ці метрики не ізольовано, а в єдиній структурі з уніфікованими критеріями, що забезпечує їхнє порівняння та визначення практичної цінності [2; 4; 5]. У таблиці 1 ключові показники систем моніторингу потужності систематизовано за спільними параметрами.

Таблиця 1

Характеристика ключових показників моніторингу потужності у велоспорті

Показник	Фізіологічна основа	Метод визначення	Тип інформації	Практичне застосування	Наукові аспекти / обмеження
<b>FTP</b>	Відображає межу стійкого аеробного навантаження (близько MLSS – максимального стійкого рівня лактату)	20-хвилинний тест (95 % середньої потужності) або 60-хвилинна часова спроба	Абсолютний (Вт) і відносний (Вт/кг) показник витривалості	Визначення тренувальних зон, прогноз результатів	Розбіжності між польовими та лабораторними тестами, відсутність уніфікованого протоколу
<b>NP</b>	Враховує варіативність інтенсивності й фізіологічну «вартість» зусиль	Алгоритм Коггана: 30-секундне ковзне середнє з подальшою обробкою	«Фізіологічно еквівалентна» середня потужність	Оцінка навантажень у перегонах і тренуваннях зі змінною інтенсивністю	Залежить від точності алгоритму та калібрування приладів
<b>IF</b>	Відносна інтенсивність зусилля щодо індивідуального FTP	Формула: $IF = NP / FTP$	Безрозмірний коефіцієнт (0,5–>1,05)	Контроль інтенсивності тренувань і гонок	Обмежене використання для міжатлетичних порівнянь
<b>TSS</b>	Інтегральний показник «стресу», що поєднує інтенсивність і тривалість	Формула: $(NP \times IF \times t) / (FTP \times 3600) \times 100$	Навантаження у балах	Планування відновлення, баланс навантаження/відпочинку	Не враховує індивідуальних відмінностей у відновленні

Джерело: сформовано на основі [2; 4; 5]

Подані в таблиці показники відображають різні аспекти фізіологічних реакцій організму на навантаження, але в сукупності вони формують цілісну систему аналізу тренувального процесу у велоспорті. FTP розглядається як інтегральний індикатор витривалості, що корелює з максимально стійким рівнем лактату та використовується

для визначення тренувальних зон. NP дає змогу врахувати варіативність інтенсивності роботи і точніше відображає реальний фізіологічний стрес, аніж проста середня потужність. IF, будучи похідним від FTP та NP, характеризує відносну інтенсивність зусиль і забезпечує стандартизацію навантажень для різних спортсменів. TSS інтегрує в собі показники інтенсивності й тривалості, що робить його універсальним інструментом для планування відновлення та довгострокового моніторингу. Таким чином, системне використання цих метрик створює підґрунтя для прогнозування спортивних результатів і оптимізації тренувальних програм, тоді як їхні науково обґрунтовані обмеження відкривають перспективи подальших досліджень.

Варто зазначити, що вивчення взаємозв'язку між показниками потужності та спортивними результатами у велоспорті демонструє їхню високу прогностичну цінність. Так, у дослідженні, проведеному серед аматорів триатлону Ironman 70.3, встановлено, що функціональна порогова потужність (FTP) виявилася найкращим предиктором часу подолання велоетапу ( $r^2 = 0,638$ ,  $p = 0,002$ ) [6, с. 722]. Подібні результати отримані й щодо паролімпійського велоспорту: серед елітних параспортсменів 20-секундна середня спринтерська потужність (POMean) була достовірно пов'язана зі швидкістю в часовій гонці, незалежно від типу велосипеда чи характеру обмежень ( $\beta = 0,015$ ;  $p < 0,01$  для велосипедистів,  $\beta = 0,030$ ;  $p < 0,01$  для хендбайкерів) [7, с. 1196]. Це свідчить про те, що навіть короткі тести здатні бути надійними маркерами витривалості й здатності підтримувати темп у змаганнях.

Додатково, сучасні підходи до нормалізації потужності з урахуванням маси тіла підкреслюють, що саме відносна потужність (Вт/кг) краще відображає результативність на складних часових трасах. У своєму дослідженні М. Horvath і Е. Р. Andersson показали, що мас-нормалізована потужність значно підвищує точність прогнозу швидкості на часових заїздах із різним рельєфом [8, с. 4]. Отже, для об'єктивної оцінки результативності доцільно враховувати не лише абсолютні значення FTP чи NP, а й їх співвіднесеність з антропометричними параметрами.

Таким чином, інтеграція таких показників, як FTP, пікова та відносна потужність, забезпечує обґрунтовану оцінку очікуваної результативності на стартах і слугує базисом для раціонального налаштування індивідуальних планів підготовки.

Сучасні наукові підходи у сфері спортивної підготовки передбачають побудову математичних моделей, які дають змогу прогнозувати результативність змагальної діяльності на основі кривої «потужність – тривалість». У дослідженні G. Vinetti та співавторів, проведеному на вибірці професійних велогонщиків під час Giro d'Italia, здійснено порівняльний аналіз двопараметричних (2-р) та трипараметричних (3-р) моделей критичної потужності [9, с. 868]. Результати роботи засвідчили, що обидва варіанти моделювання адекватно відображають динаміку функціональних можливостей спортсменів, проте саме трипараметрична модель продемонструвала вищу точність прогнозування максимальної середньої потужності на різних часових відрізках у реальних умовах багатоденних перегонів [9, с. 869]. Отримані дані дають підстави вважати багатопараметричні моделі більш перспективними для оцінювання та прогнозування результативності, оскільки вони враховують поєднання аеробних та анаеробних механізмів енергозабезпечення, що є принципово важливим у висококонкурентному велоспорті.

Разом із класичними підходами до моделювання кривої «потужність – тривалість» зростає інтерес до нових методів підвищення точності прогнозів спортивних результатів. У своєму дослідженні М. Horvath і Е. Р. Andersson запропонували оптимізовану модель нормалізації потужності з урахуванням маси тіла спортсмена та специфіки профілю траси [8, с. 4]. Автори довели, що використання показників відносної потужності (Вт/кг) значно покращує відповідність між розрахунковими та фактичними результатами на складних часових відрізках із різним рельєфом. Такий підхід не лише

враховує індивідуальні антропометричні характеристики, а й дає змогу адаптувати прогностичні моделі до реальних умов змагань, що підвищує їхню прикладну цінність для тренерів і спортсменів.

Застосування систем моніторингу потужності в підготовці велосипедистів набуває особливого значення залежно від специфіки дисципліни. У шосейному велоспорті дані ватметрів використовуються для індивідуального профілювання спортсменів і визначення їхньої функціональної підготовленості. Зокрема показники FTP і крива «потужність – тривалість» допомагають прогнозувати результативність у багатогодинних перегонах і коригувати стратегію навантажень на різних етапах дистанції [10, с. 11]. Особливе місце в цьому процесі займає стратегія пейсингу – оптимального розподілу інтенсивності зусиль на різних відрізках траси. Аналіз динаміки потужності дає змогу моделювати розподіл енергетичних ресурсів з урахуванням рельєфу, погодних умов і тривалості перегонів. Дослідження підтверджують, що використання індивідуальних даних FTP та NP у поєднанні з алгоритмами прогнозування надають можливість сформувати оптимальний профіль потужності: від більш економічного початку до поступового нарощування інтенсивності у фінальній частині дистанції [10, с. 14]. Такий підхід забезпечує ефективніше використання енергетичних резервів і підвищує ймовірність досягнення максимального спортивного результату. У ширшому контексті пейсинг у шосейних гонках виконує функцію стратегічного інструмента, що поєднує фізіологічні можливості спортсмена з тактичними завданнями команди, і саме системи моніторингу дають змогу зробити цей процес максимально індивідуалізованим.

У трекових дисциплінах головний акцент робиться на розвитку максимальної потужності та вибухових якостей, що зумовлює інший характер використання систем моніторингу. Дослідження продемонстрували ефективність застосування моделей прогнозування спринтерських результатів на основі короточасних показників пікової та середньої потужності, що допомагає точніше добирати засоби спеціальної підготовки для спортсменів-трековиків [11, с. 7].

Особливу роль системи моніторингу відіграють у підготовці до гонок на час із роздільним стартом, де вирішальним чинником є підтримання стабільного рівня інтенсивності протягом заданого проміжку часу. Згідно з сучасними дослідженнями, оптимізація темпу педалювання та рівня потужності в стартовій і фінальній фазах дистанції дає змогу значно підвищити ефективність проходження часових гонок, забезпечуючи баланс між максимальною продуктивністю та енергетичною економічністю [12, с. 5].

Таким чином, системи моніторингу потужності демонструють свою практичну цінність у різних дисциплінах велоспорту, адже допомагають як розробляти індивідуалізовані стратегії пейсингу в шосейних гонках, так і підбирати оптимальні режими підготовки для трекових дисциплін і гонок на час із роздільним стартом. Їхнє комплексне застосування забезпечує не лише контроль навантаження, а й формує науково обґрунтоване підґрунтя для підвищення результативності спортсменів.

З урахуванням різноманітності дисциплін велоспорту доцільно систематизувати ключові аспекти застосування систем моніторингу потужності в підготовці спортсменів. Це дає змогу наочно порівняти відмінності між шосейними гонками, трековими дисциплінами та гонками на час із роздільним стартом і виокремити ті показники, які мають вирішальне значення для кожного виду змагальної діяльності (табл. 2).

Таблиця 2

Використання систем моніторингу потужності в підготовці до різних дисциплін велоспорту

Дисципліна	Ключові показники	Головні акценти тренувального процесу	Практичне застосування	Наукові аспекти / обмеження
Шосейні гонки	FTP, NP, TSS	Витривалість, стратегія пейсингу, розподіл енергії	Формування індивідуальної стратегії пейсингу, контроль відновлення після етапів	Вплив зовнішніх чинників (рельєф, вітер, температура), потреба в динамічних моделях
Трекові дисципліни	Peak Power, NP, IF	Розвиток вибухової сили, спринтерські якості	Оптимізація інтервальних навантажень, прогноз спринтерських результатів	Короткочасність тестів, складність перенесення результатів у змагальні умови
Гонки на час із роздільним стартом	FTP, NP, IF	Стабільність темпу, енергетична економічність	Побудова оптимального профілю потужності на дистанції	Чутливість до похибок вимірювання, потреба в індивідуалізації стратегії

Джерело: сформовано на основі [10–12].

Таблиця відображає, що кожна дисципліна має специфічні акценти в застосуванні систем моніторингу потужності. Для шосейних гонок головним є стратегічний пейсинг і баланс навантажень між етапами; для трекових дисциплін – розвиток максимальної сили та швидкісних можливостей; для гонок на час із роздільним стартом – здатність підтримувати стабільний рівень потужності та економно витратити енергетичні ресурси. Таким чином, хоча ключові показники (FTP, NP, IF, TSS) залишаються універсальними, а їх практичне використання визначається специфікою виду змагальної діяльності.

Узагальнюючи зазначене, можна стверджувати, що сучасні методики моніторингу потужності у велоспорті створюють надійні передумови для оцінювання очікуваної змагальної результативності та конструювання індивідуальних стратегій підготовки. Водночас стрімкий розвиток цифрових технологій та аналітичних підходів відкриває новий вимір у роботі з тренувальними даними – використання алгоритмів машинного навчання, які здатні забезпечити більш глибоке моделювання адаптаційних процесів і формування персоналізованих програм підготовки.

Алгоритми машинного навчання дедалі активніше застосовуються в спортивній науці для аналізу тренувальних даних, що дає змогу виявляти приховані закономірності та персоналізувати підготовку велосипедистів. Аналіз закордонних досліджень надає можливість стверджувати, що ML-моделі (логістична регресія, k-ближчих сусідів, гаусові процеси) здатні з високою точністю (до 0,93) класифікувати спортсменів за рівнем адаптаційної відповіді, що дозволяє вчасно виявляти ознаки перевтоми чи ефективності тренування [13].

Практичним прикладом впровадження аналітики є платформа The Velodrome, розроблена у співпраці з професійною командою Israel Premier Tech. Вона поєднує об'єктивні показники (потужність, швидкість, набір висоти) із суб'єктивними даними

(сон, настрій, рівень втоми) та візуалізує їх для оцінки готовності та відновлення як окремих спортсменів, так і команди загалом [14].

Отже, поєднання ML-алгоритмів і цифрової аналітики відкриває нові можливості для індивідуалізації тренувальних програм та оптимізації командних стратегій у велоспорті. Узагальнення сучасних досліджень підтверджує, що інтеграція традиційних показників потужності з алгоритмами машинного навчання створює новий рівень практичного застосування цих технологій. Наступним кроком у цьому контексті є оптимізація тренувальних програм, що передбачає не лише контроль обсягу та інтенсивності навантажень, а й їхню адаптацію до індивідуальних особливостей спортсменів і специфіки окремих змагальних дисциплін. Одним із найбільш поширених і практично значущих підходів у цій сфері є застосування зон потужності (power-based training zones), що забезпечують кількісне визначення інтенсивності тренувань на основі функціональної порогової потужності (FTP).

Використання зон потужності (power-based training zones) у велоспорті ґрунтується на функціональній пороговій потужності (FTP) – максимальній інтенсивності, яку спортсмен здатен підтримувати близько години в стійкому фізіологічному стані. FTP слугує базою для індивідуалізації тренувальних зон і точного дозування навантажень. Дослідження підтверджують надійність цього показника: 20-хвилинні тести продемонстрували високу відтворюваність ( $ICC = 0,98$ ;  $r^2 = 0,96$ ), а більшість учасників змогли підтримувати розраховане значення протягом 60 хвилин без виходу за межі стійкого рівня лактату та  $VO_2$  [15, с. 1342]. Це підкреслює практичну цінність зон потужності як інструмента системного планування тренувального процесу.

Оптимізація тренувальних програм у велоспорті передбачає не лише визначення обсягу та інтенсивності навантажень, а й їхню структуровану періодизацію на різних рівнях – від мікроциклів (дні та тижні) до макроциклів (сезон чи рік). Дослідження норвезьких тренерів світового класу підтверджують, що ефективна модель поєднує високу частку низькоінтенсивної роботи (80–90 % часу) з 2–3 ключовими днями інтенсивних навантажень на тиждень. Важливим є системне чергування фаз навантаження та відновлення, корекція плану відповідно до календаря змагань і стану спортсмена, що забезпечує стабільний прогрес і знижує ризик перенавантаження [16, с. 15]. Такий підхід забезпечує довготривалу стабільність у розвитку функціональних можливостей і допомагає знизити ризик перенавантаження чи травматизму.

Проте планування тренувальних навантажень з урахуванням індивідуальних даних має не лише підвищувати ефективність підготовки, а й мінімізувати ризики перевантаження. Саме в цьому контексті системи моніторингу відіграють ключову роль, адже дають змогу визначити баланс між навантаженням і відновленням, що є критичним для досягнення довготривалої спортивної працездатності.

Сучасні дослідження засвідчують, що збільшення обсягу та інтенсивності тренувальних навантажень не завжди призводить до лінійного зростання результатів. У професійних велогонщиків спостерігається явище «плато-залежності», коли надмірне навантаження спричиняє зниження функціональної спроможності [17, с. 493]. Це підкреслює необхідність раціонального поєднання високої інтенсивності та періодів відпочинку з метою запобігання перевтомі та перетренованості.

Моніторинг потужності та аналіз індивідуальної реакції на навантаження є ключовими інструментами профілактики перевантаження. Вони забезпечують своєчасне виявлення ознак недостатнього відновлення, дають змогу оперативно коригувати мікро- й макроцикли та підтримувати стабільність спортивних результатів у довготривалій перспективі.

Інтеграція систем моніторингу потужності в діяльність професійних команд охоплює декілька напрямів підготовки. Зокрема дані ватметрів широко застосовуються для корекції мікроциклів, де поєднуються високо- та низькоінтенсивні навантаження

відповідно до стану спортсмена. У змагальному процесі ці системи дають змогу відстежувати розподіл потужності на різних етапах дистанції як на гірських відрізках, так і на рівнинних етапах багатоденних перегонів. Важливим аспектом є уніфікація показників із різних пристроїв, що забезпечує роботу команди з єдиною базою даних, узгодження індивідуальних планів із колективною стратегією, а також підвищує точність аналітики. Таким чином, моніторинг потужності виступає не лише засобом індивідуального контролю, а й інструментом командної координації та стратегічного планування [18, с. 5].

Аналіз наукових джерел і практичних підходів дав змогу сформуванню структурованої моделі використання систем моніторингу потужності у велоспорті. Вона поєднує ключові показники навантаження з методами їхньої аналітичної обробки та інтерпретації, а також окреслює можливості практичного застосування в тренувальному та змагальному процесах. Запропонована схема систематизує роботу з даними, підкреслює циклічність етапів контролю та створює підґрунтя для індивідуалізації підготовки спортсменів. Логіку і взаємозв'язки між компонентами моделі подано на рис. 1.

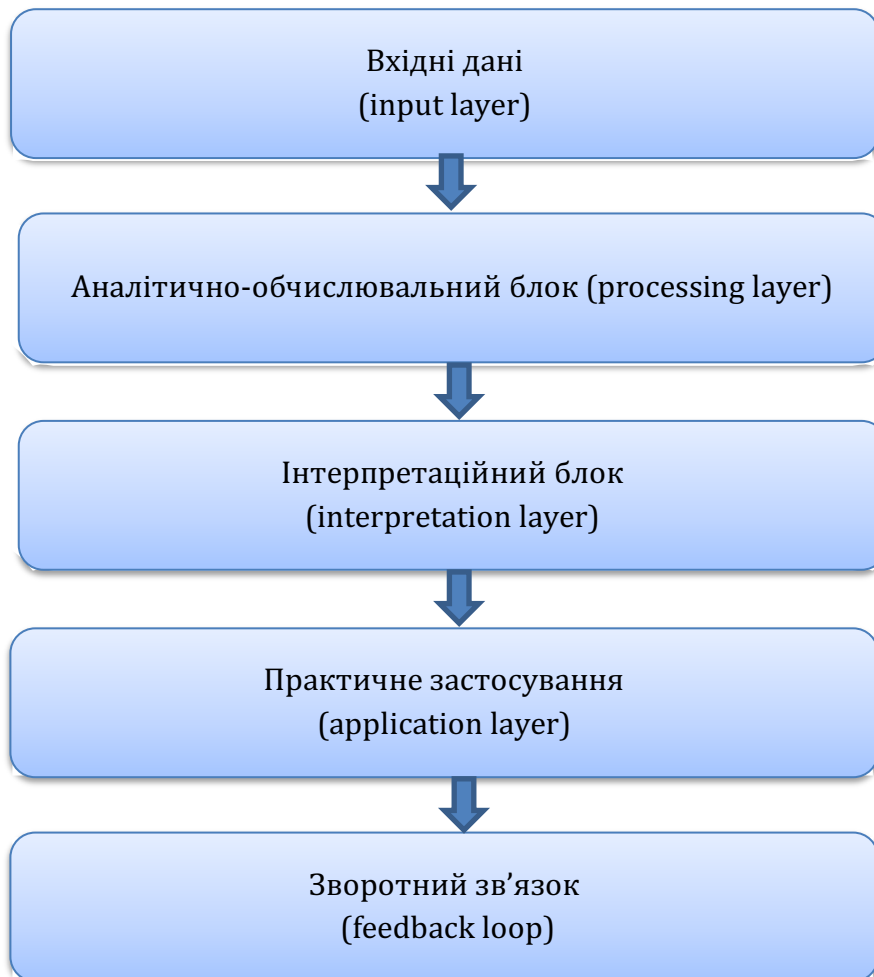


Рис. 1. Структурована модель використання систем моніторингу потужності у велоспорті.

Джерело: сформовано автором самостійно.

Запропонована схема становить наукову новизну дослідження та описується як «повний цикл». Її сутність полягає в трансформації ключових показників потужності (FTP, NP, IF, TSS) із площини числових даних у послідовність керованих дій – від збору та

оцінки інформації до інтерпретації, дозування навантажень і корекції плану через зворотний зв'язок.

На відміну від підходів типу power-duration/CP, які зосереджуються переважно на залежності «потужність – тривалість», запропонована модель інтегрує метрики в дисциплінарно-специфічні рішення. У шосейних перегонах головна увага приділяється FTP та відносній потужності (Вт/кг), у трекових дисциплінах акцент робиться на коротких пікових інтервалах, тоді як у гонках на час із роздільним стартом ключовими стають стабільність NP/IF і стратегія пейсингу з урахуванням профілю траси.

Модель передбачає п'ять взаємопов'язаних блоків.

Перший рівень – збір вихідних даних спортсмена: показники з ватметрів (потужність, каденс), датчиків швидкості та частоти серцевих скорочень, а також інформація з GPS-навігаторів. Водночас враховуються біомеханічні характеристики педалювання і навіть суб'єктивні параметри, зокрема рівень втоми, якість сну чи загальне самопочуття. Це формує комплексний масив інформації для подальшого аналізу.

Другий рівень – аналітично-обчислювальний блок. На цьому етапі дані проходять очищення від похибок, нормалізацію та перевірку коректності. Далі виконуються розрахунки ключових показників – FTP, NP, IF, TSS. Для глибшої інтерпретації результатів можуть застосовуватися спеціалізовані алгоритми, які здатні виявляти повторювані закономірності в тренувальних навантаженнях і прогнозувати реакції організму на різні стимули.

Третій рівень – інтерпретаційний блок. Показники, отримані після попередньої обробки, набувають практично значущої форми: визначаються індивідуальні тренувальні зони, аналізується баланс між навантаженням і процесами відновлення, оцінюється рівень готовності спортсмена, а також прогнозується ризик фізичного перенавантаження.

Четвертий рівень – практичне застосування. На основі результатів інтерпретації формуються тренувальні завдання різного масштабу – від розробки мікроциклів до складання макроциклів, зорієнтованих на конкретні змагання. Для кожної дисципліни визначаються власні акценти: у шосейних гонках ключовим є підтримання оптимальної відносної потужності, у трекових дисциплінах головний акцент робиться на розвитку пікових значень за короткі проміжки часу, тоді як у гонках на час із роздільним стартом вирішальним чинником є стабільність темпу. На цьому етапі також враховуються й тактичні аспекти, зокрема вибір стратегії пейсингу.

П'ятий рівень – механізм зворотного зв'язку. Після виконання тренувальних завдань отримані результати зіставляються з прогнозованими показниками, що дає змогу оперативного коригувати плани, підвищувати точність моделей і забезпечувати поступове зростання спортивної форми. Такий підхід створює підґрунтя для формування сучасного типу професійного велоспортсмена, підготовка якого базується на науково обґрунтованих стратегіях та індивідуалізованому контролі навантажень.

## Висновки

За результатами проведеного дослідження розроблено структуровану схему інтеграції показників потужності в систему підготовки велосипедистів. Схема передбачає поетапне поєднання етапів за рівнями: збір даних – обробка – інтерпретація – практичне застосування – зворотний зв'язок.

Запропоновано повноциклову модель, що трансформує ключові power-показники (FTP, NP, IF, TSS) із площини цифрових значень у послідовність керованих тренерських рішень – від збору та перевірки якості даних до їх інтерпретації, дозування навантаження і своєчасного коригування плану через зворотний зв'язок. На відміну від

підходів на кшталт power-duration чи critical power, що описують переважно математичний зв'язок «потужність – тривалість», запропонована модель безпосередньо пов'язує метрики з конкретними діями в тренувальному і змагальному процесах, роблячи індивідуалізацію підготовки прозорішою та відтворюваною.

У дослідженні систематизовано ключові підходи до використання показників потужності, визначено їх прикладне значення для різних видів велоспорту та побудовано модель, що описує логіку переходу від числових даних до практичних тренувальних завдань і корекції планів. У комплексі це полегшує персоналізацію підготовки та своєчасне балансування навантаження і відновлення.

Обмеження дослідження полягає у відсутності аналізу первинних змагальних або лабораторних даних: висновки сформовано на основі опублікованих джерел і практичних описів, тому узагальнення не претендують на оцінку ефектів у конкретних вибірках і потребують подальшої емпіричної перевірки в прикладних умовах.

Перспективи подальших досліджень полягають у порівнянні точності прогнозування між інтегрованою схемою та power-duration/CP у різних дисциплінах, у проведенні експертної оцінки етапів моделі, а також у розробленні дисциплінарних інструкцій, що напряду пов'язують метрики з тренерськими рішеннями на рівні мікро- та макроциклів.

### Список використаних джерел

1. Bouillod A., Soto-Romero G., Grappe F., Bertucci W., Brunet E., Cassirame J. Caveats and recommendations to assess the validity and reliability of cycling power meters: A systematic scoping review. *Sensors*. 2022. Vol. 22. Article 386. P. 1–32. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22010386>
2. Leo P., Spragg J., Shanahan B., Lawley J. S., Mujika I. Power profiling and the power-duration relationship in cycling: a narrative review. *European Journal of Applied Physiology*. 2022. Vol. 122. P. 301–316. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04833-y>
3. Коновал Ю. М., Бобровник В. І. Інтеграція інноваційних технологій у тренування велосипедистів: вплив на результативність та стратегію розвитку. *Академічні візії*. 2024. Вип. 31. С. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11103669>
4. Salas-Montoro J. A., Pérez-Díaz J. J. Noise or Progress: A Call for Understanding Cycling Training Terminology. *Journal of Science and Cycling*. 2023. Vol. 12. No. 3. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.28985/1223.jsc.06>
5. Sørensen A., Aune T. K., Rangul V., Dalen T. The validity of functional threshold power and maximal oxygen uptake for cycling performance in moderately trained cyclists. *Sports*. 2019. Vol. 7. No. 10. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.3390/sports7100217>
6. Vivan L., Souza V. R. A., Engelke P., Lira C. A. B., Vancini R. L., Weiss K., Knechtle B., Andrade M. S. Key factors influencing cycling performance and overall race time in the Ironman 70.3 for amateur athletes. *Sport Sciences for Health*. 2025. Vol. 21. P. 719–728. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11332-024-01306-5>
7. Nooijen C. F. J., Muchaxo R., Liljedahl J., Hoozemans M. J. M., Janssen T. W. J., Groot S. Relation between sprint power and road time trial performance in elite para-cyclists. *Journal of Science and Medicine in Sport*. 2021. Vol. 24. No. 11. P. 1193–1198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2021.04.014>
8. Horvath M., Andersson E. P. Optimal body mass normalization of power output for accurate prediction of estimated cycling performance over complex time-trial courses. *Front. Sports Act. Living*. 2025. P. 1–12. DOI: [10.3389/fspor.2025.1599319](https://doi.org/10.3389/fspor.2025.1599319)
9. Vinetti G., Pollastri L., Lanfranconi F., Bruseghini P., Taboni A., Ferretti G. Modeling the power-duration relationship in professional cyclists during the Giro d'Italia. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 2023. Vol. 37. No. 4. P. 866–871. DOI: <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004350>

10. Sitko S., Cirer-Sastre R., Corbi F., López-Laval I. Power assessment in road cycling: a narrative review. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. No. 12. P. 5216. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12125216>
11. Dunst A. K., Grüneberger R. A novel approach of modelling and predicting track cycling sprint performance. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. No. 24. Article 12098. P. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.3390/app112412098>
12. Dunst A. K., Hesse C., Ueberschär O. The concept of optimal dynamic pedalling rate and its application to power output and fatigue in track cycling sprinters — a case study. *Sports*. 2023. Vol. 11. Article 19. P. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.3390/sports11010019>
13. Barsumyan A., Shyla R., Saukkonen A., Soost C., Graw J. A., Burchard R. Quantifying training response in cycling based on cardiovascular drift using machine learning. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 8. Article 1623384. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3389/frai.2024.1623384>
14. Rize D., Sinai P., Holohan L., Saldanha P., Moskovitch R. Visualization of professional cyclists analytics. *SN Computer Science*. 2025. Vol. 6. No. 2. Article 2373. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42979-025-03773-0>
15. McGrath E., Mahony N., Fleming N., Donne B. Is the FTP Test a Reliable, Reproducible and Functional Assessment Tool in Highly-Trained Athletes? *International Journal of Exercise Science*. 2019. Vol. 12. No. 4. P. 1334–1345. URL: [https://www.researchgate.net/publication/337185798\\_Is\\_the\\_FTP\\_Test\\_a\\_Reliable\\_Reproducible\\_and\\_Functional\\_Assessment\\_Tool\\_in\\_Highly-Trained\\_Athletes](https://www.researchgate.net/publication/337185798_Is_the_FTP_Test_a_Reliable_Reproducible_and_Functional_Assessment_Tool_in_Highly-Trained_Athletes) (дата звернення: 14.07.2025)
16. Sandbakk Ø., Tønnessen E., Sandbakk S. B., Losnegard T., Seiler S., Haugen T. Best-Practice Training Characteristics Within Olympic Endurance Sports as Described by Norwegian World-Class Coaches. *Sports Medicine – Open*. 2025. Vol. 11. Article 45. P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40798-025-00848-3>
17. Gallo G., Bosio A., Martin M., Morelli A., Azzolini M., Ghercilena L., Larrazabal J., Rampinini E. Relationships between training dose and record power outputs in professional road cyclists: insights and threats to validity. *Biology of Sport*. 2023. Vol. 40. No. 2. P. 485–495. DOI: <https://doi.org/10.5114/biolsport.2023.114284>
18. Iglesias-Pino J., Herrero-Molleda A., Fernández-Fernández J., García-López J. Interchangeability between the data obtained by two powermeters during road cycling competitions: a case study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19. Article 16446. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph192416446>