

ВИКОРИСТАННЯ ШВИДКІСНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ БІОМЕТРИЧНИХ ДАНИХ СПОРТСМЕНІВ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ, РИЗИКИ ЗБОЇВ І АТАК НА МЕРЕЖЕВЕ ОБЛАДНАННЯ

Ситніков Р.С., Церковна О.В.

Кафедра інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського,
кафедра фізичного виховання та спорту,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
Україна

E-mail: roman.sytnikov@nure.ua,
olena.tserkovna@nure.ua

Abstract

In modern sports, the integration of information and communication technologies plays a crucial role in optimizing athlete training. One of the most promising innovations is Big Data analytics, enabling in-depth analysis of biomechanical, physiological, psychological, and performance indicators. Real-time transmission of biometric data – such as heart rate, oxygen levels, motion parameters, and video analysis – requires ultra-reliable low-latency communication (URLLC) supported by 5G/6G networks. This study evaluates the maximum number of simultaneous biometric data streams per cell, considering QoS profiles and correction factors for network instability. The results demonstrate that only advanced 5G/6G networks with Massive MIMO and Beamforming technologies can ensure secure, uninterrupted data exchange essential for adaptive training and injury prevention. The paper highlights technical, organizational, and cybersecurity aspects of Big Data integration in sports, emphasizing the importance of redundant transmission, QoS monitoring, and dual connectivity for maintaining real-time performance.

У сучасному спортивному середовищі дедалі більшого значення набуває використання інформаційно-комунікаційних технологій для оптимізації процесу підготовки спортсменів. Однією з найперспективніших інновацій є аналітика великих обсягів даних (Big Data), яка забезпечує глибокий аналіз біомеханічних, фізіологічних, психологічних та ігрових показників. В умовах високої конкуренції, інтенсивного календаря змагань і зростаючих вимог до результативності, використання Big Data стає не лише конкурентною перевагою, а й необхідною умовою ефективної підготовки.

Застосування аналітичних платформ дозволяє тренерам приймати рішення на основі об'єктивних даних, коригувати навантаження в реальному часі, виявляти ознаки перевтоми чи перетренованості, прогнозувати ризики травм, а також формувати індивідуальні моделі тренувального процесу. У провідних країнах світу такі технології вже інтегровані в щоденну практику спортивних клубів, тоді як в Україні ця тенденція лише набирає обертів. Водночас ефективне впровадження Big Data потребує сучасної цифрової інфраструктури, кваліфікованих фахівців, міждисциплінарного підходу та методичного забезпечення.

Особливої актуальності набуває питання оперативної передачі біометричних даних у реальному часі, що вимагає використання високошвидкісних мереж зв'язку (зокрема 5G/6G) з гарантованими параметрами якості обслуговування Quality of Service (QoS). Біометричні потоки – такі як частота серцевих скорочень, варіабельність ритму, рівень кисню, параметри руху, відео аналіз техніки – мають високу частоту оновлення, чутливість до затримки та потребують стабільного каналу зв'язку. Без надійної телекомунікаційної інфраструктури втрачається ефективність адаптивного тренування, знижується точність аналітики, а ризики перевантаження або травм зростають [1-3].

Таким чином, цифрова трансформація спорту неможлива без впровадження швидкісних мереж, здатних забезпечити безперервний, захищений обмін даними з низькою затримкою між

спортсменами, тренерами, медичними фахівцями та аналітичними системами. Це зумовлює актуальність дослідження технічних, організаційних та безпекових аспектів інтеграції Big Data в систему підготовки спортсменів, зокрема в контексті використання URLLC-профілів QoS, захисту мережевого обладнання та забезпечення стабільності передачі даних у реальному часі.

Так передача біометричних потоків у реальному часі вимагає наднизької затримки (<5 мс), мінімального джитера (<1 мс), високої надійності ($PER < 10^{-5}$) та гарантованої пропускної здатності (1–5 Мбіт/с на користувача). Однак, впровадження таких систем супроводжується ризиками:

- збої в мережевому обладнанні (нестабільність мобільних базових станцій, особливо в умовах високої мобільності спортсменів, може призвести до втрати даних або порушення QoS);
- кіберзагрози (біометричні дані є конфіденційними, тому атаки на мережеву інфраструктуру (DoS, перехоплення, маніпуляція QoS Flow) можуть мати серйозні наслідки для безпеки спортсменів і цілісності тренувального процесу);
- недостатня надлишковість (відсутність резервних каналів може спричинити затримки, що унеможливають адаптацію навантажень у реальному часі).

Для ефективного впровадження Big Data та біомеханічного аналізу в систему підготовки спортсменів необхідно:

- забезпечити інфраструктуру швидкісного зв'язку з підтримкою URLLC-профілів QoS (Ultra-Reliable Low Latency Communication);
- запровадити механізми надлишковості та резервування;
- застосовувати засоби кіберзахисту для мережевого обладнання та IoT-пристроїв.

Без швидкісних мереж передача біометричних даних у реальному часі буде нестабільною, що знижує ефективність тренувального процесу, підвищує ризики травм і ускладнює впровадження інноваційних технологій. Особливостями профілів URLLC у 5G є дублювання пакетів по різних каналах для підвищення надійності (Redundant Transmission), постійне відстеження затримки, джитера, втрат (QoS Monitoring), адаптація затримки залежно від навантаження (Dynamic PDB Allocation) та одночасне підключення до двох базових станцій (Dual Connectivity). Найбільш доцільними профілями для біометричних потоків даних є типові URLLC-профілі QoS (5G QoS Identifier, 5QI), що наведені у табл. 1 [4].

Таблиця 1. Типові URLLC-профілі QoS (5QI)

5QI	Тип ресурсу	Затримка (PDB)	PER	Розмір пакету	Приклади
85	Delay Critical GBR	5 мс	10^{-5}	255 байт	Сенсори, V2X
86	Delay Critical GBR	5 мс	10^{-4}	1354 байт	Автоколони, уникнення зіткнень
83	Delay Critical GBR	10 мс	10^{-4}	1354 байт	Відео + телеметрія
82	Delay Critical GBR	10 мс	10^{-4}	255 байт	Дискретна автоматизація

У дослідженні здійснено оцінку максимальної кількості одночасних біометричних потоків, які може обслуговувати один стільник мобільної мережі з урахуванням параметрів якості обслуговування. Метою роботи є аналіз гіпотетичного сценарію застосування високошвидкісних мереж 5G/6G для передавання біометричних даних у режимі реального часу під час тренування футбольної команди, що складається з 30 спортсменів.

Перелік біометричних параметрів та джерела їх отримання наведено в табл. 2. Загальну структуру зв'язку для системи біометричного моніторингу футболіста з використанням 5G, яка охоплює всі рівні - від сенсора до хмари, наведено на рис. 1.

На фізичному рівні біометричні сенсори (табл.2) передають дані через Bluetooth Low Energy (BLE) на вшитий в майку Polar Team Pro Shirt мікроконтролер, що агрегує потоки, формує дані у форматі JSON і через також вшитий модем Quectel RM500Q передає ці дані через 5G NR (New Radio) до edge-серверу (компактного обчислювального пристрою, розташованого на стадіоні), де виконується попередня обробка даних, виявлення аномалій та синхронізація з відео. Далі цифровий потік завантажує дані у хмару Polar Flow для аналітики та зберігання даних, побудови моделей (AI/ML), інтеграції з медичними системами. Візуалізація та керування виконується на веб-панелях з графіками, тепловими картами та звітами або на мобільних додатках на планшетах (смартфонах) тренера, лікаря, аналітика).

Системи типу Polar Team Sports дозволяють тренерам оперативно бачити живу карту активності гравців, їхню ефективність, зони навантаження та технічні помилки, а медичному персоналу – отримувати попередження про ризики травматизму.

Таблиця 2. Перелік біометричних параметрів та джерел їх отримання

Біометричні параметри	Сенсор	Розташування	Формат даних / інтерфейс	Призначення
ЧСС, варіабельність	Polar H10	Нагрудні ремені	JSON/CSV/HR, RR-інтервали/Bluetooth/ANT+	Контроль навантаження, відновлення, стрес
Рух, прискорення	STATSports Apex	Верхня частина спини/жилет	CSV/JSON/API, GPS: 10 Гц	Вимірювання швидкості, дистанції, навантаження
Контакт із м'ячом	Adidas miCoach Speed_Cell	У взутті	CSV/BLE	Вимір сили удару, частоти торкань, баланс
Температура тіла	Polar Team Pro Shirt	Компресійна майка з вбудованими електродами	JSON/BLE, HR: 1 Гц, GPS: 10 Гц	Моніторинг теплового стресу
Дихання, SpO ₂	Wellue O2Ring	Кільце на палець	JSON/Bluetooth	Оцінка дихальної ефективності
Біохімія (глюкоза, лактат)	Abbott FreeStyle Libre	На шкірі (плече/живіт)	NFC/BLE	Контроль енергетичного балансу
Концентрація, когнітивний стан	Emotiv Insight	EEG-пов'язка на голові	JSON, BLE, 128 Гц	Аналіз ментального стану перед матчем
Постава, баланс	Vicon Motion Capture	Камери на полі	XML/CSV, Ethernet/Wi-Fi	Технічний розбір рухів, стабільність



Рис. 1. Загальна структура зв'язку для системи біометричного моніторингу футболіста з використанням 5G

Узагальнена оцінка швидкості базується на технічних узагальненнях, що використовуються в галузевих моделях навантаження (табл. 3), і складає сумарно для одного спортсмена 1 - 5 Мбіт/с.

Таблиця 3. Орієнтовна середня швидкість передачі даних

Компонент	Середня швидкість
Сенсори пульсу, температури, тиску, GPS	0,5 - 1 Мбіт/с

Акселерометри, гіроскопи (часте оновлення)	0,2 - 0,8 Мбіт/с
Телеметрія з обладнання (наприклад, велотренажери)	0,3 - 0,5 Мбіт/с
HD-відео з камер (30 fps)	2 - 3 Мбіт/с
Службовий трафік (QoS, сигнали синхронізації)	~ 0,2 Мбіт/с

Середня швидкість передачі даних для систем біометричного моніторингу спортсменів у реальному часі залежить від типу сенсорів, частоти оновлення та наявності мультимедійних компонентів (наприклад, відео). Розрахунок пропускної здатності (Capacity) одного стільника 5G є складним процесом, що залежить від багатьох технічних параметрів та може мати різні рівні деталізації. Найбільш точний розрахунок зазвичай ґрунтується на стандартах 3GPP (наприклад, TS 38.306).

Орієнтовна максимальна теоретична швидкість передачі даних (Throughput/Data Rate) для одного агрегованого носія в 5G New Radio (NR) може бути оцінена за формулою, яка враховує ключові фізичні параметри [5]:

$$C \approx 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^J \left(v_{layers}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f^{(j)} \cdot R_{max} \cdot \frac{N_{PRB}^{BW(j),\mu} \cdot 12}{T_s^{\mu}} \cdot (1 - OH^{(j)}) \right), \quad (1)$$

де J - кількість агрегованих компонентних носіїв;

$v_{layers}^{(j)}$ - максимальна кількість шарів ($layers$) MIMO для j -го носія;

$Q_m^{(j)}$ - максимальний порядок модуляції (наприклад, 2 для QPSK, 4 для 16QAM, 6 для 64QAM, 8 для 256QAM);

$f^{(j)}$ - коефіцієнт масштабування (Scaling factor, може бути 1; 0,8; 0,75; 0,4);

R_{max} - максимальна швидкість кодування (Code rate), часто приймається $\approx 948/1024 \approx 0.92578125$ для кодування LDPC;

$N_{PRB}^{BW(j),\mu}$ - максимальна кількість Physical Resource Blocks (PRB) у смузі пропускання ($BW^{(j)}$) з чисельністю (μ);

12 - кількість підносіїв (Subcarriers) в одному PRB;

T_s^{μ} - середня тривалість OFDM символу в підкадрі для значення μ (визначається чисельністю μ);

$OH^{(j)}$ - накладні витрати (Overhead) для керуючих каналів (залежить від частотного діапазону FR1 (Frequency Range 1) або FR2 (Frequency Range 2), а також DL/UL (Downlink/Uplink).

Для швидкої оцінки пропускної здатності стільника 5G можна використовувати значно спрощену формулу, яка базується на теоремі Шеннона-Гартлі, що адаптована для стільникових систем:

$$C \approx B \cdot \log_2(1 + SNR) \cdot \eta_{SE}, \quad (2)$$

де C - пропускна здатність стільника (Cell Capacity) у біт/с;

B (Bandwidth) - загальна доступна смуга пропускання (у Гц) для даного стільника;

SNR (Signal-to-Noise Ratio) - середнє співвідношення сигнал/інтерференція+шум в зоні покриття стільника (в разях);

$\log_2(1 + SNR)$ - теоретична спектральна ефективність (Spectral Efficiency) у біт/с/Гц;

η_{SE} (System Efficiency Factor) - коефіцієнт системної ефективності, який враховує такі технології, як MIMO, накладні витрати на керуючі канали, втрати через планування та інші реальні обмеження.

У реальному плануванні мереж 5G часто використовують ще більш простішу модель, що базується на спектральній ефективності η , яка у 5G значно збільшується завдяки технологіям Massive MIMO та Beamforming (табл. 4):

$$C \approx B \cdot \eta. \quad (3)$$

Смуга пропускання (B) залежить від обраного спектру (наприклад, 100 МГц для FR1, 400 МГц для FR2 або 20 МГц для «старих» базових станцій 4G LTE, що працюють у мережі 5G).

Таблиця 4. Типова спектральна ефективність у 5G

Діапазон	Технології MIMO	Спектральна ефективність (біт/с/Гц)
FR1 (Sub-6 GHz)	4T4R / 8T8R MIMO	4-8
FR1 (Massive MIMO)	32T32R / 64T64R	8-20
FR2 (mmWave)	Massive MIMO / Beamforming	10-40

Щоб врахувати запас на нестабільність роботи базових станцій було використано коефіцієнт корекції (K), який залежить від рівня надійності мережі та можливих збоїв. Тому формула (3) може бути подана так:

$$C \approx B \cdot \eta \cdot K. \quad (4)$$

Значення K може залежати від таких факторів:

- енергетична автономність: якщо станція має резервне живлення (генератори, акумулятори), то K буде близько до 1.
- перевантаження мережі: у пікові години або при високому навантаженні K може знижуватися (0.8–0.9).
- зовнішні фактори: погодні умови, технічні несправності, атаки на інфраструктуру можуть зменшити K до 0.6–0.72.

За формулою (4) було розраховано пропускну здатність стільника (при $\eta_{LTE} = 5$ біт/с/Гц; $\eta_{FR1} = 10$ біт/с/Гц; $\eta_{FR2} = 20$ біт/с/Гц; $K = 0,6$) для різних технологій мережі (табл. 5).

Таблиця 5. Пропускна здатність стільника (при $K = 0,6$) для різних технологій мережі

Доступна ширина смуги каналу	Пропускна здатність стільника для потоків даних біометрії
LTE: 20 МГц	60 Мбіт/с
5G: 100 МГц у Sub-6GHz	600 Мбіт/с
5G: 400 МГц у mmWave	4800 Мбіт/с

Максимальна кількість потоків біометричних даних (користувачів) визначається за формулою:

$$N = C / R, \quad (5)$$

де N – максимальна кількість одночасних потоків біометричних даних (користувачів),

R – середня швидкість передачі даних для одного потоку (біт/с).

Максимальна кількість користувачів з врахуванням QoS визначається за формулою:

$$N_{QoS} = N \cdot (1 - P_L) \cdot (1 - J), \quad (6)$$

де: P_L – коефіцієнт втрат пакетів,

J – джитер нормалізований (варіація затримки).

Ця формула визначає показник якості обслуговування (N_{QoS}) в мережах передачі даних. Вона враховує кількість потоків (N), коефіцієнт втрат пакетів (P_L) та джитер (J), який представляє варіацію затримки. Чим менші значення P_L і J , тим вищий рівень якості обслуговування.

Для URLLC-потоків (наприклад, 5QI 85 з PDB = 5 мс) навіть джитер 1 мс дає параметр нормалізованого джитеру вже 0,2 (20%), що критично, тому у системах моніторингу спортсменів бажано, щоб $J < 0,1$, тобто, нормалізований джитер був <10% від PDB.

Як було наведено вище, типове значення середньої швидкості передачі біометричних даних R для одного користувача в мережі 5G складає до 5 Мбіт/с. Розрахунок максимальної кількості користувачів було виконано за формулами (5) та (6) з урахуванням коефіцієнта втрат пакетів $P_L = 0,001\% = 0,00001$, оптимального джитера ($J = 0,5 \text{ мс}/5 \text{ мс} = 0,1$), мінімального за нормою джитера ($J = 1 \text{ мс}/5 \text{ мс} = 0,2$) та максимального за нормою джитера ($J = 3 \text{ мс}/5 \text{ мс} = 0,6$). Результати розрахунків занесено до табл. 6.

Таблиця 6. Результати розрахунків максимальної кількості користувачів

	N	N_{QoS} (джитер <1 мс)	N_{QoS} (джитер 1 мс)	N_{QoS} (джитер 3 мс)
LTE	12	-	-	-
5G Sub-6GHz	120	108	96	48
5G mmWave	960	864	768	384

На підставі проведених розрахунків було отримано результати з оцінки ємності мережі та визначено максимальну кількість одночасних потоків біометричних даних на один стільник з урахуванням профілів QoS. Для забезпечення надлишковості введено коригувальний коефіцієнт ($K = 0,6$), який враховує нестабільність роботи базових станцій через погодні умови, технічні несправності та потенційні атаки на інфраструктуру.

З урахуванням цього коефіцієнта визначено максимальну кількість одночасних потоків біометричних даних для різних технологій мережі (LTE, 5G Sub-6GHz, 5G mmWave) (див. табл. 6). За результатами розрахунків встановлено, що лише з появою мобільних мереж п'ятого та шостого покоління (5G/6G), оснащених технологіями Massive MIMO та Beamforming, з'явилася реальна можливість впровадження цифрової трансформації у сфері спорту.

Такі мережі забезпечують необхідну пропускну здатність і низьку затримку для безперервного, захищеного обміну біометричними даними в режимі реального часу. Особливу увагу приділено профілям QoS типу URLLC, які критично важливі для сенсорних біометричних потоків, чутливих до джитера (<1 мс). У цьому контексті діапазон 5G mmWave демонструє надзвичайно низькі затримки (<1 мс), що повністю відповідає вимогам до стабільності та безпеки передачі даних за умови належного захисту мережевого обладнання.

Проведений аналіз на прикладі застосування високошвидкісних мереж для передавання біометричних даних у режимі реального часу під час тренування футбольної команди показав, що мережа mmWave забезпечує надлишкову пропускну здатність у поєднанні з мінімальними затримкою та джитером. Це відкриває можливість масштабного впровадження цифрових методик у системах моніторингу командних видів спорту, військово-спортивній підготовці та медичному моніторингу під час тренувань.

Література

1. Тищенко В.О., Верітов О.І., Клопов Р.В., Квасниця О.М. Інтеграція штучного інтелекту та інформаційних технологій в організацію діяльності спортивних клубів // Академічні Візії. 2025. № 44. С. 1–11.
2. Козак І., Жирнов О. Сучасні тренди біомеханічних технологій у спорті // Теорія і методика фізичного виховання і спорту. 2023. № 4. С. 20–26.
3. Ярмоленко М.А., Яковенко О.О., Строганов С.О., Лут І.А. Пінчук В. Застосування аналітики великих обсягів даних (Big Data) у тренувальному процесі спортсменів [Електронний ресурс] // Науковий часопис Українського державного університету імені Михайла Драгоманова. 2025. № 7(194). С. 222–227. Режим доступу: [https://doi.org/10.31392/udu-nc.series15.2025.07\(194\)](https://doi.org/10.31392/udu-nc.series15.2025.07(194)).
4. 5QI Table: 5G QoS Identifier Values and Meanings. RF Wireless World. [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://rfwireless-world.com/articles/5qi-table-5g-qos-identifier-values-meanings>.
5. 5G; NR; User Equipment (UE) radio access capabilities (3GPP TS 38.306 version 18.1.0 Release 18). ETSI, 2024. 355 р. [Електронний ресурс] // Режим доступу: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138306/18.01.00_60/ts_138306v180100p.pdf.
6. Климаш М.М., Пелішок В.О., Михайленіч П.М. Технології безпроводного зв'язку. Львів, 2007. 818 с.