

РОЗРОБКА БАЗИ ДАНИХ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ТА АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ І ЗАВАДОСТІЙКОГО КОДУВАННЯ У СИСТЕМАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

У роботі запропоновано модель бази даних для зберігання та аналізу параметрів синхронізації і завадостійкого кодування у системах мобільного зв'язку. Підхід забезпечує інтеграцію параметрів каналу, показників синхронізації, характеристик декодування та метрик якості в єдиній структурі даних. Логічна модель включає сутності: Експеримент, Сценарій, Обробка, Спостереження, Перехід_{RL}, Артефакти. Дані представляються у вигляді послідовностей «стан–дія–винагорода–наступний стан», що дозволяє формувати датасети для навчання з підкріпленням. Запропонована структура підтримує багаторівневу обробку даних і може бути використана для побудови адаптивних систем зв'язку. Модель забезпечує узгоджене зберігання подієвих та аналітичних даних із часовою прив'язкою. Це створює основу для підвищення ефективності аналізу та інтелектуального керування параметрами систем мобільного зв'язку. Запропонований підхід дозволяє проводити аналіз впливу порушень синхронізації на ефективність декодування. Отримані результати можуть бути використані при розробці інтелектуальних методів оптимізації параметрів систем зв'язку наступних поколінь.

Ключові слова: база даних, мобільний зв'язок, синхронізація, завадостійке кодування, LDPC-коди, параметри каналу, декодування, навчання з підкріпленням, аналіз даних, адаптивні системи зв'язку.

PYATIN Ilya

Khmelnytskyi Politechnic Professional College by Lviv Politechnic National University

DEVELOPMENT OF A DATABASE FOR STORAGE AND ANALYSIS OF SYNCHRONIZATION AND ERROR-CORRECTING CODING PARAMETERS IN MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS

This paper addresses the problem of designing a specialized database for storing, organizing, and analyzing synchronization parameters and error-correcting coding parameters in mobile communication systems. It is shown that existing data management approaches are typically focused either on physical layer signal processing, network analytics, or machine learning applications separately, and therefore do not provide an integrated representation of synchronization, channel conditions, decoding performance, and learning data within a unified framework. A multi-level database architecture is proposed, combining a relational model for structured data, object storage for large-scale signal and experiment data, and analytical processing mechanisms. The proposed approach enables simultaneous storage and analysis of synchronization parameters (time offset, frequency offset, phase error, jitter), channel parameters (SNR, Eb/No), coding parameters (code family, code rate, block length, decoding algorithm), and decoding performance metrics (BER, BLER, latency, number of iterations). The logical data model consists of the following entities: Experiment, Scenario, Run, Observation, Reinforcement Learning Transition, Artifact. The Experiment entity represents the overall context of the study. The Scenario defines a fixed configuration of channel and coding parameters. The Run corresponds to an individual execution of a scenario under specific computational conditions. The Artifact entity is used to manage metadata for large external objects such as signal recordings, datasets, and trained models. A key feature of the proposed approach is the integration of the database with reinforcement learning workflows. For this purpose, the Reinforcement Learning Transition entity is introduced, enabling representation of data as sequences of the form "state–action–reward–next state." The system state is defined based on channel quality indicators, synchronization parameters, and decoding metrics, while actions correspond to adaptive adjustments of decoding and transmission parameters. The reward function is formulated as a trade-off between decoding accuracy and processing latency. This formalization allows direct construction of datasets for offline reinforcement learning without additional preprocessing. The practical implementation of the proposed approach relies on open and scalable technologies, including relational database systems, object storage, and machine learning frameworks. The obtained results can be used for the analysis of decoding algorithms, investigation of synchronization impairments, and development of adaptive communication systems based on artificial intelligence techniques for 5G and 6G.

Keywords: database, mobile communication, synchronization, error-correcting coding, LDPC codes, channel parameters, decoding, reinforcement learning, data analysis, adaptive communication systems.

Стаття надійшла до редакції / Received 02.04.2026

Прийнята до друку / Accepted 29.04.2026

Опубліковано / Published 31.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© ПЯТИН Ілля

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

У системах мобільного зв'язку якість передавання даних визначається не одним окремим параметром, а сукупністю взаємопов'язаних характеристик. До них належать параметри часової та частотної синхронізації, опорні сигнали фізичного рівня, показники якості каналу, а також параметри завадостійкого

кодування і декодування. У специфікаціях 5G NR для фізичного рівня визначені опорні та синхросигнали, а для каналного кодування використано LDPC-коди для даних і полярні коди для керуваної інформації. Це означає, що параметри синхронізації та кодування потрібно аналізувати разом, у єдиному інформаційному просторі.

Разом із цим у відкритих джерелах значно більше уваги приділено або алгоритмам синхронізації та кодування, або мережевій аналітиці, або застосуванню штучного інтелекту в мережах 5G. Питання ж побудови спеціалізованої бази даних, яка б одночасно зберігала параметри синхронізації, параметри декодування, часові мітки, результати експериментів і підготовлені набори даних для подальшого навчання моделей, розкриті значно слабше. У 3GPP описані функції мережевої аналітики та зберігання аналітичних даних, а також керування моделями штучного інтелекту, але це не дає готової прикладної схеми саме для науково-дослідної бази даних під задачі синхронізації й завадостійкого кодування. Тому науково-практична задача полягає у розробці структури бази даних, яка забезпечить накопичення, впорядкування, пошук і аналіз параметрів синхронізації та завадостійкого кодування в системах мобільного зв'язку, а також дозволить формувати на її основі якісні набори даних для інтелектуальних методів адаптації, зокрема для навчання з підкріпленням.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Першу групу джерел становлять стандарти 3GPP та ETSI, які задають нормативну основу дослідження. У [1] описані фізичні канали, модуляція та сигнали, пов'язані із синхронізацією і вимірюваннями. У [2] визначено правила мультиплексування і каналного кодування, зокрема використання LDPC-кодів і полярних кодів у 5G NR. Ці документи задають набір параметрів, який доцільно фіксувати в базі даних: тип сигналу, тип коду, кодову швидкість, службові параметри кадру, а також результати декодування.

Другу групу становлять наукові праці, присвячені завадостійкому кодуванню в 5G. У відомій оглядовій роботі про каналне кодування для 5G NR [3] показано, що LDPC-коди обрані для каналів даних через високу пропускну здатність, гнучкість за довжиною блока та кодовою швидкістю, а полярні коди – для керуваної інформації через хороші властивості на коротких блоках. База даних має підтримувати різні типи кодів, різні конфігурації блока та різні показники ефективності декодування.

Третю групу джерел формують праці та стандарти, пов'язані з мережевою аналітикою. У [4] описано функції мережевої аналітики, включно зі збиранням даних, історичним зберіганням та репозиторієм аналітичних даних. У [5] вже безпосередньо закладено сервіси керування моделями штучного інтелекту та машинного навчання у 5G. Сучасна мобільна мережа розглядає дані як основу для аналітики і навчання моделей, а отже розробка спеціалізованої бази даних для параметрів синхронізації й кодування є логічним продовженням цього підходу на прикладному та дослідницькому рівні.

Четверта група джерел стосується організації самих наборів даних для навчання з підкріпленням. У роботі [6] запропоновано підхід, де дані подаються не як розрізнені записи, а як послідовності кроків: спостереження, дія, винагорода, наступний стан.

П'ята група джерел пов'язана з практичною організацією зберігання даних. Для великих експериментальних масивів сигналів у відкритій практиці використовують формат SigMF, який поєднує сигнальні дані та їх метадані. Для аналітичних таблиць широко застосовують стовпчикові формати на кшталт Parquet, а для великих версійованих наборів даних – таблицні формати Iceberg. Сучасний підхід до створення баз даних у мобільних мережах передбачає поєднання кількох рівнів: зберігання сирих сигналів, зберігання аналітичних таблиць і зберігання метаданих та описів експериментів [7-10].

Отже, аналіз літератури показує, що стандарти 3GPP добре описують, які саме параметри синхронізації, сигналів і кодування існують у 5G NR. Наукові праці достатньо глибоко розкривають властивості LDPC-, полярних- і турбо-кодів, а також питання їх реалізації. Окремий пласт джерел уже розвиває мережеву аналітику, репозиторії даних і керування моделями штучного інтелекту. Ще одна група праць доводить перспективність офлайнного навчання з підкріпленням для бездротових мереж. Водночас бракує прикладних робіт, де все це було б об'єднано в єдину спеціалізовану базу даних саме для параметрів синхронізації та завадостійкого кодування, що обґрунтовує актуальність проведеного дослідження.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є розробка структури бази даних для зберігання та аналізу параметрів синхронізації і завадостійкого кодування у системах мобільного зв'язку, яка забезпечує інтеграцію параметрів каналу, синхронізації, кодування та декодування з показниками якості передавання даних у єдиному середовищі з часовою прив'язкою та підтримує формування даних для навчання з підкріпленням.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати параметри синхронізації, каналу та завадостійкого кодування, що впливають на якість передавання даних.
2. Розробити логічну структуру бази даних із виділенням основних сутностей та зв'язків між ними.

3. Забезпечити зберігання та узгодження подієвих і аналітичних даних з часовою прив'язкою для оцінювання впливу параметрів системи на BER, BLER і затримку.

4. Розробити підхід до формування датасетів для навчання з підкріпленням для задач адаптивного керування параметрами систем зв'язку.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для задачі зберігання та аналізу параметрів синхронізації і завадостійкого кодування у системах мобільного зв'язку запропоновано багаторівневу архітектуру бази даних, яка поєднує реляційну модель для структурованих даних і об'єктне сховище для великих масивів сигналів та результатів обчислень.

Основу системи становить логічна модель, що включає шість взаємопов'язаних сутностей: експеримент, сценарій, обробка, спостереження, переходи навчання з підкріпленням та артефакти.

Розглянемо логічну модель бази даних. Ми виділяємо наступні сутності:

1. Експеримент – описує загальний контекст дослідження: середовище виконання, тип платформи, часові мітки та програмний стек. Забезпечує відтворюваність експериментів.

2. Сценарій – визначає фіксований набір параметрів каналу та кодування: SNR, Eb/No; модель каналу; тип модуляції; сімейство коду; довжина блока та кодова швидкість; алгоритм декодування та його параметри.

Сценарій є незмінною конфігурацією, що використовується у багатьох запусках.

3. Обробка – відповідає окремому запуску експерименту для заданого сценарію. Містить: тип обчислювального пристрою; параметри виконання; середню затримку та пропускну здатність; узагальнені характеристики продуктивності.

4. Спостереження – кожен запис відповідає окремому кадру або слоту та містить: параметри синхронізації (часовий зсув, фазова похибка, джиттер); показники декодування (кількість ітерацій, перевірка парності); метрики якості (BER, BLER); затримку декодування.

Ця таблиця забезпечує зв'язування параметрів каналу, синхронізації та результатів декодування в одному часовому контексті.

5. Перехід_{RL} - використовується для формування дата сетів для навчання з підкріпленням. Кожен запис відповідає переходу:

$$S_t \rightarrow A_t \rightarrow R_t \rightarrow S_{t+1}$$

де:

- стан: $S_t = \{SNR, BER, latency, iterations, phase_error\}$

- дія: $A_t = \{code_rate, modulation, max_iter\}$

- винагорода: $R_t = -\alpha \cdot BER - \beta \cdot latency$

Це дозволяє формувати навчальні вибірки без додаткової обробки.

6. Артефакти – містить метадані про великі об'єкти: IQ-сигнали; моделі; датасети; журнали.

Фізично дані зберігаються у файловому або об'єктному сховищі, а в базі — лише посилання та опис. Виділяються три рівні:

1. сирі дані (артефакти);

2. подієві дані (спостереження);

3. аналітичні та навчальні дані (перехід_{RL}).

Практична реалізація передбачає використання:

- PostgreSQL для реляційних даних;

- MinIO для об'єктного сховища;

- ClickHouse для аналітики;

- PyTorch та MLflow для навчання моделей.

Джерелами даних є MATLAB/Simulink, FPGA-реалізації та SDR-платформи.

Запропонована модель бази даних дозволяє:

- інтегрувати параметри синхронізації та кодування;

- аналізувати залежності між станом каналу і ефективністю декодування;

- формувати датасети для навчання з підкріпленням;

- реалізувати адаптивне керування параметрами системи зв'язку.

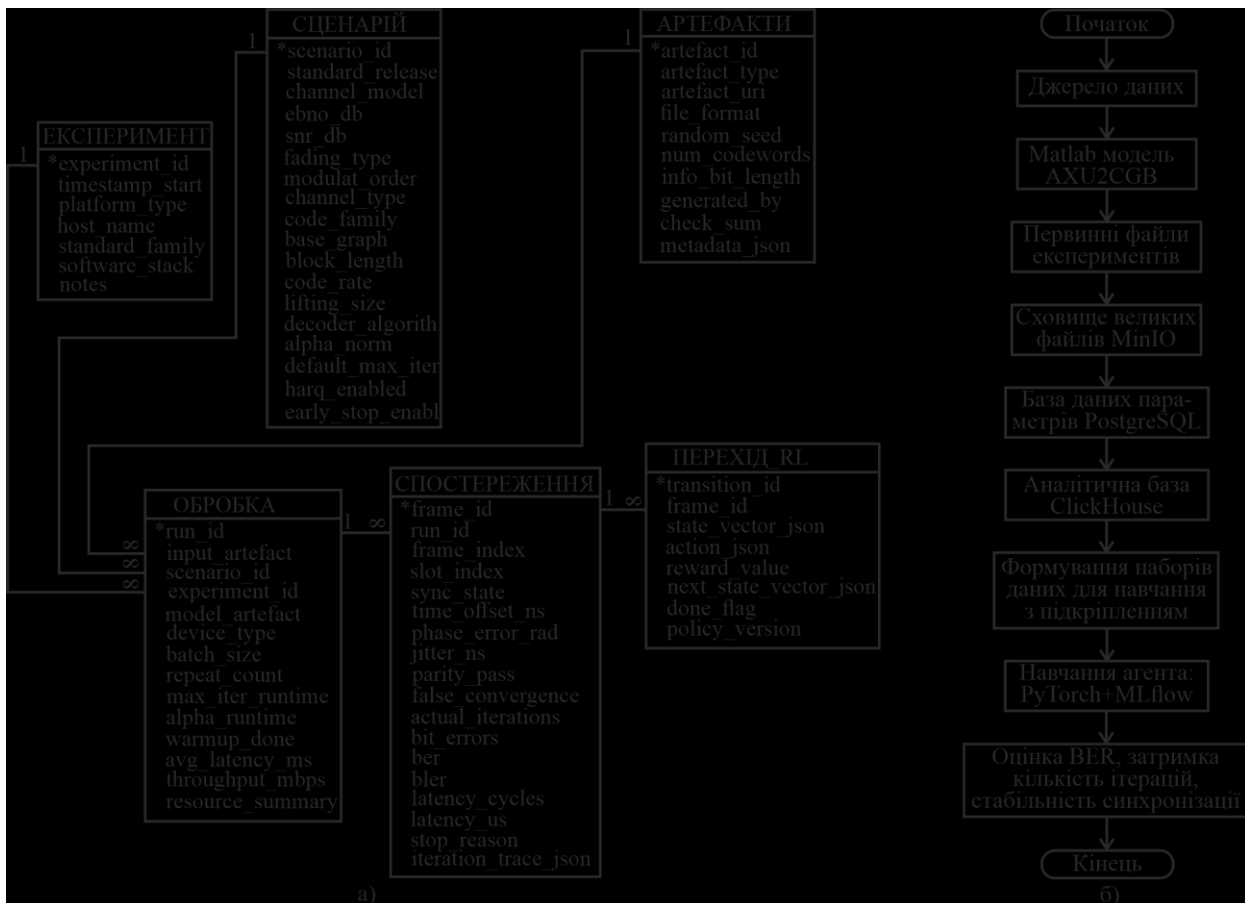


Рис. 1. Схема бази даних (а), структура системи (б)

PostgreSQL є відкритою реляційною системою керування базами даних, TimescaleDB розширює PostgreSQL для часових рядів, ClickHouse орієнтований на швидку аналітику великих таблиць, а MinIO дає S3-сумісне об'єктне сховище. Для реалізації бази даних доцільно використовувати відкриту та переносиму архітектуру, яка може бути розгорнута на сервері закладу освіти, у хмарній інфраструктурі або в гібридному середовищі з резервуванням у європейському центрі обробки даних. Структура системи приведена на рис. 1, б.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У роботі обґрунтовано необхідність створення спеціалізованої бази даних для зберігання та аналізу параметрів синхронізації і завадостійкого кодування у системах мобільного зв'язку. Показано, що для дослідження якості передавання даних недостатньо окремо аналізувати лише параметри каналу, синхронізації або декодування. Доцільним є їх об'єднання в єдиному інформаційному просторі з часовою прив'язкою.

Запропоновано логічну структуру бази даних, яка включає сутності Експеримент, Сценарій, Обробка, Спостереження, Перехід RL та Артефакти. Така структура дозволяє зберігати не лише результати моделювання або вимірювання, а й контекст їх отримання: параметри каналу, тип коду, кодову швидкість, алгоритм декодування, кількість ітерацій, затримку, BER, BLER та параметри синхронізації.

Особливістю запропонованого підходу є можливість формування наборів даних для навчання з підкріпленням безпосередньо з накопичених спостережень. Для цього дані подаються у вигляді послідовності “стан – дія – винагорода – наступний стан”, що створює основу для подальшого застосування інтелектуальних алгоритмів адаптації параметрів кодування, модуляції та декодування.

Практична реалізація такої системи може базуватися на відкритих технологіях: PostgreSQL для структурованих даних, MinIO для зберігання великих файлів, ClickHouse для аналітики великих вибірок, а також PyTorch і MLflow для навчання та контролю моделей. Це робить запропонований підхід придатним для лабораторних досліджень і перспективних досліджень мереж 5G/6G.

Перспективи подальших досліджень полягають у практичній реалізації запропонованої бази даних, наповненні її результатами моделювання LDPC-декодера, додаванні експериментальних даних, а також у побудові та перевірці алгоритмів навчання з підкріпленням для адаптивного керування кількістю ітерацій декодування, кодовою швидкістю та параметрами компенсації синхронізації.

Подальший розвиток роботи доцільно спрямувати на порівняння традиційних режимів декодування з режимами, керованими інтелектуальним агентом, за показниками BER, BLER, затримки, кількості ітерацій та обчислювальної складності. Це дозволить оцінити ефективність запропонованої інформаційної моделі не лише як сховища даних, а і як основи для адаптивного керування системами мобільного зв'язку.

Література

1. 3GPP TS 38.211. 5G; NR; Physical channels and modulation (3GPP TS 38.211 version 18.8.0 Release 18) [Електронний ресурс]. Sophia Antipolis : ETSI, 2026. Режим доступу: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/18.08.00_60/ts_138211v180800p.pdf. Дата звернення: 23.04.2026.
2. 3GPP TS 38.212. 5G; NR; Multiplexing and channel coding (3GPP TS 38.212 version 18.5.0 Release 18) [Електронний ресурс]. Sophia Antipolis : ETSI, 2025. Режим доступу: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138212/18.05.00_60/ts_138212v180500p.pdf. Дата звернення: 23.04.2026.
3. Bae J. H., Abotabl A., Lin H.-P., Song K.-B., Lee J. An overview of channel coding for 5G NR cellular communications. APSIPA Transactions on Signal and Information Processing. 2019. Vol. 8. Article e17. DOI: 10.1017/ATSIP.2019.10. Режим доступу: <https://www.cambridge.org/core/journals/apsipa-transactions-on-signal-and-information-processing/article/an-overview-of-channel-coding-for-5g-nr-cellular-communications/CF52C26874AF5E00883E00B6E1F907C7>. Дата звернення: 23.04.2026.
4. 3GPP TS 23.288. 5G; Architecture enhancements for 5G System (5GS) to support network data analytics services [Електронний ресурс]. Sophia Antipolis : ETSI, 2024. Режим доступу: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123200_123299/123288/18.06.00_60/ts_123288v180600p.pdf. Дата звернення: 23.04.2026.
5. 3GPP TS 28.105. 5G; Management and orchestration; Artificial Intelligence / Machine Learning (AI/ML) management [Електронний ресурс]. Sophia Antipolis : ETSI, 2026. Режим доступу: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/128100_128199/128105/18.09.00_60/ts_128105v180900p.pdf. Дата звернення: 23.04.2026.
6. Ramos S., Girgin S., Hussenot L. et al. RLDS: an Ecosystem to Generate, Share and Use Datasets in Reinforcement Learning [Електронний ресурс]. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2111.02767. Режим доступу: <https://github.com/google-research/rlds>. Дата звернення: 23.04.2026.
7. Yang K., Shi C., Shen C., Yang J., Yeh S. P., Sydir J. J. Offline Reinforcement Learning for Wireless Network Optimization With Mixture Datasets. IEEE Transactions on Wireless Communications. 2024. Vol. 23, no. 10. P. 12703–12716. DOI: 10.1109/TWC.2024.3395624. Режим доступу: <https://pure.psu.edu/en/publications/offline-reinforcement-learning-for-wireless-network-optimization-2>. Дата звернення: 23.04.2026.
8. SigMF: The Signal Metadata Format [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://sigmf.org/>. Дата звернення: 23.04.2026.
9. Apache Parquet. Overview [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://parquet.apache.org/docs/overview/>. Дата звернення: 23.04.2026.
10. Apache Iceberg. Documentation [Електронний ресурс]. Режим доступу: офіційна документація Apache Iceberg. Дата звернення: 23.04.2026.
11. Еталонний провайдер хмарної інфраструктури VMware [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://denovo.ua/s3-object-storage>. Дата звернення: 24.04.2026.
12. Z. Zhang, Y. Huang, C. Zhang, Q. Zheng, L. Yang and X. You, "Digital Twin-Enhanced Deep Reinforcement Learning for Resource Management in Networks Slicing," in IEEE Transactions on Communications, vol. 72, no. 10, pp. 6209–6224, Oct. 2024, doi: 10.1109/TCOMM.2024.3395698.
13. S. Shao et al., "Survey of Turbo, LDPC, and Polar Decoder ASIC Implementations," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 3, pp. 2309–2333, thirdquarter 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2893851.
14. Lara Tarkh, Ali Chouman, Hanan Lutfiyya, Abdallah Shami. RL-Loop: Reinforcement Learning–Driven Real-Time 5G Slice Control for Connected and Autonomous Mobility Services URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2604.02461>

References

1. 3GPP TS 38.211. 5G; NR; Physical channels and modulation (3GPP TS 38.211 version 18.8.0 Release 18) [Elektronnyi resurs]. Sophia Antipolis : ETSI, 2026. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/18.08.00_60/ts_138211v180800p.pdf (accessed: 23.04.2026).
2. 3GPP TS 38.212. 5G; NR; Multiplexing and channel coding (3GPP TS 38.212 version 18.5.0 Release 18) [Elektronnyi resurs]. Sophia Antipolis : ETSI, 2025. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138212/18.05.00_60/ts_138212v180500p.pdf (accessed: 23.04.2026).
3. Bae J. H., Abotabl A., Lin H.-P., Song K.-B., Lee J. An overview of channel coding for 5G NR cellular communications. APSIPA Transactions on Signal and Information Processing. 2019. Vol. 8. Article e17. DOI: 10.1017/ATSIP.2019.10. Available at: <https://www.cambridge.org/core/journals/apsipa-transactions-on-signal-and-information-processing/article/an-overview-of-channel-coding-for-5g-nr-cellular-communications/CF52C26874AF5E00883E00B6E1F907C7> (accessed: 23.04.2026).
4. 3GPP TS 23.288. 5G; Architecture enhancements for 5G System (5GS) to support network data analytics services [Elektronnyi resurs]. Sophia Antipolis : ETSI, 2024. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123200_123299/123288/18.06.00_60/ts_123288v180600p.pdf (accessed: 23.04.2026).
5. 3GPP TS 28.105. 5G; Management and orchestration; Artificial Intelligence / Machine Learning (AI/ML) management [Elektronnyi resurs]. Sophia Antipolis : ETSI, 2026. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/128100_128199/128105/18.09.00_60/ts_128105v180900p.pdf (accessed: 23.04.2026).
6. Ramos S., Girgin S., Hussenot L. et al. RLDS: an Ecosystem to Generate, Share and Use Datasets in Reinforcement Learning [Elektronnyi resurs]. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2111.02767. Available at: <https://github.com/google-research/rlds> (accessed: 23.04.2026).

7. Yang K., Shi C., Shen C., Yang J., Yeh S. P., Sydir J. J. Offline Reinforcement Learning for Wireless Network Optimization With Mixture Datasets. IEEE Transactions on Wireless Communications. 2024. Vol. 23, no. 10. P. 12703–12716. DOI: 10.1109/TWC.2024.3395624. Available at: <https://pure.psu.edu/en/publications/offline-reinforcement-learning-for-wireless-network-optimization-2> (accessed: 23.04.2026).
8. SigMF: The Signal Metadata Format [Elektronnyi resurs]. Available at: <https://sigmf.org/>. (accessed: 23.04.2026).
9. Apache Parquet. Overview [Elektronnyi resurs]. Available at: <https://parquet.apache.org/docs/overview/> (accessed: 23.04.2026).
10. Apache Iceberg. Documentation [Elektronnyi resurs]. Available at: [ofitsiina dokumentatsiia Apache Iceberg](https://iceberg.apache.org/docs/) (accessed: 23.04.2026).
11. Etalonnyi provaider khmarnoi infrastruktury VMware [Elektronnyi resurs]. Available at: <https://denovo.ua/s3-object-storage> (accessed: 24.04.2026).
12. Z. Zhang, Y. Huang, C. Zhang, Q. Zheng, L. Yang and X. You, "Digital Twin-Enhanced Deep Reinforcement Learning for Resource Management in Networks Slicing," in IEEE Transactions on Communications, vol. 72, no. 10, pp. 6209-6224, Oct. 2024, doi: 10.1109/TCOMM.2024.3395698.
13. S. Shao et al., "Survey of Turbo, LDPC, and Polar Decoder ASIC Implementations," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 3, pp. 2309-2333, thirdquarter 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2893851
14. Lara Tarkh, Ali Chouman, Hanan Lutfiyya, Abdallah Shami. RL-Loop: Reinforcement Learning–Driven Real-Time 5G Slice Control for Connected and Autonomous Mobility Services URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2604.02461>