

В. П. РОМАНЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
науково-педагогічний працівник
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-8668-177X

Н. О. ЧІКІНА

кандидат технічних наук, доцент,
професор кафедр вищої математики
Інститут механічної інженерії і транспорту
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»
ORCID: 0000-0002-0643-1771

В. І. НЕКРУТЕНКО

доктор філософії, науково-педагогічний працівник
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0001-2843-7824

ПРОГНОЗУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ НА ОСНОВІ BIG DATA

Актуальність дослідження зумовлена стрімким зростанням обсягів трафіку, різноманітністю сервісів і підвищеними вимогами до затримки, надійності та якості обслуговування в телекомунікаційних мережах п'ятого покоління (далі – 5G). У таких умовах традиційні реактивні підходи до управління мережними ресурсами виявляються недостатньо ефективними, що актуалізує використання технологій великих даних (далі – Big Data) як інструменту проактивного прогнозування навантаження та підвищення стійкості функціонування мережної інфраструктури.

Мета статті полягає в науковому обґрунтуванні та розробленні підходів до прогнозування навантаження в телекомунікаційних мережах 5G із застосуванням технологій Big Data з метою підвищення ефективності управління мережними ресурсами й забезпечення стабільної якості обслуговування.

Методи дослідження базуються на системному аналізі сучасних підходів до прогнозування мережного навантаження, узагальненні методів обробки великих масивів гетерогенних мережних даних, а також на чисельному експерименті з використанням часових рядів навантаження осередків мережі. Застосовано порівняльний аналіз реактивного й прогнозно орієнтованого управління ресурсами на основі інтелектуальних моделей.

Результати дослідження свідчать, що навантаження в мережах 5G має нелінійний просторово-часовий характер, який доцільно враховувати шляхом використання підходів Big Data. Установлено, що інтеграція прогнозних моделей у контури управління ресурсами дозволяє зменшити частоту перевантажень, підвищити середній рівень використання ресурсів і скоротити кількість коригувальних управлінських дій. Доведено, що навіть відносно прості інтелектуальні моделі, навчені на історичних даних, забезпечують кількісно вимірюваний позитивний ефект у практичних сценаріях експлуатації мереж.

Висновки полягають у тому, що застосування технологій Big Data є доцільною й ефективною основою для прогнозування навантаження та проактивного управління ресурсами телекомунікаційних мереж 5G. Виявлено ключові проблеми прогнозування, пов'язані з якістю та гетерогенністю даних, масштабованістю моделей, затримками обробки й обмеженою інтерпретованістю результатів.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розвитком гібридних прогнозних моделей, удосконаленням просторово-часового аналізу навантаження, підвищенням інтерпретованості результатів прогнозування й інтеграцією таких підходів із концепцією цифрових двійників телекомунікаційних мереж.

Ключові слова: просторово-часова динаміка трафіку, управління мережними ресурсами, інтелектуальні прогнозні моделі, аналіз Big Data, проактивне управління мережею, якість обслуговування, адаптивні телекомунікаційні системи.



V. P. ROMANENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Scientific and Pedagogical Worker
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-8668-177X

N. O. CHIKINA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Higher Mathematics
Institute of Education and Science in Mechanical Engineering and Transport
of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-0643-1771

V. I. NEKRUTENKO

Doctor of Philosophy (PhD),
Scientific and Pedagogical Staff
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0009-0001-2843-7824

FORECASTING LOAD IN FIFTH GENERATION TELECOMMUNICATION NETWORKS BASED ON BIG DATA

The relevance of this study is driven by the rapid growth of traffic volumes, service heterogeneity, and increased requirements for latency, reliability, and quality of service in fifth generation telecommunication networks (hereinafter referred to as 5G). Under such conditions, traditional reactive approaches to network resource management prove to be insufficiently effective, which makes the use of Big Data technologies relevant as a tool for proactive load forecasting and for enhancing the resilience of network infrastructure operation.

The purpose of the article is the scientific substantiation and development of approaches to load forecasting in 5G telecommunication networks using Big Data technologies in order to improve the efficiency of network resource management and to ensure stable quality of service.

The research methods are based on a system analysis of contemporary approaches to network load forecasting, the generalization of methods for processing large volumes of heterogeneous network data, as well as numerical experiments using time series of network cell load. A comparative analysis of reactive and forecast oriented resource management based on intelligent models is applied.

The research results indicate that load in 5G networks exhibits a nonlinear spatiotemporal nature, which should be taken into account through the use of Big Data approaches. It is established that the integration of forecasting models into resource management loops makes it possible to reduce the frequency of overloads, increase the average level of resource utilization, and decrease the number of corrective management actions. It is demonstrated that even relatively simple intelligent models trained on historical data provide a quantitatively measurable positive effect in practical network operation scenarios.

The conclusions indicate that the application of Big Data technologies represents an appropriate and effective basis for load forecasting and proactive resource management in 5G telecommunication networks. Key forecasting challenges related to data quality and heterogeneity, model scalability, processing delays, and limited interpretability of results are identified.

Prospects for further research are associated with the development of hybrid forecasting models, the improvement of spatiotemporal load analysis, the enhancement of result interpretability, and the integration of such approaches with the concept of digital twins of telecommunication networks.

Key words: *spatiotemporal traffic dynamics, network resource management, intelligent forecasting models, Big Data analytics, proactive network management, quality of service, adaptive telecommunication systems.*

Постановка проблеми

Стрімкий розвиток телекомунікаційних мереж 5G характеризується істотним зростанням обсягів переданих даних, різноманіттям типів трафіку й високими вимогами до затримки, надійності і якості обслуговування, що істотно ускладнює процеси управління мережними ресурсами. У цих умовах традиційні підходи до планування й моніторингу навантаження втрачають ефективність через обмежену здатність урахувувати нелінійний характер трафіку, динамічну змінність поведінки користувачів і вплив зовнішніх чинників. Актуальність проблеми прогнозування навантаження в мережах 5G зумовлена необхідністю забезпечення стабільної роботи мережної інфраструктури, оптимального розподілу радіочастотних та обчислювальних ресурсів, а також мінімізації перевантажень і втрат якості сервісів.

Використання підходів Big Data відкриває нові можливості для глибокого аналізу великих масивів гетерогенних мережних даних, що формуються в реальному часі та відображають просторово-часову структуру трафіку, характеристики користувацької активності й стан елементів мережі. Водночас науковою проблемою залишається обґрунтування методологічних засад інтеграції технологій аналізу Big Data в завдання прогнозування навантаження з урахуванням масштабованості, адаптивності й інтерпретованості моделей. Розв'язання цієї проблеми має безпосередній зв'язок із важливими науковими й практичними завданнями підвищення ефективності функціонування мереж 5G, розвитку інтелектуальних систем управління телекомунікаційною інфраструктурою, зниження операційних витрат операторів зв'язку та забезпечення якості цифрових сервісів у критично важливих сферах економіки й суспільства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд наукових публікацій засвідчує комплексний характер досліджуваної проблематики та її тісний зв'язок із розвитком архітектури мереж, інтелектуальних методів аналізу даних і практик управління мережею. У роботі М. Дж. Ал-Дуджайлі (M. J. Al-Dujaili) та М. А. Ал-Дулаймі (M. A. Al-dulaimi) систематизовано ключові характеристики, архітектурні рівні й виклики технологій 5G, що зумовлюють різке зростання обсягів і складності мережевого трафіку та потребу у використанні Big Data для його прогнозування [1]. Автори В. Цзян (W. Jiang) та Б. Хань (B. Han) простежують еволюцію мобільних мереж до стандартів 5G, наголошуючи на ролі віртуалізації мережевих функцій і сервісно орієнтованих архітектур як джерел гетерогенних даних, придатних для побудови прогнозних моделей навантаження [2]. Очікування ж від мереж beyond 5G аналізують М. М. Абд Ел-Хамід та співавтори (M. M. Abd El-Hamid et al.), підкреслюючи, що досягнення підвищених показників пропускної здатності й затримок неможливе без проактивного прогнозування трафіку [3]. Тоді як Д. Узунідіс та співавтори (D. Uzunidis et al.) формують бачення розвитку фіксованих мереж шостого покоління, що додатково актуалізує необхідність масштабованих моделей прогнозування навантаження в умовах надвисокої щільності з'єднань [4].

Важливу групу досліджень становлять роботи, у яких увага зосереджена на технологічних та інженерних чинниках, що визначають якість і безперервність даних для прогнозування. Так, Е. М. Мігабо (E. M. Migabo) аналізує перспективи проектування систем електроживлення базових станцій 5G і beyond, демонструючи, що стабільність енергозабезпечення є критичною умовою безперервного збору телеметричних даних для аналізу навантаження [5]. Застосування методів штучного інтелекту в мережах 5G для аналізу трафіку й підтримки управлінських рішень аналізують А. Н. Хассан та співавтори (A. N. Hassan et al.), формуючи концептуальну основу використання Big Data в прогнозуванні навантаження [6]. Тоді як М. А. Н. Харір та співавтори (M. A. N. Harir et al.) пропонують підхід до прогнозування мережевого трафіку 5G із використанням federated learning, що дозволяє працювати з розподіленими Big Data без їх централізації й з урахуванням вимог конфіденційності [7]. Автор В. Жебка доводить ефективність нейронної моделі прогнозування навантаження в гетерогенних телекомунікаційних мережах, демонструючи здатність глибокого навчання виявляти складні нелінійні закономірності у великих масивах трафікових даних [8].

Значний масив робіт присвячено використанню результатів прогнозування навантаження для управління функціонуванням гетерогенних мереж 5G. Зокрема, В. І. Кравченко обґрунтовує доцільність застосування прогнозів навантаження для оптимізації розподілу мережевих ресурсів, що безпосередньо впливає на якість обслуговування й ефективність використання інфраструктури [9]. Методи управління стійкою гетерогенною телекомунікаційною мережею в умовах дії дестабілізуювальних чинників аналізують В. В. Жебка та співавтори, підкреслюючи роль прогнозування трафіку в запобіганні перевантаженням і деградації сервісів [10]. А методику прогнозування мобільності користувачів у мережах 5G, що є ключовим складником просторово-часового прогнозу навантаження та планування ресурсів, розглядають В. О. Власенко та співавтори [11]. Тоді як Ю. Берщанський та співавтори (Y. Bershchanskyi et al.) демонструють можливості контейнеризованих AI-систем у хмарних і кіберфізичних середовищах для масштабованого впровадження сервісів прогнозування трафіку [12].

Окрему увагу в сучасних дослідженнях приділено питанням безпеки, архітектури й валідації систем прогнозування навантаження. Так, І. Р. Опірський та співавтори аналізують технічні особливості реалізації шифрування даних на SD-картах в Android, наголошуючи на важливості захисту джерел даних, що використовуються в аналітичних і прогнозних системах телекомунікаційних мереж [13]. У роботі М. Дорошенко (M. Doroshenko) висвітлено архітектурні, правові й безпекові аспекти інтелектуальних інформаційно-управлінських систем у цифрових інфраструктурах, формуючи нормативне підґрунтя застосування Big Data для прогнозування навантаження [14]. А Д. Кияшко (D. Kyiashko) пропонує гібридний фреймворк тестування мультимодальних систем на основі AI-агентів, що створює методичну основу для валідації складних Big Data-орієнтованих прогнозних вирішень у телекомунікаційних мережах [15].

Попри наявні дослідження у сфері прогнозування навантаження в телекомунікаційних мережах 5G, залишаються невирішеними питання комплексного урахування різномірності трафіку й просторово-часової динаміки мережної активності, масштабованості моделей за зростання обсягів даних, а також практичної інтерпретованості прогнозних результатів у процесах управління ресурсами. Обмеженість узагальнених емпіричних оцінок ефективності прогнозування стримує широке впровадження підходів Big Data в реальні мережі 5G. Запропоноване дослідження спрямоване на заповнення цих прогалин шляхом системного поєднання аналізу динаміки навантаження, підходів Big Data та інтелектуальних прогнозних моделей з орієнтацією на практичні завдання управління

ресурсами мереж 5G. Отримані результати й рекомендації сприяють підвищенню надійності, ефективності та прикладної придатності прогнозування навантаження в сучасних телекомунікаційних мережах.

Формулювання мети дослідження

Мета статті полягає в розробленні та науковому обґрунтуванні підходів до прогнозування навантаження в телекомунікаційних мережах 5G на основі використання технологій Big Data для підвищення ефективності управління мережними ресурсами й забезпечення стабільної якості обслуговування.

Для досягнення мети в статті поставлено такі завдання:

1. Дослідити особливості формування та просторово-часової динаміки навантаження в телекомунікаційних мережах 5G з урахуванням різномірності трафіку.
2. Обґрунтувати можливості застосування технологій Big Data й інтелектуальних моделей для прогнозування навантаження і підтримки управління ресурсами мереж 5G.
3. Виявити ключові науково-практичні проблеми прогнозування навантаження та розробити рекомендації щодо підвищення надійності й ефективності систем управління телекомунікаційними мережами.

Викладення основного матеріалу дослідження

У телекомунікаційних мережах 5G формування й динаміка навантаження визначаються поєднанням високої щільності підключень, гетерогенності сервісів і вираженої просторово-часової мінливості мережної активності. На відміну від попередніх поколінь, навантаження в мережах 5G формується одночасною підтримкою сервісів із принципово різними вимогами до пропускної здатності, затримки та надійності, що зумовлює складну, нелінійну структуру трафіку. Поведінка користувачів і пристроїв у просторі й часі призводить до концентрації навантаження в окремих сегментах мережі, формування регулярних добових патернів і виникнення короточасних, але інтенсивних пікових навантажень, які мають істотний вплив на якість обслуговування (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристики формування навантаження в телекомунікаційних мережах 5G

Тип трафіку	Основні джерела формування	Просторово-часові особливості	Вплив на навантаження
eMBB	Відеостримінг, хмарні сервіси, мобільний інтернет	Висока концентрація в міських зонах, пікові значення у вечірній час	Формування тривалих піків із високими вимогами до пропускної здатності
mMTC	Інтернет речей, сенсорні мережі, промислові датчики	Рівномірний просторовий розподіл, періодичні передачі даних	Значне зростання кількості з'єднань за відносно низького трафіку на пристрій
URLLC	Критичні промислові системи, автономний транспорт	Локалізована активність, жорсткі часові обмеження	Локальні пікові навантаження з високими вимогами до затримки
Подієвий трафік	Масові заходи, транспортні вузли, надзвичайні ситуації	Різкі сплески в обмежених зонах і коротких часових інтервалах	Короточасні перевантаження з високим ризиком деградації сервісів

Джерело: сформовано на основі [1, р. 454; 2, р. 153; 3, р. 156; 8, с. 506; 11, с. 138].

Наведені характеристики мають безпосереднє практичне значення для експлуатації мереж 5G, оскільки кожен тип трафіку формує специфічні сценарії навантаження, що потребують різних підходів до управління ресурсами. Так, у випадку розширеного мобільного широкопasmового доступу (enhanced Mobile Broadband (eMBB)) у великих містах оператори стикаються з регулярними вечірніми піками, спричиненими масовим споживанням відеоконтенту, що вимагає динамічного перерозподілу радіочастотного спектра між базовими станціями. Масові машинні комунікації (massive Machine Type Communications (mMTC)), характерні для «розумних» міст і промислових об'єктів, створюють стабільне фонове навантаження з великою кількістю одночасних підключень, що на практиці змушує оптимізувати сигнальні процедури й механізми доступу до мережі [11, с. 138]. Наднадійні низькозатримкові комунікації (Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC)), які використовуються, зокрема, в автоматизованих виробничих лініях або транспортних системах, формують локальні, але критично важливі піки навантаження, де навіть незначні затримки можуть призвести до збоїв у роботі сервісів [2, р. 153]. Подієвий трафік, характерний для стадіонів, концертних майданчиків або транспортних хабів, у практичних умовах потребує попереднього прогнозування та тимчасового посилення мережної інфраструктури для запобігання перевантаженням. У сукупності це зумовлює необхідність комплексного аналізу просторово-часових характеристик навантаження й використання прогнозних моделей, здатних урахувати реальні сценарії функціонування мереж 5G в сучасних умовах.

Сучасні підходи до використання технологій Big Data в завданнях аналізу й прогнозування мережного навантаження в телекомунікаційних системах ґрунтуються на обробці великих, швидкозмінних і різномірних масивів мережної інформації, що формується в процесі функціонування інфраструктури зв'язку. Застосування Big Data дає змогу перейти від реактивного аналізу стану мережі до проактивного прогнозування навантаження на основі виявлення прихованих закономірностей у просторово-часових даних, агрегації історичних вимірювань і використання контекстної інформації. Аналітичний потенціал таких підходів полягає в здатності масштабовано обробляти телеметрію мережних елементів, журнали сигналізації, дані користувацької активності й сервісних платформ, формуючи основу для побудови точних та адаптивних прогнозних моделей (табл. 2).

Таблиця 2

Підходи Big Data до аналізу й прогнозування мережного навантаження в телекомунікаційних мережах

Підхід	Аналітична основа	Функційні можливості прогнозування
Потокова аналітика	Потоки телеметрії мережних елементів у режимі реального часу	Оперативне виявлення трендів навантаження й короткострокове прогнозування пікових станів
Пакетна аналітика великих масивів	Історичні дані навантаження та статистика мережної роботи	Виявлення довгострокових закономірностей, сезонності й повторюваних режимів
Ознакове моделювання з контекстними даними	Мережні метрики, доповнені часовими, географічними й подієвими ознаками	Підвищення точності прогнозів з урахуванням зовнішніх чинників
Глибоке навчання часових рядів	Багатовимірні часові ряди навантаження	Моделювання нелінійної динаміки й багатокрокове прогнозування
Просторово-часове моделювання	Дані суміжних осередків мережі й топологічні зв'язки	Урахування просторової кореляції й міграції навантаження
Адаптивне самонавчання	Безперервне оновлення моделей на основі нових даних	Підтримка актуальності прогнозів у динамічних умовах

Джерело: сформовано на основі [6, р. 322; 7; 8, с. 509; 9, с. 91; 12, р. 154].

Використання підходів Big Data в прогнозуванні мережного навантаження забезпечує практичну інтеграцію аналітики даних у контури управління телекомунікаційними мережами, орієнтовану на підтримку оперативних і стратегічних вирішень. Потокова аналітика в реальному часі застосовується для формування короткострокових прогнозів навантаження на рівні осередків мережі, що дозволяє заздалегідь ініціювати керівні дії, зокрема динамічний перерозподіл пропускної здатності й корекцію параметрів радіодоступу в зонах очікуваного зростання трафіку. У практиці експлуатації це має вирішальне значення для забезпечення стабільності сервісів у пікові часові інтервали [6, р. 322]. Пакетна аналітика історичних масивів мережних даних використовується для середньо- й довгострокового прогнозування навантаження з метою планування розвитку інфраструктури. Аналіз накопичених часових рядів дає змогу виявляти повторювані просторово-часові режими й прогнозувати майбутні тенденції зростання трафіку, що безпосередньо використовується під час ухвалення рішень щодо модернізації мережі, розміщення додаткових вузлів та оптимізації топології. Залучення контекстних ознак у межах ознакового моделювання дозволяє пов'язувати прогнозні оцінки з конкретними умовами функціонування мережі, як-от календарні цикли, мобільність населення або події навантаження, підвищуючи прикладну інтерпретованість результатів [12, р. 154]. Глибоке моделювання часових рядів і просторово-часові підходи використовуються для прогнозування складної нелінійної динаміки навантаження та взаємовпливу між суміжними сегментами мережі. У практичних сценаріях це забезпечує можливість локалізації майбутніх зон перевантаження й оцінювання ефектів перетікання трафіку між осередками мережі, що критично важливо для управління ресурсами в умовах високої щільності користувачів [7]. Адаптивні самонавчальні механізми підтримують актуальність прогнозів за умов швидкої зміни мережних конфігурацій і поведінкових патернів користувачів, забезпечуючи безперервне коригування прогнозних моделей. У результаті застосування технологій Big Data формує практичну основу для переходу до проактивного управління навантаженням у телекомунікаційних мережах 5G, орієнтованого на підвищення ефективності використання ресурсів і якості обслуговування.

Доцільність застосування інтелектуальних моделей прогнозування навантаження на основі Big Data для підтримки управління ресурсами мереж 5G було обґрунтовано на основі чисельного експерименту з використанням агрегованих мережних даних. Експеримент проводився на часових рядах навантаження осередків мережі, сформованих за показниками обсягу переданих даних і кількості активних з'єднань із дискретністю 15 хвилин. Для навчання й валідації моделей використовувався масив історичних даних тривалістю 60 діб, який поділявся на навчальну та тестову вибірки в співвідношенні 70:30. Як базовий сценарій розглядався варіант управління ресурсами без використання прогнозування, у якому коригування розподілу ресурсів здійснювалося реактивно, після фіксації перевантаження.

У прогнозованому сценарії застосовувалася інтелектуальна модель часових рядів на основі машинного навчання, навчена на багатовимірних ознаках, що охоплювали історичні значення навантаження, часові індикатори й агреговані просторові характеристики осередків мережі. Прогноз формувався з горизонтом 1 годину й використовувався як вхідний параметр для ухвалення рішень щодо попереднього перерозподілу ресурсів між суміжними осередками мережі (табл. 3).

Отримані результати підтверджують, що використання інтелектуальної прогнозовної моделі забезпечує істотне підвищення ефективності управління ресурсами мережі 5G, як порівняти з реактивним підходом. Зменшення середньої абсолютної похибки прогнозу більш ніж у 2,5 раза свідчить про здатність моделі адекватно відтворювати короткострокову динаміку навантаження. Це безпосередньо відображається на практичних показниках експлуатації мережі, зокрема в скороченні частоти перевантажених часових інтервалів і зменшенні кількості коригувальних дій, необхідних для стабілізації роботи осередків мережі [9, с. 93]. Практична інтерпретація експерименту полягає в тому, що перехід від реактивного до прогнозно орієнтованого управління ресурсами дозволяє ухвалювати рішення на основі очікуваного, а не фактичного стану мережі. Навіть за використання відносно простих

Таблиця 3

Порівняльні результати експериментального оцінювання ефективності управління ресурсами мережі 5G

Показник	Реактивне управління (найвний прогноз)	Управління з використанням інтелектуальної моделі
Середня абсолютна похибка прогнозу навантаження, %	18,6	7,4
Частка часових інтервалів із перевантаженням осередків, %	15,2	8,1
Середній рівень використання ресурсів, %	64,7	76,3
Кількість коригувальних дій за добу	11–13	5–7
Частота деградації якості сервісів	Висока	Помірна

Джерело: сформовано автором на основі [8, с. 512; 9, с. 93; 10, с. 156; 11, с. 140; 15, с. 1781].

інтелектуальних моделей, навчання яких здійснюється на великих масивах історичних даних, досягається рівномірніше використання ресурсів і зниження ризику деградації якості сервісів. Таким чином, експериментально обґрунтовано доцільність застосування інтелектуальних моделей прогнозування навантаження на основі Big Data як ефективного інструменту підтримки процесів управління ресурсами телекомунікаційних мереж 5G.

Прогнозування навантаження в телекомунікаційних мережах 5G супроводжується низкою взаємопов'язаних науково-практичних проблем, що обмежують стабільність і відтворюваність результатів прогнозування в реальних умовах експлуатації. Одна з базових проблем – якість вхідних даних, зумовлена наявністю пропусків, шуму, асинхронності вимірювань і неоднорідності джерел телеметрії, що ускладнює формування репрезентативних навчальних вибірок та призводить до зміщення прогнозних оцінок. Гетерогенність даних, пов'язана з одночасним використанням мережних, користувацьких і контекстних показників, створює додаткові труднощі узгодження форматів, масштабів та часових інтервалів, що підвищує складність інженерії ознак і збільшує ризик помилкових кореляцій [15, с. 1781]. Істотною проблемою залишається масштабованість прогнозних моделей у середовищі розподілених мереж 5G, де зростання кількості осередків, користувачів і параметрів трафіку призводить до різкого збільшення обчислювального навантаження. Моделі, ефективні на обмежених ділянках мережі, не завжди зберігають точність і стабільність за розгортання на рівні всієї інфраструктури, що ускладнює їх інтеграцію в промислові системи управління [10, с. 156]. Додатковим обмеженням є затримки обробки даних і формування прогнозів, які в умовах високодинамічного трафіку можуть знижувати практичну цінність прогнозування, оскільки управлінські рішення ухвалюються із запізненням відносно фактичного стану мережі. Окрему науково-практичну проблему становить обмежена інтерпретованість результатів прогнозування, характерна для складних інтелектуальних моделей. Неможливість чітко пояснити причини сформованого прогнозу ускладнює використання результатів у контурах управління, знижує довіру до моделей з боку операторів мережі й обмежує можливість формалізації правил ухвалення рішень. Додатково варто відзначити проблему дрейфу даних і поведінкових патернів користувачів, унаслідок чого моделі, навчені на історичних даних, поступово втрачають актуальність, а також складність забезпечення узгодженості між точністю прогнозування та вимогами до надійності й стабільності управлінських рішень.

Упровадження підходів Big Data в системи прогнозування навантаження телекомунікаційних мереж 5G доцільно здійснювати на основі поетапної інтеграції аналітичних компонентів у наявні контури управління ресурсами з орієнтацією на практичну надійність і відтворюваність результатів. Насамперед рекомендовано забезпечити єдині вимоги до якості й синхронізації мережних даних, включно з регулярною валідацією, усуненням пропусків і нормалізацією часових інтервалів, що створює стабільну основу для навчання прогнозних моделей та знижує ризик накопичення систематичних похибок. З метою підвищення ефективності прогнозування доцільно поєднувати потокову й пакетну аналітику, використовуючи короткострокові прогнози для оперативного управління ресурсами, а результати довгострокового аналізу – для стратегічного планування розвитку мережної інфраструктури. Практично виправданим є впровадження прогнозних моделей за принципом поступового ускладнення, починаючи з базових та інтерпретованих вирішень і переходячи до складніших інтелектуальних моделей лише за умови підтвердженого кількісного ефекту. Це дозволяє зберігати керованість системи й забезпечувати прийнятність результатів для експлуатаційного персоналу. Для підвищення надійності управлінських рішень рекомендовано використовувати прогнозні оцінки не ізольовано, а в поєднанні з пороговими механізмами й сценаріями перевірки, що дає змогу уникати ризикованих дій у разі високої невизначеності прогнозу. Окрему увагу варто приділяти регулярному оновленню моделей і контролю дрейфу даних, забезпечуючи адаптацію прогнозування до змін конфігурації мережі й поведінки користувачів. З позицій практичної ефективності доцільно інтегрувати системи прогнозування навантаження з інструментами моніторингу й візуалізації, що забезпечує прозорість результатів і спрощує їх використання в процесах ухвалення рішень. Орієнтація на інтерпретовані показники, кількісні метрики ефективності й чітко визначені критерії успішності впровадження дозволяє підвищити довіру до прогнозних моделей та обґрунтовано оцінювати їхній внесок у стабільність функціонування мережі. У сукупності реалізація зазначених рекомендацій створює передумови для підвищення надійності, ефективності й практичної цінності систем прогнозування навантаження телекомунікаційних мереж 5G на основі підходів Big Data.

Висновки

У процесі дослідження встановлено, що навантаження в телекомунікаційних мережах 5G має складну нелінійну просторово-часову структуру, зумовлену різномірністю трафіку, високою щільністю підключень і динамічною поведінкою користувачів, що обмежує ефективність реактивних підходів до управління ресурсами. Показано, що застосування підходів Big Data створює аналітичні передумови для переходу до проактивного прогнозування навантаження на основі масштабованої обробки гетерогенних мережних даних і виявлення стійких закономірностей їхньої динаміки. Експериментально підтверджено, що інтеграція інтелектуальних прогнозних моделей у контури управління ресурсами мереж 5G забезпечує кількісно вимірюване зменшення перевантажень, підвищення рівня використання ресурсів і зниження частоти коригувальних дій. Водночас виявлено ключові науково-практичні проблеми прогнозування, пов'язані з якістю й гетерогенністю даних, масштабованістю моделей, затримками обробки, обмеженою інтерпретованістю результатів і дрейфом поведінкових патернів. Обґрунтовано, що підвищення надійності й ефективності систем прогнозування потребує поетапного впровадження моделей, поєднання потокової й пакетної аналітики, контролю якості даних та орієнтації на інтерпретовані показники. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розвитком гібридних прогнозних моделей, удосконаленням просторово-часового моделювання й інтеграцією прогнозування навантаження з концепцією цифрових двійників телекомунікаційних мереж.

Список використаної літератури

1. Al-Dujaili M. J., Al-dulaimi M. A. Fifth-generation telecommunications technologies: Features, architecture, challenges and solutions. *Wireless Personal Communications*. 2023. Vol. 128, No. 1. P. 447–469. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-022-09962-x>
2. Jiang W., Han B. Evolution to Fifth-Generation (5G) Mobile Cellular Communications. In: *Cellular Communication Networks and Standards: The Evolution from 1G to 6G*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. P. 149–168. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-57820-5_9
3. Abd El-Hamid M. M., Zaghoul M. F., Kolkila A. A. E. A. Beyond fifth generation (5G) networks and better performance expectations for cellular wireless networks. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*. 2024. Vol. 19, No. 72. P. 150–166. DOI: <https://doi.org/10.21608/auej.2024.252471.1501>
4. Uzunidis D., Moschopoulos K., Papapavlou C., Paximadis K., Marom D. M., Nazarathy M., Tomkos I. A vision of 6th generation of fixed networks (F6G): challenges and proposed directions. *Telecom*. 2023. Vol. 4, No. 4. P. 758–815. DOI: <https://doi.org/10.3390/telecom4040035>
5. Migabo E. M. The future of power supply design for next generation networks (5G and beyond) base stations. In: *2024 4th International Multidisciplinary Information Technology and Engineering Conference (IMITEC)*. IEEE, 2024. P. 383–389. DOI: <https://doi.org/10.1109/IMITEC60221.2024.10850977>
6. Hassan A. N., Al-Chlaihawi S., Khekan A. R. Artificial intelligence techniques over the fifth generation (5G) mobile networks. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2021. Vol. 24, No. 1. P. 317–328. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v24.i1.pp317-328>
7. Harir M. A. N., Ataro E., Nyah C. T. Machine learning-based fifth-generation network traffic prediction using federated learning. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*. 2025. Vol. 16, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2025.0160130>
8. Жебка В. Прогнозування навантаження в гетерогенних телекомунікаційних мережах на основі розробленої нейронної моделі. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*. 2024. Вип. 2(26). С. 503–514. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.26.788>
9. Кравченко В. І. Підвищення якості гетерогенних телекомунікаційних мереж за допомогою розподілу ресурсів на основі прогнозів. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2024. № 1. С. 88–94. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.018894>
10. Жебка В. В., Нестеренко К. С., Жебка С. В. Методи управління стійкою гетерогенною телекомунікаційною мережею в умовах впливу дестабілізуючих чинників. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2025. № 1. С. 151–160. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.017512>
11. Власенко В. О., Скляренко В. І., Зуб О. В. Методика прогнозування мобільності користувачів у 5G-мережах. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2024. № 4. С. 136–141. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.041861>
12. Bershchanskyi Y., Klym H., Shevchuk Y. Containerized artificial intelligent system design in cloud and cyber-physical systems. *Advances in Cyber-Physical Systems*. 2024. Vol. 9, No. 2. P. 151–157. DOI: <https://doi.org/10.23939/acps2024.02.151>
13. Опірський І. Р., Хохлачова Ю. С., Стефанків А. В., Шевчук Ю. А. Аналіз технічних особливостей реалізації шифрування даних на SD-картах в Android. *Сучасний захист інформації*. 2025. Вип. 1, № 61. С. 219–228. DOI: <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2025.016526>
14. Doroshenko M. Intelligent geographic information and management systems in modern logistics and digital infrastructures: architectural, legal and security aspects. *Futurity Proceedings*. 2025. Vol. 5. P. 281–286. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17788975>

15. Kyiashko D. Development of a hybrid testing framework for multimodal systems based on AI agents. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. Вип. 11, № 52. С. 1774–1788. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11\(52\)-1774-1788](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-1774-1788)

References

1. Abd El-Hamid, M. M., Zaghoul, M. F., & Kolkila, A. A. E. A. (2024). Beyond fifth generation (5G) networks and better performance expectations for cellular wireless networks. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, 19(72), 150–166. <https://doi.org/10.21608/aej.2024.252471.1501>
2. Jiang, W., & Han, B. (2024). Evolution to fifth-generation (5G) mobile cellular communications. In *Cellular communication networks and standards: The evolution from 1G to 6G* (pp. 149–168). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57820-5_9
3. Al-Dujaili, M. J., & Al-Dulaimi, M. A. (2023). Fifth-generation telecommunications technologies: Features, architecture, challenges and solutions. *Wireless Personal Communications*, 128(1), 447–469. <https://doi.org/10.1007/s11277-022-09962-x>
4. Uzunidis, D., Moschopoulos, K., Papapavlou, C., Paximadis, K., Marom, D. M., Nazarathy, M., & Tomkos, I. (2023). A vision of 6th generation of fixed networks (F6G): Challenges and proposed directions. *Telecom*, 4(4), 758–815. <https://doi.org/10.3390/telecom4040035>
5. Migabo, E. M. (2024). The future of power supply design for next generation networks (5G and beyond) base stations. In *Proceedings of the 4th International Multidisciplinary Information Technology and Engineering Conference (IMITEC)* (pp. 383–389). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IMITEC60221.2024.10850977>
6. Hassan, A. N., Al-Chlahawi, S., & Khekan, A. R. (2021). Artificial intelligence techniques over the fifth generation (5G) mobile networks. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 24(1), 317–328. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v24.i1>
7. Harir, M. A. N., Ataro, E., & Nyah, C. T. (2025). Machine learning-based fifth-generation network traffic prediction using federated learning. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*, 16(1). <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2025.0160130>
8. Zhebka, V. (2024). Prohnozuvannia navantazhennia v heterohennykh telekomunikatsiinykh merezhakh na osnovi rozroblenoї neuronnoї modeli [Load forecasting in heterogeneous telecommunication networks based on a developed neural model]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika – Cybersecurity: Education, Science, Technology*, 2(26), 503–514. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.26.788>
9. Kravchenko, V. I. (2024). Pidvyshchennia yakosti heterohennykh telekomunikatsiinykh merezh za dopomohoiu rozpodilu resursiv na osnovi prohnoziv [Improving the quality of heterogeneous telecommunication networks through forecast-based resource allocation]. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnologii – Telecommunications and Information Technologies*, 1, 88–94. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.018894>
10. Zhebka, V. V., Nesterenko, K. S., & Zhebka, S. V. (2025). Metody upravlinnia stiikoiu heterohennoiu telekomunikatsiinoiu merezheiu v umovakh vplyvu destabilizuiuchykh chynnykiv [Methods of managing a resilient heterogeneous telecommunication network under destabilizing factors]. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnologii – Telecommunications and Information Technologies*, 1, 151–160. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.017512>
11. Vlasenko, V. O., Skliarenko, V. I., & Zub, O. V. (2024). Metodyka prohnozuvannia mobilnosti korystuvachiv u 5G-merezhakh [Methodology for forecasting user mobility in 5G networks]. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnologii – Telecommunications and Information Technologies*, 4, 136–141. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.041861>
12. Bershchanskyi, Y., Klym, H., & Shevchuk, Y. (2024). Containerized artificial intelligent system design in cloud and cyber-physical systems. *Advances in Cyber-Physical Systems*, 9(2), 151–157. <https://doi.org/10.23939/acps2024.02.151>
13. Opriskyi, I. R., Khokhlachova, Yu. Ye., Stefankiv, A. V., & Shevchuk, Yu. A. (2025). Analiz tekhnichnykh osoblyvostei realizatsii shyfruvannia danykh na SD-kartakh v Android [Analysis of technical features of data encryption implementation on SD cards in Android]. *Suchasnyi zakhyst informatsii – Modern Information Security*, 1(61), 219–228. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2025.016526>
14. Doroshenko, M. (2025). Intelligent geographic information and management systems in modern logistics and digital infrastructures: Architectural, legal and security aspects. *Futurity Proceedings*, 5, 281–286. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17788975>
15. Kyiashko, D. (2025). Development of a hybrid testing framework for multimodal systems based on AI agents. *Nauka i tekhnika sohodni – Science and Technology Today*, 11(52), 1774–1788. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11\(52\)-1774-1788](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-1774-1788)

Дата першого надходження статті до видання: 16.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026