

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-47-17>

УДК 004.72

Микитенко Сергій Сергійович, аспірант,

<https://orcid.org/0000-0001-8842-004X>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ МЕРЕЖ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

Микитенко С.С. Принципи формування архітектури мереж стільникового зв'язку п'ятого покоління. Проведено огляд принципів формування архітектури стандарту стільникового зв'язку п'ятого покоління (5G). Розкрито основні обмеження та принципи реалізації архітектури 5G. Визначено основні стеки протоколів 5G NR, які поділено на три основні рівні: фізичний; MAC, RLC, PDCP; RRC, які представлено схематично. Описано сутність мережі O-RAN, яка пропонує можливість повного (або часткового) виконання стека протоколів у віддаленому обчислювальному центрі, реалізованому на персональному комп'ютері, за рахунок чого реалізується концепція хмарної C-RAN (Cloud RAN). Проілюстровано поточну архітектуру 3GPP 5G з відокремленням недоліків наведеної архітектури. До основних напрямків, які потребують детального опрацювання віднесено, у першу чергу, розділ протоколів між радіоінтерфейсом і стеком протоколів N2/N3 вузлів RAN, що дозволить реалізувати стійкий доступ та постійний зв'язок у мережі, мінімізуючи зовнішні впливи, по-друге, модифікація панелі управління обладнання користувача, за рахунок керування потоком даних висхідної лінії, що дозволить панелі управління гнучко підключатися до різних мереж, таких як 5G, 4G CN, або безпосередньо до Інтернету. Наведено новітню архітектуру стандарту стільникового зв'язку п'ятого покоління (5G), яка зв'язується з 5G через уніфікований об'єкт взаємодії замість окремих функцій взаємодії. Запропоновано модифікацію панелі управління обладнання користувача, наголошено на мінімальних програмних змінах в архітектурі 3GPP 5G, які легко реалізувати, а найголовнішим у запропонованому підході є відсутність змін у протоколі між панеллю управління користувача та gNB та 5G, а також gNB та 5G. Підкреслено, що архітектура стандарту стільникового зв'язку п'ятого покоління RAN 5G володіє спрощеною інтеграцією з кількома RAT, ефективне керування потоками даних у RAN, гнучкість підключення до будь-якої CN або Інтернету безпосередньо через RAN на основі 4G/5G/Wi-Fi.

Ключові слова: архітектура, мережа, стільниковий зв'язок, 5G, модернізація, перепроектування, п'яте покоління.

Mykytenko S.S. Principles of the architecture of the fifth generation cellular networks. A review of the principles of formation of the architecture of the fifth generation cellular communication standard (5G) has been carried out. The main limitations and principles of 5G architecture implementation are revealed. The main 5G NR protocol stacks are defined, which are divided into three main layers: physical; MAC, RLC, PDCP; RRC, which are represented schematically. The essence of the O-RAN network is described, which offers the possibility of full (or partial) execution of the protocol stack in a remote computing center implemented on a personal computer, due to which the cloud concept of C-RAN (Cloud RAN) is implemented. The current 3GPP 5G architecture is illustrated, highlighting the shortcomings of the architecture shown. The main areas requiring detailed processing include, first of all, the section of protocols between the radio interface and the N2/N3 protocol stack of RAN nodes, which will allow to implement stable access and constant communication in the network, minimizing external influences, and secondly, modification of the user equipment control panel, by controlling the uplink data flow, which will allow the control panel to flexibly connect to various networks such as 5G, 4G CN, or directly to the Internet. The latest architecture of the fifth generation (5G) cellular standard is presented, which communicates with 5G through a unified interaction object instead of separate interaction functions. A modification of the user equipment control panel is proposed, minimal software changes in the 3GPP 5G architecture are noted, which are easy to implement, and the most important thing in the proposed approach is the absence of changes in the protocol between the user control panel and gNB and 5G, as well as gNB and 5G. It is emphasized that the architecture of the fifth generation cellular communication standard RAN 5G has simplified integration with multiple RATs, efficient data flow control in the RAN, the flexibility to connect to any CN or the Internet directly through the RAN based on 4G/5G/Wi-Fi.

Keywords: architecture, network, cellular communication, 5G, modernization, redesign, fifth generation.

Вступ та постановка проблеми.

В останні роки, на ринку сучасного зв'язку з'явився стандарт стільникового зв'язку п'ятого покоління (5G), який передбачає підтримку різних варіантів використання, тобто розширеного мобільного широкопasmового зв'язку, надзвичайно надійного зв'язку з малою затримкою та масового зв'язку машинного типу. Великомасштабні функціональні здібності призвели до багатьох нововведень і модернізованих принципів перепроектування стільникової мережі в рамках стандартизації 5G проекту 3-го покоління (3GPP), таких як архітектура на основі послуг, віртуалізовані мережеві функції, поділ планів керування та користувачів і розділення мережі. Головною передовою функцією стандарту стільникового зв'язку п'ятого покоління (5G) виступає можливість об'єднання технологій множинного доступу в базовій мережі 5G (5GC), що є важливим кроком до підвищення ефективності мережі. До технологій доступу, які покладені в основу інноваційного стандарту, варто віднести: доступ 3GPP (наприклад, NodeB наступного покоління (gNB) і розвинений NodeB (eNB)) і доступ без 3GPP (наприклад, Wi-Fi і доступ по дротовій мережі). Проте, враховуючі різносторонні доповнення, стандарт 5G має певні неточності у поточній архітектурі, які потребують детального опрацювання з метою виявлення критичних точок з'єднання.

Також проблемою є неможливість розгортання мережі за допомогою продукції від різних постачальників, яка є основою сучасної політики виробників телекомунікаційних пристроїв. Натомість оператори стільникового зв'язку змушені купувати обладнання та програмне забезпечення (ПЗ) у одного постачальника, щоб налаштувати та здійснювати якісне обслуговування споживачів у рамках послуг, що надаються компанії. Нову концепцію організації архітектури мережі запропонували розробники із альянсу Open-RAN (O-RAN). Основна концепція O-RAN полягає у відкритості радіоінтерфейсів та програмного вихідного коду, який є доступним та має функцію співпраці зі сторонніми програмами. Цей підхід дозволяє як комбінувати технологічну продукцію різних постачальників, а й розробляти власні рішення. Альянсом O-RAN запропоновано концепцію «білої скриньки», згідно з якою на ринок буде випущено відкрите мережеве обладнання з можливістю вільної модернізації. Згідно з прогнозами аналітиків, ця концепція дозволить скоротити CAPEX і OPEX і прискорити розгортання мереж 5G NR.

Аналіз досліджень і публікацій.

В останні роки з'являється все більше робіт, в яких описуються механізми та принципи застосування стандартів стільникового зв'язку на різних пристроях та у різних областях науки.

Було досліджено моделі та алгоритми функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку за наявності кількох конкуруючих операторів зв'язку та високої гетерогенності технологій радіодоступу, типів пристроїв та вимог до параметрів якості передавання даних [1].

Також, було проаналізовано питання інформаційної технології підвищення ефективності роботи базових станцій стільникового оператора [2]. Було встановлено, що одним із головних напрямків розвитку сучасних телекомунікацій є удосконалення існуючих і створення нових поколінь стільникових мереж зв'язку, зокрема, 5G.

Було здійснено огляд проблеми функціонування систем забезпечення якості у мережах п'ятого покоління. На підставі чого, було встановлено, що оскільки принципи управління QoE при переході від 4G до 5G будуть збережені, основні зусилля розробників 5G повинні бути зосереджені на віртуалізації втратити зв'язок із мережею, що відповідають за управління та контроль QoE в мережі [3].

Також, здійснено аналіз тенденцій становлення та розвитку технологій мобільного зв'язку п'ятого покоління у світі та його вплив на процеси цифровізації економіки, а також визначено високу перспективність цієї практики для імплементації в умовах України [4].

Додатково, було досліджено методи підвищення ефективності розподіленої обробки даних в комп'ютерних системах операторів стільникового зв'язку [5].

Проте, враховуючи описані наукові набуток, за темою, питання огляду принципів формування архітектури стандарту стільникового зв'язку п'ятого покоління (5G) залишається відкритим та потребує детального опрацювання [6-7].

Невирішені раніше частини проблеми, яким присвячується стаття.

До основних напрямків, які потребують детального опрацювання варто віднести, у першу чергу, розділ протоколів між радіо-інтерфейсом і стеком протоколів N2/N3 вузлів RAN, що дозволить реалізувати стійкий доступ та постійний зв'язок у мережі, мінімізуючи зовнішні впливи, по-друге, модифікація панелі управління обладнання користувача, за рахунок керування потоком даних висхідної лінії, що дозволить панелі управління гнучко підключатися до різних мереж, таких як 5GC, 4G CN, або безпосередньо до Інтернету.

Мета дослідження.

Провести огляд принципів формування архітектури стандарту стільникового зв'язку п'ятого покоління (5G).

Виклад основного матеріалу дослідження та обґрунтування отриманих результатів наукового дослідження.

Кожне наступне покоління бездротових технологій традиційно вводиться разом із новими діапазонами спектра, які надаються для розгортання цієї технології. Оскільки кількість користувачів, які використовують нову технологію, поступово збільшується, спектр може бути перенесений з більш старої до більш нової технології. Однак у випадку архітектури стандарту стільникового зв'язку п'ятого покоління (5G) додатковим обмеженням є те, що нові діапазони спектра, пропоновані для мереж 5G, знаходяться на більш високих частотах і, отже, не забезпечують такий рівень покриття, як діапазони спектра, на яких мережі стандарту LTE розгорнуті в даний час. Для усунення цього обмеження у стандарті 5G передбачена можливість спільного використання радіо-інтерфейсів NR та LTE.

Стек протоколів 5G NR включає 3 рівні:

Layer 1 (L1) – фізичний;

Layer 2 (L2) – MAC, RLC, PDCP;

Layer 3 (L3) – RRC.

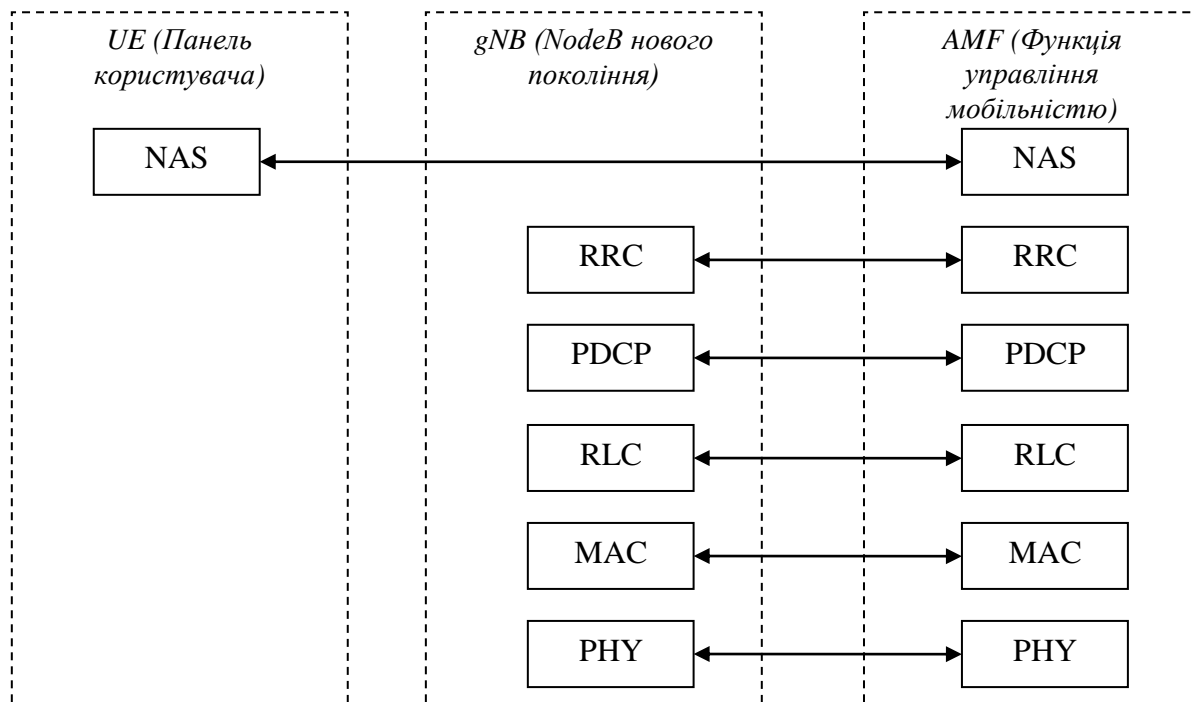


Рисунок 1 – Структура стеку протоколів 5G NR

У мережах 4G LTE цей стек виконувався у спеціалізованому обладнанні. Архітектура мережі O-RAN пропонує можливість повного (або часткового) виконання стеку протоколів у віддаленому обчислювальному центрі, реалізованому на персональному комп'ютері, за рахунок чого реалізується концепція хмарної C-RAN (Cloud RAN). Тому сьогодні існує гостра необхідність провести комплексні дослідження різних реалізацій O-RAN, у тому числі для оцінки та аналізу факторів, що впливають на обчислювальну складність процедур O-RAN [8].

Поточна архітектура 3GPP 5G проілюстрована на рис. 2.

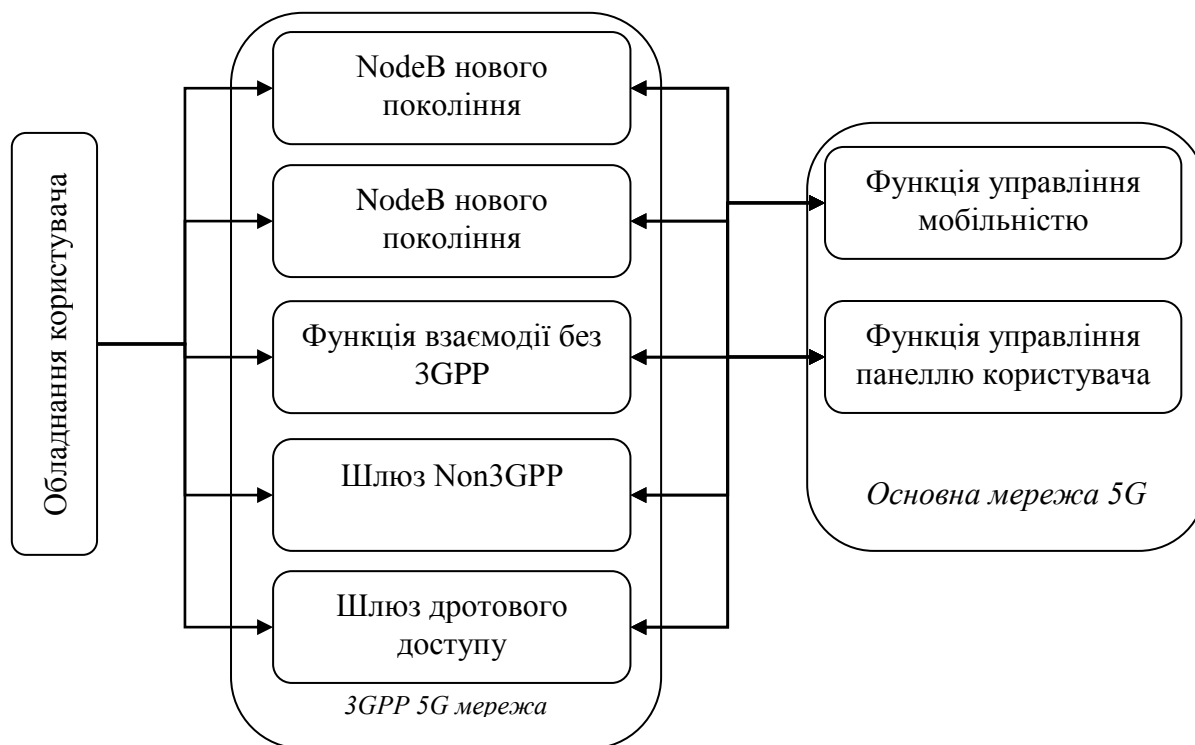


Рисунок 2 – Поточна архітектура 3GPP 5G

У рамках якого показано, як різні технології доступу взаємодіють із 5G за допомогою окремих взаємодіючих об'єктів. Ненадійний доступ до Wi-Fi використовує Non-3GPP Interworking Function (N3IWF), довірений доступ до Wi-Fi використовує довірений шлюз Trusted Non-3GPP Gateway Function (TNGF), а дротовий доступ використовує функцію Wireline Access Gateway Function (W-AGF) для взаємодії з 5G.

На рисунку 3 наведено новітню архітектуру стандарту стільникового зв'язку п'ятого покоління (5G). Наведена інноваційна архітектура зв'язується з 5G через уніфікований об'єкт взаємодії замість окремих функцій взаємодії. Крім того, під час огляду архітектури O-RAN основною метою є забезпечення гнучкого інтерфейсу між RAN і CN, щоб будь-яка RAN могла підключатися безпосередньо до будь-якої стільникової мережі CN або Інтернету. Програмно визначений контролер 5G-Flow діє як контролер RAN з кількома RAT, який керує уніфікованим об'єктом взаємодії та потоками даних через декілька RAT у RAN. Оскільки контролер має доступ до інформації на рівні RAN, такого як навантаження на трафік та стан радіоканалу, він може ефективно керувати потоками даних низхідної лінії зв'язку через RAT. Як показано на рис. 3, контролер також керує обладнанням користувача або панеллю, що дозволяє керувати потоком даних висхідної лінії зв'язку в RAN з кількома RAT. Для реалізації описаної архітектури RAN 5G застосовується концепція OpenFlow. Саме завдяки даній концепції 5G RAN представляється у вигляді мережі OF, що складається з контролера 5G-Flow (як контролера OF) і комутаторів OF, які створені на стороні мережі та пов'язаних панелей користувача [9].

Поточна архітектура 3GPP 5G RAN складається з різних вузлів мережі з кількома RAT, включаючи доступ 3GPP (наприклад, gNB, eNB) і доступ без 3GPP (наприклад, Wi-Fi, N3IWF). Щоб інтегрувати кілька RAT в стандарт стільникового зв'язку п'ятого покоління 5G-Flow RAN і забезпечити уніфікований взаємодіючий об'єкт, варто розділити протокол між радіоінтерфейсом і стеком протоколів N2/N3 вузлів RAN. Для вузлів доступу 3GPP, таких як gNB, розділення відбувається на самому вузлі gNB, тоді як для доступу без 3GPP це здійснюється за допомогою функції взаємодії, такої як N3IWF [7-9].

Панель управління обладнання користувача також варто модифікувати, так у випадку коли перемикач введений у стан OF на панелі управління, від'єднуються рівні протоколу NAS (який зв'язується з 5GC) і IP від базового стека радіопротоколів. Необхідно встановити загальний рівень IP замість специфічних для RAT рівнів IP. Залежно від технології можуть бути різні стеки радіоінтерфейсу, але рівні NAS та IP залишаються постійними. На радіопортах комутатора управління обладнання користувача відображаються радіостеки NR (RRC/SDAP і базовий стек протоколів) і Wi-Fi (MAC і фізичний рівень).

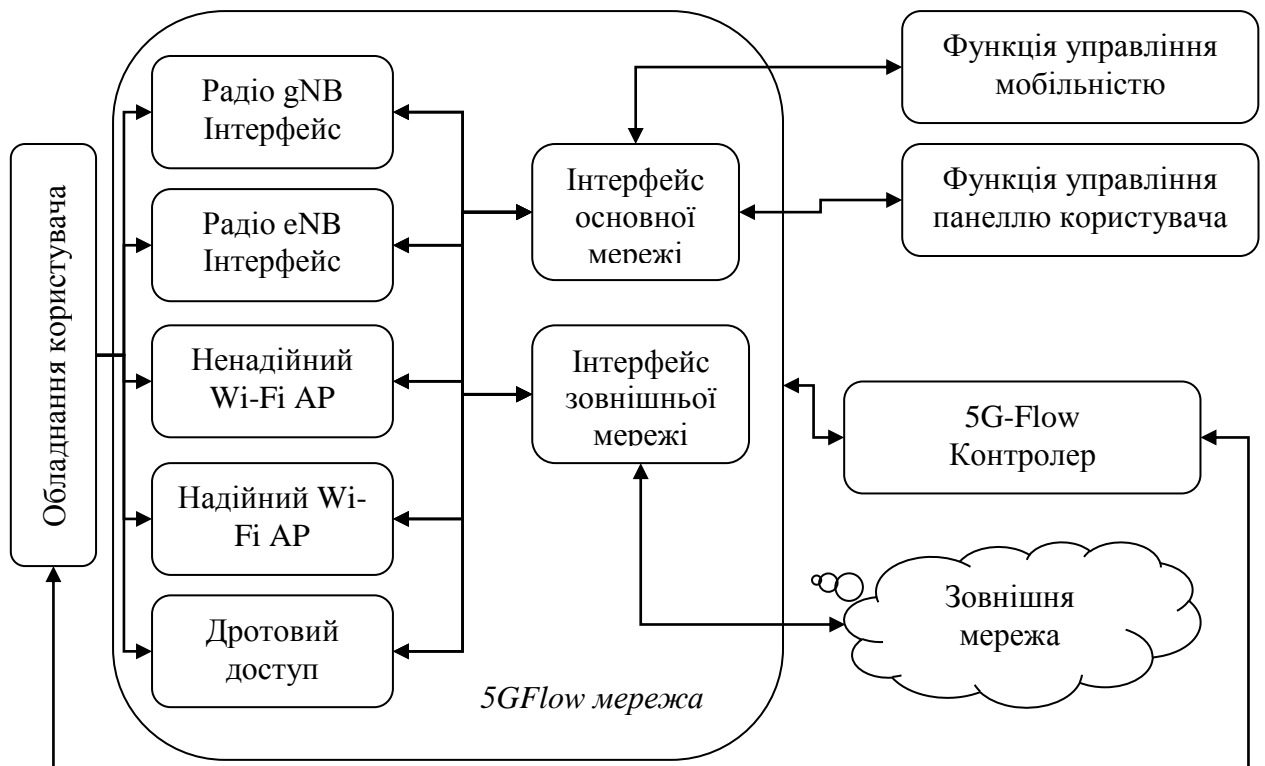


Рисунок 3 – Архітектура стандарту стільникового зв'язку п'ятого покоління RAN 5G

Перемикач управління обладнання користувача разом із контролером 5G-Flow керує радіозв'язком панелі управління та дозволяє керувати потоком даних висхідної лінії через декілька RAT. Більше того, коли панель управління підключено до 5G через декілька RAT, реєструється вона лише один раз. У поточній архітектурі 3GPP 5G панель управління обладнанням користувача, підключена до 5G через більше ніж одну RAT, має зареєструється в 5G окремо через кожну RAT. З відокремленням рівня NAS від стека радіопротоколів (на додаток до радіо і протоколів N2/N3, розділених на стороні мережі), зв'язок панелі управління з RAN повністю відокремлено від його зв'язку з 5G. Ця функція дозволяє панелі управління гнучко підключатися до різних мереж, таких як 5GC, 4G CN, або безпосередньо до Інтернету.

Висновки та перспективи подальших досліджень.

В умовах сьогодення, усі великі оператори стільникового зв'язку по всьому світу реалізують швидке розгортання стандарту стільникового зв'язку п'ятого покоління 5G. Невід'ємною частиною нової архітектури стільникових мереж є транспортна мережа, яка забезпечує зв'язок між базовими станціями, периферійними центрами обробки даних, хмарними програмами та сервісами. Архітектура 3GPP 5G підтримує інтеграцію з кількома RAT на 5GC, у поточній архітектурі 5G є кілька недоліків, які детально розглянуті та запропонована їх модифікація за рахунок реорганізації. Запропоновані мінімальні програмні зміни в архітектурі 3GPP 5G, легко реалізувати, а найголовнішим є відсутність змін у протоколі між панеллю управління користувача та gNB та 5GC, а також gNB та 5GC. Архітектура стандарту стільникового зв'язку п'ятого покоління RAN 5G володіє спрощеною інтеграцією з кількома RAT, ефективне керування потоками даних у RAN, гнучкість підключення до будь-якої CN або Інтернету безпосередньо через RAN на основі 4G/5G/Wi-Fi

Список бібліографічного опису

1. Брич М.В. Моделі та алгоритми функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі» (172 Телекомунікації та радіотехніка). Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2018. 160 с.
2. Полігенько О.О. Інформаційна технологія підвищення ефективності роботи базових станцій стільникового оператора. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.06 «Інформаційні технології». Національний авіаційний університет, Київ, 2019. 172 с.
3. Одарченко, Р., Дика, Т. Дика, Н.. Оцінка QoE для різних випадків використання 5G. Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем: Збірник матеріалів доповідей та тез. м. Київ, 15-16 квітня 2021 року р.. Київський національний університет імені Тараса Шевченка. ВПЦ"Київський університет", 2021, 20-21.
4. Князев С.І.. Мобільний зв'язок п'ятого покоління та його місце у трансформаційних процесах цифровізації економіки. Економіка промисловості. 2021. № 1 (93). С. 46–59.
5. Усік П.С. Методи підвищення ефективності розподіленої обробки даних в комп'ютерних системах операторів стільникового зв'язку. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія». – Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, 2021. 154 с.
6. Palazzo, Maria & Siano, Alfonso. (2021). Fifth-generation (5G) communication networks and sustainability: A research agenda. CORPORATE GOVERNANCE AND RESEARCH & DEVELOPMENT STUDIES. 55-73. <https://doi.org/10.3280/cgrds1-2021oa10459>.
7. Jain, Amit & Acharya, Rupesh & Jakhar, Saroj & Mishra, Tarun. (2018). Fifth Generation (5G) Wireless Technology "Revolution in Telecommunication". 1867-1872. <https://doi.org/10.1109/ICICCT.2018.8473011>.
8. Avinash, R. & Dabhade, Manish & Srivastava, Kunal & Kanaujia, Binod. (2019). Antenna Design For Fifth Generation (5G) Applications. <https://doi.org/10.23919/URSIAP-RASC.2019.8738212>.
9. Fakieh, Khalid. (2015). The Concept of Fifth Generation (5G) Mobile Technology. Communications on Applied Electronics. 2. 45-48. <https://doi.org/10.5120/cae2015651853>.

References

1. Brih, M.V. Models and algorithms of functioning of heterogeneous mobile communication networks. Qualifying scientific work on the rights of the manuscript. The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences (doctor of philosophy) on a specialty 05.12.02 "Telecommunication systems and networks" (172 Telecommunications and radio engineering). Lviv Polytechnic National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018. 160 p.
2. Polygenko, O.O. Information technology to increase the efficiency of cellular base stations. Qualifying scientific work on the rights of the manuscript. The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences (doctor of philosophy) on a specialty 05.13.06 "Information technologies". National Aviation University, Kyiv, 2019. 172 p.
3. Odarchenko, R., Dika, T. Dika, N.. Estimation of QoE for different cases of 5G use. Problems of cybersecurity of information and telecommunication systems: Collection of materials of reports and abstracts. Kyiv, April 15-16, 2021. Taras Shevchenko National University of Kyiv. Ukrainian Orthodox Church "Kyiv University", 2021, 20-21.

4. Knyazev, S.I. Mobile communication of the fifth generation and its place in the transformational processes of digitalization of the economy. *Industrial economics*. 2021. № 1 (93). Pp. 46–59.
5. Usik, P.S. Methods for improving the efficiency of distributed data processing in computer systems of cellular operators. Qualifying scientific work on the rights of the manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 123 "Computer Engineering". - Cherkasy State Technological University, Cherkasy, 2021. 154 p.
6. Palazzo, Maria & Siano, Alfonso. (2021). Fifth-generation (5G) communication networks and sustainability: A research agenda. *CORPORATE GOVERNANCE AND RESEARCH & DEVELOPMENT STUDIES*. 55-73. <https://doi.org/10.3280/cgrds1-2021oa10459>.
7. Jain, Amit & Acharya, Rupesh & Jakhar, Saroj & Mishra, Tarun. (2018). Fifth Generation (5G) Wireless Technology “Revolution in Telecommunication”. 1867-1872. <https://doi.org/10.1109/ICICCT.2018.8473011>.
8. Avinash, R. & Dabhade, Manish & Srivastava, Kunal & Kanaujia, Binod. (2019). Antenna Design For Fifth Generation (5G) Applications. <https://doi.org/10.23919/URSIAP-RASC.2019.8738212>.
9. Fakieh, Khalid. (2015). The Concept of Fifth Generation (5G) Mobile Technology. *Communications on Applied Electronics*. 2. 45-48. <https://doi.org/10.5120/cae2015651853>.