

УДК 004.8+65.05+681.5

Ю. І. КАТКОВ, канд. техн. наук, доцент;

О. В. ЗІНЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент;

Ю. В. БЕРЕЗОВСЬКА, аспірантка;

А. С. СТУПНИК, студентка,

Державний університет телекомунікацій, Київ

АНАЛІЗ ЗАГРОЗ ПІД ЧАС УПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ІМТ-2020/5G

Розглянуто загрози під час упровадження стільникових мереж стандарту ІМТ-2020/5G. Упровадження і розвитку концепцій «цифрової економіки», хмарних технологій, великих баз даних, Інтернету речей, промислового інтернету речей та технології «розумний пил» потребує розвитку комунікаційного зв'язку нового покоління, яке має забезпечити переміщення цифрової інформації між об'єктами нового технологічного укладу. Огляд можливостей покоління 5G показує таку здатність завдяки впровадженню нових телекомунікаційних, інформаційних та інтелектуальних технологій, які здійснюватимуть підтримання нових видів послуг. Але треба визначити загрози для потенційно вразливих елементів рухомих безпроводових широкосмугових стільникових мереж передавання даних стандарту ІМТ-2020/5G.

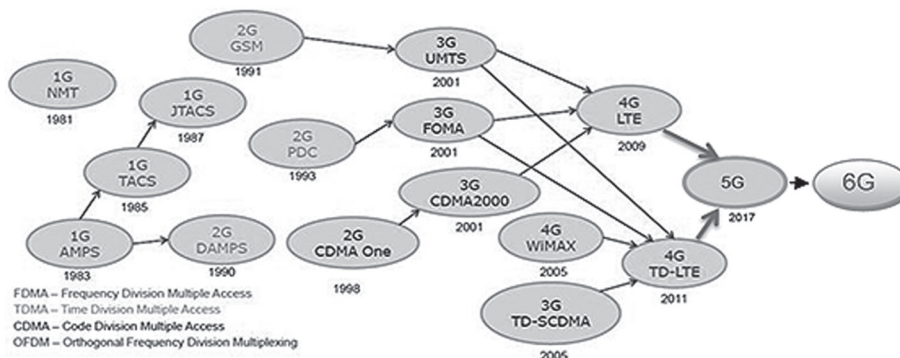
Ключові слова: стільникові мережі стандарту ІМТ-2020/5G; уразливість; критична інфраструктура.

Вступ

Зростання економічних показників держави залежить від створення цифрового майбутнього («цифрової економіки» (*digital economy*), хмарних технологій (*cloud technologies*), великих баз даних (*Big Data*), Інтернету речей (*Internet of Things — IoT*), промислового інтернету речей (*Industrial Internet of Things — IIoT*) та технологій «розумний пил» (*Smart Dust*). Старі способи передавання інформації недостатньо підходять для створення цифрового майбутнього. Тому постає потреба у новому поколінні комунікаційного зв'язку, яке має забезпечити переміщення цифрової інформації між об'єктами нового технологічного укладу, надати нові види послуг, ґрунтуючись на новітніх телекомунікаційних, інформаційних та інтелектуальних технологіях. Еволюція стільникового зв'язку включає в себе кілька поколінь 1G, 2G, 3G, 4G, 5G та 6G (G — *generation* — покоління). Кожне покоління G стільникового зв'язку — це набір функціональних можливостей роботи мережі завдяки таким різноманітним технологіям як: реєстрація абонента, установлення виклику, передавання інформації між мобільним телефоном і базовою станцією по радіоканалу, процедура

встановлення виклику між абонентами, ефективне використання частотного діапазону, упровадження технології шифрування, застосування комунікаційних технологій, роумінг в інших мережах, а також набір мультимедійних послуг, що надаються абонентові. Кожне покоління має свої переваги та недоліки (під час упровадження, експлуатації та маркетингових проєктів), які розглянуто в багатьох джерелах, наприклад в [1–5]. Еволюцію стільникового зв'язку можна подати у вигляді, зображеному на рисунку.

Розвиток стільникових мереж (див. рисунок) пов'язаний із вимогами щодо послуг: 1G — це послуги передавання мови по аналоговій мережі; 2G — це послуги передавання мови по цифровій мережі та низькошвидкісні послуги передавання даних (GPRS, EDGE); 3G — це високошвидкісні послуги передавання даних (HSPA), із можливістю передавання голосу по мережі IP, мобільний доступ до інтернету МВВ (*Mobile Broad band*); 4G — це мультимедійні послуги широкосмугового мобільного доступу МВВ на базі технологій LTE-Advanced та передавання голосу (VoLTE); 5G — це вдосконалений мобільний широкосмуговий доступ eMBB (*enhanced MBB*), наднадійні



Еволюція стандартів мобільного зв'язку [2]

комунікації з низькою затримкою ULLRC (*Ultra Low Latency Reliable Communication*), масивні міжмашинні комунікації Massive IoT/IIoT, mMTC (*massive Machine Type Communication*) та нарізка мережних ресурсів під різні типи трафіку (*Network Slicing*) для IoT/IIoT, «розумного пилу»; 6G — це покоління 5G, якому є подальший розвиток і вдосконалення концептуальних положень для Cloud Technologies, Big Data, IoT/IIoT на основі застосування технологій штучного інтелекту (ШІ) та «розумного пилу». «Розумний пил» — це малесенькі пристрої (групові роботи), які можуть самоорганізуватися та обмінюватися безпроводовими сигналами й працювати як єдина система. Передбачається, що базові елементи «розумного пилу» — моти (англ. *Mote* — «порошинка») будуть розміром з частинку піску або навіть пилу. Кожна порошинка має володіти власними сенсорами, обчислювальним вузлом, підсистемами комунікації та енергопостачання. Групуючись разом, моти автоматично будуть створювати дуже гнучкі мережі. Області їх застосування можуть варіюватися від систем управління кліматом до пристроїв розваги, що взаємодіюватимуть з іншими інформаційними пристроями [6].

Постановка завдання. Розглядається покоління 5G (рухомих безпроводових широкосмугових стільникових мереж передавання даних стандарту IMT-2020/5G). Необхідно визначити потенційну вразливість окремих елементів мереж IMT-2020/5G та загрози для цих уразливих елементів за допомогою методів теоретичного рівня (вивчення та узагальнення, абстрагування, формалізації та аналізу), тобто виконати опис факторів критичності в інноваційних механізмах упровадження мобільного зв'язку покоління 5G, а саме: тенденції розвитку послуг мобільного зв'язку; перспективні області застосування мереж майбутнього; особливості радіоінтерфейсу та технічні характеристики. Об'єктом дослідження є мережі IMT-2020/5G. Предмет дослідження — теоретичні, методичні та практичні аспекти критичності функціонування мережі IMT-2020/5G.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З 1 жовтня 2018 року — моменту першого впровадження мережі 5G компанією «Verizon Communications» до теперішнього моменту нагромаджено багато теоретичного і практичного матеріалу з різних аспектів розвитку мереж покоління 5G. Значний внесок у розвиток теорії та практики стільникових мереж закладено в працях таких зарубіжних і вітчизняних дослідників, як A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, By Mark La Pedus, Eric Hardouin, В. Б. Толубко та багато інших. У роботах цих авторів концептуальному осмисленню піддаються окремі питання специфіки стільникових мереж,

погляди на масштаб світового ринку послуг стільникових мереж, особливості функціонування мереж за умов економічного зростання та інноваційної активності в світовій економіці. Проте аналіз вітчизняної та зарубіжної літератури за темою дослідження аспектів критичності функціонування мереж IMT-2020/5G дозволяє дійти висновку про недостатність науково обґрунтованих уявлень, а також висновків стосовно особливостей функціонування таких мереж, ускладнюючи проведення комплексних заходів щодо оптимізації процесів їхнього створення і просування. Існує явний брак обліку вразливості елементів мереж IMT-2020/5G та створення умов критичності. Отже, у зв'язку з тим, що вивчення мереж IMT-2020/5G є відносно новим і маловивченим напрямком, тема роботи є актуальною та практично затребуваною.

Основна частина

1. Аналіз тенденції розвитку послуг мобільного зв'язку [6]. Як показано в [6] перше покоління 1G було засновано на аналоговому способі передавання інформації. Комерційну реалізацію в основному мала функція рухомого радіотелефонного зв'язку. У цьому поколінні мереж уразливими є аналогові канали зв'язку, які були недостатньо завадостійкими. Щоб усунути недоліки покоління 1G, у поколінні 2G було застосовано цифровий спосіб передавання інформації. У процесі будівництва мереж 2G було створено єдиний стандарт GSM. Але зростаюча потреба користувачів мобільного зв'язку в використанні інтернету з мобільних пристроїв зумовила основний поштовх для появи мереж покоління 2,5G, які стали перехідними між 2G і 3G. Мережі 2,5G використовують ті самі стандарти мобільного зв'язку, що і мережі 2G, але до наявних можливостей додалося підтримання технологій пакетного передавання даних — GPRS (англ. *General Packet Radio Service* — пакетний радіозв'язок загального користування), EDGE (англ. *Enhanced Data rates for GSM Evolution* — підвищена швидкість передавання даних для розвитку GSM). Використання пакетного передавання даних дало можливість збільшити швидкість передавання даних під час роботи з мережею Інтернет з мобільних пристроїв з 9,6 до 384 кбіт/с. Потреба в більш високошвидкісному доступі до інтернету натрапила на такі критичні моменти: не ефективне використання каналного ресурсу, що створює низьку пропускну здатність мережі; великі потужності абонентських і базових станцій, що спричинює завади для інших електронних пристроїв; складність частотного планування, оскільки всі базові станції мережі використовують один і той самий каналний ресурс; неможливість зміни швидкостей передавання вгору та вниз для окремих видів послуг різних абонентів, що унеможливило підтримання асиметричних

видів передавання інформації, таких як інтернет; неможливість реалізації м'якого хендвера, призводячи до збільшення кількості обривів зв'язку; неможливість підвищення якості зв'язку, особливо під час передавання одночасно даних, відеосигналу й мультимедіа.

Переломним моментом розвитку мереж мобільного зв'язку вважається перехід до покоління 3G, яке відомо під аббревіатурою стандарту **IMT-2000** (англ. *International Mobile Telecommunications — міжнародний мобільний зв'язок 2000*). Він об'єднує такі стандарти: W-CDMA, CDMA2000, TD-CDMA/TD-SCDMA, DECT. Стандарт IMT-2000 визначає мережі 3G як інтегровану мобільну мережу, яка забезпечує: для нерухомих абонентів швидкість обміну інформацією не менш як 2048 кбіт/с; для абонентів, що рухаються зі швидкістю не більш ніж 3 км/год — 384 кбіт/с; для абонентів, які прямують зі швидкістю не більш як 120 км/год — 144 кбіт/с. Мережі 3G використовують радіоінтерфейси на основі технологій FDMA, TDMA і CDMA. Основою всіх стандартів покоління 3G є протоколи множинного доступу з кодовим розділенням каналів [6; 7].

Завдяки стандарту IMT-2000 з'явився потужний ринок нових мультимедійних послуг під назвою Triple Play (відео, голос, дані). Мультимедійні послуги Triple Play потребували збільшення швидкості каналу доступу, зменшення затримок пакетів у каналі, можливість доступу до сайтів для швидко рухомих абонентських пристроїв. Це спонукало на початок розвитку у напрямку покоління 3,5G на основі стандарту IMT-2000. Покоління 3,5G базується на технології HSPA (англ. *High Speed Packet Access — високошвидкісний пакетний доступ*). Спочатку вдалося досягти швидкості в 14,4 Мбіт/с, проте зараз теоретично досяжна швидкість 84 Мбіт/с. Але нові послуги Triple Play зазнали в поколінні 3G, 3,5G на таких недоліків: необхідність синхронізації послідовностей, що кодуються в приймачах; значні труднощі з реалізації когерентної обробки прийнятих сигналів; необхідність швидкого регулювання потужності передавачів мобільної та базової станцій; залежність віддалі зв'язку від швидкості передавання й швидкості пересування абонента; непостійність («дихання») стільника, що, у свою чергу, знижує якість зв'язку під час перевантаження стільника та створює значні труднощі до адаптивного управління мережею в реальному часі [7].

Для усунення цих недоліків розпочалася робота покоління 4G, яке дістало назву **IMT-Advanced** (*International Mobile Telecommunications Advanced*). Базовою технологією четвертого покоління є технологія OFDM (англ. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing — мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів*), а також технологія передавання даних MIMO (англ.

Multiple Input/Multiple Output — множинний вхід/множинний вихід). Завдяки цим технологіям передавальні та приймальні антени рознесені так, щоб досягти слабкої кореляції між сусідніми антенами [8]. Покоління 4G вже має швидкість передавання даних: до 100 Мбіт/с (для швидко рухомих абонентів, наприклад поїздів або автомобілів); до 1 Гбіт/с (для абонентів із невеликою швидкістю рухливості 3 км/год, наприклад пішоходів або фіксованих абонентів). Необхідно зазначити, що подальший розвиток отримали також нові версії мобільного WiMAX (англ. *World wide Inter operability for Microwave Access — всесвітня сумісність для мікрохвильового доступу*) та LTE (англ. *Long Term Evolution — довгостроковий розвиток*), вони підтримують високі швидкості доступу, їх можна назвати технологіями, що відповідають вимогам IMT-Advanced, хоча вони часто згадуються постачальниками послуг як технології 4,5G.

На думку аналітиків, покоління 4G та 4,5G мають низку потенційних критичних для розвитку проблем, а саме [7]:

1. *Загальна зона покриття 4G мережі менша порівняно з 3G, оскільки архітектура побудови 4G мереж передбачає побудову гетерогенної опорної мережі, на яку мають спиратися стільники: міні, мікро, піко розмірів. Хоча розміри стільника мережі 4G можуть бути більшими, наприклад розмір стільника LTE до 30 км.*

2. *Для більшості споживачів послуги 4G або 4,5G швидше за все стануть досить дорогими, оскільки потрібні нові абонентські пристрої і тому 4G мережі не будуть широко доступні ще тривалий час у будь-якому географічному місці, крім мегаполісів.*

3. *Смартфони і модеми зі стандарту IMT-Advanced не зможуть продемонструвати свою функціональну потужність, оскільки наявна більшість телефонів і планшетів налаштовано для роботи в більш економічному діапазоні 1800 МГц, і тому не зможуть використовувати діапазон 800 МГц або 2,6 ГГц. Це означає, що користувачам необхідно суцільним загалом замінювати свої пристрої, що є мало ймовірним.*

4. *Несумісний роумінг.* Навіть якщо у вас є пристрій, який підтримує мережі 4G, немає ніякої гарантії, що ви зможете використовувати 4G у будь-якому географічному місці. Це відбувається тому, що в різних країнах використовуються різні діапазони частот для послуг 4G (проблема конверсії частот), отже, якщо ви плануєте подорож за кордон, може так статися, що вам доведеться повернутися до використання мереж 3G.

5. *Якщо кількість смартфонів і планшетів збільшиться в одному стільнику, то це може призвести до великого навантаження на мережу. Хоча 4G і пропонує широко смуговий доступ і більш*

високу швидкість у теорії, але в реальності зростання продажів планшетів і смартфонів зможе переважити навіть таку сучасну мережу.

Зазначені недоліки стосуються більшості абонентів мереж, які користуються мультимедійними послугами Triple Play в інтернеті. Але підвищення економічних показників держави залежить від створення цифрового майбутнього («цифрової економіки» (*digital economy*) на основі впровадження хмарних технологій (*cloud technologies*), великих баз даних (*Big Data*), Інтернету речей (*Internet of Things* — IoT), промислового інтернету речей (*Industrial Internet of Things* — IIoT) та технології «розумний пил» (*Smart Dust*). Старі способи передавання інформації замало підходять для створення такого цифрового майбутнього. Тому потрібно сформувати таке нове покоління комунікаційного зв'язку, яке б забезпечувало переміщення цифрової інформації між об'єктами нового технологічного укладу, надавало нові види послуг на основі новітніх телекомунікаційних, інформаційних та інтелектуальних технологій. Тобто необхідно створити універсальне нове покоління мобільного зв'язку, яке називатиметься поколінням 5G.

У 2017 році організація 3GPP офіційно повідомила, що IMT-2020/5G стане офіційною назвою наступного покоління мобільного зв'язку. Покоління 5G на основі стандарту IMT2020/5G — це новий етап розвитку технологій, який покликаний розширити можливості доступу до хмарних технологій, великих баз даних, IoT/IIoT та мотів, масової комутації машинного типу через мережі радіодоступу. Уже існують думки, що на основі нових телекомунікаційних, інформаційних та інтелектуальних технологій доцільне створення стандарту мобільного рухомого безпроводового широкопasmового зв'язку шостого покоління 6G, упровадження якого передбачається в 2020–2030 роки [8–10].

Таким чином, з аналізу бачимо, що вектор призначення стільникових мереж переміщується від надання традиційних мультимедійних послуг Triple Play (відео, мови, даних) користувачам у напрямку створення умов для хмарних технологій управління великими базами даних, інтернету речей особистого або промислового характеру, більш того проглядається думка управління «розумним пилом».

2. Аналіз перспективних областей застосування мереж стандарту IMT-2020/5G. Організація 3GPP офіційно повідомила, що перспективні області застосування мереж стандарту IMT-2020/5G — це широкопasmовий доступ до комунікаційних мереж для користувачів, надання високоякісного медіа, розумного транспорту та дорожньої інфраструктури, IoT/IIoT та контролю над критично важливими пристроями (моти).

Відомо, що покоління 5G мереж зв'язку повинно відповідати таким вимогам [5]: швидкість

доставляння призначених для користувача даних у будь-якій точці в сотні мегабіт за секунду; надвисока пропускна здатність (кілька гігабіт за секунду); з'єднання великої кількості комунікаційних пристроїв машинного типу; підтримання з'єднання між близько розташованими об'єктами (наприклад, між транспортними засобами під час забезпечення безпеки дорожнього руху, між груповими роботами-порошинками); ефективне використання електроенергії завдяки зниженню вартості експлуатації та енергоспоживання в 5G.

Таким чином, нові вимоги зумовлюють необхідність розвитку стільникових мереж покоління 4G, оскільки за допомогою існуючих технічних вирішень для мереж зв'язку 4G такі вимоги не можуть бути задоволені.

3. Аналіз упровадження перспективних функціональних можливостей. У мережах 5G такі перспективні функціональні можливості [11]: удосконалений мобільний широкопasmовий доступ eMBB (enhanced MBB); масова міжмашинна комунікація Massive IoT/IIoT (масовий інтернет особистих та індустріальних інтернет речей), Critical IoT (критичний IoT), Broad band IoT (широкопasmовий IoT) та Industrial Automation IoT (промислова автоматизація IoT); massive Machine Type Communication — mMTC (масові комутації машинного типу); наднадійні комунікації з низькою затримкою ULLRC (Ultra Low Latency Reliable Communication); нарізка мережних ресурсів під різні типи трафіку (net work slicing). Стисло розглянемо ці перспективні впровадження нових функціональних можливостей у мережах 5G.

3.1. Удосконалення мобільного широкопasmового доступу (eMBB) передбачає:

♦ розвиток послуг (швидкість передавання даних до гігабайт за секунду; 3G-відео (об'ємне відео), якісне відео 4K/8K; екран надвисокої чіткості (UHD); доповнена і віртуальна реальність (AR/VR); зв'язок у разі надзвичайних ситуацій (Mission Critical Communication), тактильний інтернет (Tactile Internet); безпілотний транспорт (автомобілі, трактори, поїзд, дрони); IP-телефонія — голос по пакетній мережі та ін.);

♦ промислова автоматизація (IIoT-Industrial Internet of things, AI—Artificial Intelligence, Machine learning, Deep learning); бізнес-критичні додатки (Mission Critical Applications), електронна медицина (e-Health);

♦ робота на будь-якому пристрої та з будь-якого місця в інтернеті з використанням хмарних технологій, що надає можливість зберігати дані, витягувати їх звідти, використовувати прикладні програми, які працюють безпосередньо з хмари. Окрім того, є можливість використання інтерфейсів прикладного програмування API, через які хмарні сервіс-провайдери можуть надавати свої послуги абонентам оператора мережі 5G;

♦ розумний будинок — це цілий спектр різних сервісів Інтернету речей (IoT), що доступний для вирішення концепцій «Розумний будинок» (Smart Home) і «Розумна будівля» (Smart Building): відеоспостереження, управління та автоматизація побутової техніки, управління системами безпеки, сховища контенту, кліматика тощо;

♦ розумне місто — це горизонтальне та вертикальне масштабування функціонала й спектра сервісів «Розумного будинку». Основні сервіси «Розумного міста»: Безпечне місто, електронний уряд e-Government, електронна охорона здоров'я e-Health, електронна освіта e-Education, електронний банкінг e-Bank, електронний збір свідчень ЖКГ Smart Meters, «розумні електромережі» Smart Grid тощо.

3.2. Масова міжмашинна комунікація Massive IoT/IIoT (масовий інтернет особистих та індустріальних інтернет речей), *Critical IoT* (критичний інтернет речей), *Broad band IoT* (ширококутовий інтернет речей) та *Industrial Automation IoT* (промислова автоматизація інтернету речей); *massive Machine Type Communication* — мМТС (масові комутації машинного типу). Масові — це такі, де один сервер приймає багато запитів від великої кількості пристроїв, обробляє їх та аналізує. Інтернет речей — це система, що об'єднує реальні речі у віртуальну мережу. Завдяки цьому ефективність їхньої роботи підвищується, а втручання людини майже не потрібне. Архітектура IoT-пристроїв досить проста. Для роботи прилади мають розпізнавати один одного, отримувати інформацію з довкілля, мати мережу для зв'язку між собою та комп'ютер, який все це оброблятиме.

3.3. Наднадійні комунікації з низькою затримкою ULLRC (*Ultra reliable and low latency communications*) — це впровадження складної організаційно-технічної системи, яка забезпечує на всіх рівнях мережної моделі OSI надійність роботи відносно питань застосування протоколів обміну даними, цілісності, доступності, конфіденційності, спостереження, невідновності під час передавання даних із вкрай низькою затримкою. При цьому модель OSI трансформується в модель OSS-CBR (*Open system sinter connection basic reference model* — відкрита система синтезування з'єднання базової еталонної моделі). Низька затримка передбачає скорочення часу проходження пакета в системі зв'язку за рахунок створення каналів equipment-to-equipment або point-to-point.

3.4. Нарізка мережних ресурсів під різні типи трафіку (*net work slicing*). *Net work slicing* — це означає нарізку мережних ресурсів під різні типи трафіку, причому для кожного slicing (буквально — шматка мережі) може використовуватися своя технологія передавання даних. Завдяки гнучкості підходу можна задовольнити найрізноманітніші та навіть суперечливі вимоги користувачів різ-

них типів. Наприклад, для передавання веб-даних цілком підходить LTE — його потрібно тільки трохи доопрацювати, підвищити швидкість. Для передавання даних із маленькою затримкою буде використовуватися спеціальний slicing, який називається URLLC. Якщо в LTE мінімальна тривалість передавання 1 мс, то в URLLC мінімальна тривалість передавання триватиме 0,01 мс, а надійність буде дуже високою, до 99,999%. Окремий slicing у рамках 5G відведено для IoT, що дозволяє передавати дані для чималої кількості пристроїв із низьким енергоспоживанням. Окрім того, буде slicing для високошвидкісного передавання даних у міліметровому діапазоні (від 30 до 300 ГГц), де смуга частот значно збільшує ширину використовуваного частотного каналу, в якому передаються дані. Проблема полягає в тому, що передавати дані можна тільки для пристроїв, які знаходяться в прямій зоні видимості, інакше якість сигналу різко знижується [12].

4. Аналіз основних вимог до параметрів стандарту IMT-2020/5G. Для забезпечення низки нових функціональних можливостей визначено такі ключові технічні вимоги до мереж 5G, параметрів IMT-2020/5G [13; 14]: для міжмашинного обміну максимальна швидкість передавання даних: лінія вниз — 20 Гбіт/с, лінія вгору — 10 Гбіт/с; для користувача швидкість передавання даних: лінія вниз — 100 Мбіт/с, лінія вгору — 50 Мбіт/с; затримка для сервісів із ширококутового мобільного зв'язку eMBB — 4 мс, а для сервісів наднадійного міжмашинного зв'язку URLLC — 1 мс; швидкості пересування абонента (мобільність) — до 500 км/год; щільність підімкнення (підтримання одночасного підімкнення абонентів) — до 1 млн пристроїв на квадратний кілометр; спектральна ефективність: униз — 30 (біт · с⁻¹)/Гц, угору — 15 (біт · с⁻¹)/Гц; пропускна здатність — до 10 (Мбіт · с⁻¹)/м²; підвищення енергоефективності — на два порядки, що дозволить пристроям «Інтернету речей» працювати без підзарядки акумулятора протягом 10 років; розподіл між різними послугами необхідного частотного ресурсу (*network slicing*); застосування малих стільників (*macro, small, ultra small*) зі надщільним розподілом; застосування багатовимірних антен MIMO; застосування повного дуплекса в загальній смузі частот; застосування нових методів багатохвильової модуляції; зниження загальної вартості експлуатації мереж п'ятого покоління. Порівняння технічних характеристик 4G і 5G зі Звіту MCE-R M [IMT-2020.TECH PERF REQ від 22.02.2017 надаються для 4G і 5G в [14].

5. Аналіз особливостей радіоінтерфейсу, технічні характеристики тощо. Особливості радіоінтерфейсів стандарту IMT-2020/5G такі [13]:

5.1. Новий радіоінтерфейс із малими стільниками (*New Air Interface — Small Cells*) має базува-

тися: на нових формах сигналу (New wave form); нових методах множинного доступу; нових видах дуплекса (New duplexing); простих і гнучких протоколах канального рівня (Light MAC); високих порядках модуляції (Higher order modulation); механізмах міжстільникової взаємодії та координації (Multi-cell cooperation); ефективних методах компенсації внутрішньосистемних завад (Interference cancellation/utilization); багатовимірних антенних системах (Massive MIMO) і тривимірному формуванні напрямленого променя для передавання багатьом користувачам (MU 3D Beamforming).

5.2. Нова архітектура мережі радіодоступу (New NW Architecture) має забезпечувати: використання змішаних стільників із різними рівнями ієрархії та управління ресурсами в гетерогенній архітектурі Het-Net (Mixed Cell & Het-Net management); централізовані й «хмарні» мережі радіодоступу RAN (Centralized RAN/Cloud RAN); реконфігуровані складники радіомереж SDR і SDN (Software Defined Radio/Networks); передавання керуючої інформації (службових команд) та даних користувача в різних фізичних середовищах (Separation of data & control planes); спільне використання мережної структури (Network sharing).

5.3. Радіочастотний ресурс (Radio Frequency) має забезпечувати: використання високих діапазонів частот, зокрема діапазон міліметрових хвиль (Millimeter wave); використання нових форм ліцензування (New licensing regime); використання ліцензованого та неліцензованого спектра (Licensed & unlicensed band operation); спільне використання спектра (Spectrum sharing); комбіноване застосування спектра всередині приміщень та в зовнішньому середовищі (Indoor-Outdoor operation).

5.4. Інтелектуальні й адаптивні мережі (Intelligent & Adaptive Networks) мають забезпечувати: стохастичне і адаптивне використання мережних ресурсів (Opportunistic Adaptive use of resources); виявлення доступного спектра (Spectrum sensing) та використання його на принципах когнітивного радіо (Cognitive radio and network); самоконфігурування й автоматизовані мережі (Automated networks/Plug & play); «інтелектуальне» низьке споживання електроенергії (Lower and smarter use of energy).

6. Аналіз уразливості елементів та загроз під час використання потенційних технологій у стандарті IMT-2020/5G. У стандарті IMT-2020/5G передбачається наступне використання таких потенційних технологій [15], в яких є загрози:

6.1. Масові MIMO. Технологія MIMO означає використання кількох антен на приймач. Технологія, яка успішно застосовується в мережах 4G, буде корисною і в мережах 5G. При цьому, якщо сьогодні в мережах використовується MIMO 2×2 і 4×4 , то в майбутньому кількість антен збіль-

шиться. Ця технологія має відразу два вагомі аргументи для застосування: 1) швидкість передавання даних зростає майже пропорційно до кількості антен; 2) якість сигналу поліпшується в разі прийому сигналу відразу кількома антенами завдяки розосередженому прийманню (Receive Diversity). Але сукупність технологій OFDMA і MIMO породжує загрозу в тому, що, по-перше, дана сукупність технологій дуже чутлива до синхронізації за частотою, що пов'язано з додатковими тимчасовими затримками в радіоінтерфейсі, неприйнятними у випадках численних з'єднань у реальному масштабі часу, а по-друге, у результаті застосування технологій MIMO технологія OFDMA дуже критична до показника відношення пікової потужності до середньої потужності PAPR (Peak to Average Ratio) [16].

6.2. Перехід у сантиметровий і міліметровий діапазони. На даний момент мережі LTE працюють у частотних діапазонах, нижчих за 3,5 ГГц (1,8 ГГц — найбільш економний). Для повноцінного функціонування мереж мобільного зв'язку стандарту 5G необхідно розгортати мережі в більш вільних високочастотних діапазонах (більш як 2,6 ГГц). З підвищенням частоти, на якій передається інформація, значно зменшується віддаль зв'язку та обгинання завад. Це закон фізики, обійти його можна лише підвищуючи потужність передавача, яка обмежена санітарними нормами. Однак вважається, що базові станції мереж п'ятого покоління будуть розташовуватися щільніше, ніж зараз, що зумовлено необхідністю створити набагато більшу ємність мережі. Перевагою діапазонів десятків гігагерц є наявність великої кількості вільного спектра. Але загроза в тому, що задекларовану швидкість передавання для абонентів не буде виконано, оскільки швидкість каналів змінна і залежить від радіуса покриття, тобто з підвищенням частоти в сантиметровий і міліметровий діапазони віддаль зв'язку буде зменшуватися і на граничній віддалі буде зменшуватися швидкість передавання.

6.3. Мультитехнологічність. Для забезпечення високоякісного обслуговування в мережах 5G необхідна підтримка як уже наявних стандартів, таких як UMTS, GSM, LTE, так і інших, наприклад Wi-Fi. Тому передбачається, що базові станції, які працюють за технологією Wi-Fi або LTE можуть використовуватися для розвантаження трафіку в особливо завантажених місцях всередині зони покриття. Загроза у тому, що в абонентів з мережі GSM або UMTS не буде бажання щодо підключення до мережі IMT-2020/5G внаслідок збільшення вартості або низької якості обслуговування, оскільки оператору мережі IMT-2020/5G невигідно обслуговувати абонентів мережі GSM або UMTS, які використовують абонентські пристрої попередніх поколінь 2G або 3G.

6.4. D2D (Device-to-device). Технологія D2D дає змогу пристроям, розміщеним неподалік один від одного, обмінюватися даними безпосередньо, без участі базових станцій мережі 5G, через ядро якої буде проходити лише сигнальний трафік. Перевагою такої технології є можливість перенесення передавання даних у неліцензованій частині спектра, що дозволить додатково розвантажувати мережу. Через оператора буде проходити тільки сигнальний трафік. Використання прямого зв'язку між сусідніми мобільними пристроями поліпшить використання спектра, загальну пропускну здатність і ефективність енергоспоживання, одночасно надаючи нові послуги. Саме тому мережі п'ятого покоління важливі для розвитку Інтернету речей. Із впровадженням мереж 5G вдасться забезпечити масивну міжмашинну взаємодію: даними зможуть обмінюватися не десятки, а сотні й тисячі різних датчиків, актуаторів та пристроїв. *Але впровадження D2D створює загрозу для розподілу ресурсів спектра між звичайним стільниковим та D2D зв'язком. Йдеться про те, що спільне використання спектра мобільними пристроями в режимі D2D та мобільними пристроями в режимі звичайного стільникового зв'язку додатково ускладнюють гнучкість вибору режиму D2D, оскільки потенційна пара D2D зв'язку може перемикатися між прямим і звичайним стільниковим зв'язком. Тобто постає питання — чи повинні мобільні пристрої в режимі D2D зручним (вигідним, агресивним) способом отримувати доступ до ресурсів спектра, витісняючи мобільні пристрої звичайного стільникового зв'язку, або потрібно розробляти план розподілу ресурсів спектра?*

6.5. Новий радіоінтерфейс у мережах IMT-2020/5G. Однією з перешкод для запуску 5G є недолік частотного спектра в традиційних діапазонах 800/1800/2600 МГц. Передбачається, що в майбутніх мережах ресурс необхідно розширити, що можливо завдяки міліметровому діапазону. Але виникає проблема недостатнього покриття та доступності мережі. Проблему покриття та доступності мережі передбачається розв'язати орієнтуванням на абонентів, тобто радіопокриття мережі буде підлаштовуватися під потреби абонентів на відміну від попередніх стандартів. Ефективність радіоінтерфейсу мереж 5G буде збільшено в три рази, тобто пропускати до 3-х разів більше даних при тій самій ширині смуги. Очікуваний показник енергетичної ефективності не менш як $6 \text{ (біт} \cdot \text{с}^{-1})/\text{Гц}$. Наприклад, як претенденти на звання революційного радіоінтерфейсу мереж 5G Huawei пропонує такі технічні рішення:

◆ **SCMA (Sparse Code Multiple Access).** Ґрунтується на методі поділу абонентів розрідженими кодами (алгоритм створення розріджених матриць, на основі яких будуються кодові книги), що не впотребує підтвердження про доставку. Працює

він так: перед трансляцією за допомогою телефону бітові потоки різних абонентів з одного частотного ресурсу перетворюються в кодове слово завдяки так званій кодовій книзі. Відновлення сигналу на приймальному боці також здійснюється за кодовою книгою;

◆ **F-OFDM (Flexibel OFDM).** F-OFDM надасть під кожну задачу свій набір параметрів за рахунок гнучкого розбиття на підносійні, застосування різної довжини символів і зміни величини циклічного префікса. F-OFDM є вдосконаленою версією OFDM;

◆ **Polar Code** — технологія з субквадратичною складністю кодування. Являє собою лінійний коригувальний код, оснований на явищі поляризації каналу. Полярні коди дадуть змогу підвищити частотний спектр у три рази, дозволять проводити декодування лінійної складності та істотно збільшити швидкість передавання даних. У кодування мереж 5G за принципом Polar code є низка переваг. По-перше, технологія мінімум у три рази підвищує частотний спектр високошвидкісної мережі порівняно з використовуваними сьогодні стандартами RAN. По-друге, полярні коди цікаві операторам з погляду економічного ефекту. Вирішення здатне проводити декодування лінійної складності, що дозволяє скоротити до мінімуму вартість впровадження запуску мереж 5G в майбутньому.

Інтерес розробників до субквадратичного кодування пояснюється також тим, що його характеристики здатні наблизити швидкість передавання даних до граничних значень, тобто до межі Шеннона. Також під час декодування за допомогою простого поляризованого каналу з послідовним придушенням завад вона забезпечує результат, аналогічний тому, що досягається у разі декодування за методом максимальної правдоподібності, але складність застосування полярних кодів істотно менша. З огляду на зазначене, можна дійти висновку, що технологія Polar code має вагомими конкурентні переваги порівняно з іншими варіантами кодування каналу 5G, значно прискорюючи процес стандартизації та розгортання мереж для комерційної експлуатації. Зокрема, є намір опрацювати технологію F-OFDM (filtered OFDM), тобто мультиплексування, в основу якого покладено ортогональний поділ частот каналів за наявності фільтрації позасмугових випромінювань. Також планується впровадити розріджені коди SCMA (Sparse Code Multiple Access), які мають реалізувати багатостанційний доступ, а також коди типу Grant Free і Short TTI (Transmission Time Interval). *Загроза у тому, що виникають умови для недостатнього покриття та доступності мережі, а вирішення цієї проблеми вказаними методами стикається з не достатнім дослідженням і не може бути сьогодні впроваджено в стандарт IMT-2020/5G.*

6.6. Віртуалізація архітектури мереж IMT-2020/5G (технології SDN та NFV). Ефективною технологією, яка дозволить скоротити обсяг операторського обладнання та спростити обслуговування інфраструктури, може стати програмно-конфігурована мережа SDN (*Software-Defined Networks*). SDN сприяє цифровій трансформації компаній та перекладу сервісів на хмарні технології. Фундаментальний принцип роботи SDN — це дистанційне керування мережею і пристроями передавання даних, тобто програмно. У свою чергу передбачається, що віртуалізація мережних функцій NVF (*Network Functions Virtualization*) дозволить віртуалізувати різні функції багатьох мережних елементів операторів мобільного зв'язку, а також реалізувати «мережу за запитом». Тобто оброблятися та зберігатися дані будуть у віртуальному середовищі («у хмарі»). За класичним устаткуванням залишиться функція передавання користувальницького трафіку. Такий підхід до організації мереж 5G відповідає тенденціям розвитку конвергентності зв'язку. Конвергентність передбачає інтеграцію відокремлених об'єктів мережі в єдиний обчислювальний комплекс. Це, зокрема, важливо і для технології «розумний пил» з метою обміну інформацією пристроїв у режимі он-лайн. Для організації певної ділянки мережі оператори застосовують уже опрацьовані вирішення з набором необхідних параметрів і конкретним обладнанням. Віртуалізація 5G і мережі «за запитом» дасть можливість заздалегідь організувати сервери і DATA-центри для операторів, тобто надати для них «типові» вирішення, значно скоротивши часові та фінансові витрати на впровадження нових послуг. *Але постає загроза виникнення додаткових накладних витрат на процес інкапсуляції, а саме: через відсутність можливості управляти якістю транспорту, підвищення складності контролю і налагодження інкапсульованого трафіку, появу значних обмежень на конфігурацію мережі, необхідність запровадження спеціального мережного обладнання.*

6.7. Супутні технології IMT-2020/5G. Створити більш досконалу та якісно іншу інфраструктуру мереж 5G покликаний ряд інших технологій: Massive MIMO, M2M і D2D.

Технологія **Massive MIMO** — це комплекс із кількох антен, який буде формувати дуже гострі діаграми напрямленості, які дозволять передавати одному абоненту до восьми потоків даних. Кілька променів поліпшить рівень сигналу й усуне інтерференцію від інших абонентів, що позитивно вплине на пропускну здатність мережі та ефективність використання частотного спектра. *Але загрозою від застосування технології Massive MIMO (алгоритмів неортогональних методів просторово-часового кодування) є: наявність тимчасових витрат на початку та в кінці передавання, висока складність реалізації, труднощі кодування.*

Технологія **M2M** (*Machine-to-Machine* — між-машинна взаємодія) і **D2D** (*Device to Device* — пристрій-пристрій). Це яскравий напрямок концепції Інтернету речей. Технологія M2M необхідна для взаємодії пристроїв між собою без безпосередньої участі людини, тобто для автоматизації процесів. Сфера застосування M2M досить широка. Наприклад, в платіжних терміналах, системах безпеки, системах координації транспортних засобів. Технологія здешевлює процеси, а також мінімізує їх залежність від людського чинника, дозволяє оперативно реагувати на збої в роботі систем. *Загроза у тому, що постає питання (аналогічно для D2D) — мобільні пристрої в режимі M2M повинні зручним (вигідним, агресивним) способом отримувати доступ до ресурсів спектра, витісняючи мобільні пристрої звичайного стільникового зв'язку, або необхідно розробляти план розподілу ресурсів спектра?*

Висновок

Огляд можливостей мереж IMT-2020/5G показує, що впровадження нових телекомунікаційних, інформаційних та інтелектуальних технологій може здійснювати підтримання нових послуг, необхідних для впровадження «цифрових економік». Однак розробка мереж IMT-2020/5G неминуче зіткнеться з новими технічними критичними проблемами, які можна розглядати як загрози для впровадження мереж IMT-2020/5G.

Список використаної літератури

- 1. Еволюція поколень сотової зв'язу** [Електронний ресурс]. URL: <https://kibernetiki.com.ua/stati/evolyutsiya-pokoleniy-sotovooy-svyazi> (Дата: 15.05.2019).
- 2. Что такое «поколение» сетей сотовой связи?** [Електронний ресурс]. URL: <http://1234g.ru/1g/chto-takoe-pokolenie-setej-sotovooy-svyazi> (Дата: 15.05.2019).
- 3. ITU towards «IMT for 2020 and beyond»** [Електронний ресурс]. URL: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx>. (Дата: 15.05.2019).
- 4. Развитие мобильной связи от 1G к 5G** [Електронний ресурс]. URL: <http://www.vitasvyaz.ru/news/razvitie-mobilnoj-svjazi-ot-1g-k-5g.html>. (Дата: 15.05.2019).
- 5. 5G Пятое поколение мобильной связи** [Електронний ресурс]. URL: [http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:5G_\(%D0%BF%D1%8F%D1%82%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%BC%D0%BE%D0%B1%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B9_%D1%81%D0%B2%D1%8F%D0%B7%D0%B8\)](http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:5G_(%D0%BF%D1%8F%D1%82%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%BC%D0%BE%D0%B1%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B9_%D1%81%D0%B2%D1%8F%D0%B7%D0%B8)) (Дата: 15.05.2019).

6. **Що таке мобільні мережі 1G, 2G, 3G...?** [Електронний ресурс]. URL:

<https://all-spares.ua/uk/articles-and-video/what-are-1g-2g-3g-etc-mobile-networks.html> (Дата: 15.05.2019).

7. **Недостатки сетей 4G** [Електронний ресурс]. URL:

<http://console8bit.ru/6189.html> (Дата: 15.05.2019).

8. **David K., Berndt H.** 6G Vision and Requirements: Is There Any Need for Beyond 5G? // *IEEE Vehicular Technology Magazine*, September 2018. [Електронний ресурс]. URL:

doi:10.1109/mvt.2018.2848498

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8412482> (Дата: 15.05.2019).

9. **Get ready for 6G mobile networks: 1Tbps speeds, microsecond latency and AI optimisation** [Електронний ресурс]. URL:

<https://www.techradar.com/news/get-ready-for-6g-mobile-networks-1tbps-speeds-microsecond-latency-and-ai-optimisation>. (Дата: 15.05.2019).

10. **Smart Dust: Communicating with a Cubic-Millimeter** / B. Warneke, M. Last, B. Liebowitz, Kristofer S. J. Pister // *Computer*. 2001. Vol. 34. P. 44–51.

11. **Emerging Trends in 5G/MT2020, ITU** — Многобразие функциональных возможностей сетей IMT2020/5G-2016.

12. **Тактильный интернет в эпоху 5G** [Електронний ресурс]. URL:-

<https://postnauka.ru/faq/81008> (Дата: 15.05.2019).

13. **ITU-R SG05 Contribution 40. Draft new Report ITU-R M. [IMT-2020.TECH PERF REQ]. Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s). 2017-02-23.WP 5D** [Електронний ресурс]. URL:

<https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0040/en>. (Дата: 15.05.2019).

14. **Технические характеристики 5G. Сравнение 4G и 5G** [Електронний ресурс]. URL:

<http://1234g.ru/5g/tekhnicheskie-kharakteristiki-5g> (Дата: 15.05.2019).

15. **What is 5G?** [Electronic resource]. Access mode. URL:

<http://1234g.ru/5g/chto-takoe-5g> (Date: 10.05.2019).

Рецензент: доктор техн. наук, професор **В. В. Вишнівський**, Державний університет телекомунікацій, Київ.

Ю. И. Катков, О. В. Зинченко, Ю. В. Березовская, А. С. Ступник

АНАЛИЗ УГРОЗ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ IMT-2020/5G

Рассмотрены угрозы при внедрении сотовых сетей стандарта IMT-2020/5G. Внедрение и развитие концепций «цифровой экономики», облачных технологий (cloud technologies), больших баз данных, Интернета вещей, промышленного интернета вещей и технологии «умная пыль» требует развития коммуникационной связи нового поколения, которое должно обеспечить перемещение цифровой информации между объектами нового технологического уклада. Обзор возможностей поколения 5G показывает такую способность путем внедрения новых телекоммуникационных, информационных и интеллектуальных технологий, которые могут осуществлять поддержку новых видов услуг. Однако требуется определить угрозы для потенциально уязвимых элементов подвижных беспроводных широкополосных сотовых сетей передачи данных стандарта IMT-2020/5G.

Ключевые слова: сотовые сети стандарта IMT-2020/5G; уязвимость; критическая инфраструктура.

Yu. I. Katkov, O. V. Zinchenko, Yu. V. Berezovska, A. S. Stupnyk

ANALYSIS OF IMT-2020/5G IMPLEMENTATION TECHNOLOGY THREATS

The article discusses threats in the implementation of the IMT-2020/5G cellular networks, which is a relatively new and little-studied topic, so it is relevant and practically in demand. Introduction and development of the concepts of «digital economy» (digital economy), cloud technologies (cloud technologies), large databases (Big Data), Internet of things (Internet of Things — IoT), industrial Internet of things (Industrial Internet of Things IIoT) and technologies «Smart Dust» (Smart Dust) requires the development of communication communications of a new generation, must ensure the movement of digital information between the objects of the new technological order. An overview of the capabilities of the 5G generation shows this possibility by introducing new telecommunications, information and intelligent technologies that can support new types of services. The article aims to: identify threats to potentially vulnerable elements of mobile wireless broadband cellular data networks of the IMT-2020/5G standard. To solve the problem using the methods of the theoretical level (study and synthesis, abstraction, formalization and analysis), a description of critical factors in innovative mechanisms for introducing 5G mobile communication is performed, namely: trends in the development of mobile communication services; promising areas of application for future networks; features of the radio interface and technical characteristics, allows to determine the potential vulnerability of individual elements of the network standard IMT-2020/5G. It is concluded that the development of the 5G network generation will inevitably encounter new technical critical problems that make it impossible for most consumers to make wide use of the services of the 5G network.

Keywords: IPT-2020/5G cellular networks; vulnerability; critical infrastructure.