

## ОПТИЧНІ КОРПОРАТИВНІ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ

<sup>1</sup> Вінницький національний технічний університет;

### **Анотація**

*Розглянуто інтеграцію технологій DWDM та PON для забезпечення високої пропускної здатності. Розглянуто дві схеми генерації OFC, кожна з яких забезпечує однакову потужність несучої та дозволяє переконфігурувати інтервал частот без необхідності складної конфігурації системи. Також було продемонстровано доказову концепцію OFC на основі DWDM-PON, де OFDM був використаний для гнучкого розподілу низхідних піднесучих для кінцевих користувачів. Більше того, для висхідної передачі несуча використовується повторно, і, отже, собівартість загальної системи може бути зменшена.*

**Ключові слова:** DCN, MMW, PON, DWDM, OLT, ONU, RoF, MZM, POI, M-PAM.

### **Abstract**

*The integration of DWDM and PON technologies for high bandwidth is considered. Two OFC generation schemes are considered, each of which provides the same carrier power and allows to reconfigure the frequency range without the need for complex system configuration. The DWDM-PON-based OFC evidence concept was also demonstrated, where OFDM was used to flexibly distribute descending subcarriers to end users. Moreover, for uplink the carrier is reused, and therefore the cost of the overall system can be reduced.*

**Keywords:** DCN, MMW, PON, DWDM, OLT, ONU, RoF, MZM, POI, M-PAM.

### **Вступ**

Актуальність роботи. Високий попит на пропускну здатність у кожному сегменті мережі обумовлений, з одного боку, збільшенням кількості кінцевих користувачів та новими інтернет-додатками, що вимагають підвищеної пропускної здатності, такими як віртуальна реальність (VR), телебачення високої чіткості (HDTV), соціальна мережа на основі відео, а з іншого боку, створює значні виклики комунікаційним мережам. Ієрархію комунікаційних мереж можна розділити на дві основні категорії відповідно до відстані передачі, а саме мережі магістрального та абонентського призначення. Метро та магістральні мережі з відстанню передачі в сотні чи тисячі кілометрів мають відносно великий радіус дії і належать до першої категорії. У мережах зв'язку на значній відстані оптичні технології широко застосовуються і вважаються надійним рішенням, що забезпечує високу пропускну здатність [1].

Окрім фіксованого ширококутового доступу, доступ мобільних користувачів також має високі вимоги до існуючих мереж зв'язку з точки зору високої пропускної здатності. Прогнозується, що мобільний трафік даних зросте втричі швидше, ніж фіксований IP-трафік [1]. Нові стандарти бездротового зв'язку постійно збільшують швидкість бездротової передачі. Більшість з них працюють в мікрохвильовому діапазоні від 2 до 5 ГГц [2]. Враховуючи швидко зростаючий попит на пропускну здатність, зумовлено використання субміліметрових хвиль та міліметрових хвиль (MMW) [3]. Перенесення даних на декількох смугах MMW додатково збільшує пропускну здатність. Однак розповсюдження MMW обмежується високими втратами в атмосфері. Для вирішення цієї проблеми широко розглядається техніка радіопередачі над волокном (RoF), щоб збільшити відстань передачі MMW завдяки низьким втратам при передачі у ВОЛЗ.

За останні кілька років спостерігається збільшення хмарних обчислень, соціальних мереж та потокових відеодзвінків, що використовуються в центрах обробки даних підвищеної пропускної здатності. При цьому, додатки, що вимагають інтенсивної взаємодії в центрах обробки даних, потребують високої пропускної здатності для зв'язку між серверами. З іншого боку, запуск центру обробки даних є енергоємним заходом. Світові центри обробки даних споживають 3% від загального споживання енергії, що дорівнює річній кількості енергії, споживаної Італією чи Іспанією [2]. Через проблеми з тепловіддачею центри обробки даних не можуть дозволити збільшення споживання

енергії пропорційно зростанню потужності. Отже, центри обробки даних повинні підтримувати різко зростаючу потужність при обмеженому збільшенні споживання енергії.

Оптична транспортна технологія, яка отримала широке поширення в телекомунікаційних мережах завдяки своїй високій пропускній здатності та низькому енергоспоживанню, також розглядається як оптимальний варіант побудови мереж внутрішнього центру обробки даних. В роботі ми розглядаємо мережі внутрішнього центру обробки даних як мережі центрів обробки даних (DCN), які обробляють трафік, що залишається всередині центрів обробки даних [3].

### Результати дослідження

Для побудови мереж оптичного доступу, запропоновано дві схеми формування оптичних частотних гребінців (OFC) в якості джерела з декількома носійними для системи DWDM-PON взамін звичайної схеми на базі лазерної решітки, де необхідний індивідуальний контроль та керування кожною довжиною хвилі. Доцільність використання таких схем генерації OFC в системі DWDM-PON експериментально підтверджена [3]. Крім того, міжканальний інтервал у запропонованій схемі генерації OFC може бути гнучко переналаштований, підтримуючи потенційне оновлення мережі шляхом звуження інтервалу між каналами, замість заміни загальних оптичних джерел.

Для підтримки майбутнього мобільного доступу високої ємності ми пропонуємо концепцію частотного поділу та поєднуємо його з технологіями RoF для полегшення організації двосмугового зв'язку MMW. Модифікований спектр здатний одночасно сформувати двосмугові сигнали MMW. Використовуючи в повному обсязі спектр MMW, передаючи різні дані на двох діапазонах, пропускна спроможність запропонованої системи RoF значно покращується в порівнянні з існуючими схемами (рис.1). Крім того, запропонована схема формування спектра у модифікованій формі також має перевагу з точки зору продуктивності передачі на вищому рівні порівняно зі схемою OFC, де всі частоти мають однаковий рівень потужності.

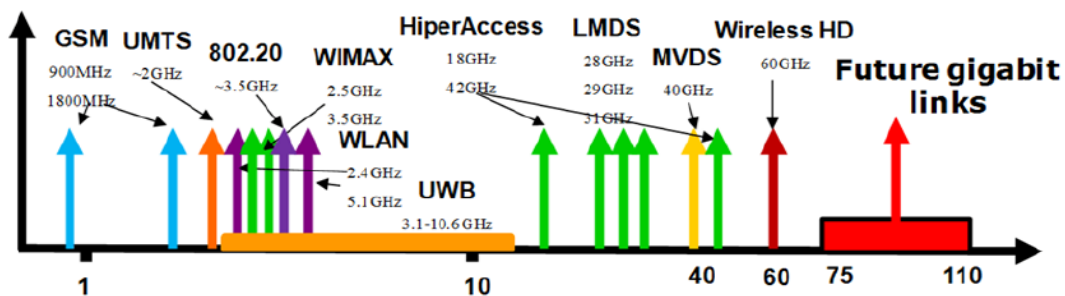


Рис. 1. Спектр використання безпроводних послуг.

(GSM: глобальна система для мобільної системи; UMTS: універсальна система мобільного зв'язку; WIMAX: всесвітня взаємодія для мікрохвильового доступу; WLAN: бездротова локальна мережа; UWB: надширокопasmуговий; LMDS: локальна багатоточкова служба розподілу; MVDS: багатоточкова система розподілу відео)

Розроблений алгоритм оцінювання масштабованості POI враховує характеристик фізичного рівня, наприклад, тип приймача, пропускна здатність приймача, формат модуляції, інтервал рівня символів та пороги прийняття рішень. В процесі тематичного дослідження, ефективність масштабованості різних рішень, заснованих на POI, теоретично аналізується з точки зору максимального розміру взаємозв'язку та найвищої швидкості передачі даних, яку можна підтримати. В подальшому, до POI вводиться оптичний підсилювач, легований ербієм (EDFA), для збільшення бюджету енергії і, отже, масштабованості. При цьому, оцінюється покращення масштабованості та вплив додаткових втрат та споживання енергії, спричинених EDFA. Крім того, експериментально досліджується фактор використання різних форматів модуляції в POI, і таким чином аналізуються показники масштабованості POI, що використовують розширені формати модуляції [4].

Мережі доступу забезпечують кінцеве сполучення з Інтернетом останньої милі. Існує кілька типів технологій доступу, класифікованих за використанням різного середовища передачі, таких як кабельні лінії, бездротові (повітряні) лінії та ВОЛЗ. Волоконна мережа доступу використовує оптичне волокно для забезпечення зв'язку та перевершує інші за великою інформаційною ємністю та довгим трактом передавання. Як правило, волоконна мережа доступу складається з оптичного

лінійного терміналу (OLT), розташованого в СО, з'єднаного з одним або групою ONU в кінцевих точках ВОЛЗ.

Пасивні оптичні мережі (PON) використовують лише пасивні компоненти, наприклад, розгалужувачі довжини хвилі або потужності та сплітери, для з'єднання різних ділянок ВОЛЗ. Такі мережеві архітектури знижують втрати та споживання енергії, одночасно покращуючи показники надійності порівняно з активними оптичними мережами, де потрібно використовувати активне обладнання. На основі різних методів мультиплексування, можуть бути реалізовані різні типи PON, такі як TDM-PON та WDM-PON. Також розгортаються TDM-PON 1 Гбіт / с, такі як PON (GPON) [2] та Ethernet PON (EPON) [3], що підтримують гігабітні швидкості. 10 Гбіт / с TDM-PON, такі як XG-PON1 [4] та 10G-EPON [5], перебувають на початковій стадії розгортання. У TDM-PON пакетні потоки від OLT транслуються на всі ONU за допомогою оптичних розгалужувачів, і при цьому кожному ONU присвоюється певний часовий інтервал. Сигнали від OLT зазнають великих втрат через використання подільників потужності, особливо коли OLT обслуговує велику кількість ONU. Крім того, потужність, виділена однією довжиною хвилі, розподіляється між усіма ONU, що ускладнює виконання заданих вимог до пропускної здатності кінцевими користувачами.

Прямим способом підтримки більшої кількості клієнтів і подальшого покращення можливостей доступу в WDM-PON є зменшення інтервалу довжин хвиль  $\lambda$ , таким чином, збільшення кількості доступних каналів. При використанні технології DWDM-PON довжини хвиль близькі одна до одної з різницею менше 100 ГГц [5]. Однак вузька різниця каналів робить систему чутливою до перехресних завад, особливо коли передаються сигнали з високою смугою пропускання. Дрейф сигналів лазерного джерела на будь-якій носійній довжині хвилі може значно погіршити ефективність передачі інформаційних потоків [1].

Технологія OFC, що складається із множини частотних складових, що формуються з однієї довжини хвилі з однаковою амплітудою та постійним інтервалом, є перспективним варіантом для підтримки роботи джерела з декількома несучими в системі DWDM-PON. Звичайна схема генерації OFC може базуватися на блокуванні режиму лазерів [4], та ефектах нелінійності оптичного волокна [3]. Однак керування лазером із блокуванням режиму є складною задачею. Підхід, заснований на нелінійному ефекті, вимагає використання довгого нелінійного волокна. Потужність значного вхідного сигналу для генерації OFC на основі ефектів нелінійності. З розвитком електрооптичного модулятора на основі кристалічного хвилеводу LiNbO<sub>3</sub> генерація OFC із використанням модуляторів Маха-Зендера (MZM) стає привабливою [2].

Різниця між схемою RoF та звичайною цифровою оптичною схемою формування базової смуги [3] для передачі радіочастотних сигналів показана на рис. 2. У звичайному варіанті побудови сигнал базової смуги безпосередньо перетворюється в оптичний спектр перед передачею у ВОЛЗ за допомогою електрооптичного (Е/О) перетворювача. На базовій станції (BS) здійснюється обробка сигналу, демодуляція та модуляція сигналу базової смуги перед підсиленням та трансляцією його в ефір. У системі RoF бездротовий сигнал генерується модулем перетворення ВЧ-частоти, а потім перетворюється в оптичний сигнал за допомогою модуля перетворення Е / О. Використовуючи техніку RoF, конфігурація на базових стільникових станціях спрощується завдяки тому, що обробка сигналу базової смуги більше не потрібна на ділянці стільникової мережі.

Задоволення зростаючих вимог до пропускної здатності бездротового зв'язку забезпечується за рахунок використання смуги MMW. Діапазон MMW охоплює діапазон частот від 30 ГГц до 300 ГГц (що відповідає діапазону хвиль від одного до десяти міліметрів), що може забезпечити високу ємність для бездротового доступу. Наприклад, діапазон 60 ГГц, вже стандартизований для бездротових програм короткого діапазону [5], і навіть більш високі частотні діапазони, що перевищують 100 ГГц, також привертають велику увагу [4]. Однак смуга MMW зазнає вищого ослаблення розповсюдження через атмосферу, ніж діючі смуги операторів мобільних послуг, що обмежує типову відстань передачі MMW меншою 100 метрів. Це робить привабливим використання технології RoF для розподілу сигналу MMW до антен. [3].

Є багато досліджень, зосереджених на схемах RoF на основі MMW. У роботі [4] використовують модулятор Маха-Зендера (MZM) в CS та техніку змішування гетеродину для реалізації генерації багатосмугового MMW-сигналу за допомогою оптичного локального генератора (LO) у комірці, що призводить до складної конфігурації системи. У роботі [5] пропонується генерація багатосмугового сигналу з подвійним модулятором і двома окремими тактовими сигналами, що вимагає

високочастотного синтезатора. Оптичний частотний фільтр (OFC) з плоским спектром і рівним інтервалом частот є альтернативним підходом для генерації багатосмугових MMW [3].

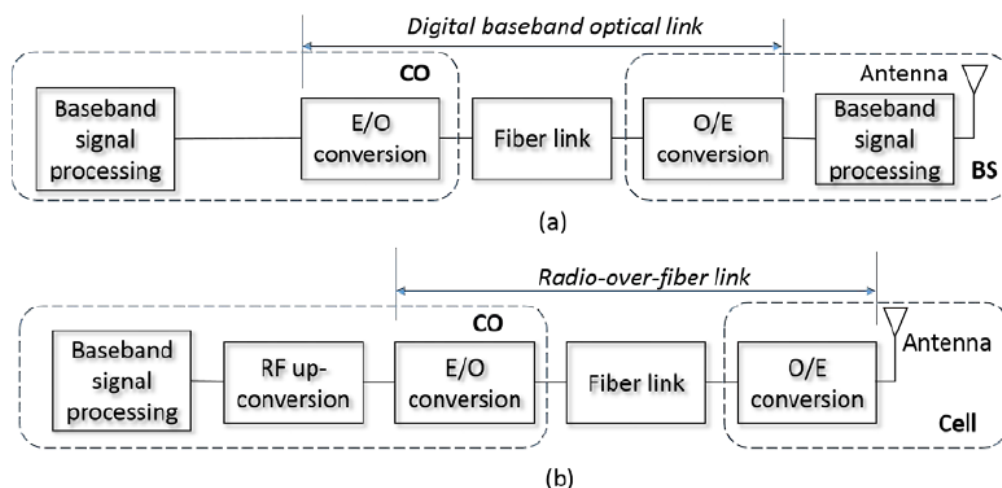


Рис. 2. Схема передачі радіочастотного сигналу на (а) цифровому оптичному каналі базової смуги та (б) RoF

Центри обробки даних стають все більш важливими у сучасному світі, за рахунок того, що підтримують багато видів оплати послуг в Інтернеті, включаючи соціальні медіа, електронну пошту, пошук в Інтернеті, споживчі послуги в Інтернеті, які роблять наше суспільство більш продуктивним та ефективним. Оптичний зв'язок, який характеризується високою пропускнуою здатністю, низькими втратами та високою енергоефективністю, відіграє ключову роль у забезпеченні енергоефективного мережевого рішення для центрів обробки даних. Ця тенденція призводить до зосередження уваги на проблемі споживання енергії для мереж локальних центрів обробки даних, які в роботі називаються мережними центрами обробки даних (DCN).

Чітке розуміння основних особливостей трафіку, що формується серверами, має вирішальне значення для проектування ефективної архітектури DCN.

Одним із способів підвищення енергоефективності центру обробки даних є зменшення використання електричних компонентів. Багато існуючих архітектур DCN засновані на оптичній комутації [2]. У більшості цих конструкцій оптичні вимикачі замінюють електричні в агрегатному та середньому рівні. Однак енергія, що економиться завдяки впровадженню технології оптичного перемикачання на вищих рівнях в центрі обробки даних є обмеженою [5]. З іншого боку, до 90% загальної енергії при комутації споживається комутаторами ToR через велику кількість обладнання в центрі обробки даних [1]. Тому слід надати пріоритет для підвищення енергоефективності центру обробки даних зменшенню споживання енергії на перемикачання ToR. Порівняно з архітектурою, що базується на комутаторах, використання пасивних компонентів, наприклад, оптичних муфт для з'єднання портів, має невід'ємні переваги з точки зору вартості, енергоспоживання та надійності. Крім того, у зв'язку з тим, що не потрібно ніякої реконфігурації обладнання, архітектури POI мають потенціал високої продуктивності з точки зору затримки. Масштабованість POI на основі розгалужувача аналізується в [5] лише з урахуванням втрат, що є суттєвим, але недостатнім. Різні функції фізичного рівня, включаючи, але не обмежуючись ними, такі як тип приймача, пропускну здатність систем, формати модуляції, модуляція та схеми прийняття рішень, повинні бути враховані при оцінці масштабованості.

Методи модуляції інтенсивності та прямого виявлення (IM / DD) популярні через використання короткого діапазону в DCN, головним чином, завдяки своїй простоті та недорогому розгортанню порівняно з узгодженими рішеннями. У підходах IM / DD швидкість передачі бітів на довжину хвилі є добутком двох основних параметрів: символів в секунду (швидкість передачі даних) і бітів на символ (порядок модуляції). Модуляція бінарної інтенсивності, тобто включення / відключення (ООК) - це найпростіша технологія IM / DD. Однак для цього необхідно використовувати електрооптичні компоненти з високою пропускнуою здатністю, особливо коли потрібно забезпечувати високу швидкість передачі даних. Використання вдосконалених форматів модуляції, тобто

збільшення порядку модуляції дозволяє забезпечити високу пропускну здатність. В результаті, M-PSK та DMT формують недорогі та низькоенергетичні інтегровані трансивери, що використовуються двома основними потоками в Datascom [1].

M-PSK відноситься до багаторівневої модуляції інтенсивності, наприклад, 4-PSK та 8-PSK відноситься до модуляції з 4 та 8 рівнями амплітуди, відповідно. Порівняно з бінарною модуляцією, напр. OOK, спектральна ефективність M-PSK покращується в коефіцієнт  $\log_2 MM$  при передачі з однаковою швидкістю передачі даних.

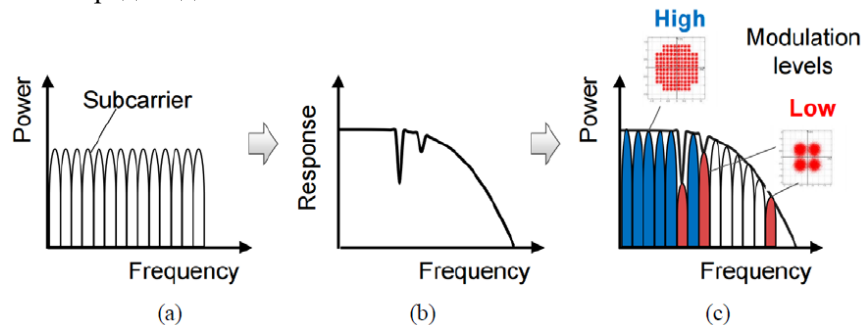


Рис. 3. Спектральні характеристики DMT-сигналів в ТКС  
(а) піднесучі сигналу DMT; (б) відгук каналу лінії передачі; (с) розподіл потужності та бітів для піднесучих відповідно до відгуку каналу.

Багатонесуча технологія DMT є спеціальною реалізацією ортогонального мультиплексування з розподілом частоти (OFDM). DMT формує спектр, як показано на рис.3, де кожна з піднесучих займає лише частку смуги пропускання каналу. Розподіл бітів та потужності для кожної піднесучої залежить від реакції каналу на відповідній частоті піднесучої. Іншими словами, в DMT піднесучі з високим відношенням сигнал / шум (SNR) можуть бути розподілені з форматами модуляції високого порядку, тоді як піднесучі з низьким SNR призначаються форматами модуляції низького порядку, що призводить до розширення використання спектру.

Загалом, M-PSK має меншу складність реалізації та нижчий рівень енергоспоживання, в той час як DMT має очевидні переваги з точки зору використання спектра та надійності у випадку нелінійної реакції каналу.

## Висновки

В дослідженні виконано аналіз оптичних комунікаційних мереж великої ємності локального призначення. Зокрема, зосереджена увага на волоконно-оптичних мережах доступу з відстанню поширення сигналу в десятки кілометрів та оптичних мережах центрів обробки даних з відстанню передачі в декілька кілометрів.

Діапазон MMW здатний забезпечити велику пропускну здатність, ставши перспективним варіантом для задоволення зростаючих вимог до пропускну здатності бездротової мережі доступу. Однак серйозне послаблення потужності сигналів при бездротовому розповсюдженні надзвичайно обмежує використання діапазону MMW. Завдяки низькому загасанню сигналу, широко розглядається техніка RoF, яка забезпечує зв'язок між центральним офісом та антенами. З огляду на це запропоновано двосмугову схему генерації MMW, яку називаємо схемою генерації спектра у модифікованій формі, яка може подвоїти робочу смугу пропускання. Оптичний носій може бути використаний для передачі, тоді як двосмугові MMW, що несуть різні дані для нижніх потоків, генеруються прямим биттям між симетричними бічними смугами «долонеподібного» спектра. Запропонована схема генерації спектра може забезпечити значно вищий OSSN і, отже, кращі показники передачі у вихідному напрямку порівняно з оптичним частотним фільтром, де всі довжини хвиль мають однакову потужність. Крім того, за допомогою моделювання було перевірено доцільність використання запропонованої генерації спектра у модифікованій формі в системі RoF.

У випадку мереж оптичних центрів обробки даних, ми зосередились на енергоефективних рішеннях оптичного взаємозв'язку, тобто POI. Методологія оцінки масштабованості розроблена з урахуванням основних спотворень передачі в ультракороткомк діапазоні в мережах ЦОД, тобто втрат потужності та шуму приймача. Крім того, інші параметри фізичного рівня, такі як пропускну

здатність приймача, формат модуляції, інтервал між символами та порогові значення, також були враховані в запропонованій системі оцінки масштабованості.

Оцінено масштабованість архітектур POI на основі розгалужувача. Результати показали, що POI, що базується на розгалужувачі, здатний з'єднати між собою більше 500 портів, що підходить для малого або середнього центру обробки даних. Також запропоновано покращити масштабованість шляхом введення лише однієї EDFA в архітектуру POI на основі розгалужувача. При цьому потужність комутації може бути покращена в 16 разів. Крім того, також вивчений взаємозв'язок між масштабованістю системи та різними розширеними форматами модуляції, а також досліджена ефективність передачі сигналів PAM і DMT в короткодоступній оптичній лінії зв'язку. Цифрова обробка сигналу покращує продуктивність передачі, а отже, і масштабованість.

Показано, що PAM перевершує DMT з точки зору продуктивності передачі, коли швидкість передачі даних становить 10 Гбіт / с і 20 Гбіт / с. Крім того, масштабованість POI, що використовує PAM та DMT, досліджується із застосуванням різних методів FEC.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. X. Yin, F. Blache, B. Moeneclaey, J. Van Kerrebrouck, R. Brenot, and G. Coudyzer, "40-Gb / s TDM-PON downstream with low-cost EML transmitter and 3-level detection APD receiver," in Optical Fiber Communication Conference, 2016.
2. V. Olmos, J. José, T. Monroy, N. Eiselt, J. Wei, H. Griesser, A. Dochhan, M. Eiselt, and J. Elbers, "First Real-Time 400G PAM-4 Demonstration for Inter-Data Center Transmission over 100 km of SSMF at 1550 nm," Optical Fiber Communication Conference (OFC), 2016.
3. J. Lee, P. Dong, N. Kaneda, and Y.-K. Chen, "Discrete Multi-Tone Transmission for Short-Reach Optical Connections," Optical Fiber Communication Conference (OFC), 2016.
4. M. P. Anastasopoulos, A. Tzanakaki, and D. Simeonidou, "Scalable Monitoring and Optimization Techniques for Megascale Data Centers," J. Light. Technol., vol. 34, no. 8, pp. 1980–1989, 2016.
5. Антонюк Г.Л. Високошвидкісні оптичні мережі доступу/ М.В. Васильківський, Г.Л. Антонюк, О.С. Полуденко, К.О. Коваль. – Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2017, №2. – с. 57-62.

**Антонюк Ганна Леонідівна** — аспірант групи АС-20, кафедра ТКСТБ, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: annaantonuik@gmail.com

**Стальченко Олександр Володимирович** – доцент кафедри ТКСТБ, Вінницький національний технічний університет

**Полуденко Ольга Сергіївна** — аспірант групи АС-19, кафедра ТКСТБ, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: olha.poludenko@gmail.com

Науковий керівник: **Васильківський Микола Володимирович** — канд. техн. наук, доцент кафедр телекомунікаційних систем і телебачення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mvasytkivskyi@gmail.com

**Antonuk Hanna L.** — Department of Telecommunication system and television, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email : annaantonuik@gmail.com

**Stalchenko Oleksandr V.** - Associate Professor of Telecommunication system and television, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email : rtt.poludenko@gmail.com

**Poludenko Olha S.** — Department of Telecommunication system and television, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email : rtt.poludenko@gmail.com

Supervisor: Supervisor: **Vasytkivsky Mykola V.**— Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Telecommunication system and television, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia