

Гніденко М.П., к.т.н.; Ільїн О.О., д.т.н.; Серих С.О., к.т.н.;  
Прокопов С.В., к.т.н.; Бондарчук А.П., д.т.н.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ З ВИСОКОЮ ЩІЛЬНІСТЮ ПІД ВЕЛИКИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

**Hnidenko N.P., Pyin O.A., Sierykh S.A., Prokopov S.V., Bondarchuk A.P. Investigation of the features of very high-density wireless local area network under high load.**

The possibility of taking into account some fundamental reasons affecting the performance of wireless networks with high density under heavy load is considered. It is shown that when building a wireless network with a high density, it is necessary to ensure the proper ratio of signal level to noise level throughout the service area (high signal power), efficient use of air time and sufficient bandwidth to serve a large number of subscribers. It was shown that the size of the collision domain is much larger than the cell size, and therefore the distant subscribers decode the preamble, still designate the channel as busy for the entire frame duration, even if the payload cannot be restored. The use of airtime significantly affects the operation of a wireless network under high load. With the increase in the number of subscribers, the transmission capabilities significantly decrease, since the payload takes less and less airtime to send, and the rest of the airtime is consumed by the overhead of the MAC protocol and framing. Thus, in essence, the channel has to work harder and harder to transmit less and less data.

**Key words:** Very High Density (VHD), Wireless Local Area Network (WLAN), Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA), Transmit Opportunity (TXOP).

**Гніденко М.П., Ільїн О.О., Серих С.О., Прокопов С.В., Бондарчук А.П. Дослідження особливостей роботи безпроводових мереж з високою щільністю під великим навантаженням.**

Розглянута можливість врахування деяких фундаментальних причин, що впливають на ефективність роботи безпроводових мереж з високою щільністю під великим навантаженням. Показано, що при побудові безпроводової мережі з високою щільністю необхідно забезпечити належне відношення рівня сигналу до рівня шуму по всій зоні обслуговування (велику потужність сигналу), ефективне використання ефірного часу та достатню пропускну здатність для обслуговування великої кількості абонентів.

**Ключові слова:** Дуже висока щільність (VHD), безпроводова локальна мережа (WLAN), множинний доступ з контролем несучої та униканням колізій (CSMA/CA), передавальні можливості (TXOP).

**Гниденко Н.П., Ильин О.О., Серых С.О., Прокопов С.В., Бондарчук А.П. Исследование особенностей работы беспроводных сетей с высокой плотностью под большой нагрузкой.**

Рассмотрена возможность учета некоторых фундаментальных причин, влияющих на эффективность работы беспроводных сетей с высокой плотностью под большой нагрузкой. Показано, что при построении беспроводной сети с высокой плотностью необходимо обеспечить должное отношение уровня сигнала к уровню шума по всей зоне обслуживания (большую мощность сигнала), эффективное использование эфирного времени и достаточную пропускную способность для обслуживания большого количества абонентов.

**Ключевые слова:** Очень высокая плотность (VHD), беспроводная локальная сеть (WLAN), множественный доступ с контролем несущей и избеганием коллизий (CSMA/CA), возможности передачи (TXOP).

### Вступ

Локальна безпроводова мережа WLAN (Wireless Local Area Network) з дуже високою щільністю VHD (Very High Density) визначається як зона радіочастотного покриття з великою кількістю безпроводових клієнтів і точок доступу в одному фізичному просторі. Іншими словами, VHD WLAN є такою, яка призначена для обслуговування від 100 і до 500 безпроводових пристроїв на комірку.

© Гніденко М.П., Ільїн О.О., Серих С.О., Прокопов С.В., Бондарчук А.П., 2019

Висока концентрація користувачів у будь-якому середовищі з високою щільністю створює проблеми для розробки та розгортання безпроводової мережі. Тому при плануванні мереж Wi-Fi в зонах з надвисокою щільністю підключень слід дотримуватися наступних основних правил [1,2,3]:

використовувати точки доступу з підтримкою сучасних стандартів 802.11ac, 802.11ac wave2 для досягнення високих швидкостей і обслуговування більшої кількості клієнтів за одиницю часу;

використовувати точки доступу з хорошою антеною схемою (MIMO 3x3/4x4; максимально намагатися відмовлятися від діапазону 2.4 ГГц;

скорочення зони дії радіокомірок і підвищення їх пропускної спроможності за рахунок відключення старих стандартів (802.11b);

скорочення кількості SSID (в ідеалі до 1) для зменшення кількості службового трафіку і підвищення продуктивності мережі;

використання відкритої мережі для більш швидкої асоціації клієнтів і їх роумінгу.

І це далеко не всі тонкощі, які слід враховувати при плануванні Wi-Fi-мережі високої щільності. При проектуванні мереж надзвичайно високої щільності справедливо побоюються впливу радіосигналів сторонньої природи на мережі Wi-Fi. Однак зазвичай більшу частину інтерференції складають саме перешкоди від сторонніх мереж IEEE 802.11 [4,5]. Щоб врахувати ці особливості побудови мереж надзвичайно високої щільності, необхідно розглянути деякі фундаментальні причини, що впливають на ефективність їх роботи. Перш за все, розглянуто вплив домену колізій на роботу безпроводової мережі надвисокої щільності та можливості його врахування при проектуванні мережі. Потребує також детального аналізу вплив на роботу безпроводової мережі структури ефірного часу та ефективність роботи точок доступу під високим навантаженням [6]. Оскільки розгляд безпроводової мережі високої щільності здійснюється з точки зору технологій Aguba, необхідно врахувати також можливість її практичної реалізації на основі точок доступу з необхідними параметрами. Показані результати дають можливість зупинити свій вибір при побудові безпроводових мереж високої щільності на точках доступу, які показують кращі результати при високому навантаженні.

### **1. Вплив домену колізій на роботу безпроводової мережі надвисокої щільності**

Канал передачі даних у безпроводовій мережі за своєю сутністю представляє собою домен колізій стандарту 802.11. В радіосистемах може виникати інтерференція один з одним, якщо два передавачі намагаються здійснити передачу одночасно на одній і тій же частоті. Для усунення колізій застосовується множинний доступ з уникненням колізій (CSMA/CA - Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance), але це впливає на швидкість передачі.

Комірка не являється синонімом домена колізій. Комірки зазвичай є інженерними областями, де SINR (відношення сигнал/шум) або RSSI (відносна отримана інтенсивність сигналу) перевищує конкретне цільове значення. Так званий «край комірки» - це радіальна відстань від точки доступу, на якій це значення використовується. Однак, домен колізій продовжується до тих пір, поки SINR не перейде нижче порогу виявлення преамбули (PD - preamble detection).

Швидкість передачі даних залежить безпосередньо від відношення/шум (SINR), що вимірюється на приймачі. «Краї» домену колізій є SINR, необхідний для декодування Signal field (L-SIG) Legacy Preamble, який повинен бути надісланий за допомогою модуляції BPSK (Binary Phase Shift Keying). BPSK вимагає SINR 4 дБ. Преамбули, які опускаються нижче цієї величини, стають шумом. Отже, фізичний край будь-якого домену колізій завжди визначається як відстань, на якому SINR дорівнює 4 дБ.

Рис. 1 є двовимірним фрагментом моделі, який фокусується на осях швидкості передачі даних і відстані.

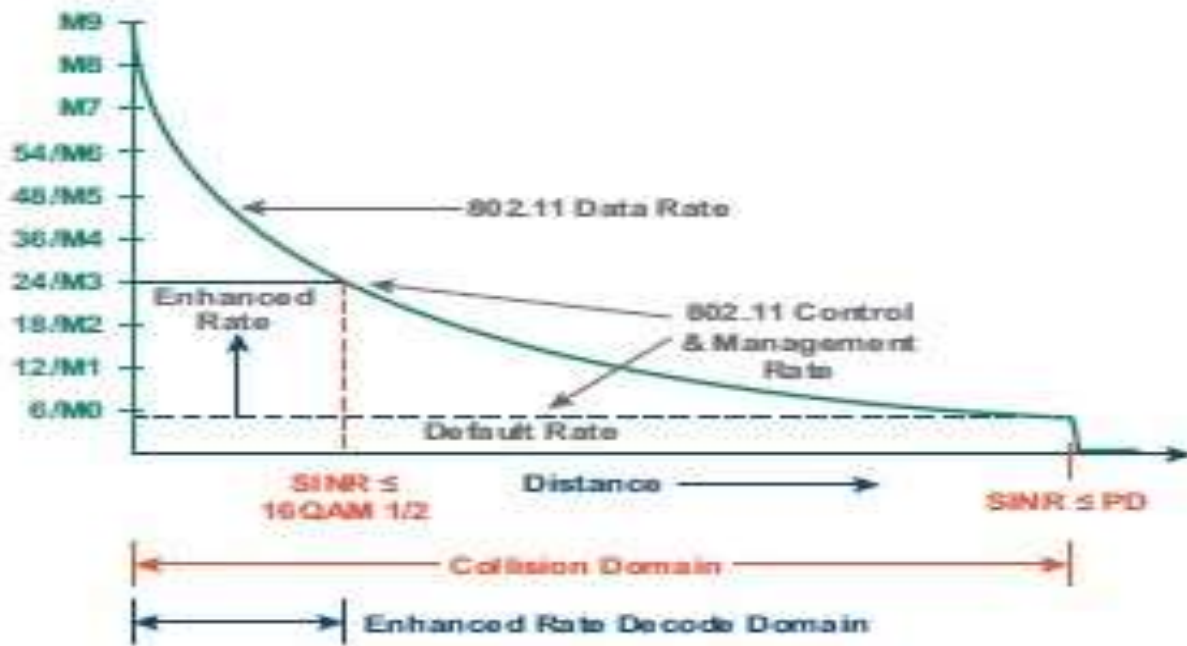


Рис. 1. Використання моделі домену колізій для розуміння швидкості передачі даних

Цей графік показує кілька важливих моментів:

середня швидкість передачі даних РНУ, яка використовується для кадрів даних між будь-якою станцією (STA) і AP, повинна слідувати кривій швидкості, показаної зеленим кольором. Якщо швидкість, яка спостерігається в реальності, менша, ніж очікувалося, це вказує на оперативну проблему або проблему з проектуванням системи;

середня швидкість передачі даних РНУ, що використовується для контрольних кадрів, повинна бути якомога вищою для забезпечення надійності. На рисунку показана пунктирна синя лінія для встановлення за замовчуванням 6 Мбіт/с і суцільна синя лінія для налаштування 24 Мбіт/с (16-AM модуляція з  $\frac{1}{2}$  кодування);

середня швидкість передачі даних РНУ, яка використовується для кадрів управління, повинна бути набагато вищою, ніж за замовчуванням з тих же причин.

Рисунок 1 також виправляє загальне непорозуміння між інженерами та архітекторами WLAN. Загальноприйнята думка полягає в тому, що при збільшенні швидкості передачі даних для контрольних та керуючих кадрів розмір комірки «стискається». Більш високий SINR необхідний для декодування більш швидкої швидкості, так що корисне навантаження не декодується поза певною точкою. Таке ж мислення стоїть за загальною практикою «вирівнювання» низьких швидкостей передачі даних OFDM.

Однак діаграма чітко показує, що якщо змінюється коефіцієнт корисного навантаження, це зміна не змінює діапазон перешкод виявлення попередньої преамбули. Ці преамбули повинні бути надіслані за допомогою BPSK і їх не можна змінювати. Тому розмір домену колізій не змінюється. Далекі STA, які декодують преамбулу, все ще позначають канал як зайнятий протягом усього тривалості кадру, навіть якщо корисне навантаження не можна відновити.

Якщо існують дві точки доступу і вони перекриваються, то вони не є незалежними в часі в цій області домену колізій.

Тут модель ясно показує, що ці дві комірочки фактично є єдиним доменом колізій. Навіть якщо коефіцієнти корисного навантаження даних і контрольних кадрів були збільшені згідно з кращими практиками цього VRD, дві клітини є одним доменом колізій. Потужність радіосигналу падає в геометричній прогресії, тому спочатку вона швидко падає, а потім продовжується на дуже великій відстані.

## 2. Структура ефірного часу, яку необхідно враховувати при побудові безпроводових мереж надвисокої щільності

На найвищому рівні 802.11 ефірний час можна розглядати як безперервний ряд змінюючих один одного періодів простою та зайнятості на даному каналі (або домені колізій). Довжина кожного періоду вимірюється в одиницях часу, наприклад, мілісекунди (мс) або мікросекунди (мкс). При перегляді на цьому високому рівні, час, необхідний для кожного періоду, постійно змінюється.

Рис. 2 показує чередування періодів простою та зайнятості на трьох сусідніх каналах, що не перекриваються.

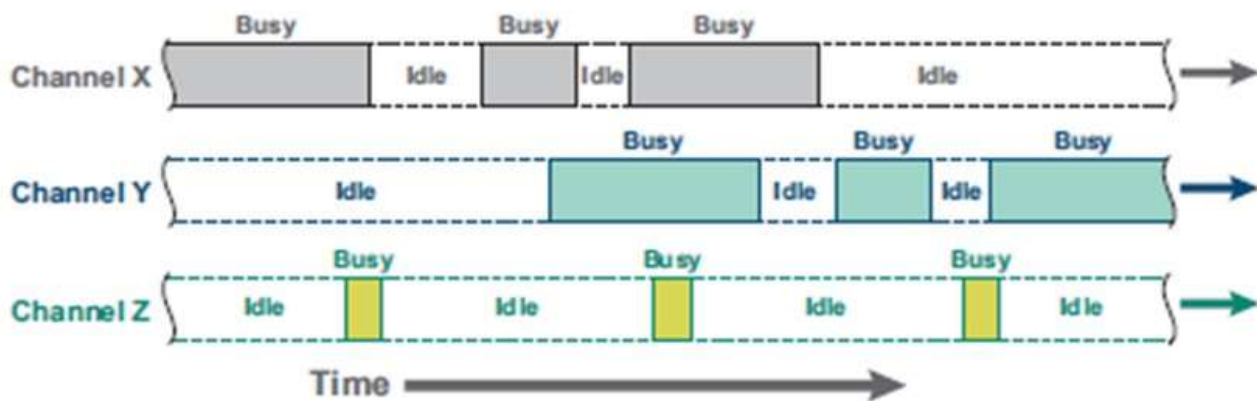


Рис. 2. Чередування періодів очікування та зайнятості на трьох каналах

У період часу, який охоплюється діаграмою, канал X розпочинається в момент середини передачі, а потім закінчується в режимі очікування. Канал Y розпочинається в режимі очікування і закінчується зайнятим. Канал Z неактивний, за винятком періодично повторюваних передач, таких як маяк точки доступу (AP).

Для більш детального розгляду структура ефірного часу збільшимо масштаб і будемо фокусуватися на тому, щоб розглянути більш деталізовано як один радіоканал 802.11 організований на рівні MAC.

Wi-Fi використовує технологію, яка називається множинним доступом на основі несучої з уникненням зіткнення (CSMA/CA або просто CSMA), щоб упорядкувати канал. За допомогою CSMA ефірний час поділяється на зайняті одиниці, які називаються передавальними можливостями TXOPs (Transmit Opportunity) і часу простою. Час простою далі розбивається на арбітражні періоди та дійсного простою (коли жоден пристрій не має нічого для відправки). Станції змагаються один з одним, щоб отримати контроль над каналом в процесі, званому арбітражем. Немає центрального планувальника. Станція, яка виграє арбітражний процес, стає власником TXOP і має виключне використання каналу до ліміту TXOP.

Стандарт 802.11 TXOP технічно починається з моменту, коли будь-яка станція на каналі виграє арбітраж. У 802.11ас всі корисні навантаження даних повинні бути надіслані за допомогою цього формату. Базовий TXOP 802.11ас показаний на рис. 3. Він складається з наступних компонентів:

кадру Ready to Send (RTS) передує арбітражний період;  
 кадру Clear to Send (CTS) передує SIFS (Short Inter-Frame Space);  
 кадру Aggregated MAC protocol data unit (A-MPDU) передує SIFS (Short Inter-Frame Space);  
 кадру підтвердження блоку передує SIFS (Short Inter-Frame Space);  
 У 802.11ac фактично всі TXOP починаються з обміну RTS/CTS, щоб дозволити функції динамічної смуги пропускання каналу визначити, скільки підканалів є чистими.

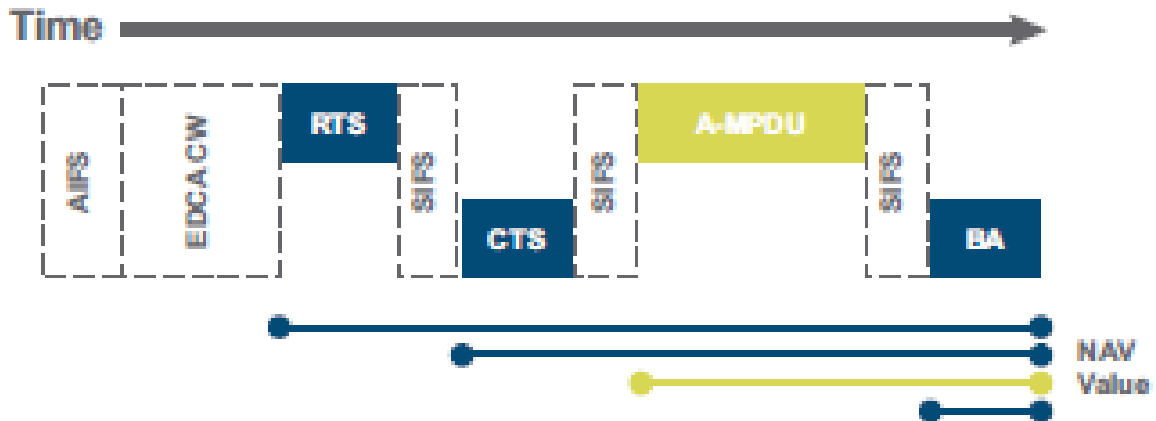


Рис. 3. Структура TXOP у часовому домені

Заглиблюючись у більш глибокі деталі, ми повинні ще більше збільшити структуру ефірного часу, щоб побачити, що кожен кадр 802.11 насправді складається з двох або більше частин. Ці частини є преамбулою (ами) і корисним навантаженням. Рис. 4 показує цю розбивку і показує, що існує більше одного типу преамбули.

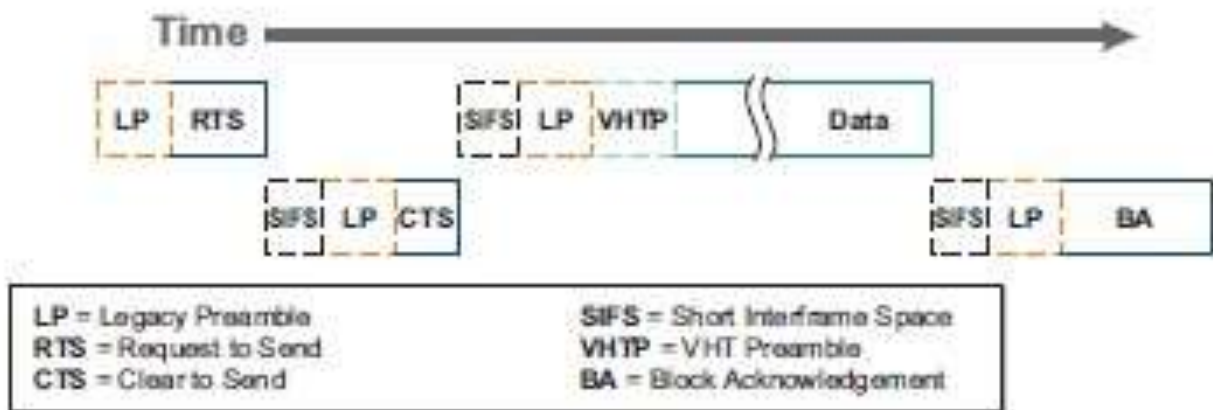


Рис. 4. Структура TXOP включаючи преамбулу

Преамбула є інструментом, який використовується радіо для завантаження кожного кадру. Преамбула містить різні елементи, що використовуються радіо для блокування передачі, а також ряд полів даних, які описують, як обробляти корисне навантаження. Існує декілька типів преамбул, із яких розглянемо два – стара преамбула (legacy preamble - LP) і преамбула Very High Throughput Preamble (VHTP). VHTPs передують LP, щоб забезпечити сумісність із застарілими станціями. Преамбули споживають значну кількість ефірного часу.

Не заглиблюючись у TXOP, ви повинні побачити, що ключ до продуктивності в зонах VHD з багатьма станціями - це мінімізувати зайнятий час і максимізувати час простою. Час простою максимальний, коли:

усуваються непотрібні TXOP;  
 потрібні TXOP завершуються за декілька мікросекунд;  
 повторні передачі невдалих TXOP мінімізуються.

При проектуванні VRD необхідно звертати особливу увагу на ці три принципи. Якщо обслуговуються сотні або тисячі клієнтів, то кожен зайнятий період забирає потенціал у когось іншого. Необхідно взяти безжалісно критичний погляд на все споживання ефірного часу. Здатність розгортати успішні мережі VHD залежить від того, наскільки добре і наскільки міцно дотримуєтеся цих принципів.

Тепер оновлюємо рис. 4 зі структурою TXOP, щоб відобразити всі складові частини та швидкість передачі даних. Наразі припускаємо, що швидкість керуючих даних така ж, як швидкість преамбули: 6 Мбіт/с. Ігноруємо AIFS і вікно конфлікту. На рис. 5 наведені ці зміни.

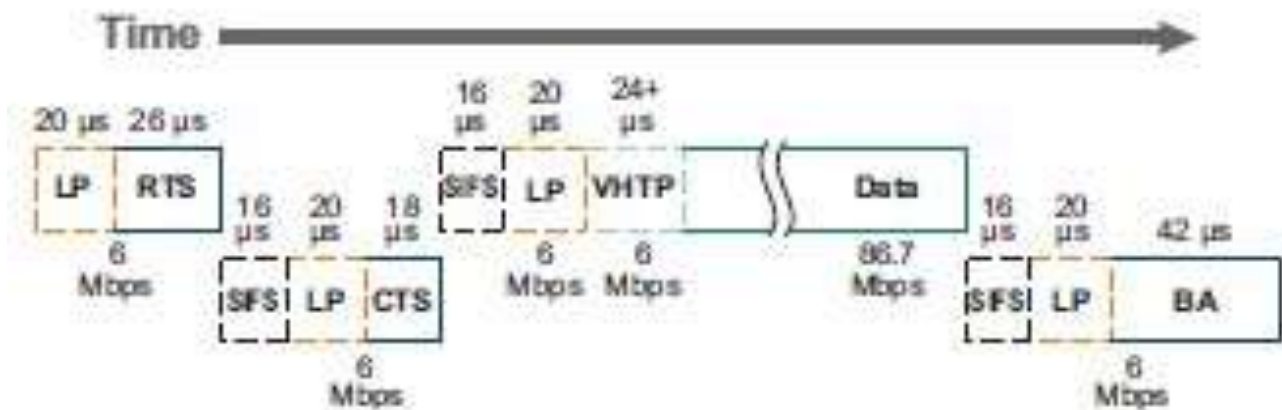


Рис. 5. Детальна структура TXOP зі швидкістю передачі даних преамбули

Перші 20 мкс або більше кожного окремого кадру споживається старую преамбулою, яка передається з найменшою швидкістю 6 Мбіт/с. Таку швидкість передачі даних налагоджено на 802.11 і не може бути змінена.

Преамбула VHT вимагає мінімум 24 мкс і може бути ще довшою, якщо потрібні додаткові довгі поля тренування (LTF). У 802.11ac існує, як правило, один LTF, необхідний для просторового потоку. VHTP-кадри вимагають LP і VHTP для загального мінімального ефірного часу преамбули щонайменше 44 мкс,

Розглянемо один з найбільш поширених кадрів MPDU, відправлених на будь-якій проводовій або безпроводовій мережі - 90-байтове підтвердження (acknowledgment) TCP. Припустимо, що він передається пристроєм 1SS VHTP20 при максимальній швидкості MCS8. Потрібне час ефіру 8,3 мкс. У порівнянні з 44 мкс VHTP, преамбула вимагає 5,3 рази більше ефірного часу, ніж TCP acknowledgment корисного навантаження! І цей час не включає арбітраж або іншу структуру TXOP.

Тепер є достатня кількість інформації для побудови калькулятора часу кадру. Необхідно розпочати з встановлення кожного компонента TXOP у лівій колонці в порядку, в якому він відбувається. Потім заповнюють фіксовані елементи тривалості, включаючи SIFS (16 мкс), LP (20 мкс), VHTP (24 мкс). Потім додайте рядки для обчислення ефірного часу для кожного з чотирьох корисних даних. Додайте фіксований байт для RTS (20), CTS (14) і BA (32). Додайте динамічне поле для MPDU; ось де ми будемо змінювати розмір корисного навантаження, щоб зробити аналіз "що, якщо". Наразі припустимо, що корисне навантаження даних становить 512 байт. У 802.11ac кожному MPDU передую 4-байтовий

роздільник MPDU. Помножите кількість байтів на 8, щоб отримати біти, а потім поділіть на швидкість передачі даних.

Останнім кроком є додавання стовпця для швидкості передачі даних для п'яти типів кадрів з корисним навантаженням. Ми встановлюємо контрольні кадри за замовчуванням 6 Мбіт/с, а дані MPDU - 86,7 Мбіт/с. Якщо ви все це побудуєте в електронній таблиці, вона повинна виглядати так, як показано у табл. 1.

У цьому прикладі для передачі TXOP потрібно 287,61 мкс, за винятком арбітражу. З цього періоду 512 байт даних корисного навантаження займають трохи більше 16% ефірного часу для відправки. Решта 84% ефірного часу споживається накладними витратами протоколу MAC і кадрівання.

### 3. Робота каналу під високим навантаженням.

Тепер, коли є чітке розуміння ефірного часу для окремих можливостей передачі (TXOP), розглянемо, як працює весь канал, коли сотні пристроїв намагаються використовувати його одночасно.

Таблиця 1. Структура ефірного часу

| MAC Unit   | Payload Bytes | Payload Bits | Data Rate | µsec          | % Airtime     |
|--|---------------|--------------|-----------|---------------|---------------|
| Legacy Preamble  |               |              | 6 Mbps    | 20.00         | 7.0%          |
| RTS  | 20            | 160          | 6 Mbps    | 26.67         | 9.3%          |
| SIFS   |               |              |           | 16.00         | 5.6%          |
| Legacy Preamble  |               |              | 6 Mbps    | 20.00         | 7.0%          |
| CTS  | 14            | 112          | 6 Mbps    | 18.67         | 6.5%          |
| SIFS   |               |              |           | 16.00         | 5.6%          |
| Legacy + VHT Preambles   |               |              | 6 Mbps    | 44.00         | 15.3%         |
| A-MPDU Delimiter   | 4             | 32           | 86.7 Mbps | 0.37          | 0.1%          |
| Data Frame Payload   | 512           | 4096         | 86.7 Mbps | 47.24         | 16.4%         |
| SIFS   |               |              |           | 16.00         | 5.6%          |
| Legacy Preamble  |               |              | 6 Mbps    | 20.00         | 7.0%          |
| BA   | 32            | 256          | 6 Mbps    | 42.67         | 14.8%         |
| <b>Airtime for TXOP only (excluding arbitration)</b>             |               |              |           | <b>287.61</b> | <b>100.0%</b> |
| <b>Effective TXOP rate for TXOP only (excluding arbitration)</b> |               |              |           | <b>16.2</b>   |               |

Ключове питання, на яке необхідно відповісти: Чому загальна пропускна здатність каналу 802.11 зменшується, як тільки кількість станцій, які намагаються його використовувати, збільшується?

У 2010 року для VRD, Aruba опублікувала дослідження, які показують, що загальна сукупна пропускна здатність каналу 802.11 знижується, як тільки при тестуванні використовується 50 пристроїв. З тих пір інші великі постачальники WLAN повідомляли про подібні висновки.

Aruba вирішила збільшити розмір тесту на 100 одночасних пристроїв, дослідити вплив різних чисел просторових потоків та пояснити основний механізм цього ефекту.

Для досягнення цих цілей, була побудована випробувальна лабораторія VHD з 300 пристроями 802.11ac. Тестова лабораторія має три площадки по 100 пристроїв. Один площадка зі 1SS смартфонами, інший зі 2SS ноутбуками, а третій - 3SS ноутбуки. Завдяки

цьому обладнанню можна вивчати широкий спектр комбінацій пристроїв, щоб відповісти на важливі запитання про продуктивність VHD.

*Пропускна здатність каналу зворотно пропорційна кількості клієнтів.*

Одним з найважливіших явищ, що регулюють продуктивність каналу Wi-Fi у середовищі з високою щільністю, є те, що потужність зменшується при навантаженні.

Наприклад, на рис. 6 показані результати для 100 тестів станцій телефону 1SS, 2SS ноутбука і ноутбука 3SS у каналі VHT20. На цій діаграмі горизонтальна вісь - це кількість STA в тесті. Зверніть увагу, що загальна пропускна здатність зменшується зліва направо, оскільки ми збільшуємо кількість STA від 1 до 100.

Така поведінка є фундаментальною властивістю 802.11. Ви побачите цей тип кривої від кожного постачальника WLAN, з кожним клієнтським постачальником і в кожній ширині каналу. Така поведінка стосується 802.11a, 802.11n і 802.11ac.

Це, мабуть, навіть не дивно. Інтуїтивно зрозуміло, що Wi-Fi є спільним середовищем, схильним до колізій. Більше користувачів означає, що кожна станція отримує менше ефірного часу. Отже, розумно очікувати, що буде отримано менше загального позитивного результату на 100 станцій, ніж на 5 або 10 станцій.

Чи можна щось зробити для контролю або обмеження цього ефекту для відновлення частини втраченої пропускної здатності?

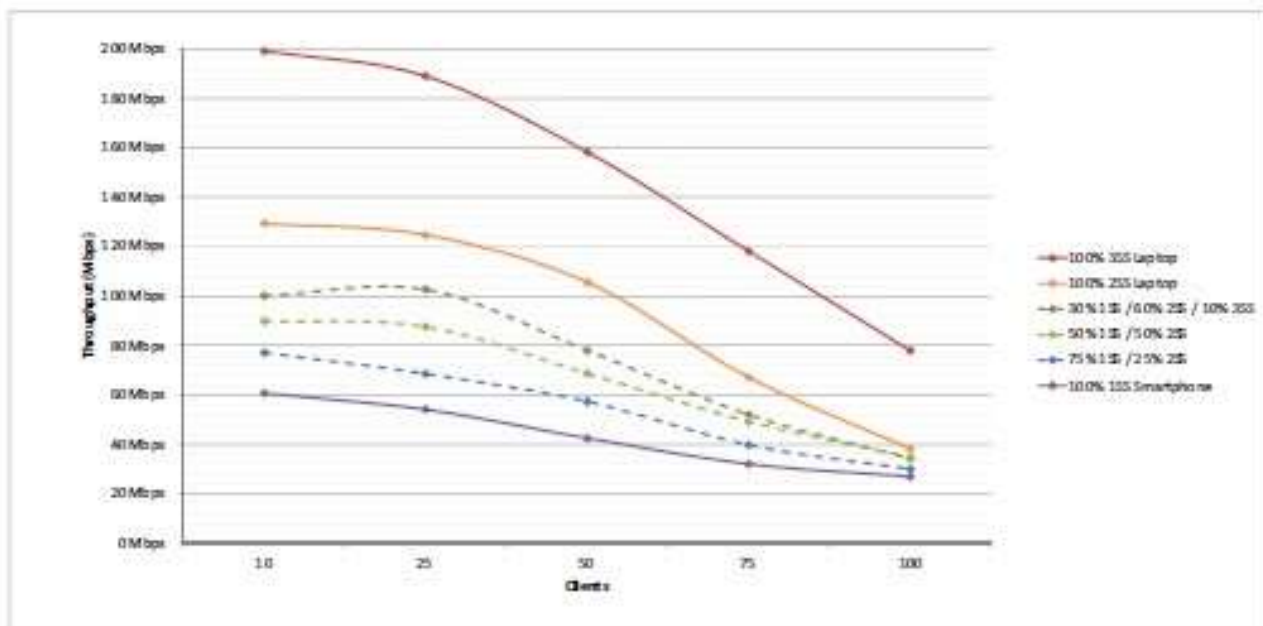


Рис. 6. Потужність зменшується, оскільки кількість клієнтів збільшується (AP-225, VHT20, TSP двонаправлена)

*Визначення конкурентної премії.*

Щоб почати аналіз, потрібен спосіб нормалізації результатів дуже різних видів тестів. Різні смуги пропускання каналів і різні значення просторового потоку дають дуже різні абсолютні пропускні числа. Так само роблять різні покоління обладнання.

Хорошим методом порівняння є уточнення результатів тестування масштабуванням клієнта на процентному рівні, використовуючи пропускну здатність однієї станції для цього тесту як 100%. Кожна з інших точок даних у тесті виражається у відсотках від пропускної здатності однієї станції. Якщо ми зробимо це з результатами для трьох різних типів клієнтів, показаних на Рисунку 6, ми можемо отримати уявлення про масштаб падіння. На Рисунку 7 показані дані у відсотковому форматі.



Aguba визначає термін "конкурентна премія", що означає різницю між сумарною сукупною пропускною спроможністю для однієї станції порівняно з більшою кількістю станцій. Для тесту, показаного на рис. 7, сума премії збільшується з середнього значення приблизно на 10% на 25 станціях до приблизно 60% на 100 станціях. Хоча ми бачимо деякі відмінності від клієнта до клієнта, узгодженість загальної тенденції цілком зрозуміла.

Тепер достатньо інформації, щоб зрозуміти причину і наслідки. Простіше кажучи, ось основний ланцюжок причинності, який відбувається:

зі збільшенням числа станцій в тесті ефективність упаковки A-MPDU різко падає (наприклад, кожна STA здатна посилати менше і менше MPDU на TXOP);

це падіння збільшує кількість TXOP, необхідних для передачі будь-якої заданої кількості даних корисного навантаження;

кожна TXOP вимагає повного арбітражу, тому загальна кількість ефірного часу, що споживається придбанням каналу, лінійно збільшується як кратне загальної кількості TXOP;

частка ефірного часу корисного навантаження кожного TXOP також знижується, що означає, що кожна TXOP менш продуктивна;

між тим, збільшення TXOP приводить до паралельного збільшення активності PS, тому що кожна STA повинна будити частіше, щоб відправляти менші і менші обсяги даних;

додаткове ефірний час втрачається для енергозбереження переходів, кожен з яких вимагає повного арбітражу. Це ще більше зменшує ефірний час для TXOP.

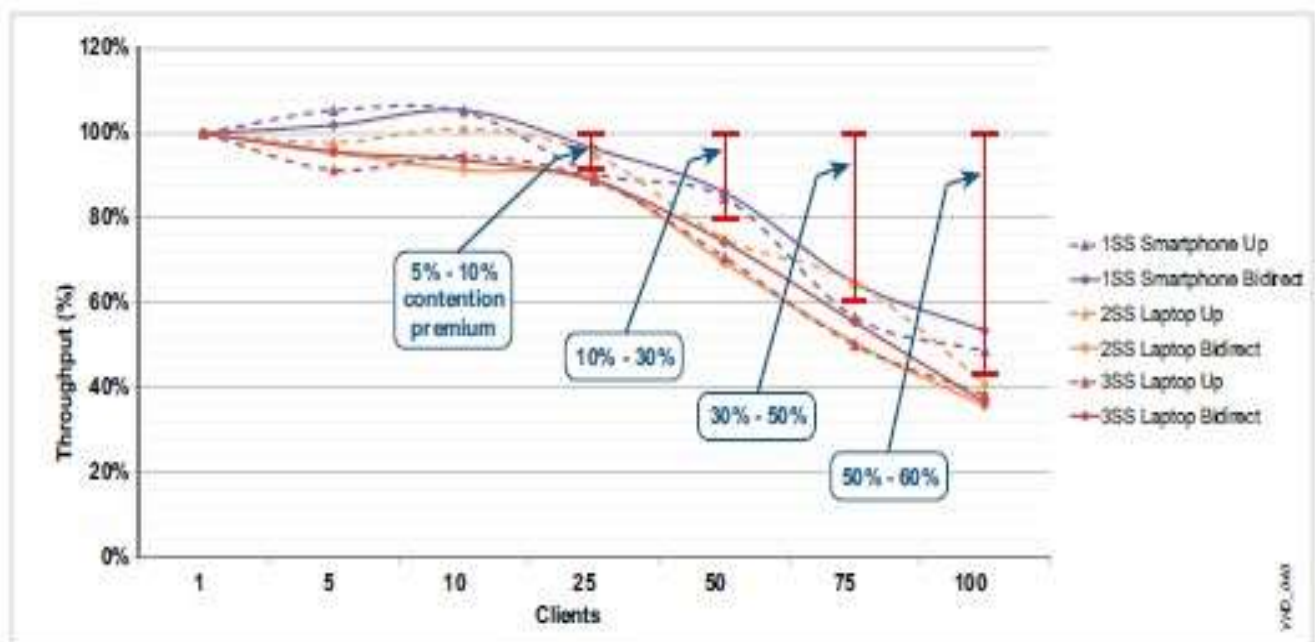


Рис. 7. Зміст премії як частка пропускної здатності однієї станції

## 5. Вибір точки доступу для побудови мереж з високою щільністю

Aguba пропонує повну лінійку точок доступу для внутрішнього та зовнішнього використання стандарту 802.11ac.

Щоб забезпечити максимальну швидкість та сумісність з пристроями в мережах з високою щільністю, Aguba рекомендує придбати лише 802.11ac AP для областей VHD.

Враховуючи наявності відмінностей процесора та пам'яті точок доступу, існує відмінність і в продуктивності між точками доступу AP-205, AP-215 і AP-225 (Рис. 8 та Рис. 9). Ці відмінності є основним і найбільш важливим аспектом, перш ніж розглядати інші відмінності функції.

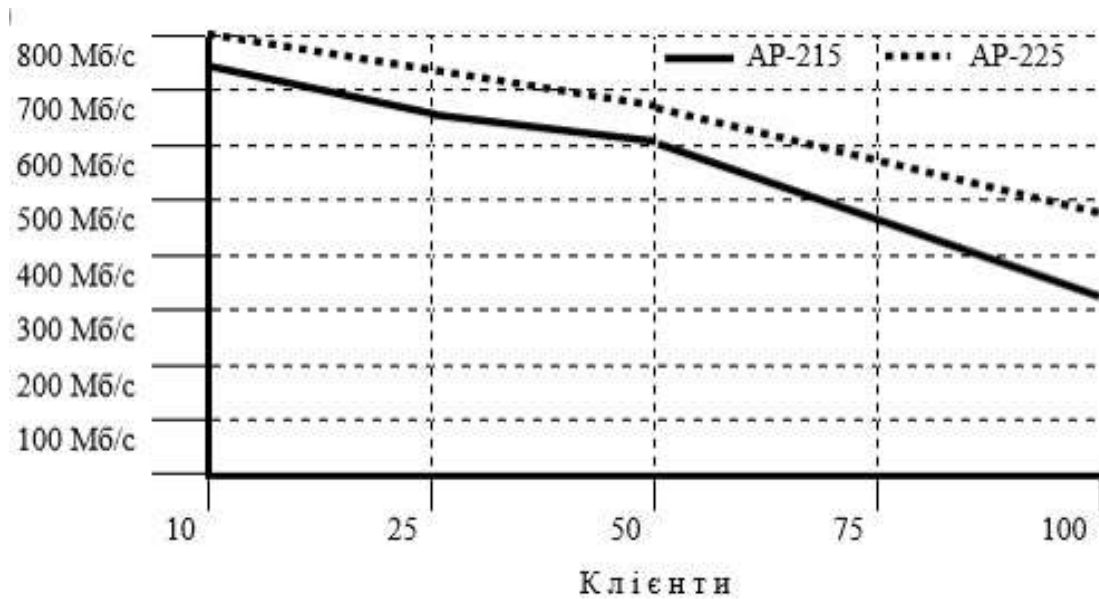


Рис. 8. Ноутбук 3SS у каналі VHTP80

Рис. 8 порівнює двонаправлену продуктивність TCP 100 різних ноутбуків 3SS MacBook Pro, як на AP-225, так і на AP-215. Вони підтримують повну пропускну спроможність ноутбуків. На малюнку показано, як змінюється загальна пропускну спроможність, оскільки ми збільшуємо кількість паралельних станцій від 10 до 100. Очікується, що загальна пропускну спроможність знижується зліва направо через зменшення ефективності та збільшення кількості зіткнень.

Рисунок 9 показує двонаправлену пропускну здатність TCP 100 різних ноутбуків 2SS MacBook Air (MBA). Ноутбуки протестовані проти всіх трьох моделей. При спілкуванні з AP-225 і AP-215, MBA обмежуються швидкістю передачі даних 2SS. На цьому рисунку є три ключові спостереження:

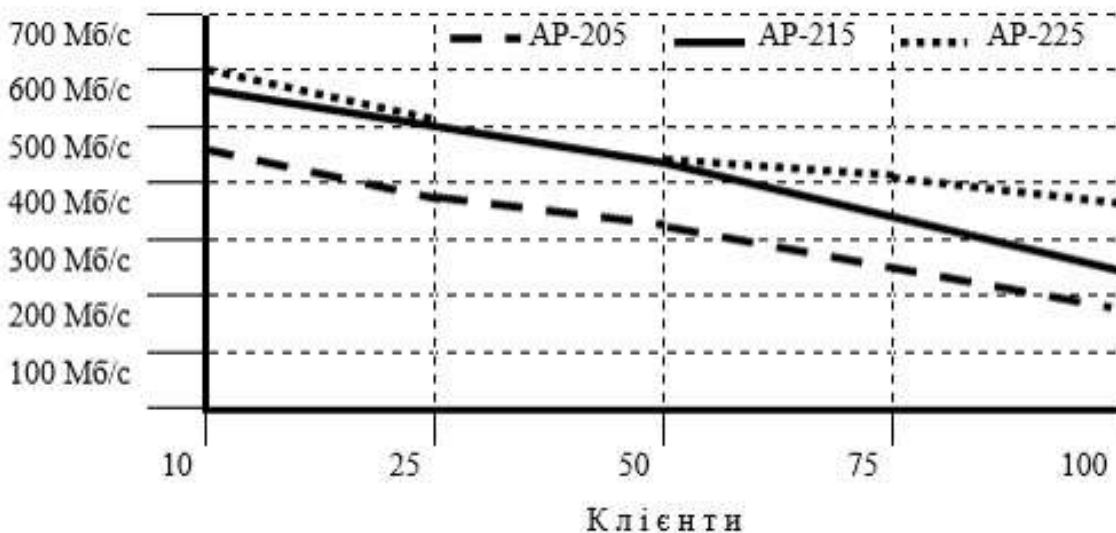


Рис. 9. Ноутбук 2SS у каналі VHTP80

AP-225 підтримує більшу пропускну спроможність, якщо більше 50 станцій одночасно намагаються використовувати WLAN;  
 AP-215 дуже подібний до AP-225;

AP-205 найкраще підходить для невеликих мереж, де максимально 25 користувачів, що використовують безпроводну мережу.

Можна побачити, що продуктивність високої щільності зростає при переході від AP-205 до AP-225. Швидкий процесор та більший обсяг пам'яті забезпечують більшу продуктивність при високих навантаженнях клієнтів. Цілком прийнятно використовувати AP-225 у VHD областях, навіть якщо безпроводна мережа рекомендована на обладнанні AP-205 або AP-215.

Рис. 10 показує продуктивність одного типу клієнта - 3SS MacBook Pro - проти AP-215 і AP-225.

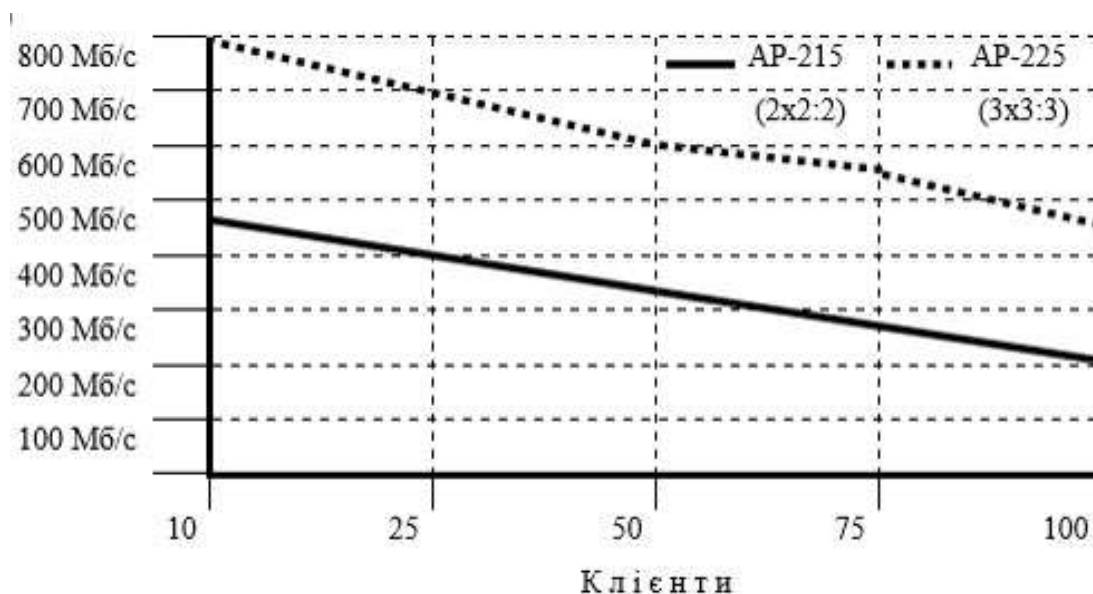


Рис. 10. 3SS клієнти вимагають 3SS AP, щоб досягти максимальної продуктивності

AP-215 підтримує два потоки, тоді як AP-225 підтримує три. AP-225 пропонує додатковий потік, тому клієнти можуть досягти значно більшої пропускної спроможності. Швидка пропускна здатність означає, що кожен клієнт виходить швидше, що дозволяє іншим станціям використовувати безпроводний носій.

### Висновки

При побудові безпроводної мережі з надвисокою щільністю на базі технології Aruba необхідно забезпечити належне відношення рівня сигналу до рівня шуму по всій зоні обслуговування (велику потужність сигналу), достатню пропускну здатність для обслуговування великої кількості абонентів. В радіосистемах 802.11 може виникати інтерференція між точками доступу (колізія домену), якщо вони намагаються здійснити передачу одночасно на одній і тій же частоті. Домен колізій продовжується до тих пір, поки відношення сигнал/шум (SINR) не перейде нижче порогу виявлення преамбули (PD). Завдяки цьому площа домена колізій набагато більше ніж площа комірки. Це необхідно враховувати при налаштуванні частотних каналів на окремих точках доступу.

Зі збільшенням числа станцій ефективність передачі корисного навантаження падає (кожна станція посилає його все менше і менше на кожен TXOP). Це падіння збільшує кількість TXOP, необхідних для передачі будь-якої заданої кількості даних корисного навантаження. Частка ефірного часу корисного навантаження кожного TXOP знижується, що означає, що кожна TXOP менш продуктивна. Збільшення TXOP приводить до того, що кожна станція повинна передавати частіше, щоб відправляти все менші і менші обсяги даних. У зв'язку з цим, при плануванні мережі Wi-Fi високої щільності необхідно збільшити

кількість точок доступу настільки, що подальше збільшення не буде змінювати сукупну ємність мережі. Навантаження на кожну точку доступу зменшиться, продуктивність мережі збільшиться.

При побудові безпроводових мереж високої щільності необхідно зупиняти свій вибір на точках доступу стандарту 802.11ac, та точках доступу які показують кращі результати при високому навантаженні.

### Список використаної літератури

1. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 5-е изд. — СПб.: Питер, 2016. — 992 с.
2. Смирнова Е.В., Пролетарский А.В. и др. Технологии современных беспроводных сетей Wi-Fi: учебное пособие под общей редакцией А.В. Пролетарского. — Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. — 446 с.
3. Pejman Roshan, Jonathan Leary. 802.11 Wireless Local-Area Network Fundamentals. Publisher: Cisco Press. Pub Date: December 23, 2003. Pages: 312.
4. Викулов А.С., Парамонов А.И. Введение в сети Wi-Fi с высокой плотностью // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Том 6. № 1. с. 12–20.
5. Викулов А. С., Парамонов А. И. Исследование нагрузки в сети стандарта IEEE 802.11 // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Т. 5. № 4. с. 1–7.
6. Chuck Lukaszewski. Very High Density 802.11ac Networks Validated Reference Design. 1344 CROSSMAN AVENUE, CALIFORNIA. Aruba Networks, Inc., 2015. Pages 110.

### Автори статті

**Гніденко Микола Петрович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

**Ільїн Олег Олександрович** – доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерних наук, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

**Серих Сергій Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

**Прокопов Сергій Васильович** - кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

**Бондарчук Андрій Петрович** – доктор технічних наук, директор інституту інформаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

### Authors of the article

**Hnidenko Nikolay Petrovich** - candidate of science (technic), associate professor of Department of Computer Science, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Ilyin Oleh Aleksandrovich** – doctor of science (technic), professor of Department of Computer Science, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Sierykh Sergiy Aleksandrovich** - candidate of Science (technic), Associate Professor of Department of Computer Science, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Prokopov Serhii Vasylovych** – candidate of Sciences (technical), associate professor of Department of Computer Science, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Bondarchuk Andrii Petrovych** – doctor of Science (technical), institute director of informative technologies, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Дата надходження в редакцію: 26.06.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Вишнівський