

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Факультет комп'ютерних наук
Кафедра теоретичної та прикладної системотехніки

«Затверджую»
Зав. кафедри теоретичної та
прикладної системотехніки
_____ д.т.н., проф. С. І. Шматков
«___» _____ 2023 р

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
бакалавра

на тему: «Метод визначення та управління пропускнуою спроможністю Mesh-
мережі»

Захищено на засіданні
Атестаційної комісії № 44
протокол № __ від __.06.2024 р.
Оцінка ____ / ____
Голова Атестаційної комісії
_____ Скоб Ю. О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Виконав:
студент 4 курсу, групи КУ– 41
Галузь знань: 15 – Автоматизація та
приладобудування
Спеціальність: 151 – «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»
Нестеренко Нікіта Сергійович


(підпис)

Керівник:
Старший викладач ЗВО кафедри ТПС
Павлов Анатолій Миколайович


підпис

Рецензент:
доцент ЗВО кафедри БІСТ, канд. техн. наук
Колованова Євгенія Павлівна

(підпис)

Харків – 2024

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і чотирьох додатків. Загальний обсяг роботи складає 59 сторінку, із яких 41 сторінок основної частини з 7 рисунками, 1 таблицею, 9 найменуваннями списку використаних джерел та трьома додатками.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка ефективного методу визначення та управління пропускнуою спроможністю Mesh-мережі для забезпечення стабільної та оптимальної передачі даних, з урахуванням специфічних характеристик та викликів, пов'язаних з Mesh-архітектурою.

Об'єкт дослідження – Mesh-мережі, їхня структура, функціонування та особливості, які впливають на пропускну спроможність.

Предмет дослідження – методи та алгоритми визначення та управління пропускнуою спроможністю Mesh-мереж, а також їх впровадження для оптимізації роботи мережі.

Завдання, яке вирішується в кваліфікаційній роботі полягає у розробці ефективного методу для визначення та управління пропускнуою спроможністю мережі типу Mesh. Вдосконалення процесу управління ресурсами мережі, що дозволить оптимізувати розподіл пропускнуої здатності для забезпечення кращої якості обслуговування для користувачів.

Область застосування – комп'ютерні мережі.

Ключові слова: метод, пропускну спроможність, Mesh-мережа.

ABSTRACT

The explanatory note to the bachelor's thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references and four appendices. The total volume of the work is 59 pages, including 41 pages of the main part with 7 figures, 1 table, 9 references and three appendices.

The purpose of the qualification work is to develop an effective method for determining and managing the bandwidth of a Mesh network to ensure stable and optimal data transmission, taking into account the specific characteristics and challenges associated with Mesh architecture.

The object of research is Mesh networks, their structure, functioning and features that affect throughput.

The subject of research is methods and algorithms for determining and managing the bandwidth of Mesh networks, as well as their implementation to optimize network performance.

The task that is solved in the qualification work is to develop an effective method for determining and managing the bandwidth of a Mesh network. Improving the process of managing network resources, which will optimize the allocation of bandwidth to provide better quality of service for users.

The field of application is computer networks.

Keywords: method, bandwidth, Mesh network.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ MESH-МЕРЕЖ	8
1.1 Визначення та основні топології Mesh-мереж.....	8
1.2 Використання Mesh-мереж	11
1.3 Переваги використання та особливості Mesh-мереж.....	15
Висновки за розділом 1	18
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ	20
2.1 Поняття пропускної спроможності мережі	20
2.2 Ключові показники пропускної здатності мережі	22
2.3 Математична модель розрахунку пропускної спроможності Mesh- мережі	24
2.4 Алгоритми та стратегії управління пропускною спроможністю.....	31
Висновки за розділом 2	33
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ	34
3.1 Показники пропускної спроможності.....	34
3.2 Умови й обмеження	35
3.3 Основні розрахункові співвідношення.....	36
Висновки за розділом 3	45
ВИСНОВКИ	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	48
ДОДАТКИ	49

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

WAN – (англ. Wide Area Network) широкомасштабна мережа;

MAC – (англ. Media Access Control) керування доступом до каналу передачі даних;

IoT – (англ. Internet of Things) Інтернет речей;

TCP/IP – (англ. Transmission Control Protocol/Internet Protocol) протокол керування передачею даних/Інтернет-протокол;

UDP – (англ. User Datagram Protocol) протокол користувацьких датаграм;

QoS – (англ. User Datagram Protocol) якість обслуговування;

ММО – мережа масового обслуговування;

DCA – (англ. Dynamic Channel Assignment) динамічне призначення каналів;

CACA – (англ. Channel Assignment for Cellular Architecture) призначення каналів для клітинної архітектури;

OLSR – (англ. Optimized Link State Routing) оптимізована маршрутизація стану зв'язку;

AODV – (англ. Ad hoc On-Demand Distance Vector) вектор відстані на вимогу для адгок-мереж;

ВСТУП

Сучасні бездротові мережі зазнають значних змін завдяки розвитку технологій і зростанню потреб користувачів у швидкому та надійному доступі до інформації. Однією з таких інноваційних технологій є Mesh-мережі, які дозволяють створювати гнучкі, масштабовані та надійні бездротові інфраструктури. Mesh-мережі складаються з безлічі вузлів, які можуть взаємодіяти один з одним без централізованого контролера, що забезпечує високий рівень стійкості та адаптивності мережі.

Одним з найважливіших аспектів функціонування Mesh-мереж є їх пропускна спроможність – здатність мережі передавати певну кількість даних за одиницю часу. Визначення та управління пропускною спроможністю є ключовими факторами, що впливають на якість обслуговування користувачів і загальну ефективність мережі. Проте, ці процеси ускладнюються через динамічну природу Mesh-мереж, варіативність трафіку та можливі перешкоди в бездротовому середовищі.

Актуальність теми. Дана тема зумовлена необхідністю розробки ефективних методів визначення та управління пропускною спроможністю Mesh-мереж, які б враховували їх специфічні особливості та забезпечували оптимальну продуктивність. Успішне вирішення цієї проблеми сприятиме покращенню якості обслуговування користувачів, підвищенню надійності та стабільності мереж, а також ефективнішому використанню наявних ресурсів.

Метою дослідження є розробка ефективного методу визначення та управління пропускною спроможністю Mesh-мережі для забезпечення стабільної та оптимальної передачі даних, з урахуванням специфічних характеристик та викликів, пов'язаних з Mesh-архітектурою.

Об'єкт дослідження – Mesh-мережі, їхня структура, функціонування та особливості, які впливають на пропускну спроможність.

Предмет дослідження – методи та алгоритми визначення та управління пропускнуою спроможністю Mesh-мереж, а також їх впровадження для оптимізації роботи мережі.

Методи дослідження: математичне моделювання, експериментальні дослідження, аналіз та обробка даних.

Завдання дослідження

1. Аналіз існуючих підходів до визначення та управління пропускнуою спроможністю Mesh-мереж.
2. Створення системи управління пропускнуою спроможністю Mesh-мереж на основі запропонованих алгоритмів.
3. Проведення експериментальних досліджень для оцінки ефективності розробленого методу.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ MESH-МЕРЕЖ

1.1 Визначення та основні топології Mesh-мереж

Mesh-мережа - це архітектура локальної мережі, в якій вузли інфраструктури (такі як мости, комутатори та інші пристрої інфраструктури) з'єднуються безпосередньо, динамічно і неієрархічно з якомога більшою кількістю інших вузлів, щоб ефективно передавати дані клієнтам і отримувати їх від них.

Кожен вузол може брати участь у ретрансляції інформації через відсутність залежності від одного вузла. Mesh-мережі автоматично організовуються і конфігуруються, що може знизити навантаження на установку. У випадку, якщо кілька вузлів виходять з ладу, здатність до самоконфігурації забезпечує динамічний розподіл навантаження [1].

Всі комп'ютери з'єднані один з одним у своєрідну мережу, яка називається комірчастою топологією. З'єднання між пристроями в комірчастій топології здійснюються випадковим чином. Комп'ютери, комутатори, концентратори та інші пристрої можуть бути пов'язаними вузлами. Навіть якщо одна з ланок комірчастої архітектури виходить з ладу, інші вузли все одно можуть працювати. Оскільки в такій топології немає ієрархії, взаємозалежності або регулярних зв'язків між вузлами, вона є надзвичайно дорогою. З'єднання в сітчастій топології не є більш простими для побудови.

У комірчастій архітектурі кожен комп'ютер слугує ретранслятором для інших вузлів, а також відповідає за передачу власних сигналів. Його з'єднання можуть бути дротовими або бездротовими і зазвичай використовуються для бездротових мереж. Топологія з комірчастою структурою включає в себе з'єднання типу "точка-точка" між кожним вузлом. Мережа з комірчастою топологією показана на зображенні нижче.

Mesh-мережа - це топологія локальної мережі, в якій вузли інфраструктури з'єднуються безпосередньо, динамічно і неієрархічно з якомога більшою кількістю інших вузлів і співпрацюють один з одним для ефективної маршрутизації даних до і від клієнтів (рис. 1.1).

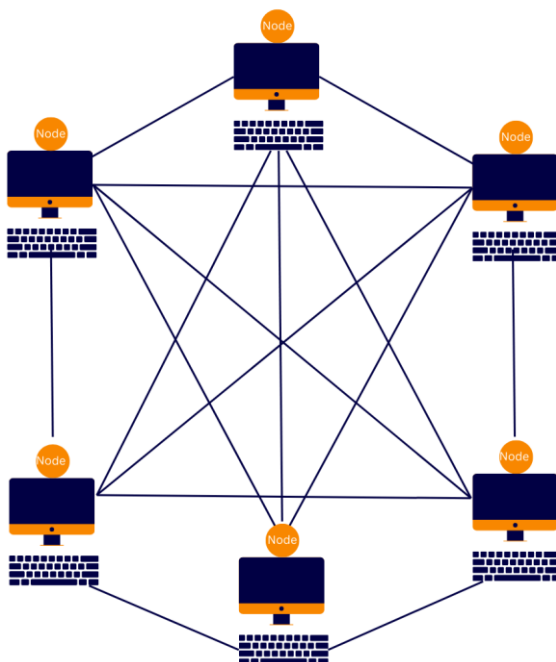


Рис. 1.1 – Mesh-топологія

Формула $w = n * (n - 1) / 2$, де w - кількість з'єднань WAN (глобальної мережі), а n - кількість сайтів, може бути використана для визначення кількості необхідних з'єднань WAN. Наприклад, для створення повністю сітчастої мережі для мережі з 10 сайтів потрібно 45 WAN-з'єднань: $10 * (10 - 1) / 2 = 45$.

Основні характеристики комірчастої топології пояснюються нижче:

1. У комірчастій топології всі пристрої діють як маршрутизатори і визначають шлях потоку даних, виходячи з наявності з'єднань між вузлами.
2. У разі обриву кабелю навантаження на мережу розподіляється між усіма вузлами, підтримуючи доступність мережі.
3. Враховуючи, що всі компоненти мережі фізично з'єднані один з одним, це свого роду мережева архітектура, яка забезпечує

надлишкове з'єднання по всій мережі, але вона рідко використовується через зусилля, необхідні для підтримки мережі, і високу вартість.

4. Дизайн комірчастої мережі ідеально підходить для побудови частково комірчастої топології, оскільки він балансує між потребою в надмірності та вартістю.

Використовуючи техніку, відому як спеціальне векторизація відстані на вимогу, радіостанції можуть спонтанно організовуватися в багатьох комірчастих мережах. Для того, щоб згенерувати деякі маршрути і призначити вузли для виконання певних ролей, таких як кінцеві вузли або ретранслятори, творець цього реактивного протоколу використовує деякі функції проактивної маршрутизації. Якщо говорити простою мовою, то кінцева точка служить не тільки джерелом і пунктом призначення даних, але і точкою ретрансляції.

Mesh-системи часто покладаються на таблицю маршрутизації, яка вказує кожному вузлу, як з'єднатися з точкою доступу і куди надсилати будь-які вхідні дані. Таблиця маршрутизації робить припущення, що єдині вузли в мережі, які можуть безпосередньо взаємодіяти, - це ті, у яких є маршрут до точки доступу. Якщо ви не знаєте шляху, ви передаєте повідомлення тому, хто його знає; інакше це схоже на велику телефонну гру.

Щоб функціонувати, mesh-мережі або маршрутизують дані, або переповнюють їх. У mesh-мережі, коли повідомлення маршрутизується, воно слідує заздалегідь визначеним маршрутом, перестрибуючи від вузла до вузла, поки не досягне своєї мети. Для того, щоб створювати ці маршрути і гарантувати наявність відкритих шляхів, мережа повинна регулярно підключатися і налаштовуватися. Для того, щоб генерувати таблиці маршрутів, вона повинна безперервно шукати розірвані шляхи і розробляти алгоритми самовідновлення. Комірчасті мережі менш ефективні, ніж мережі типу "зірка", оскільки для побудови маршруту мережею проходить багато даних другого рівня (MAC).

1.2. Використання Mesh-мереж

Mesh-мережі стають популярною мережевою структурою в державному, комерційному та промисловому секторах. Оскільки IoT розвивається і впливає майже на всі сфери життя, його впровадження, ймовірно, буде зростати. Нижче перераховані 10 найкращих варіантів використання mesh-мереж [2]:

1. Зв'язок для суспільного блага: правоохоронні, пожежні та інші державні органи спілкуються більш ефективно і оперативно завдяки mesh-мережі. Mesh-мережі допомагають задовольнити потреби клієнтів у державному секторі. Численні пожежні підрозділи, військові операції, місцеві правоохоронні органи та пошуково-рятувальні команди продовжують покладатися на громіздкі, дорогі, надмірно спроектовані системи, які не зазнавали значних модифікацій протягом багатьох років. Mesh-мережі чудово підходять для автономних систем зв'язку, оскільки вони швидко створюють мережу, яка може охоплювати великі відстані.
2. Спостереження за навколишнім середовищем: можна швидко дослідити і відстежити умови в будь-якій місцевості за допомогою різноманітних датчиків температури, вологості, забруднення та інших датчиків. Можна навіть спостерігати за окремими деревами, сільськогосподарськими угіддями, водоймами та іншими вразливими регіонами. Завдяки створеним процедурам датчики здатні взаємодіяти в інфраструктурному та mesh-режимах. Технологія підвищує відмовостійкість та масштабованість системи, дозволяючи кожному сенсорному вузлу функціонувати як ретранслятор. Адміністрування окремих етапів роботи системи, таких як додавання нових вузлів, несанкціоноване переміщення вузлів з одного сегмента мережі в інший тощо, може здійснюватися за допомогою технології автентифікації на основі парних ключів, яка була застосована для моніторингу міського середовища.
3. Медичне спостереження: Mesh-мережі допомагають збільшити пропускну здатність, а також спрощують і покращують спостереження за пацієнтами. Вузол мережі, який зазвичай є комп'ютером, допомагає

черговому лікарю стежити за палатами лікарні. Це гарантує, що стан здоров'я пацієнта контролюється навіть за відсутності медсестри. IoT - це мережа постійно підключених пристроїв, які обмінюються повідомленнями. Конкретні пристрої IoT важливіші в охороні здоров'я, ніж інші, тому організаціям необхідно надавати мережеві рішення, які концентруються на сигналах моніторингу стану пацієнта.

4. Промисловий контроль і моніторинг: датчики, інтегровані в сітку, надають дані про будь-який процес або метод виробництва. Бездротова технологія використовується для зворотного зв'язку з системою управління. Інформація про технічне обслуговування отримується шляхом вивчення стану машини. Інсталяції стають простішими і дешевшими завдяки використанню бездротової сітки. Кілька основних прикладів несподіваного використання включають шахти і залізниці. Чіпи, попередньо сертифіковані модулі та програмне забезпечення для mesh-мереж - ось деякі приклади бездротових сенсорних мережевих пристроїв, які забезпечують зв'язок між датчиками в складних промислових середовищах IoT. Якщо кожен вузол передає дані з різною швидкістю, управління мережею автоматично синхронізує кожну пару з'єднань для ефективної маршрутизації трафіку.
5. Заходи безпеки: практично кожна точка входу або спосіб входу в установу контролюється недорогими сенсорними вузлами. На "хвилі" mesh-мереж зараз перебувають, серед іншого, мережеві камери спостереження, системи реагування на надзвичайні ситуації, програмне забезпечення для управління відео та системи розпізнавання номерних знаків. Разом вони створюють таку велику цінність, що міста все частіше знаходять фінансові можливості інвестувати в ці системи. Більшість розгортань бездротових mesh-мереж відбувається вздовж доріг, які зазвичай окреслюють муніципальні кордони. Це дозволяє розділити територію покриття на зони, які відповідають різним етапам інвестування та розгортання.

6. Автомобільний нагляд: автомобілі з кожним роком отримують все більше технологічних оновлень, доповнень і мережевих з'єднань. Відмова від електропроводки дає змогу краще контролювати численні операції транспортного засобу та керувати ним. Фраза "автоматизований автомобіль" може здатися оманливою, коли на дорогах з'являться перші безпілотні транспортні засоби. Так, автономні автомобілі повинні бути незалежними. Підключені до системи хмарних обчислень і один до одного, вони функціонують набагато краще. Рухаючись повністю автономно, автоматизовані транспортні засоби можуть сканувати дорогу і сусідні автомобілі. Вони все ще не мають уявлення про те, що на них чекає, або про те, що чекає на сусідні автомобілі. З іншого боку, підключений автомобіль може аналізувати широкий спектр даних, включаючи тривалість поїздки і дорожні умови, надані іншими автомобілями.
7. Військова розвідка та зв'язок: радіус дії і надійність систем зв'язку між солдатами підвищується за допомогою масивної мережі. Сітчаста мережа інтерфейсу автоматизованих інформаційних систем бойового забезпечення надала армії можливість забезпечити високошвидкісним зв'язком з високою пропускнуою здатністю фахівців з логістики і забезпечення, які підтримують бойові операції, та інший передовий особовий склад. Групи реагування зв'язуються між собою за допомогою супутникового зв'язку, використовуючи супутникові термінали і мережу, що забезпечує їм доступ до найкращої і найсвіжішої інформації. Мережа поширює військові і комерційні системи навколо постраждалих районів і в них, полегшуючи радіозв'язок.
8. Спостереження та керування будинком: за допомогою системи "розумного будинку", керованої mesh-мережею, можна легко вмикати і вимикати світло, регулювати яскравість освітлення, кондиціонер та інші функції. Повним будинком можна керувати за допомогою однієї або декількох точок доступу. Системи домашньої автоматизації

складаються з численних компонентів, і дуже важливо переконатися, що все продовжує працювати належним чином, навіть якщо мережа в якийсь момент зламається. Mesh-мережі ідеально підходять для таких ситуацій, які часто трапляються у великих будинках або компаніях. Сигнали завжди мають куди йти, оскільки кожен пристрій з'єднується з кожним іншим пристроєм. Це гарантує, що майже все завжди функціонує так, як заплановано.

9. Бездротовий широкосмуговий доступ: у місцях, де немає кабельного телебачення або інтернет-проводів, можна побудувати комірчасту мережу Wi-Fi, щоб забезпечити покращене інтернет-з'єднання та інші широкосмугові з'єднання. Наразі існує декілька таких мереж, і їх стає дедалі більше. З додаванням додаткових вузлів збільшується покриття мережі та її надійність. Практичним вибором для широкосмугового інтернет-з'єднання "останньої милі" є бездротові mesh-мережі. Кожен користувацький вузол функціонує як хост і маршрутизатор, подібно до мереж ad hoc. Користувацькі пакети надсилаються через багатошляховий шлюз, який підключений до Інтернету. Хоча комірчаста архітектура пропонує ряд переваг, включаючи високу надійність і широке охоплення ринку, вона повинна бути захищена апаратним брандмауером.
10. Автоматичне зчитування лічильників: зчитування даних з газових та електричних лічильників - це велика робота. Оскільки для миттєвого зчитування даних з лічильників енергоспоживання використовуються системи mesh-мереж, тепер можна розгорнути систему з використанням недорогих mesh-вузлів, що є бюджетним рішенням. До складу системи входять вимірювальні пристрої, бездротові сенсорні вузли, збирачі даних, центр управління та технології бездротового зв'язку. Для передачі даних від сенсорних вузлів до збирача даних використовується складна система зв'язку. Під час проведення процедури інформація передається через мережу Ethernet від збирача даних до станції

управління. При підключенні бездротових mesh-мереж збирач даних виступає в ролі шлюзу.

1.3 Переваги використання та недоліки Mesh-мереж

Знання переваг комірчастої топології допоможе вам визначити, як побудувати мережу і як її використовувати. Основні переваги комірчастої топології наведені нижче:

- Комірчаста топологія здатна обробляти великий трафік: у комірчастій топології немає ієрархічних зв'язків. Припустимо, що будь-який підключений пристрій намагається безпосередньо зв'язатися з будь-яким іншим підключеним пристроєм, використовуючи можливості маршрутизації пристроїв. Вони зможуть це зробити в такій ситуації.
- Відмова одного пристрою не впливає на роботу мережі: що стосується стійкості до проблем, то комірчаста топологія є видатною. Кожен вузол мережі отримує і транслює інформацію. Система пропонує своїм клієнтам достатню надмірність, щоб вони могли продовжувати користуватися нею, навіть якщо трапляються певні помилки. Мережа достатньо потужна, щоб задіяти інші вузли для завершення роботи мережі, навіть якщо один з них вийде з ладу.
- Передача даних є надійною, оскільки збій мережі не зупиняє процес: у комірчастій топології є кілька шляхів для передачі даних. Для того, щоб мережа розвивала успішний набір методів роботи, кожен вузол повинен бути з'єднаний з кожним іншим вузлом. В результаті покращується загальна узгодженість передачі даних. Крім того, якщо кілька вузлів виходять з ладу, це не впливає на маршрут, і повідомлення все одно може бути відправлене.
- Додавання нового обладнання не впливає на передачу даних: користувачі можуть додавати додаткові віджети та гаджети завдяки структурі комірчастої топології без перешкод для поточних

повідомлень. Кожен вузол пов'язаний між собою, тому навіть якщо один елемент обладнання вийде з ладу, інформаційний потік не зупиниться.

- Масштабованість проста: оскільки комірчаста топологія усуває потребу в більшій кількості маршрутизаторів, оскільки кожен вузол функціонує як власний маршрутизатор, це дозволяє легко регулювати розмір мережі. В результаті, можна швидко і тимчасово впровадити нову технологію в будь-якій області в корпоративному середовищі з існуючим темпом робіт.
- Простота додавання комірчастої топології: додавання сітчастої топології часто є простим і безпроблемним. Для того, щоб вона працювала, необхідно з'єднати вузли зі шлюзами, щоб повідомлення могли надходити до решти мережі. Це дозволяє технології оптимізувати себе.
- Мережу майже неможливо зруйнувати: якщо не станеться всесвітньої катастрофи, яка знищить всі гаджети, якими ми користуємося по всьому світу, то зруйнувати комірчану топологію майже неможливо через її поточну глобальну структуру.
- Mesh-топологія не потребує централізованого управління для передачі даних, отже, в ньому немає потреби: у результаті, людина створює особистий, безпечний засіб комунікації, який дає їй можливість залишатися анонімною, якщо вона цього бажає. Щоб захистити свою конфіденційність, їм не потрібно використовувати брандмауер або будь-яке інше подібне програмне забезпечення.
- Гнучкість: можливість часткового дефіциту комірчастої топології надає їй велику гнучкість. Тому, щоб скористатися перевагами покращеного зв'язку, мережу не обов'язково будувати з повною павутиною з'єднань для кожного вузла.
- Може обробляти величезні обсяги даних: у порівнянні зі звичайними системами, мережа з комірчастою топологією може обробляти

величезні обсяги даних, оскільки до неї можна підключити кілька пристроїв одночасно і надсилати дані одночасно [3].

Сітчаста топологія має багато переваг, але є й деякі недоліки. Знаючи про них, можна краще зрозуміти зворотній бік медалі. Недоліки комірчастої топології перераховані далі:

- Висока ціна: реалізація комірчастої топології коштує дорожче, ніж аналогічні проекти, оскільки вимагає великої кількості різного обладнання. Поки у вас не буде всього обладнання, проводки, швидкості інтернету тощо, необхідного для встановлення, система не зможе функціонувати належним чином.
- Будівництво та обслуговування займає багато часу: додавання нових вузлів є простим, коли система запущена і працює, але початкова процедура є складною і трудомісткою.
- Значний ризик дублюючих з'єднань: завдяки здатності Mesh-топології керувати кількома мережами, існує ймовірність створення надлишкових з'єднань, що становить високий ризик.
- Навантаження на кожен вузол збільшується: на кожен вузол припадає більше навантаження, оскільки він повинен виконувати багато завдань і служити маршрутизатором. Тому механізм є надзвичайно складним.
- Проблеми із затримкою: малопотужним комірчастим топологіям не вистачає обчислювальної потужності, необхідної для швидкого обміну даними. Тому існує кілька проблем із затримкою.

Також наведено порівняльну таблицю для зручності.

Таблиця 1.1

Переваги та недоліки топології Mesh

Переваги	Недоліки
1. Здатний впоратися з інтенсивним трафіком	1. Висока ціна
2. Вихід з ладу одного пристрою не впливає на роботу мережі	2. Витрати часу на будівництво та обслуговування
3. Передача даних надійна	3. Значний ризик дублюючих з'єднань
4. Проста масштабованість	4. Навантаження на кожен вузол збільшилося
5. Додавання нового обладнання не впливає на передачу даних	5. Проблеми з затримкою
6. Просте додавання топології сітки	
7. Неможливо демонтувати	
8. Відсутність необхідності в централізованому управлінні для передачі даних	
9. Гнучкість	
10. Обробляти величезні обсяги даних	

Висновки за розділом 1

У даному розділі було розглянуто теоретичні аспекти Mesh-мереж. Ми визначили основні топології Mesh-мереж, їх структуру та функціональні особливості. Також було проаналізовано сфери використання Mesh-мереж, включаючи їх застосування у різних галузях, таких як телекомунікації, розумні міста та інтернет речей (IoT). Особливу увагу приділено перевагам використання Mesh-мереж, зокрема їх високій надійності, масштабованості та стійкості до збоїв. Отримані знання створюють базу для подальшого дослідження методів визначення та управління пропускнуою спроможністю Mesh-мереж.

РОЗДІЛ 2

ПРОПУСКНА СПРОМОЖНІСТЬ MESH-МЕРЕЖ

2.1. Поняття пропускної спроможності мережі

Пропускна спроможність мережі є ключовим параметром, який визначає ефективність передачі даних через мережу. Вона визначає максимальну кількість даних, які можуть бути передані через мережу за одиницю часу, зазвичай вимірюється в бітах за секунду (bps), мегабітах за секунду (Mbps) або гігабітах за секунду (Gbps). Пропускна спроможність безпосередньо впливає на продуктивність мережі та якість обслуговування користувачів [4].

Характеристики пропускної здатності мережі:

- Пропускна здатність каналу: це максимальна швидкість, з якою дані можуть передаватися по каналу.
- Пропускна здатність мережі: це максимальна швидкість, з якою дані можуть передаватися через мережу.
- Ефективна пропускна здатність: це фактична швидкість, з якою дані передаються через мережу. Ефективна пропускна здатність завжди менша, ніж пропускна здатність мережі, оскільки вона враховує такі фактори, як шум, перешкоди та навантаження на мережу.
- Затримка: це час, який потрібно даним, щоб пройти через мережу. Затримка вимірюється в мілісекундах (мс).
- Jitter: це варіативність затримки. Jitter вимірюється в мілісекундах (мс).
- Втрата пакетів: це відсоток пакетів даних, які втрачаються під час передачі через мережу.

Фактори, що впливають на пропускну здатність мережі:

- Тип кабелю або бездротового з'єднання: різні типи кабелів та бездротових з'єднань мають різну пропускну здатність. Наприклад, оптичне волокно має значно більшу пропускну здатність, ніж мідний кабель.

- Ширина каналу: ширина каналу - це діапазон частот, який використовується для передачі даних. Чим ширший канал, тим більша пропускна здатність.
- Шум та перешкоди: шум та перешкоди можуть призвести до спотворення сигналів, що може знизити пропускну здатність.
- Протоколи передачі даних: різні протоколи передачі даних мають різну ефективність. Наприклад, протокол TCP/IP має меншу ефективність, ніж протокол UDP, але він більш надійний.
- Навантаження на мережу: чим більше користувачів використовують мережу, тим меншою буде пропускна здатність для кожного користувача.

Методи вимірювання пропускної здатності мережі:

- Команди ping: команда ping використовується для вимірювання затримки між двома комп'ютерами.
- Інструменти тестування пропускної здатності: існує багато інструментів тестування пропускної здатності, які можна використовувати для вимірювання пропускної здатності мережі. Ці інструменти зазвичай генерують великий обсяг трафіку та вимірюють час, необхідний для його передачі через мережу.
- Моніторинг мережі: програмне забезпечення для моніторингу мережі може використовуватися для відстеження пропускної здатності мережі протягом певного періоду часу.

Збільшення пропускної здатності мережі:

- Оновлення обладнання: оновлення обладнання до більш швидкого може збільшити пропускну здатність мережі.
- Розширення каналу: розширення каналу може збільшити пропускну здатність мережі.
- Встановлення повторювачів: повторювачі можна використовувати для розширення діапазону дії мережі та збільшення пропускної здатності.

- Використання QoS: QoS (Quality of Service) - це технологія, яка може використовуватися для пріоритезації трафіку та забезпечення того, щоб важливі програми мали доступ до більшої пропускної здатності.

2.2. Ключові показники пропускної здатності мережі

Управління пропускною здатністю мережі є життєво важливим для того, щоб ваша мережа могла впоратися з поточними та майбутніми вимогами. Нижче ми розглянемо ключові показники, які ви можете відстежувати за допомогою інструментів моніторингу продуктивності мережі:

1. Пропускна здатність мережі:

- Розуміння тенденцій використання: постійно відстежуйте використання пропускної здатності в різні періоди часу (погодинно, щоденно, щотижнево), щоб передбачити майбутні потреби.
- Детальний моніторинг: відстежуйте використання смуги пропускання для дротових і бездротових пристроїв за допомогою інформаційних панелей і звітів. Цей детальний перегляд допоможе вам визначити конкретні пристрої або програми, які споживають найбільше пропускної здатності.
- Рішення щодо планування пропускної здатності: Проаналізуйте історичне та поточне використання пропускної здатності, щоб визначити, чи потрібно підвищувати пропускну здатність.

2. Використання процесора та пам'яті:

- Оптимізація мережевих ресурсів: відстежуйте використання процесора і пам'яті в мережевій інфраструктурі, наприклад, на серверах і ноутбуках, для ефективного розподілу ресурсів.
- Виявлення вузьких місць: інструменти мережевого моніторингу точно визначають програми, пристрої або процеси, які споживають надмірні ресурси процесора і пам'яті. Це допомагає усунути вузькі місця та оптимізувати продуктивність.

- Уніфікований моніторинг: порівнюйте використання процесора і пам'яті на різних мережевих пристроях на одній інформаційній панелі для легкого аналізу.
- Аналіз тенденцій для планування: створюйте докладні звіти, що відстежують завантаження процесора, температуру, швидкість та інші ключові показники з плином часу. Використовуйте ці звіти для виявлення тенденцій і планування майбутніх потреб у ресурсах.

3. Затримка та пропускна здатність мережі:

- Встановлення базових показників: мережеві інструменти допомагають вимірювати та аналізувати затримку та пропускну здатність мережі для встановлення базових показників продуктивності.
- Вимірювання затримок: тести на затримку оцінюють затримку, яку відчують користувачі під час передачі або отримання даних. Це допомагає виявити потенційні вузькі місця, що впливають на роботу користувачів.
- Визначення пропускну здатності: вимірювання пропускну здатності показує фактичну швидкість передачі даних у вашій мережі. Це допомагає переконатися, що ваша мережа може обробляти необхідний користувачам обсяг даних.
- Визначення вузьких місць: аналіз затримок і пропускну здатності може виявити потенційні проблеми, які можуть вплинути на продуктивність мережі в довгостроковій перспективі.

4. Мережевий Jitter і втрата пакетів:

- Розуміння потоку трафіку: мережеві інструменти дають уявлення про потік трафіку за допомогою таких показників, як Jitter і втрата пакетів.
- Вимірювання Jitter: тести мережевого Jitter відстежують неузгодженість затримок пакетів, що виникають на приймальній

стороні. Високий Jitter може призвести до збоїв у роботі додатків у реальному часі, таких як відеоконференції.

- Моніторинг втрат пакетів: втрата пакетів показує кількість пакетів даних, втрачених під час передачі мережею. Надмірна втрата пакетів може призвести до неповної передачі даних і погіршення якості роботи користувачів.
- Важливо для планування пропускної здатності: регулярний моніторинг Jitter і втрат пакетів має вирішальне значення для точного планування пропускної здатності мережі.

Завдяки ефективному моніторингу цих ключових показників ви можете проактивно керувати пропускною здатністю мережі, забезпечуючи її відповідність поточним і майбутнім потребам. Це допомагає в наступному:

- Оптимізувати продуктивність мережі: визначте та усуньте вузькі місця, що впливають на продуктивність мережі.
- Запобігати перебоям у роботі мережі: проактивне планування пропускної здатності допомагає запобігти перевантаженню мережі та потенційним збоям.
- Покращити взаємодію з користувачем: забезпечте користувачам безперебійну і стабільну роботу в мережі з достатньою пропускною здатністю і мінімальними затримками.
- Приймайте обґрунтовані рішення: дані, отримані за допомогою інструментів моніторингу мережі, допомагають приймати стратегічні рішення щодо майбутньої модернізації мережі та розподілу ресурсів.

Ефективне управління пропускною спроможністю мережі гарантує, що ваша мережа залишатиметься надійною та масштабованою, підтримуючи постійно зростаючі потреби вашої організації [5].

2.3 Математична модель розрахунку пропускної спроможності Mesh-мережі

Мережа масового обслуговування (Мережа ММО) являє собою сукупність кінцевої кількості взаємопов'язаних вузлів обслуговування, у якій циркулюють заявки, що переходять відповідно до маршрутної матриці з виходу одного вузла на вхід іншого. Кожен окремий вузол є розімкненою ММО і відображає функціонально самостійну частину реальної системи.

ММО використовують для визначення таких важливих характеристик модельованих систем, як:

- продуктивність;
- час доставки заявок (повідомлень, пакетів тощо);
- імовірність втрати заявки;
- імовірність блокування вузла;
- допустимі значення навантаження, за яких забезпечується необхідна якість обслуговування.

Для наочного представлення ММО використовують граф, вершини якого (вузли) відповідають окремим вузлам мережі, а дуги відображають зв'язки між вузлами.

Перехід заявок між вузлами відбувається миттєво відповідно до перехідних імовірностей $P_{ij}, i, j = \overline{1, N}$, що позначають імовірність того, що заявка після обслуговування у вузлі i перейде у вузол j .

Якщо вузли i і j безпосередньо між собою не пов'язані $P_{ij} = 0$.

Якщо з вузла i можливий перехід тільки у вузол j , $P_{ij} = 1$.

Під вхідним потоком деякого вузла розумітимемо потік заявок, що надходять на вхід цього вузла із зовнішнього середовища. У загальному випадку кількість вхідних потоків ММО дорівнює числу вузлів, що утворюють мережу.

Найбільш розробленою є теорія експоненціальних ММО, заснована на апараті марковських процесів із безперервним часом, за допомогою якої можна отримати аналітичні вирази для знаходження основних показників досліджуваних систем.

Експоненціальною називають мережу, що має такі властивості:

- вхідні потоки пуасонівські;
- час обслуговування заявок у вузлах розподілено за експоненціальним законом;
- заявки у вузлах обслуговуються в порядку надходження;
- перехід заявки з виходу i -го вузла на вхід j -го вузла є незалежною випадковою подією, що має ймовірність $P_{ij}, i, j = \overline{1, N}, P_{i0}, i = \overline{1, N}$, P_{i0} - ймовірність відходу заявки з ММО.

Із цих властивостей випливає, що час обслуговування в кожному вузлі не залежить ні від часу обслуговування в інших вузлах, ні від параметрів вхідного потоку, ні від стану мережі, ні від маршрутів проходження вимог.

Щоб задати розімкнуту експоненціальну ММО, необхідно задати значення такого набору параметрів:

- число вузлів N ;
- число каналів i -ого вузла $n_i, i = \overline{1, N}, n_i = \overline{1, N}$;
- матрицю ймовірностей передач $P = \|p_{ij}\|, i = \overline{1, N}, j = \overline{0, N}$, $P = \|p_{ij}\|, i = \overline{1, N}, j = \overline{0, N}$;
- інтенсивності вхідних потоків заявок $\Lambda_i, i = \overline{1, N}, \Lambda_i = \overline{1, N}$;
- інтенсивності μ_i або середні часи $\bar{t}_{si}, \bar{t}_s$ обслуговування заявок у вузлах, $i = \overline{1, N}, i = \overline{1, N}$.

Стаціонарність мережі означає, що середня кількість заявок у будь-якому її фрагменті незмінна, тобто, сумарна інтенсивність потоків, що входять у цю частину, дорівнює сумарній інтенсивності потоків, що виходять. Математичний запис цього факту називається рівнянням балансу. Якщо як фрагменти мережі взяти її вузли, то, складаючи рівняння балансу для кожного вузла, можна одержати систему рівнянь, що зв'язує невідомі інтенсивності $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ з відомими $\Lambda_1, \dots, \Lambda_N$. У цьому разі для N невідомих виходять N рівнянь. Додаванням до них рівняння балансу для вхідних і вихідних потоків

усієї мережі загалом, виходить система з $N+1$ рівнянь, одне з яких можна використовувати для перевірки.

Потік заявок на вході окремого вузла складається з вхідного потоку мережі (можливо, нульової інтенсивності) і з потоків, що надходять із виходів інших вузлів. Вхідний потік вузла в експоненціальній мережі в загальному випадку пуасонівським не є, тому вузли ММО в загальному випадку не експоненціальні. Проте вузли все ж часто вважають експоненціальними. Це дає змогу знайти з рівнянь балансу значення інтенсивностей $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ вхідних потоків заявок і скористатися для розрахунку показників мережі відповідними аналітичними моделями теорії МО [6].

Крім показників окремих вузлів для опису мережі використовуються показники, що відображають властивості мережі загалом. До найважливіших належать такі:

- Середній час перебування заявки в мережі.

Час перебування заявки в мережі визначається як час, що минув з моменту приходу заявки в мережу до моменту її виходу з мережі. Середній час перебування розраховується за формулою:

$$\bar{T} = \frac{1}{\Lambda} \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot \bar{t}_{\Sigma_j} \quad \bar{T} = \frac{1}{\Lambda} \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot \bar{t}_{\Sigma_j},$$

де $\Lambda = \Lambda_1 + \dots + \Lambda_N$,

$\bar{t}_{\Sigma_j}$ - середній час перебування заявки в j -ом вузлі.

- Передавальні коефіцієнти.

Під передавальним коефіцієнтом розуміють середнє значення числа приходів α_{ij} заявки i -го вхідного потоку в j -ий вузол за час перебування цієї заявки в мережі.

У стаціонарному режимі за будь-яких $\Lambda_1, \dots, \Lambda_N$ для $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ справедливо:

Якщо всі вхідні інтенсивності мережі, крім Λ_i , покласти рівними нулю, то, використовуючи розгорнуту форму запису умов стаціонарності, отримаємо, що для стаціонарності необхідно, щоб:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{i1} \Lambda_1 \leq \frac{n_1}{t_{s1}} \\ \alpha_{i2} \Lambda_2 \leq \frac{n_2}{t_{s2}} \\ \dots\dots\dots \\ \alpha_{iN} \Lambda_N \leq \frac{n_N}{t_{sN}} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \alpha_{i1} \Lambda_1 \leq \frac{n_1}{t_{s1}} \\ \alpha_{i2} \Lambda_2 \leq \frac{n_2}{t_{s2}} \\ \dots\dots\dots \\ \alpha_{iN} \Lambda_N \leq \frac{n_N}{t_{sN}} \end{array} \right.$$

Або ж

$$\left\{ \begin{array}{l} \Lambda_1 \leq \frac{n_1}{t_{s1} \alpha_{i1}} \\ \Lambda_2 \leq \frac{n_2}{t_{s2} \alpha_{i2}} \\ \dots\dots\dots \\ \Lambda_N \leq \frac{n_N}{t_{sN} \alpha_{iN}} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \Lambda_1 \leq \frac{n_1}{t_{s1} \alpha_{i1}} \\ \Lambda_2 \leq \frac{n_2}{t_{s2} \alpha_{i2}} \\ \dots\dots\dots \\ \Lambda_N \leq \frac{n_N}{t_{sN} \alpha_{iN}} \end{array} \right.$$

- Умовні пропускні спроможності.

Умовною пропускною спроможністю за i -м входом V_i називають максимальне значення інтенсивності Λ_i , за якого мережа залишається стаціонарною. За заданих Λ_k ($k \neq i$) мережа стаціонарна для будь-яких значень $\Lambda_i \leq V_i$. Для знаходження V_i слід підставити значення всіх вхідних інтенсивностей мережі, крім Λ_i , і розв'язати отриману систему щодо Λ_i :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Lambda_i \leq \beta_1 \\ \Lambda_i \leq \beta_2 \\ \dots\dots\dots \\ \Lambda_i \leq \beta_N \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \Lambda_i \leq \beta_1 \\ \Lambda_i \leq \beta_2 \\ \dots\dots\dots \\ \Lambda_i \leq \beta_N \end{array} \right.$$

- Запаси за пропускними спроможностями.

Запас за пропускними здібностями $D_i = B_i - \Lambda_i, i = \overline{1, N}$ $D_i = B_i - \Lambda_i, i = \overline{1, N}$, показує, наскільки може бути збільшена інтенсивність приходу заявок на i -му вході за фіксованих інших без порушення умови стаціонарності.

Методика розрахунку пропускної спроможності. Для експоненціальної розімкнутої мережі масового обслуговування потрібно розрахувати:

- Часткові характеристики вузлів ММО.
- Середній час перебування заявки в мережі. Для вузлів мережі з інтенсивностями вхідного потоку $\Lambda_i > 0$.
- Середній вхідний час перебування заявки в мережі.
- Абсолютну пропускну здатність.
- Умовну пропускну здатність.
- Запас за пропускнуою спроможністю.

2.4. Алгоритми та стратегії управління пропускнуою спроможністю

Mesh-мережі створюють унікальні проблеми з управлінням пропускнуою здатністю порівняно з традиційними дротовими або централізованими бездротовими мережами. Розподілена природа mesh-з'єднань робить ефективний розподіл смуги пропускання і контроль перевантажень ще більш важливими.

Алгоритми управління пропускнуою спроможністю:

1. Алгоритми розподілу каналів: Ці алгоритми динамічно розподіляють канали між вузлами мережі, щоб мінімізувати перешкоди та оптимізувати загальну пропускну здатність мережі. Вони враховують такі фактори, як рівень сигналу, навантаження трафіку та доступність каналів на сусідніх вузлах. Найпоширеніші алгоритми включають:
 - Розподілене призначення каналів (DCA): вузли домовляються з сусідами, щоб знайти канали, які не створюють перешкод.

- Призначення каналів з урахуванням зв'язку (CASA): надає пріоритет каналам, які підтримують зв'язок з мережею.
2. Адаптивні протоколи маршрутизації: на відміну від статичної маршрутизації в традиційних мережах, mesh-мережі використовують протоколи адаптивної маршрутизації для пошуку найбільш ефективного шляху для пакетів даних. Ці протоколи враховують такі фактори, як перевантаження, кількість хопів (кількість переходів між джерелом і пунктом призначення) і час автономної роботи вузла. Приклади включають:
- OLSR (Optimised Link State Routing): ефективно розподіляє інформацію про маршрутизацію по всій мережі.
 - Спеціальна векторна маршрутизація на вимогу (Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing, AODV): динамічно знаходить маршрути на вимогу, зменшуючи накладні витрати на управління.
3. Алгоритми управління чергами: ці алгоритми керують пакетами даних, які очікують на передачу на кожному вузлі. Вони визначають пріоритетність пакетів на основі таких факторів, як вимоги реального часу, вузол-джерело або залишок заряду батареї. Пріоритетна і справедлива черга - це загальні підходи, які використовуються в mesh-мережах.

Стратегії управління пропускнуою спроможністю:

1. Керування пропускнуою здатністю з урахуванням енергоспоживання: вузли mesh часто покладаються на батареї, тому стратегії, які мінімізують енергоспоживання при управлінні пропускнуою здатністю, є критично важливими. Можуть використовуватися такі методи, як циклічність роботи (періодичне вмикання і вимикання вузлів) і протоколи маршрутизації з низьким енергоспоживанням.
2. Забезпечення якості обслуговування (QoS): подібно до традиційних мереж, QoS забезпечує виділення смуги пропускання для додатків в

режимі реального часу, таких як відеодзвінки. Однак в mesh-мережах важливо враховувати обмеженість ресурсів кожного вузла.

3. Спільне управління ресурсами: вузли mesh-мережі можуть працювати разом, щоб спільно використовувати пропускну здатність і оптимізувати продуктивність мережі. Це може включати такі методи, як вибір ретрансляційного вузла на основі доступної пропускну здатності та балансування навантаження між кількома шляхами.

Ефективне управління пропускну здатністю в mesh-мережах вимагає поєднання алгоритмів і стратегій, адаптованих до конкретних вимог мережі. Використовуючи ці методи, mesh-мережі можуть забезпечити ефективну передачу даних, пріоритезувати критичний трафік і підтримувати стабільність мережі навіть у динамічних умовах [6].

Висновки за розділом 2

У даному розділі ми розглянули поняття пропускну спроможності мережі, визначили ключові показники цієї спроможності, а також оглянули різноманітні алгоритми та стратегії управління нею. Цей аналіз дозволив нам краще розуміти, як працює пропускну спроможність мережі та як можна оптимізувати її роботу для досягнення більш ефективного управління.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Показники пропускної здатності

З огляду на випадковий характер формування навантаження в цифровому тракті доступу як узагальнений показник пропускної спроможності можна розглядати ймовірність $P(b \leq V_{\text{дост}})$ того, що швидкість передавання даних у цифровому тракті доступу не перевищує максимально реалізовану $V_{\text{дост}}$, встановлену провайдером інтернет-послуг.

Критерієм відповідності вимогам щодо пропускної спроможності цифрового тракту доступу може слугувати співвідношення $P(b \leq V_{\text{дост}}) \geq P_{\text{доп}}$, де $P_{\text{доп}}$ - допустиме значення ймовірності досягнення необхідної швидкості передавання даних не вище максимально реалізованої [7].

Іншим узагальненим показником пропускної спроможності може служити ймовірність відмов в обслуговуванні $P(b > V_{\text{дост}})$ - ймовірність того, що випадкова величина швидкості передачі в цифровому тракті прив'язки перевищує швидкість $V_{\text{дост}}$, максимально реалізовану цифровою системою передачі в цьому тракті, при цьому абоненти повинні отримувати відмову в з'єднанні або ставати в чергу.

За обмеженої ємності буфера втрата пакетів відбуватиметься через переповнення буфера, коли довжина черги l_{ω} перевищить ємність буферного пристрою $L_{\text{буф}}$. Імовірність втрати пакета TCP/IP через переповнення буфера позначимо $P_{\text{пп.}\omega} = P(l_{\omega} > L_{\text{буф}})$.

Зменшити значення цієї ймовірності можна за рахунок збільшення ємності буферного пристрою. Однак за великої ємності буферного пристрою є можливість настання події, що час перебування пакета в черзі t_{ω} перевищить

допустимий час очікування $T_{\text{доп}}$ і відбудеться його втрата за часом $P_{\text{пп.т}} = P(t_{\omega} > T_{\text{доп}})$.

За правильно обраної швидкості передавання даних у цифровому тракті доступу та ємності буфера $P(b > V_{\text{дост}}) \geq P_{\text{пп.}\omega}$ та $P(b > V_{\text{дост}}) \geq P_{\text{пп.т}}$.

Таким чином, $P(b > V_{\text{дост}})$ є, по суті, верхньою межею втрат через обмежену пропускну здатність цифрового тракту доступу.

Критерієм відповідності пропускну спроможності тракту за даним узагальненим показником є вираз $P(b > V_{\text{дост}}) \leq P_{\text{отк.доп}}$, де $P_{\text{отк.доп}}$ - допустиме значення ймовірності відмов в обслуговуванні $P_{\text{отк.доп}} = 1 - P_{\text{доп}}$.

Узагальнені показники пропускну спроможності пов'язані співвідношенням $P(b > V_{\text{дост}}) = 1 - P(b \leq V_{\text{дост}})$ і можуть розглядатися також як показники якості обслуговування, а їхні критеріальні значення $P_{\text{отк.доп}}$ и $P_{\text{доп}}$ - як вимоги до якості обслуговування, за таких умов $P_{\text{отк.доп}} = 1 - P_{\text{доп}}$.

Як приватні показники пропускну спроможності цифрового тракту доступу до мережі Інтернет можуть розглядатися такі:

- максимально реалізована швидкість передавання даних у тракті доступу $V_{\text{дост}}$, що визначається провайдером інтернет-послуг;
- максимальна кількість віртуальних з'єднань $N_{\text{вс.мах}}$ абонентів із Web-сервером, яку одночасно може обслуговувати в годину найбільшого навантаження з необхідною якістю.

3.2 Умови й обмеження

Будемо вважати, що продуктивність серверного обладнання обчислювального центру дає змогу обробляти весь трафік, що надходить із мережі Інтернет цифровим трактом доступу [8].

Нехай обчислювальний центр має j ($j = \overline{1, J}$) цифрових сполучних трактів зв'язку з мережею Інтернет, а загальна кількість абонентів K класів

$$N = \sum_{k=1}^K N^{(k)}.$$

Навантаження, створюване кожним абонентом, характеризуватимемо, з одного боку, традиційними параметрами трафіку k -го класу ($k = \overline{1, K}$):

- інтенсивністю $\gamma_{аб}^{(k)}$ виходів в Інтернет абонента k -го класу;
- середньою тривалістю сеансу передавання даних абонентом k -го класу $T_{ср}^{(k)}$;
- питомою інтенсивністю навантаження, створюваного абонентом k -го класу $\eta_{аб}^{(k)} = \gamma_{аб}^{(k)} T_{ср}^{(k)} / 3600$.

З іншого боку, швидкість передавання даних абонентом k -го класу характеризується параметрами:

- середньої $B_{ср}^{(k)}$, пікової $B_p^{(k)}$ і мінімальної $B_{min}^{(k)}$ бітової швидкості;
- пачечністю трафіку $K_{пач} = B_p^{(k)} / B_{ср}^{(k)}$;
- середньою тривалістю піку $T_p^{(k)}$, тобто середнім часом роботи абонента з максимальною швидкістю.

Будемо також вважати, що поточна швидкість $b^{(k)}$ передавання даних абонентом k -го класу є дискретною випадковою величиною, що набуває пікових значень $B_p^{(k)}$ з імовірністю $p^{(k)}$ і мінімального значення $B_{min}^{(k)}$ з імовірністю $q^{(k)} = 1 - p^{(k)}$.

3.3 Основні розрахункові співвідношення

Щільність розподілу швидкості передавання даних абонентом k -го класу може бути виражена через δ -функції так:

$$f(b^{(k)}) = p^{(k)} \delta(b^{(k)} - B_p^{(k)}) + q^{(k)} \delta(b^{(k)} - B_{min}^{(k)}),$$

а перший і другий початкові моменти - за такими виразами:

$$\beta_1^{(k)} = p^{(k)} B_p^{(k)} + q^{(k)} B_{min}^{(k)}, \quad \beta_2^{(k)} = p^{(k)} [B_p^{(k)}]^2 + q^{(k)} [B_{min}^{(k)}]^2.$$

Перший початковий момент характеризує середнє значення швидкості

$B_{\text{ср}}^{(k)} = \beta_1^{(k)}$, а дисперсія швидкості передавання може бути виражена через другий і перший початкові моменти таким чином:

$$D[b^{(k)}] = \beta_2^{(k)} + [\beta_1^{(k)}]^2 = p^{(k)} q^{(k)} (B_p^{(k)} - B_{\min}^{(k)})^2.$$

Для прогнозування верхньої оцінки абонентського трафіку апроксимуємо роботу абонента джерелом передавання даних типу "увімкнений-вимкнений".

На рис. 3.2(а) ілюструється передавання даних такого абонента з постійною швидкістю передавання (ПСП), а на рис. 3.1(б) - зі швидкістю передавання, що змінюється протягом тривалості сеансу $T_c^{(k)}$, (ІСП). Тут $B_{\min} = 0$.

У роботі показано, що ця модель дає змогу отримати верхню оцінку абонентського трафіку. З урахуванням цієї моделі середнє значення швидкості передавання даних абонентом k -го класу може бути виражене таким чином:

$$B_{\text{ср}}^{(k)} = p^{(k)} B_p^{(k)},$$

де:

$$p^{(k)} = \frac{1}{K_{\text{пач}}^{(k)}}, K_{\text{нач}}^{(k)} = \frac{B_p^{(k)}}{B_{\text{ср}}^{(k)}} = \begin{cases} > 1 & \text{для джерела ІСП} \\ 1 & \text{для джерела ПСП} \end{cases}$$

а дисперсія:

$$D[b^{(k)}] = \begin{cases} p^{(k)} q^{(k)} [B_p^{(k)}]^2 & \text{для джерела ІСП} \\ 0 & \text{для джерела ПСП} \end{cases}$$

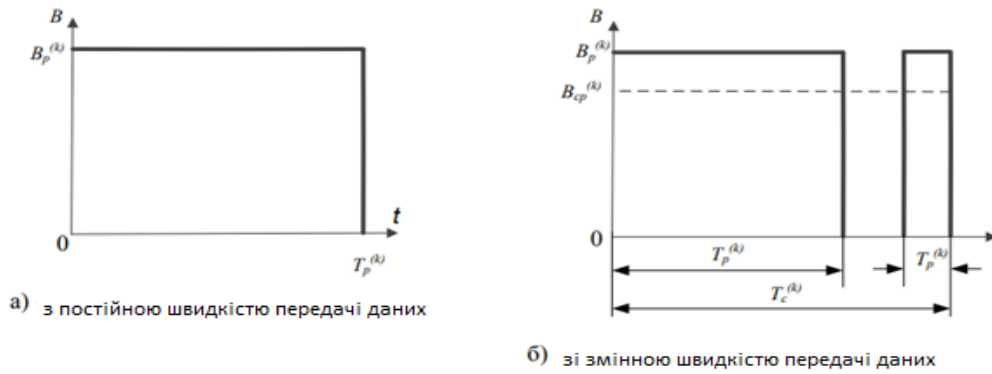


Рис. 3.1 – Швидкість передачі даних абонентом

Будемо вважати, що кількість віртуальних з'єднань усіх $N^{(k)}$ абонентів k -го класу з WEB-сервером обчислювального центру за j -м трактом доступу є випадковою величиною $n_{\text{вс}}^{(k)}$ з пуасонівським розподілом із середнім значенням

$N_{\text{вс},j}^{(k)} = \gamma_{\text{вс}}^{(k)} T_{\text{ср}}^{(k)}$ та дисперсією $D[n_{\text{вс},j}^{(k)}] = N_{\text{вс},j}^{(k)}$, тут інтенсивність $\gamma_{\text{вс}}^{(k)}$ потоку віртуальних з'єднань абонентів k -го класу з WEB-сервером дорівнює $\gamma_{\text{вс}}^{(k)} = N_{\text{аб}}^{(k)} \gamma_{\text{аб}}^{(k)}$.

Числові характеристики випадкової величини швидкості потоку даних у j -м тракті доступу можуть бути визначені як числові характеристики суми випадкового числа випадкових величин.

Математичне очікування $B_{\text{ср},j}^{(k)}$ і дисперсія $D[b_j^{(k)}]$ випадкової величини швидкості потоку даних у j -му тракті доступу $b_j^{(k)}$ від абонентів k -го класу, можуть бути знайдені за виразами $B_{\text{ср},j}^{(k)} = N_{\text{вс},j}^{(k)} B_{\text{ср}}^{(k)} = N_{\text{вс},j}^{(k)} p^{(k)} B_p^{(k)}$, $D[b_j^{(k)}] = [B_{\text{ср}}^{(k)}]^2 D[n_{\text{вс},j}^{(k)}] + N_{\text{вс},j}^{(k)} D[b^{(k)}] = N_{\text{вс},j}^{(k)} p^{(k)} [B_p^{(k)}]^2$.

Через велику кількість абонентів кожного k -го класу розподіл випадкової величини швидкості в j -му тракті доступу може бути апроксимовано нормальним розподілом навіть у тому разі, коли випадкові величини абонентських швидкостей підкоряються довільному закону розподілу. Основне обмеження, що накладається на абонентські швидкості,

полягає в тому, щоб вони були більш-менш однакові, що на практиці виконується найповніше для абонентів одного класу, які передають формалізовані документи, наприклад декларації [9].

У цьому випадку щільність розподілу швидкості передавання даних у j -му тракті доступу від усіх абонентів k -го класу має вигляд:

$$f(b_j^{(k)}) = \frac{1}{\sigma[b_j^{(k)}]\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(b_j^{(k)} - B_{\text{ср},j}^{(k)})^2}{2\sigma[b_j^{(k)}]^2}\right],$$

де $\sigma[b_j^{(k)}] = \sqrt{D[b_j^{(k)}]} = \sqrt{N_{\text{вс},j}^{(k)} p^{(k)} [B_p^{(k)}]^2}$ - середнє квадратичне відхилення швидкості в j -му тракті зв'язку при одночасній роботі абонентів k -го класу.

Відомою властивістю нормального закону розподілу ймовірностей є те, що будь-які лінійні комбінації нормальних випадкових величин також є нормальними.

За умови незалежності роботи k класів абонентів щільність розподілу випадкової величини швидкості передавання b_j у j -му тракті прив'язки для приймання даних від абонентів усіх K класів становить:

$$f(b_j) = \frac{1}{\sigma[b_j]\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(b_j - B_{\text{ср},j})^2}{2\sigma[b_j]^2}\right],$$

де $B_{\text{ср},j} = \sum_{k=1}^K N_{\text{вс},j}^{(k)} p^{(k)} B_p^{(k)}$, $\sigma[b_j] = \sqrt{\sum_{k=1}^K N_{\text{вс},j}^{(k)} p^{(k)} [B_p^{(k)}]^2}$.

Імовірність того, що швидкість передавання даних у j -му цифровому тракті прив'язки буде не вищою за максимально реалізовану, дорівнює:

$$P(b_j \leq B_{\text{дост},j}) = \frac{1}{\sigma[b_j]\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{B_{\text{дост},j}} \exp\left[-\frac{(b_j - B_{\text{ср},j})^2}{2\sigma[b_j]^2}\right] db_j.$$

Виконавши заміну змінної $\frac{b_j - B_{\text{ср},j}}{\sigma[b_j]} = t$, інтеграл можна привести до вигляду:

$$P(b_j \leq B_{\text{дост},j}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{B_{\text{дост},j} - B_{\text{ср},j}}{\sigma[b_j]}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt.$$

Скориставшись поданням цього інтеграла через спеціальну функцію $F(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$, отримаємо розрахунковий вираз для ймовірності забезпечення швидкості передавання даних у цифровому тракті, не вищої за ту, що реалізується цифровою системою передавання в j -му тракті прив'язки:

$$P(b_j \leq B_{\text{дост.}j}) = F(u), \quad \text{де} \quad u = \frac{B_{\text{дост.}j} - B_{\text{ср.}j}}{\sigma[b_j]}.$$

Проведемо деякі розрахунки. Приклад 1. Розрахувати кількість віртуальних з'єднань абонентів з Web-сервером обчислювального центру за таких умов:

- швидкості передачі даних по цифровому тракту доступу становлять $B_{\text{дост.}j} = 155, 300$ і 500 Мбіт/с;
- імовірність відмови у встановленні з'єднання цифровим трактом доступу не повинна перевищувати $P(b_j B_{\text{дост.}j}) \leq 10^{-3}$. Цій імовірності відповідає аргумент функції нормального розподілу $u = 3,08$;
- параметри роботи абонентів трьох класів такі: $B_p^{(1)} = 64$ кбіт/с, $p^{(1)} = 0,9$; $B_p^{(2)} = 512$ кбіт/с, $p^{(2)} = 0,8$; $B_p^{(3)} = 2$ Мбіт/с, $p^{(3)} = 0,5$.
- цифровий тракт доступу до Web-сервера обчислювального центру використовується для приймання даних тільки від абонентів одного класу.

За формулою за швидкості доступу 155 Мбіт/с отримуємо максимальну можливу кількість віртуальних з'єднань із Web-сервером обчислювального центру абонента тільки першого класу $N_{\text{вс.}j.\text{макс}}^{(1)} = 2590$, тільки другого класу – $N_{\text{вс.}j.\text{макс}}^{(2)} = 325$, тільки третього класу – $N_{\text{вс.}j.\text{макс}}^{(3)} = 109$.

На рис. 3 представлено залежність максимально можливих з'єднань від швидкості роботи абонентів за трьох значень імовірності ($p = 0,9; 0,8$ і $0,5$) роботи абонентів із піковою швидкістю $B_p^{(k)}$ і за двох значень швидкості передавання даних ($B_{\text{дост.}j} = 500$ і 155 Мбіт) у цифровому тракті доступу. З

розгляду кривих впливає, що кількість віртуальних з'єднань зростає зі зменшенням абонентської швидкості доступу і зі зростанням швидкості передавання в тракті доступу обчислювального центру. Особливо різке зростання спостерігається на абонентських швидкостях доступу нижче 1,5 Мбіт/с.

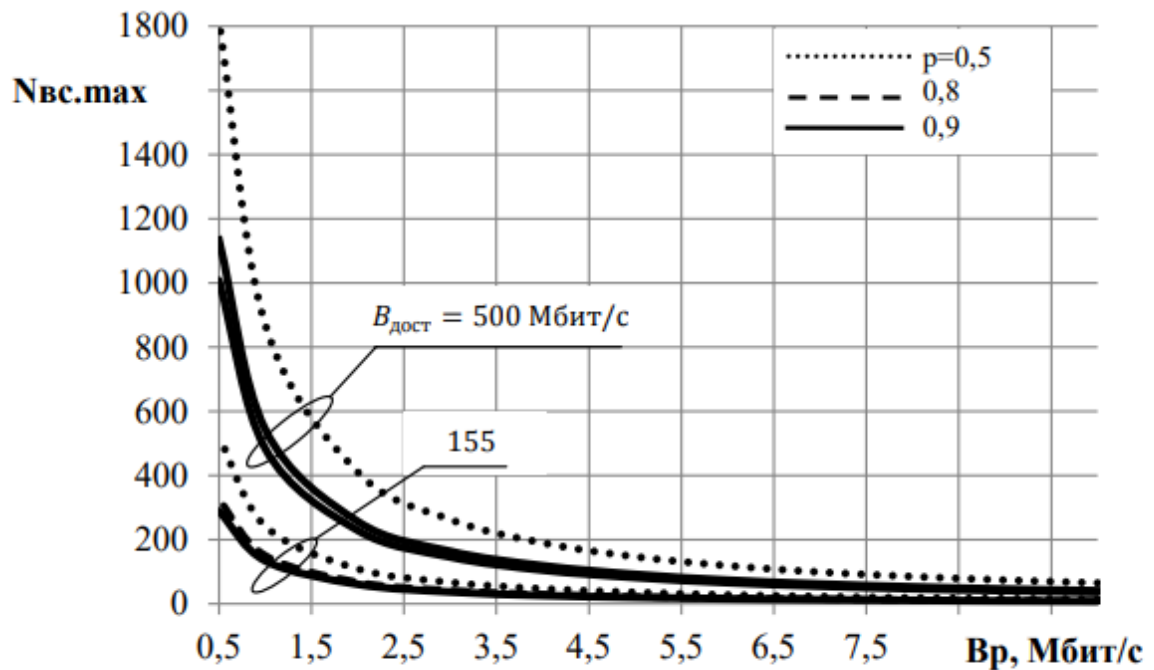


Рис. 3.2 - Залежність кількості максимально можливих віртуальних з'єднань абонентів з обчислювальним центром при швидкостях передачі даних у цифровому тракті доступу до мережі Інтернет 500 і 155 Мбіт/с.

Вплив значення допустимої ймовірності відмов в обслуговуванні на кількість максимально можливих віртуальних з'єднань показано на рис.4. Криві розраховано для ймовірності $p = 0,9$ роботи абонента з піковою швидкістю. Графіки свідчать про незначний вплив допустимої ймовірності відмови $P_{доп}$ на кількість віртуальних з'єднань. Так, збільшення ймовірності відмови з 10^{-3} до 10^{-1} призводить до збільшення не більше ніж на 10 віртуальних з'єднань.

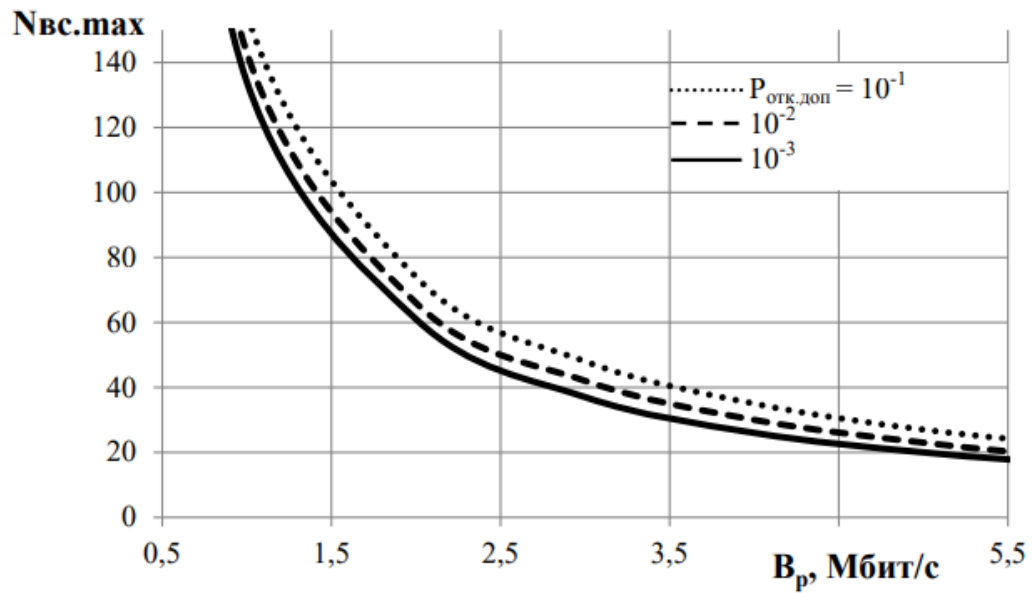


Рис. 3.3 - Залежність кількості максимально можливих з'єднань абонентів з обчислювальним центром від абонентської швидкості передавання даних при $p=0,9$.

Розрахуємо кількість віртуальних з'єднань з обчислювальним центром абонентів першого і другого класів.

Кількість віртуальних з'єднань абонентів першого і другого класу, які одночасно працюють, за швидкостей передавання даних у тракті доступу 155, 300 і 500 Мбіт/с і ймовірності відмови в обслуговуванні не вище 10^{-3} ілюструється на рис. 3.4.

Так, за $N_{вс,j}^{(1)}=1000$ кількість віртуальних з'єднань з обчислювальним центром абонентів другого класу не перевищує $N_{вс,j}^{(2)}=196$ за швидкості в тракті доступу 155 Мбіт/с і не перевищує 529 віртуальних з'єднань за 300 Мбіт/с і не перевищує 1000 за 500 Мбіт/с.

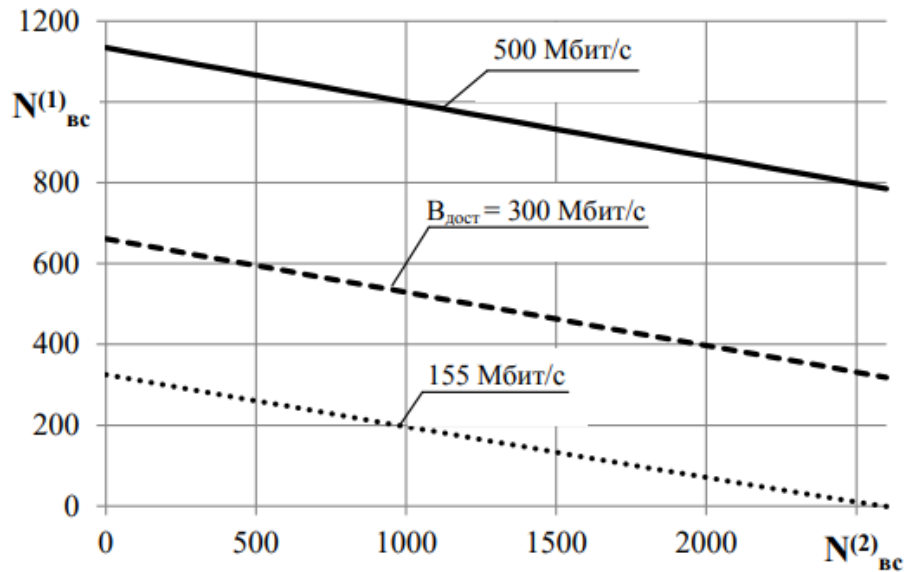


Рис. 3.4 - Кількість віртуальних з'єднань з обчислювальним центром абонентів першого класу за ймовірності відмови в обслуговуванні не вище 10^{-3} .

Також потрібно розрахувати кількість віртуальних з'єднань з обчислювальним центром абонентів першого і третього класів.

Характер залежності кількості віртуальних з'єднань від швидкості тракту доступу обчислювального центру аналогічний представленому на рис. 3.3.

Так, за $N^{(1)}_{vc}=1000$ кількість віртуальних з'єднань з обчислювальним центром абонентів третього класу не перевищує $N^{(3)}_{vc,j}=63$ за швидкості в тракті доступу 155 Мбіт/с і не перевищує 184 віртуальних з'єднань при 300 Мбіт/с і не перевищує 361 - при 500 Мбіт/с.

Якщо цифровий тракт доступу зі швидкістю 155 Мбіт/с використовується для приймання даних від абонентів трьох класів і кількість з'єднань від двох класів становить $N^{(1)}_{vc,j}=1000$ і $N^{(2)}_{vc,j}=100$, то за формулою допустиме кількість віртуальних з'єднань абонентів третього класу не перевищує $N^{(3)}_{vc,j}=30$, а при швидкостях 300 і 500 Мбіт/с не перевищує 148 і 324

віртуальних з'єднань відповідно.

Результати обчислень для трьох класів абонентів і швидкості цифрового тракту доступу 155 Мбіт/с наведено на рис. 3.5 у вигляді поверхні, що обмежує максимальну кількість віртуальних з'єднань за вищевказаних умов.



Рис. 3.5 - Кількість віртуальних з'єднань з обчислювальним центром абонентів першого, другого і третього класу.

На рис. 3.6 ілюструється максимально допустима кількість віртуальних з'єднань абонентів кожного з трьох класів $N_{BC,j,max}^{(1)} = 2590$, $N_{BC,j,max}^{(2)} = 325$, $N_{BC,j,max}^{(3)} = 109$, що відповідає точкам А, С і В на осях графіка.

Точка Е відповідає кількості віртуальних з'єднань $N_{вс,j}^{(1)} = 1000$, $N_{BC,j,max}^{(2)} = 196$ за спільної роботи абонентів першого і другого класів, а точка F відповідає $N_{BC,j,max}^{(1)} = 1000$, $N_{BC,j,max}^{(3)} = 63$ за спільної роботи абонентів першого і третього класів.

Точка D на поверхні тривимірного графіка ілюструє кількість віртуальних з'єднань абонентів $N_{BC,j,max}^{(1)} = 1000$, $N_{BC,j,max}^{(2)} = 100$, $N_{BC,j,max}^{(3)} = 30$ кожного класу за спільної роботи.

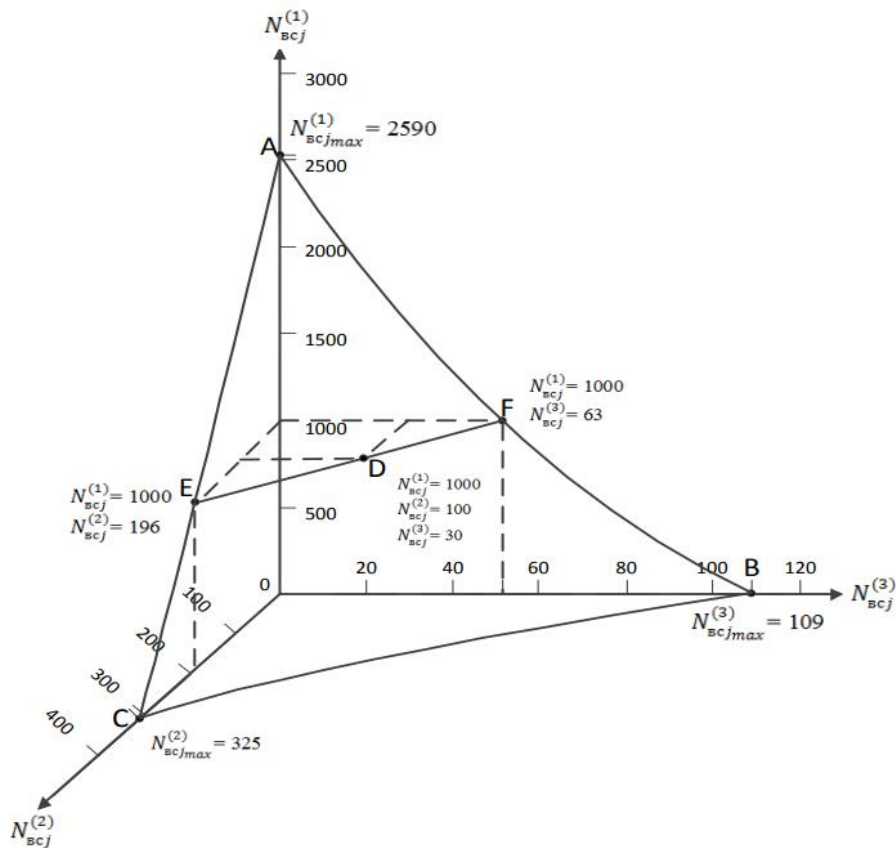


Рис. 3.6 - Залежність допустимої кількості віртуальних з'єднань з обчислювальним центром абонентів трьох класів за їхньої спільної роботи.

Таким чином, за кількістю віртуальних з'єднань абонентів кожного класу з обчислювальним центром, можна оцінити достатність пропускної спроможності цифрового тракту прив'язки за умови виконання встановлених вимог щодо ймовірності відмови в обслуговуванні в годину найбільшого навантаження.

Висновки за розділом 3

У даному розділі здійснено експериментальне дослідження, спрямоване на вивчення показників пропускної спроможності системи. У розділі описані умови та обмеження, які враховувалися під час проведення експерименту. Також наведено основні розрахункові співвідношення, які використовувалися для аналізу отриманих результатів.

ВИСНОВКИ

У цій роботі було досліджено методи визначення та управління пропускною спроможністю Mesh-мережі. Основні результати дослідження включають аналіз теоретичних аспектів Mesh-мереж, пропускної спроможності Mesh-мереж та експериментальні дослідження. Проаналізовано основні поняття та топології Mesh-мереж, які забезпечують гнучкість та надійність мережевих з'єднань. Вивчено різні сфери використання Mesh-мереж, включаючи їх застосування в розумних містах, промислових мережах та інтернеті речей (IoT). Визначено основні переваги та особливості Mesh-мереж, що робить їх привабливими для широкого кола застосувань. Розкрито поняття пропускної спроможності мережі та визначено ключові фактори, що на неї впливають. Проаналізовано принципи управління пропускною спроможністю та запропоновано ефективні алгоритми та стратегії для її оптимізації. Проведено аналіз існуючих методів визначення та управління пропускною спроможністю, їх переваги та недоліки. Визначено основні показники пропускної спроможності Mesh-мереж та проведено експериментальні дослідження для їх оцінки. Встановлено умови та обмеження, які впливають на пропускну спроможність Mesh-мереж. Розроблено основні розрахункові співвідношення для визначення пропускної спроможності в різних умовах експлуатації.

Запропоновані методи визначення та управління пропускною спроможністю Mesh-мереж показали свою ефективність у покращенні продуктивності мережі. Результати дослідження можуть бути використані для подальшого розвитку Mesh-мереж, зокрема у сферах, що потребують високої надійності та масштабованості. Запропоновані алгоритми та стратегії управління пропускною спроможністю можуть бути інтегровані у вже існуючі мережеві інфраструктури для покращення їхньої ефективності. Ця робота створює базу для подальших досліджень у напрямку оптимізації Mesh-мереж,

що сприятиме їх більш широкому впровадженню та використанню в різних галузях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Liu, M., Leung, V.C.M., Liu, K.R.: Mesh networks: an overview. *IEEE Netw.* 21(4), 28–36 (2007)
2. Akyildiz, I.F., Wang, X., Wang, W.: Wireless mesh networks: a survey. *Comput. Netw.* 47(4), 445–487 (2005)
3. Rani, R., Ansari, J.: A survey on applications of wireless mesh network. *Procedia Comput. Sci.* 48, 706–711 (2015)
4. Zhang, H., Cao, G.: Capacity of wireless mesh networks: a new perspective. In: 26th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM), pp. 228–237. IEEE (2007)
5. Keshavarz-Haddad, A., Taheri, H.: A survey on routing algorithms in wireless mesh networks. *Comput. Netw.* 57(11), 2411–2434 (2013)
6. Gupta, S., Agrawal, D.P.: A survey of clustering schemes for mobile ad hoc networks. *Commun. Surv. Tutorials, IEEE* 15(2), 860–877 (2013)
7. Wang, Y., Guo, S., Zhang, Y.: Experimental study on the throughput of wireless mesh networks under interference constraint. In: IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), pp. 1–9. IEEE (2013)
8. Farris, I., Mahmoud, A.S.: Performance evaluation of multipath routing protocols in wireless mesh networks. *J. Netw. Comput. Appl.* 35(1), 62–70 (2012)
9. Hwang, I.S., Choi, B.K., Kim, H.S.: Performance analysis of wireless mesh networks using multiple gateways. In: International Conference on Information Networking (ICOIN), pp. 263–268. IEEE (2014)

ДОДАТКИ**Додаток А**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет комп'ютерних наук
Кафедра теоретичної та прикладної системотехніки
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) **бакалавр**
галузь знань:15 – Автоматизація та приладобудування
спеціальність:151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри теоретичної
та прикладної системотехніки
_____ д.т.н., проф. Шматков С. І.
«21» грудня 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Нестеренко Нікіта Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема роботи «Метод визначення та управління пропускнуою спроможністю Mesh-мережі»

керівник роботи Павлов Анатолій Миколайович, старший викладач
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від “ ____ ” ____ 2024року № _____

2.Строк подання студентом роботи 31 травня 2024року

3. Перелік питань, які потрібно розробити

1. Аналіз Mesh-мережі.
2. Пропускна спроможність у Mesh-мережах.

3. Теоретичні основи визначення пропускної спроможності.
4. Вибір методики та розрахунки пропускної спроможності Mesh-мережі.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Аналіз научної літератури	21.12.2023 - 25.01.2024
2	Визначення та характеристики Mesh-мереж	19.12.2023 - 2.01.2024
3	Пропускна спроможність у Mesh-мережах	2.01.2024 - 2.02.2024
4	Метод визначення пропускної спроможності Mesh-мережі	2.01.2024 - 2.02.2024
5	Вибір методики та розрахунки пропускної спроможності Mesh-мережі	3.02.2024 - 30.03.2024
6	Підготовка наукової статті	3.03.2024 - 30.04.2024
7	Розробка пояснювальної записки	31.03.2024 - 27.05.2024
8	Оформлення звіту за результатами переддипломної практики	15.05.2024 – 31.05.2024
9	Представлення кваліфікаційної роботи керівнику та рецензенту	31.05.2024
10	Оформлення пояснювальної записки та підготовка презентації	31.05.2024

5. Дата видачі завдання 21.12.2023

Студент

Нестеренко Н. С.

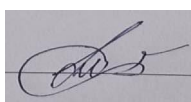
ініціали, прізвище


 підпис

Керівник роботи

Павлов А. М.

ініціали, прізвище


 підпис

Додаток Б

Затверджую

«___» _____ 2023 р.

**Технічне завдання
на розробку програмного виробу «Метод визначення та управління
пропускною спроможністю Mesh-мережі»**

1.	Введення	1.1. Назва: Метод визначення та управління пропускною спроможністю Mesh-мережі 1.2. Галузь застосування: Автоматизація та приладобудування
2.	Підстава для розробки	2.1. Навчальний план за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології 2.2. Завдання на кваліфікаційну роботу бакалавра №4101-5/895 від «23» травня 2024 (представити як Додаток А до пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи).
3.	Призначення розробки	3.1. Мета розробки: полягає у створенні ефективного та оптимізованого способу керування мережею, який забезпечить оптимальне використання ресурсів та максимальну пропускну спроможність. 3.2. Призначення розробки: Визначення пропускної спроможності, управління пропускною спроможністю, оптимізація трафіку, адаптація до змінних умов 3.3. Вихідні дані розробки: пропускну спроможність Mesh-мережі; вхідні дані розробки: дані задані умовою.
4.	Технічні вимоги до програмного виробу	4.1. Вимоги до функціональних характеристик: автоматичне визначення пропускної спроможності, динамічне керування пропускною спроможністю, моніторинг та аналіз мережі, сумісність з існуючими стандартами. 4.2. Вимоги до надійності: забезпечення безперебійної роботи програмного виробу при будь-яких вимогах користувача в рамках призначення виробу . 4.3.Вимоги до умов експлуатації: немає 4.4. Вимоги до складу і параметрів технічних засобів: для виконання програми повинен підходити ПК із

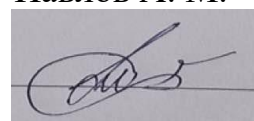
		будь-якою операційною системою сімейства Windows, Linux/Unix, Mac OS . 4.5. Вимоги до інформаційної та програмної сумісності: підтримка ОС Linux або Windows 11, підтримка мови програмування, підтримка різних платформ. 4.6. Вимоги до маркування та упаковки: вимоги до маркування та упакування не представляються. 4.7. Вимоги до транспортування і зберігання: вимоги до транспортування та зберігання не представляються. 4.8. Спеціальні вимоги: спеціальні вимоги до програмного виробу не пред'являються.	
5.	Вимоги до програмної документації	Програмною документацією до виробу «Метод аналізу інформативності змінних стану при діагностиці систем з використанням інформаційних критеріїв» вважати: 1) Справжнє Технічне завдання на розробку виробу (представити у вигляді Додатку Б до пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи). 2) Методику розрахунку інформативності змінних стану (у вигляді глав 3.2 та 3.3 пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи). 3) Опис виробу (представити в розділі 3 пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи)	
6.	Вимоги до техніко-економічних показників	Програмною документацією до виробу «Метод визначення та управління пропускнуою спроможністю Mesh-мережі» вважати: 1) Справжнє Технічне завдання на розробку виробу (представити у вигляді Додатку Б до пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи). 2) Опис програмного виробу (представити в Розділі 3 пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи). 3) Джерела базової інформації.	
7.	Стадії і етапи розробки	Дата	Назва етапу
		від 21 грудня 2023 до 25 січня 2024	Аналіз научної літератури
		від 19 грудня 2023 до 2 січня 2024	Визначення та характеристики Mesh-мереж
		від 2 січня 2024 до 2 лютого 2023	Пропускна спроможність у Mesh-мережах сортування

		від 2 січня 2024 до 2 лютого 2024 від 3 лютого 2024 до 30 березня 2024 від 3 березня 2024 до 30 квітня 2024 від 31 березня 2024 до 27 травня 2024 від 15 травня 2024 до 31 травня 2024 31 травня 2024 31 травня 2024	Метод визначення пропускної спроможності Mesh-мережі Вибір методики та розрахунки пропускної спроможності Mesh-мережі Підготовка наукової статті Розробка пояснювальної записки. Оформлення звіту за результатами переддипломної практики. Представлення кваліфікаційної роботи керівнику та рецензенту Оформлення пояснювальної записки та підготовка презентації
8.	Порядок контролю і приймання програмного продукту (моделі)	1. Перевірку ходу розробки програми виконувати раз в 3 тижні. 2. Захист розробленої моделі провести на засіданні Атестаційної комісії. 3. Пояснювальну записку подати на паперових носіях в 1 примірнику і в електронному вигляді в 1 примірнику на CD-R компакт-диску.	

Виконавець
студент групи КУ- 41
Нестеренко Н. С.



Замовник
старший викладач
Павлов А. М.



Додаток В**Програма і методика випробувань програмного виробу**

«Метод визначення та управління пропускнуою спроможністю Mesh-мережі»

1 Об'єкт випробувань

1. Назва програмного виробу : «Метод визначення та управління пропускнуою спроможністю Mesh-мережі»
2. Галузь застосування : Автоматизація та приладобудування
3. Перераховані відомості запозичуються з відповідних розділів Технічного завдання.

2. Мета випробувань

Перевірка відповідності функціональності програмної реалізації системи заявленим функціональним можливостям в технічному завданні (Додаток Б до пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи).

3. Загальні положення**1. Підстави для проведення випробувань**

Підставою для проведення випробувань є наказ про призначення атестаційної комісії.

2. Місце і тривалість випробувань

Приймальні (приймально-здавальні) випробування проводяться на базі комп'ютерного класу кафедри в період роботи атестаційної комісії.

3. Обсяг випробувань

Приймальні випробування програмного виробу проводяться в обсязі відповідному цієї програми і методики випробувань.

4. Організації, які беруть участь у випробуваннях

Приймальні випробування проводяться атестаційною комісією напередодні засідання (або в процесі засідання) за участю Замовника, Виконавця та інших осіб, присутніх на засіданні.

4. Вимоги до програми або програмного виробу

Модель повинна задовольняти наступним вимогам:

- 4.1. Вимоги до функціональних характеристик: автоматичне визначення пропускнуої спроможності, динамічне керування пропускнуою спроможністю, моніторинг та аналіз мережі, сумісність з існуючими стандартами.

- 4.2. Вимоги до надійності: забезпечення безперебійної роботи програмного виробу при будь-яких вимогах користувача в рамках призначення виробу .
- 4.3. Вимоги до умов експлуатації: немає
- 4.4. Вимоги до складу і параметрів технічних засобів: для виконання програми повинен підходити ПК із будь-якою операційною системою сімейства Windows, Linux/Unix, Mac OS .
- 4.5. Вимоги до інформаційної та програмної сумісності: підтримка ОС Linux або Windows 11, підтримка мови програмування, підтримка різних платформ.
- 4.6. Вимоги до маркування та упаковки: вимоги до маркування та упакування не представляються.
- 4.7. Вимоги до транспортування і зберігання: вимоги до транспортування та зберігання не представляються.
- 4.8. Спеціальні вимоги: спеціальні вимоги до програмного виробу не пред'являються.

5. Вимоги до програмної документації

Документацією до виробу «Метод визначення та управління пропускнуою спроможністю Mesh-мережі» вважати:

- 1) Документація по мові програмування та додаткові мануали.
- 2) Програму і методику випробувань розробленої програми (представити як Додаток В до пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи).
- 3) Опис програмного виробу (представити в Розділі 3 пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи).
- 4) Джерела базової інформації.

6. Засоби і порядок випробувань

6.1 Засоби випробувань

Засоби випробувань представлено на ПК на яких встановлено наступні програмні засоби: інтерпретатор мови програмування.

6.2 Порядок проведення випробувань

Як правило, випробування проводяться в два етапи:

- ознайомчий (1-й етап);
- власне випробування програмного виробу (2-й етап).

Перелік перевірок, що проводяться на 1 етапі випробувань, включає в себе:

1) Перевірку комплектності складу програмної документації здійснюється за критерієм наявності зазначеної в ТЗ документації.

2) Перевірку якості програмної документації. Перевірку здійснювати за критерієм відповідності вимогам ГОСТ 19.301-79 ЕСПД. «Програма і методика випробувань».

Перелік перевірок, що проводяться на 2 етапі випробувань, включає в себе:

1) Перевірку відповідності технічних характеристик програми вимогам технічного завдання.

2) Перевірку ступеня виконання функціональних вимог до програми.

3) Методику проведення перевірок:

а) Запустити програмне забезпечення.

б) Порядок проведення випробувань:

– Зробити налаштування.

– Перевірити чи працює програма.

– Перевірити чи формується звіт.

4) Якщо перевірки на першому та другому етапах виконано успішно, то виріб вважається таким, що пройшов випробування.

Для проведення випробувань пропонується тест 1, тест 2 та тест 3.

Тест 1

1. Перевірка виконання програми;
2. Залежність допустимої кількості віртуальних з'єднань з обчислювальним центром абонентів трьох класів за їхньої спільної роботи.;
3. Отримання результату.

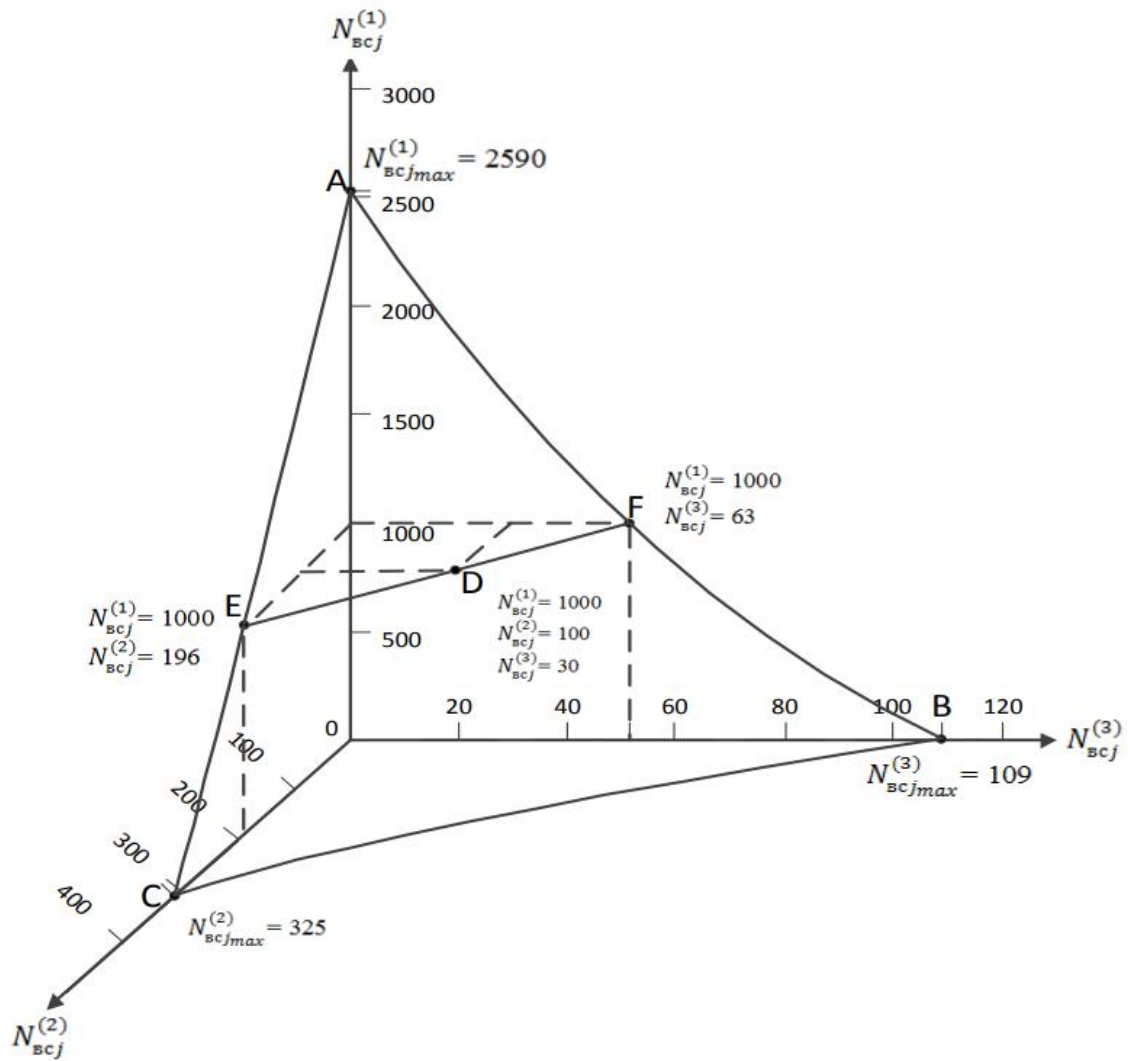


Рис. В.1 Тест 1

Тест 2

1. Перевірка виконання програми
2. Значення ймовірності відмови в обслуговуванні;
3. Отримання результату.

$P_{\text{доп}}$	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}
u	-2,326	-3,090	-3,719	-4,265	-4,753	-5,199	-5,612	-5,998	-6,631

Рис. В.2 Тест 2

Тест 3

4. Перевірка виконання програми

5. Залежність кількості максимально можливих віртуальних з'єднань абонентів з обчислювальним центром за швидкостей передавання даних у цифровому тракті доступу до мережі Інтернет 500 і 155 Мбіт/с;
6. Отримання результату.

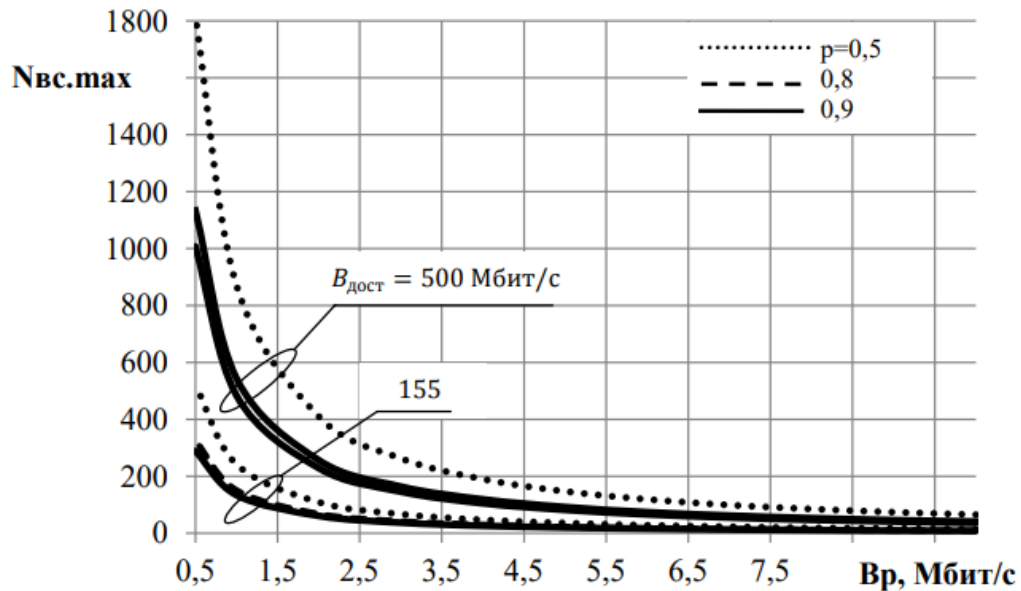


Рис. В.3 Тест 3

Тест вважається пройденим, якщо відбуваються вказані операції і їх відображення у програмному продукті.

Висновки: тест 1 успішно пройшов випробування, тест 2 успішно пройшов випробування і тест 3 успішно пройшов випробування. Випробування пройшло успішно.

Виконавець: студент групи КУ-41, Нестеренко Н. С.