МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Факультет математики і інформатики

Кафедра теоретичної та прикладної інформатики

Кваліфікаційна робота

магістр

на тему:

«Керування трафіком реального часу в комп'ютерних мережах»

Виконав: студент 2 курсу, групи МФ-61
спеціальність 122 «Комп’ютерні науки»
освітньо-наукова програма
«Інформатика»
Шкловський Валерій Борисович

Керівник: проф., д. т. н.
Руккас Кирило Маркович

Рецензент _____

Харків – 2023 року

ЗМІСТ

1. ВСТУП

1.1. Формулювання мети роботи, задач та обґрунтування актуальності теми

Сьогодні в часи глобальної індустріалізації і технологічного прориву важко уявити життя без розумного будинку, автомобіля, який самостійно безпечно може їхати і супутника на орбіті, який аналізує стан атмосфери в реальному часі. Для якісної роботи всіх вузлів недостатньо великої швидкості передачі даних, велику роль відіграє надійність мережі і каналів зв’язку. Стандартне мережеве обладнання [1] сучасних інформаційних технологій не може забезпечити автоматичну синхронізацію елементів, але крок за кроком інтеграція нових технологій робить індустрію інформаційних мереж більш високо динамічною, гнучкою і передбачуваною. Однією з таких технологій є TSN (Time Sensitive Network) [2], яка робить неоціненний внесок в розвиток тим, що забезпечує надійний зв’язок в реальному часі та підвищує універсальність в промислових мережах. Такі мережі жорстко налаштовані під виконання специфічних задач, тому тиражування в реальному часі для перевірки нових функцій неможливе і у нагоді стає симуляції у віртуальному середовищі для демонстрації своїх переваг і недоліків. Це дозволяє провести дослідження в контрольованих умовах без небезпеки втручання в реальне середовище.

1.2 Стислий огляд відомих результатів

Моделювання мереж реального часу є активним напрямком досліджень в галузі комп'ютерних наук та інформаційної технології.

Дослідження в цій галузі спрямовані на розробку методів та алгоритмів, які дозволяють забезпечувати передачу даних у реальному часі.

Одним з відомих результатів моделювання мереж реального часу є мережевий стек протоколів Ethernet AVB (Audio Video Bridging) [3], який було розроблено з метою забезпечення передачі аудіо- та відеоданих у реальному часі з низькими затримками та високою якістю обслуговування.

Іншим відомим результатом є модель передачі даних TTEthernet (Time-Triggered Ethernet), яка базується на принципах строгого часового планування та дозволяє передавати дані з високою гарантією надійності та точності у реальному часі.

Однак обидві технології є обмеженими за сферою використання і не мають інструментів для передачі універсальних даних.

1.3. Відомості про одержані результати та їх новизна

Був змодельований ряд чутливих за часом мереж, використовуючи різні методи керування трафіком реального часу, і проаналізована наскрізна затримки для кожного випадку. В дипломній роботі розглянуті наступні проблеми:

- синхронізація часу;
- планування та формування трафіку з урахуванням часу;
- планування та формування трафіку на основі кредитів;
- технологія призупинення кадрів;
- технологія наскрізної комутації.

Отримані результати є важливими для практичного застосування TSN мереж у різних галузях, де вимагається висока точність та надійність передачі даних в реальному часі.

1.4. Теоретичне та практичне значення результатів, можливі області використання, результати

Одержані результати моделювання мереж реального часу мають важливе теоретичне та практичне значення і можуть відігравати велику роль в різних галузях промисловості та науки. Деякі з можливих областей застосування для досягнення високого рівня точності та надійності включають наступне:

1. Індустріальні мережі: відомості про продуктивність та надійність TSN мереж можуть бути використані для проектування та розробки індустріальних мереж.
2. Автомобільна промисловість: результати можуть бути використані для проектування та розробки систем автопілоту та безпеки автомобілів.
3. Телекомунікаційні мережі: можуть бути використані для проектування та розробки мереж реального часу в телекомунікаційній галузі.
4. Медичні пристрої: можуть бути використані для проектування та розробки медичних пристроїв, що дозволяють відслідковувати та контролювати роботу в реальному часі.

2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1. Постановка задачі

Головною задачею цієї дипломної роботи стояла моделювання критичних за часом мереж з метою дослідження ефективності різних методів управління трафіком реального часу. Зробивши аналіз існуючих стандартів TSN було визначено, що наступні мережі повинні відповідати певним критеріям:

- доставка даних з низькою затримкою та мінімальним відхиленням від заданого графіка;
- розділення трафіку на групи з різними пріоритетами;
- синхронізація часу в мережі;
- захист від мережевих колізій та переповнень.

В рамках даної роботи можна визначити наступні завдання:

- дослідження проблеми досягнення глобального часу в мережі;
- розглядання різних методів планування трафіку, а саме формування з урахуванням часу і формування на основі кредитів;
- визначення необхідності призупинення передачі кадрів в TSN мережі;
- встановлення важливості технології наскрізної комутації;
- розробка імітаційної моделі TSN мережі реального часу методом модульного проектування і реалізація функціональності TSN для планування трафіку;
- аналіз отриманих аналітичних результатів на відповідність специфікації TSN мережі.

2.2 Мережі реального часу

Комп'ютерна мережа, яка може гарантувати відповідь протягом визначеного проміжку часу, так званого “дедлайну”, можна класифікувати як мережу реального часу [4]. Існує два важливих фактора для того, щоб система відповідала своїм термінам доставки даних: детермінізм і обмежена затримка для зв’язку. Детермінізм означає, що система в будь-якому випадку буде формувати однаковий результат для однакових вхідних даних. Обмежена затримка означає, що існує верхня межа, яку гарантовано не буде перевищено. Проте стандартний Ethernet протокол не може гарантувати ні детермінізм, ні обмежену за часом затримку. Припустимо ситуацію, коли декілька звичайних пристроїв Ethernet надсилають серію пакетів на один і той самий порт приймача, в такому випадку отримаємо непередбачену затримку, оскільки пакети стануть в чергу, або навіть втрату даних, якщо буфер черги не достатньо великий. З метою уникнення даних проблем були розроблені спеціальні стандарти для забезпечення жорстких гарантій для мереж реального часу, які використовують Ethernet у формі обмеженої затримки або гарантії пропускної здатності. Кожен з них має свої особливості і використовується в різних галузях. Основні стандарти мереж реального часу відображено нижче (*табл. 1*) [5].

Стандарт	Сфера використання
Ethernet/IP, OPC UA, PROFINET	Промислові системи автоматизації
Profibus	Автоматизовані системи
Modbus, HART	Збір даних з пристроїв, що забезпечують контроль та

	управління процесами, включаючи вимірювальні прилади та сенсори
CAN	Передача даних між мікроконтролерами в автомобільних системах
EtherCAT	Передача даних в режимі реального часу між промисловими пристроями, що використовує технологію "Master-Slave"
TSN	Забезпечення точності часу та передачі даних з обмеженою затримкою та гарантованою доставкою

табл. 1 - Основні стандарти мереж реального часу

Серед вище предоменстрованих стандартів для вивчення був обраний TSN стандарт. Даний стандарт використовується як в промислових мережах (автоматизовані виробничі лінії, машини з ЧПУ, медичне обладнання), так і в телекомунікаційних мережах (передача відео і аудіо), де вкрай важливо передавати дані з високою точністю і гарантованою доставкою.

2.3 Time Sensitive Networking

У своїй найпростішій формі мережа чутлива до часу (TSN) [6] - це визначена стандартом IEEE 802.1Q технологія для гарантування детермінованого обміну пакетами в Ethernet. Технологія TSN передбачає

центральне управління, забезпечує гарантії доставки даних та мінімізовану затримку за допомогою планування часу. TSN є технологією другого рівня мережевої моделі OSI, таким чином маємо, що дана технологія - це стандарт Ethernet, а не стандарт інтернет протоколу. Рішення про відправку пакетів приймають мости TSN і використовують вміст заголовка Ethernet, а не IP-адресу. Корисне навантаження кадрів Ethernet може бути будь-яким і ніяким чином не обмежується інтернет протоколом. Завдяки цьому технологія TSN може використовуватися в будь-якому середовищі для переноса будь-якого корисного навантаження промислового застосування. Основним поняттям технології TSN є формування трафіку (*рис. 1*). Формувальник трафіку - це механізм, який спрямований на підвищення якості обслуговування для одного або декількох типів трафиків в мережі.

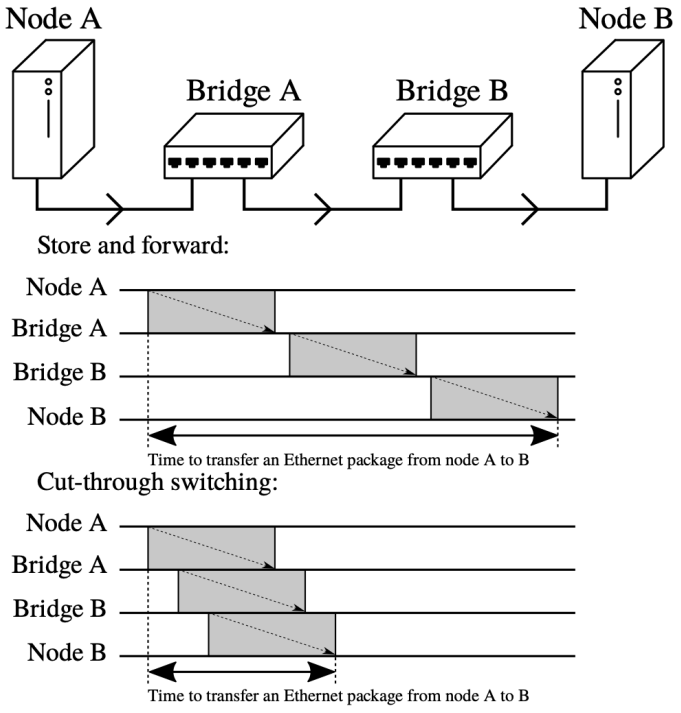

рис. 1 - Формування трафіку в TSN мережах

На зображенні вище продемонстровано використання комутації “зберегти і переслати” проти наскрізної комутації для надсилання одного пакету даних від вузла A до вузла B через два мости Ethernet.

2.4 Аналіз існуючих стандартів TSN мережі

Технологія TSN складається з набору стандартів, розроблених для для підтримки вимог реального часу та гарантованої якості обслуговування. Основні стандарти, їх сфери визначення і назви вказані нижче (*табл. 2*) [7].

Стандарт	Сфера визначення	Назва стандарту
IEEE 802.1AS, IEEE 1588	Синхронізація часу між мережевими пристроями	Enhancements and performance improvements
IEEE 802.1Qbu and IEEE 802.3br	Переадресація та черги	Frame preemption
IEEE 802.1Qbv	Переадресація та черги	Enhancements for scheduled traffic
IEEE 802.1Qca	Керування розкладом трафіку та затримкою	Path control and reservation

IEEE 802.1Qcc	Керування пропускною здатністю та керування затримками	Enhancements and performance improvements
IEEE 802.1Qci	Визначення та контроль якості обслуговування для трафіку реального часу	Per-stream filtering and policing
IEEE 802.1CB	Резервування шляхів для підтримки безперебійного комутування	Frame replication and elimination for reliability

табл. 2 - Стандарти TSN мережі

2.5. Огляд та аналіз існуючих інструментів для моделювання мереж

Моделювання мережі з нуля вимагає багато роботи. У багатьох випадках будуть використовуватися модулі, які вже були реалізовані тисячі разів. Програмні інструменти допомагають обійти цю проблему, надаючи основу, на яку можна сміло спиратися. Вони дозволяють будувати і аналізувати моделі різних типів мереж реального часу. Кожен з інструментів має специфічні особливості та можливості для розробки та аналізу. Нижче приведені найпопулярніші інструменти для моделювання мереж реального часу (*рис. 2*).

рис. 2 - Найпопулярніші інструменти для моделювання мереж реального часу

Проаналізовані різні інструменти для моделювання з точки зору промислового застосування. Окрім специфічних, комерційних реалізацій, існують дві добре відомі системи моделювання: OMNeT++ [8, 9] та ns-3 [10].

Переваги OMNeT++:

- Широкий спектр застосувань: OMNeT++ може використовуватись для моделювання різних типів мережевих систем, включаючи бездротові мережі, мережі на базі інтернету речей (IoT), мережі передачі даних тощо.
- Гнучкість: OMNeT++ дозволяє користувачеві створювати власні моделі та алгоритми для аналізу мережевих систем.

- Підтримка паралельної обробки: OMNeT++ може працювати на паралельних комп'ютерах та використовувати багатоядерні процесори для більш швидкого підрахунку.
- Модульність: OMNeT++ дозволяє моделювати окремі компоненти мережі як окремі модулі, що полегшує розробку та налагодження.
- Інтуїтивний інтерфейс: OMNeT++ має інтуїтивний графічний інтерфейс користувача, що дозволяє легко створювати та змінювати моделі.

Переваги ns-3:

- Висока продуктивність: ns-3 є дуже швидким інструментом для моделювання мережевих систем, зокрема завдяки використанню оптимізованої бібліотеки для роботи з мережевими протоколами.
- Активна спільнота користувачів: ns-3 має активну спільноту користувачів та розробників, яка постійно вдосконалює та підтримує цей інструмент.
- Відкритий код: ns-3 є відкритим інструментом з відкритим вихідним кодом, що дозволяє користувачам вносити свої власні зміни та покращувати коду.
- Інтерактивність: ns-3 має можливість інтерактивної роботи з симуляцією, що дає можливість в режимі реального часу переглядати та аналізувати результати симуляції.

Незважаючи на всі плюси, ns-3 має ряд недоліків: він вимагає великої кількості ресурсів, таких як пам'ять та обчислювальна потужність, що може призвести до повільної роботи симуляцій на менш потужних комп'ютерах і може бути нестабільним на деяких операційних системах, що може призвести до помилок та затримок у роботі. Як і все в нашому світі має свої переваги та недоліки, OMNeT++ нічим не відрізняється, він

також має ряд мінусів, серед яких обмежена кількість моделей пристроїв, що може перешкоджати моделюванню складних мережевих сценаріїв. Але незважаючи на ряд недоліків, кількість переваг перевищила кількість недоліків і було прийнято рішення для моделювання мережі використати OMNeT++.

2.6 Синхронізація часу

На превеликий жаль, реальний світ не має глобально узгодженого часу і кожен вузол в мережі використовує свій власний фізичний годинник для вимірювання проміжків часу. Через те, що кожний годинник має свою похибку час на годинниках на різних вузлах мережі з часом може відрізнятися. Для вирішення цієї проблеми необхідно використовувати методи синхронізації і періодично коригувати час на всіх вузлах мережі для коректної і злагодженої роботи. Синхронізація часу надважлива в TSN мережах, тому що точне відстеження має вирішальне значення в цих мережах. Для TSN мереж необхідна реалізація протоколу gPTP, який є розширенням стандарту IEEE 802.1 AS [11], який визначає протокол PTP або також відомий як IEEE 1588, всіма вузлами для досягнення спільної концепції часу. Протокол gPTP (*рис. 3*) використовує ієрархічну архітектуру, в якій є один або декілька головних вузлів і багато залежних. Коригування часу відбувається шляхом надсилання повідомлень синхронізації від головного вузла до всіх підлеглих.

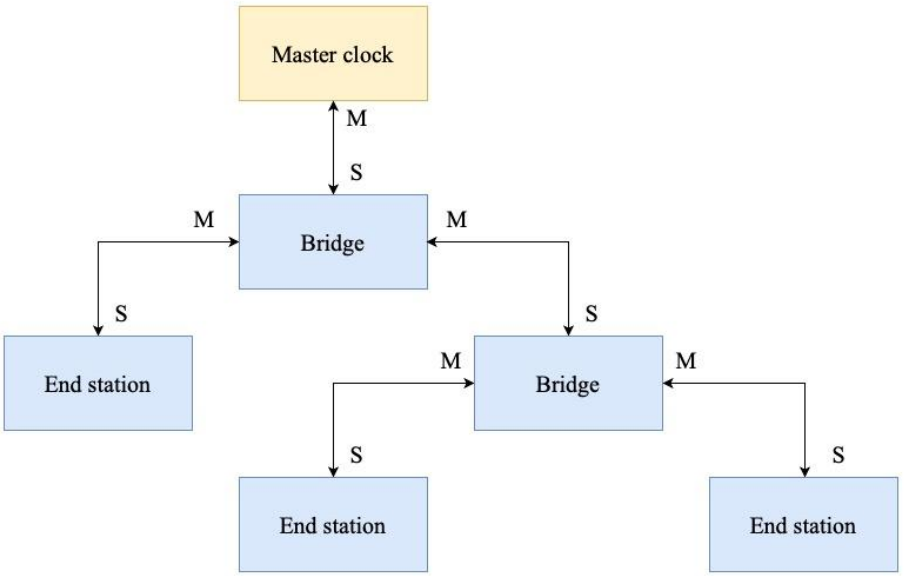

рис. 3 - Приклад мережі, побудованої згідно протоколу gPTP, де літера M означає, що відповідний Ethernet порт має роль головного, а літера S - підлеглого

Для демонстрації необхідності синхронізації годинників була змодельована наступна комп'ютерна мережа (*рис. 4*), яка складається з двох хостів-джерел, які надсилають UDP дані до двох хостів-приймачів через два поєднаних між собою комутатора.

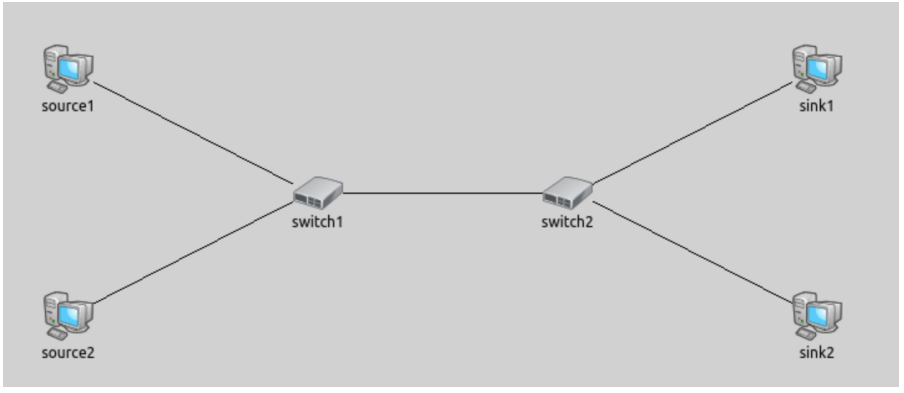

рис. 4 - Топологія мережі для виявлення проблеми глобального часу

В даній мережі всі вузли мають випадкову швидкість дрейфу годинників, яка періодично змінюється і всі годинники синхронізуються з часом модуля switch 1 (*рис. 5*) .

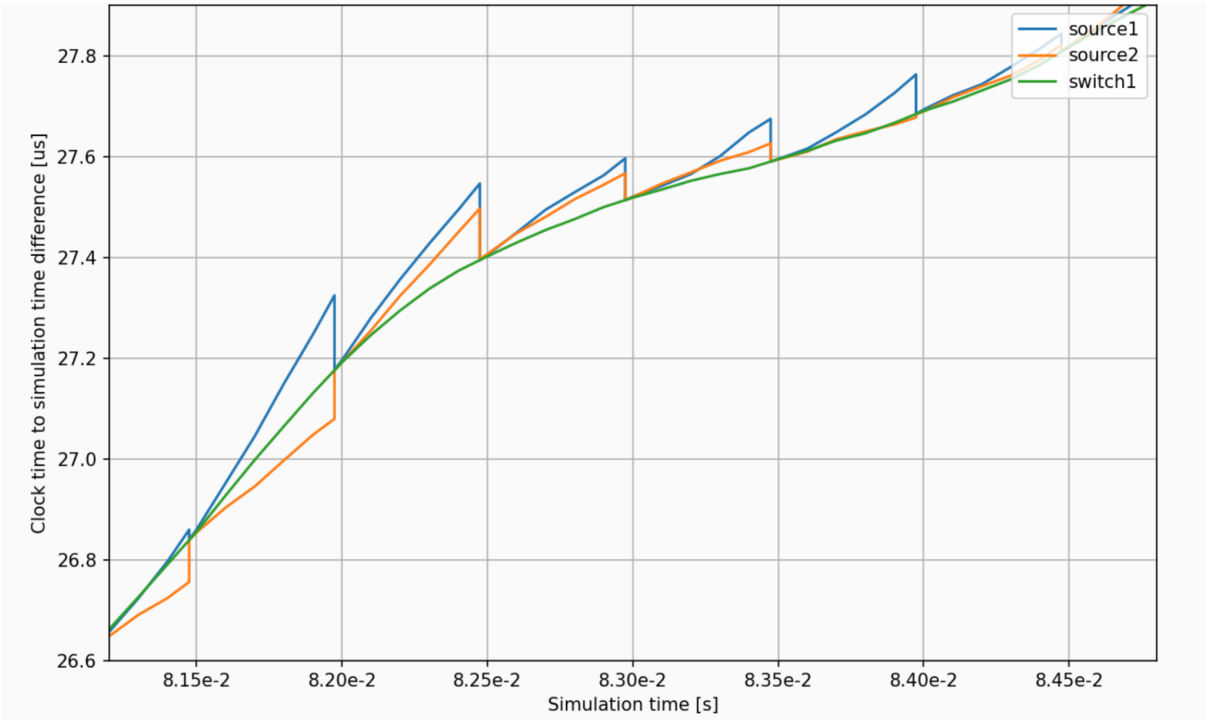

рис. 5 - Дрейф годинників з періодичною синхронізацією

Була виміряна наскрізна затримка пакетів на шляху від хоста-джерела до відповідного хоста-приймача у різних випадках. Якщо б годинники мали постійний дріфт, то передача трафіка мала б повторюваний характер (*рис. 6*)

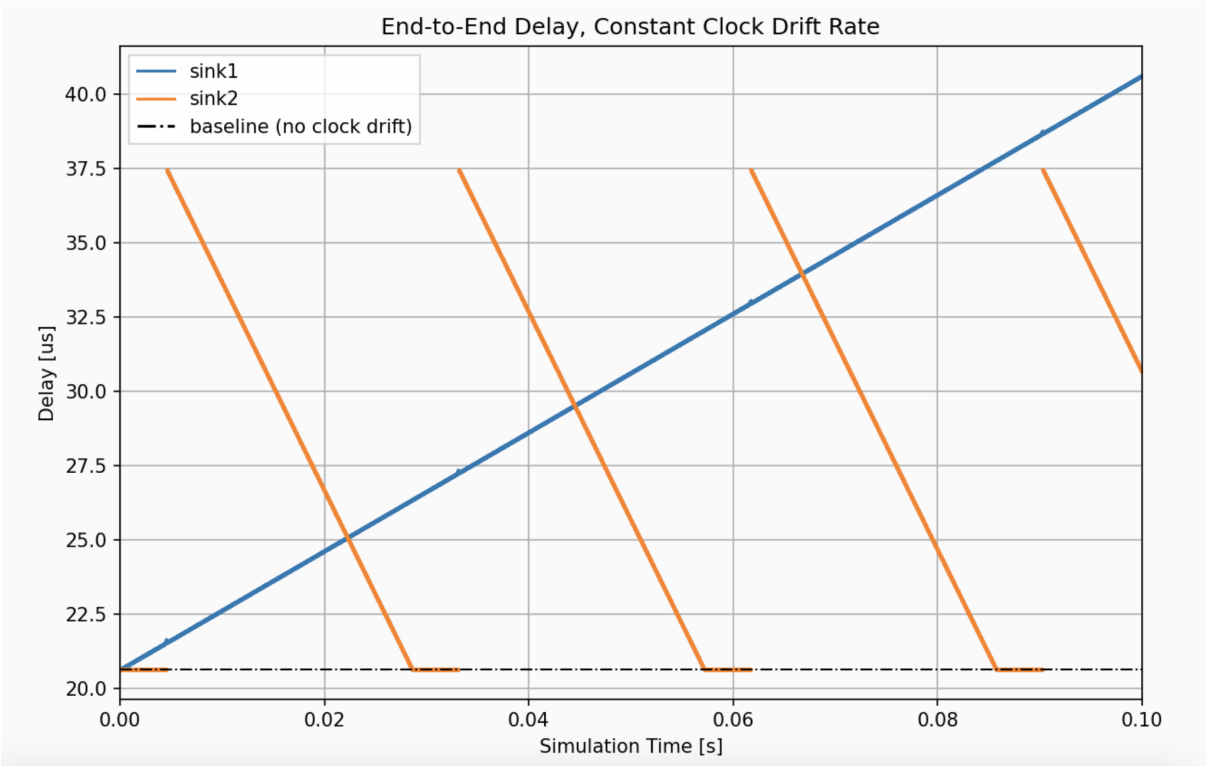

рис. 6 - Наскрізна затримка для постійного дріфту у випадку синхронізації годинників

У випадку, коли потік пакетів розріджений, то в середньому маємо менше пакетів для відправки, ніж кількість вікон відправки за певний проміжок часу, тому пакети не накопичуються в черзі. Однак ми маємо дрейф годинника і тому генерація пакетів і вікна відправки більше не синхронізовані і продовжують зміщуватись. Іноді пакет потрапляє до черги на комутаторі, коли відповідний шлюз для передачі закритий і йому доводиться чекати на наступне відприття. Якщо потік пакетів щільніший, то пакетів для відправки в середньому більше, ніж вікон для відправки за певний проміжок часу, тому пакети зрештою накопичуються в черзі. Це призводить до того, що затримка збільшується до нескінченності.

Для випадку, коли кожен модуль має довільний дрейф годинника маємо більш непередбачуваний результат наскрізної затримки (*рис. 7*).

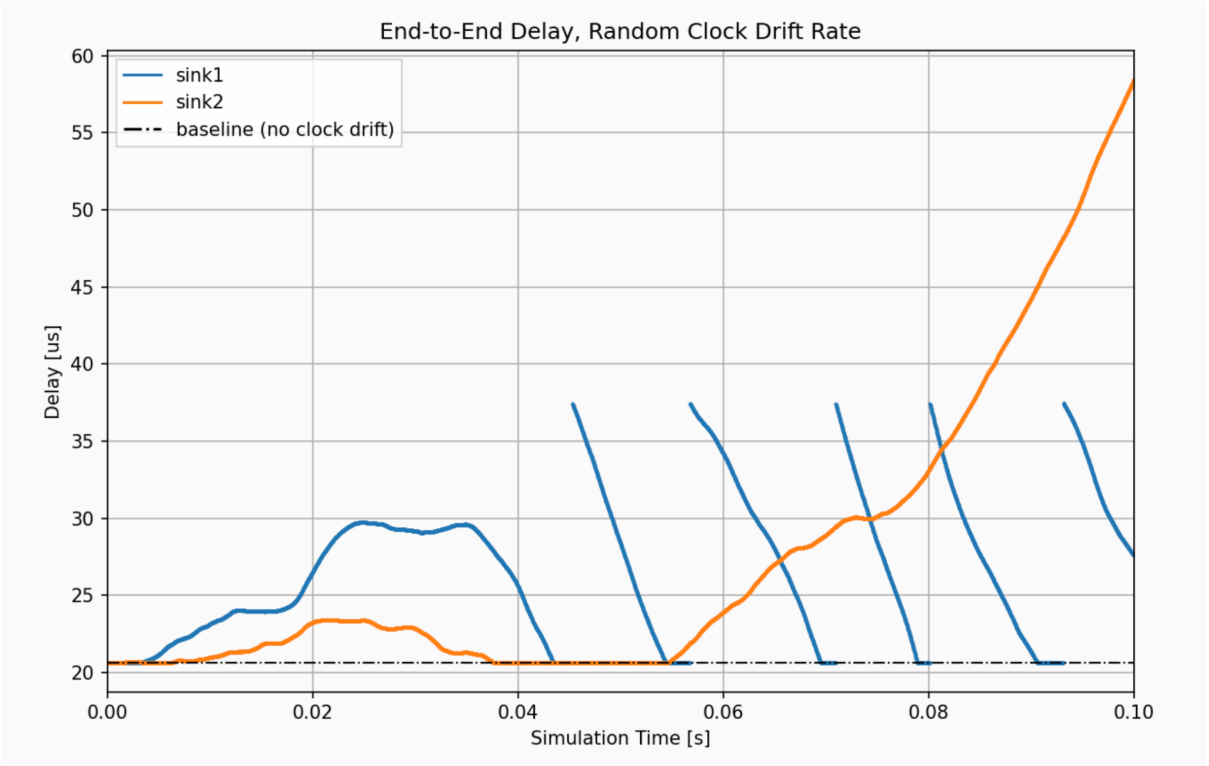

рис. 7 - Наскрізна затримка для довільного дріфту у випадку без синхронізації годинників

Отже, якщо не усунути постійний дрейф тактового генератора, мережа більше не може гарантувати будь-яку обмежену затримку для доставки пакетів. З метою досягнення гарантування обмеженої затримки необхідно синхронізувати годинники на кожному вузлі мережі (*рис. 8*).

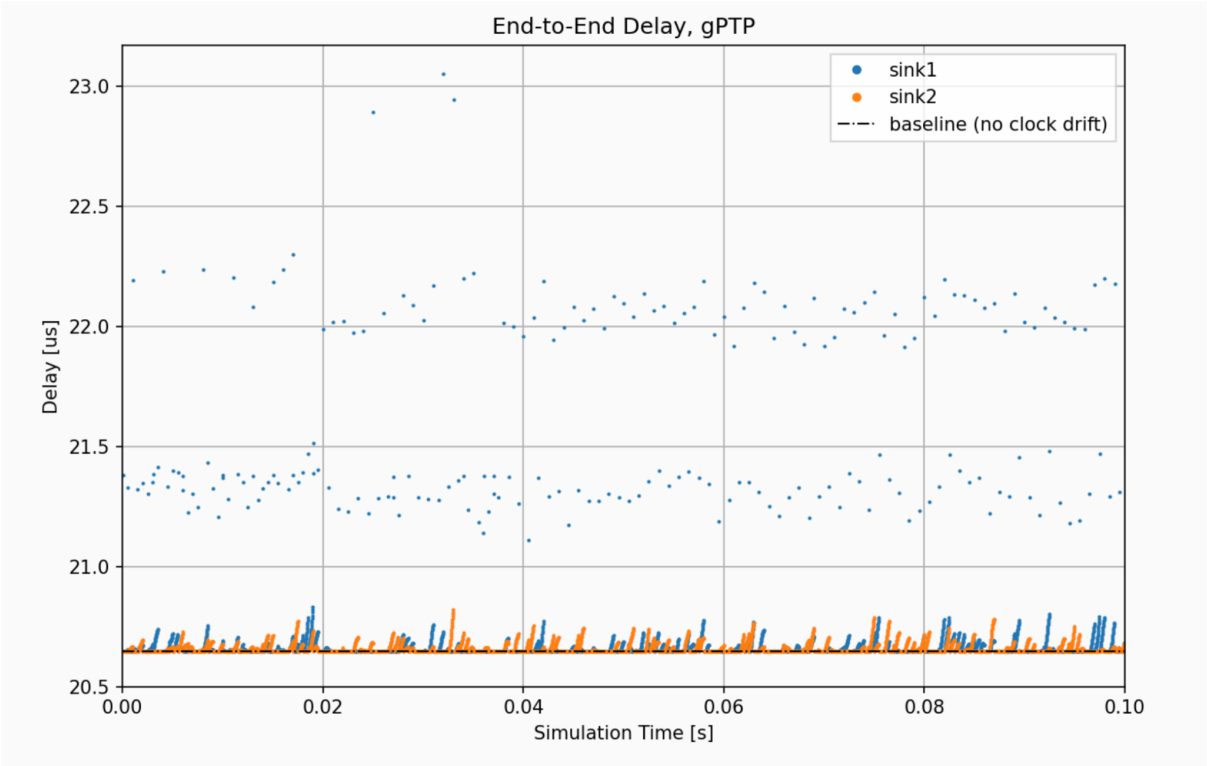

рис. 8 - Наскрізна затримка для рандомного дріфту у випадку синхронізації годинників

У випадку, коли дрейф годинника є випадковим, швидкість дрейфу компенсується без похибки при кожній події синхронізації, але так як швидкість дрейфу продовжує змінюватись навіть між подіями синхронізації, то це призводить до коливань затримки. Окрім цього маємо викиди, тому що gPTP необхідно для синхронізації часу надсилати пакети через мережу, що спричиняє затримки в передачі корисного трафіку.

2.7 Планування та формування трафіку

Планування і формування трафіку грають важливу роль в TSN мережах, оскільки саме так гарантується, що критичний трафік буде мати вищий пріоритет над іншим трафіком і загальна продуктивність мережі буде оптимізована відповідно до вимог якості обслуговування різних

потоків трафіку. Було розглянуто два важливих метода формування трафіку:

- Формування з урахуванням часу (Time-Aware Shaping)
- Формування на основі кредитів (Credit-Based Shaping)

2.7.1 Формування з урахуванням часу

Відповіддю на питання забезпечення своєчасної доставки критичних за часом кадрів є стандарт IEEE 802.1Qbv [12], він визначає спосіб передачи TSN кадрів за розкладом, дозволяючи іншим Ethernet кадрам передаватися в інтервалах, відповідно пріоритетності даних. Це забезпечує можливість гарантувати обмежену затримку передачі критичних за часом кадрів, що важливо для TSN мереж. Ідея даного стандарту полягає в розподілі часу на певні інтервали і плануванні передачі даних у відповідних інтервалах згідно їх пріоритету. Кадрам, які мають найвищий пріоритет завжди надається окремий інтервал часу для передачі, кадри, які мають нижчий пріоритет, передаються в залишку часу. Це робить затримку обмеженою, тому що кадри з нижчим пріоритетом не можуть затримувати кадри, які мають вищий пріоритет.

Формування трафіку було реалізовано за допомогою модуля Ieee8021qTimeAwareShaper (*рис. 10*). Даний модуль дозволяє замінити стандартну просту чергу в модульних інтерфейсах Ethernet, має декілька підчерг і відповідні шлюзи по кожному для кожного класу пріоритетності даних. Відповідно до стандарту IEEE 802.1Q [6] за замовчуванням цей модуль має вісім класів трафіку, але число класів можна налаштовувати згідно поставленої задачі.

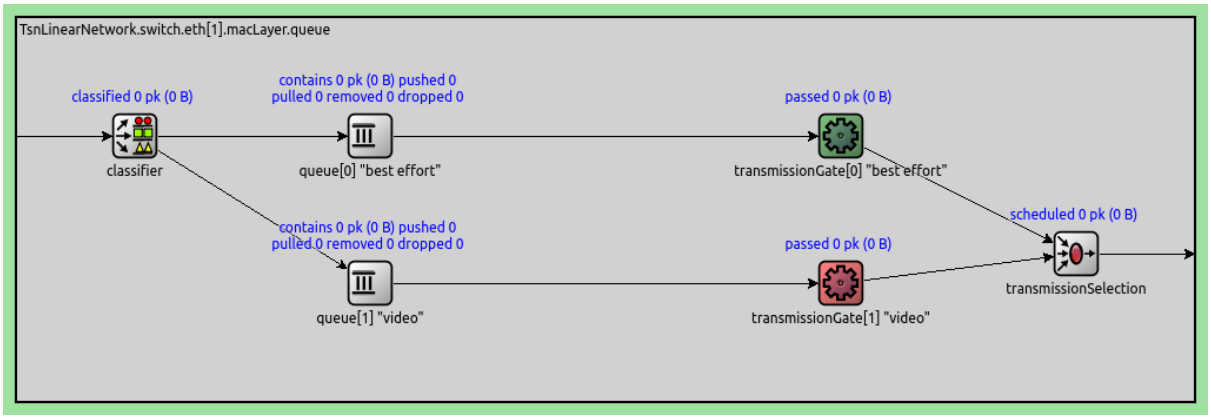

рис. 10 - Модуль Ieee8021qTimeAwareShaper із двома класами трафіку

Деякі зауваження, щодо потоку трафіку в формувальнику:

- дані розподіляються між собою згідно визначеного класифікатору і надсилаються в одну з черг;
- ворота для передачі даних відкриваються і закриваються тільки в заздалегідь визначений графік і позначають свій стан кольором - червоним, якщо закриті, або зеленим, якщо відкриті;
- після того, як пакет переходить до передачі, планувальник пріоритетів у кінці бере кадр із першої доступної черги через відкриті ворота.

Для демонстрації необхідності формування трафіку з урахуванням часу в TSN мережах була змодельована наступна мережа (*рис. 11*). Вона складається з наступних модулів: клієнт і сервер є модулями TSNDevice, TrafficGenerator і TrafficReceiver - StandardHost, а комутатор - TSNSwitch.

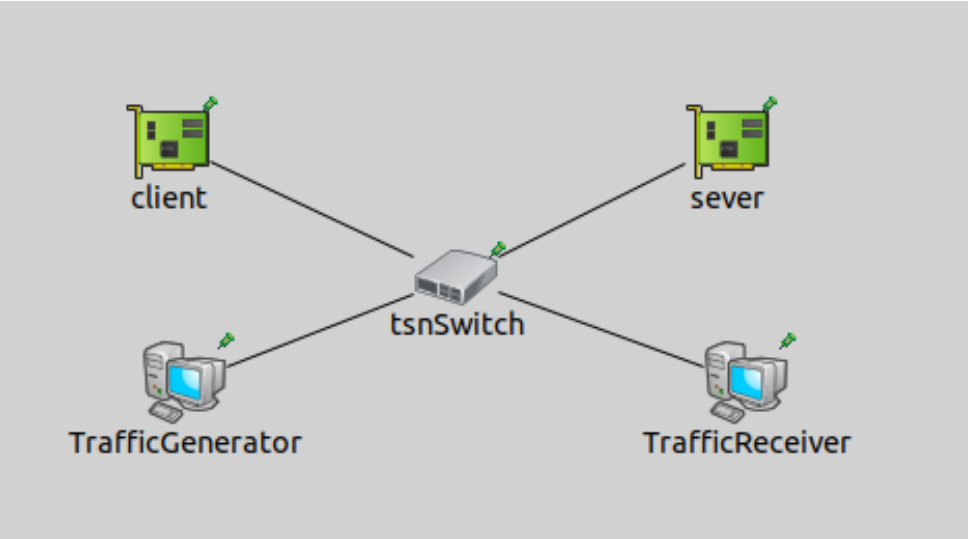

рис. 11 - Мережа для демонстрації формування трафіку з урахуванням часу

В даному прикладі була зосереджена увага на роботі формувальника трафіку з урахуванням часу і уникнення будь-яких ненавмисних ефектів формування трафіку іншими частинами мережі, такі як обмеження пропускної здатності каналу для того, щоб трафік змінювався лише в формувальнику і був незмінним від клієнта і до сервера. Клієнт створює високо пріоритетні дані, а генератор трафіку - фонові дані з низьким пріоритетом (*табл. 3*). Далі трафік класифікується за двома різними типами і на основі даного розподілення за потоками використовується кодування з метою призначення відповідного номеру пріоритетності даних.

Джерело	Пункт призначення	Тип трафіку	Інтервал передачі	Пріоритет	Розмір корисного навантаження
client	server	video	200 мс	4	946
Traffic Generator	Traffic Receiver	best effort	400 мс	0	946

табл. 3 - Параметри трафіку мережі

З метою передачі фонових даних протягом 40% часу, а відео трафіку протягом 20% був налаштований розклад відкриття відповідних воріт в зазначений час (*рис. 12*).

```
# time-aware traffic shaping
*.switch.eth[*].macLayer.queue.numTrafficClasses = 2
*.switch.eth[*].macLayer.queue.*[0].display-name = "best effort"
*.switch.eth[*].macLayer.queue.*[1].display-name = "video"
*.switch.eth[*].macLayer.queue.transmissionGate[0].offset = 0ms
*.switch.eth[*].macLayer.queue.transmissionGate[0].durations = [4ms, 6ms] # period is 10
*.switch.eth[*].macLayer.queue.transmissionGate[1].offset = 6ms
*.switch.eth[*].macLayer.queue.transmissionGate[1].durations = [2ms, 8ms]
```

рис. 12 - Налаштування графіку відкриття воріт

Пакети надсилаються клієнтом і генератором трафіку у випадкові проміжки часу, але комутатором в мережі вони пересилаються тільки згідно встановленого графіку відкриття дверей (*рис. 12*). Таким чином відповідно до налаштувань моделювання в кожному циклі інтервал з 0 - 4 мс - відправка фонових кадрів, 4 - 6 мс - відео, 6 - 10 мс - ворота закриті. На діаграмі нижче (*рис. 14*) продемонстровано результат роботи формувача

трафіку з урахуванням часу - обмеження швидкості передачі кадрів зверху до заданих значень, а отже і обмеження передачі трафіку. Пунктирною лінією зображена швидкість до роботи формувача, суцільною - після.

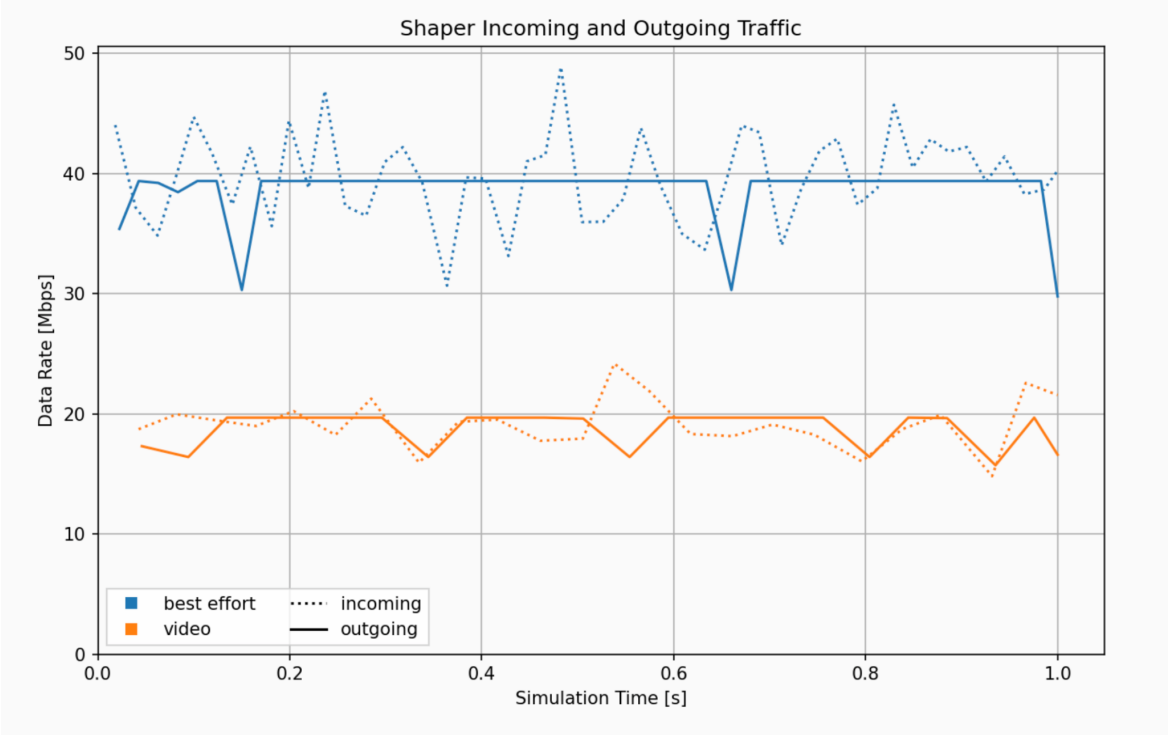

рис. 14 - Формування трафіку з урахуванням часу

2.7.2 Формування на основі кредитів

Формування трафіку на основі кредитів [13] досягається за допомогою алгоритма на основі кредитів для регулювання потоку трафіку в мережі. Ідея алгоритму полягає в тому, що кожному потоку трафіку призначається певна кількість кредитів, за допомогою яких далі визначається скільки даних можна передати за певний проміжок часу. З часом кредити поповнюються, а швидкість поповнення визначається політикою формування трафіку мережі. Перед передачею пакету даних мережевий пристрій перевіряє чи має він достатню кількість кредитів і,

якщо кредитів достатньо, передача відбувається негайно, якщо ні, то пакет або буферизується, або відкидається, залежно від політики формування трафіку мережі.

Для демонстрації роботи формувальника трафіку на основі кредитів була змодельована мережа (*рис. 11*), аналогічна вище описаному прикладу. Формування трафіку (*табл. 3*) відбувається в мережевому комутаторі, через який проходять обидва потоки.

Аналогічно попередньому прикладу пакети надсилаються клієнтом у випадкові проміжку часу, а формувальник за допомогою кредитів формує трафік в мережі. На діаграмі нижче (*рис. 15*) продемонстровано результат роботи формувача трафіку з урахуванням часу - обмеження швидкості передачі кадрів зверху до заданих значень, а отже і обмеження передачі трафіку. Пунктирною лінією зображена швидкість до роботи формувача, суцільною - після.

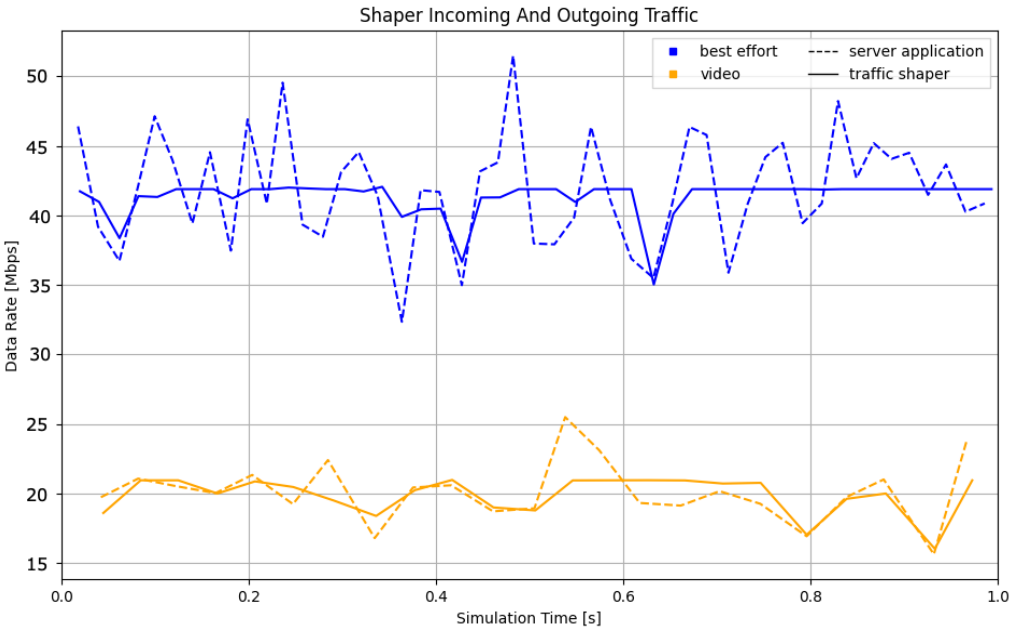

рис. 15 - Формування трафіку на основі кредитів

2.8 Призупинення передачі кадрів

Технологія призупинення передачі кадрів (Frame Preemption) [14], яка визначена в стандарті 802.1Qbu [6], дає можливість мережі визначити деякі класи як пріоритетні, а весь інший трафік, як той, передачу якого можна призупинити (*рис. 16*). Таким чином дана технологія разом з фрагментацією дає можливість мосту призупинити передачу Ethernet кадру в тому випадку, якщо необхідно відправити пакет вищого пріоритету. Одразу після завершення передачі пріоритетного пакету, мережа повертається до передачі того кадру, який був призупинений (*рис. 17*). Дана технологія дуже важлива для TSN мереж, тому що кадри, які мають вищий пріоритет, можуть містити критичні до часу дані, які необхідно доставити з мінімальною затримкою.

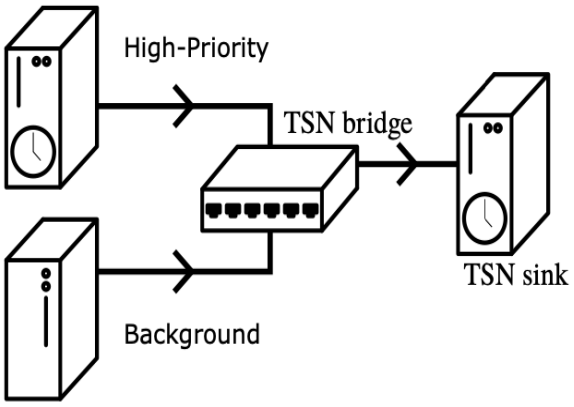

рис. 16 - Структурна схема передачі трафіку в мережі

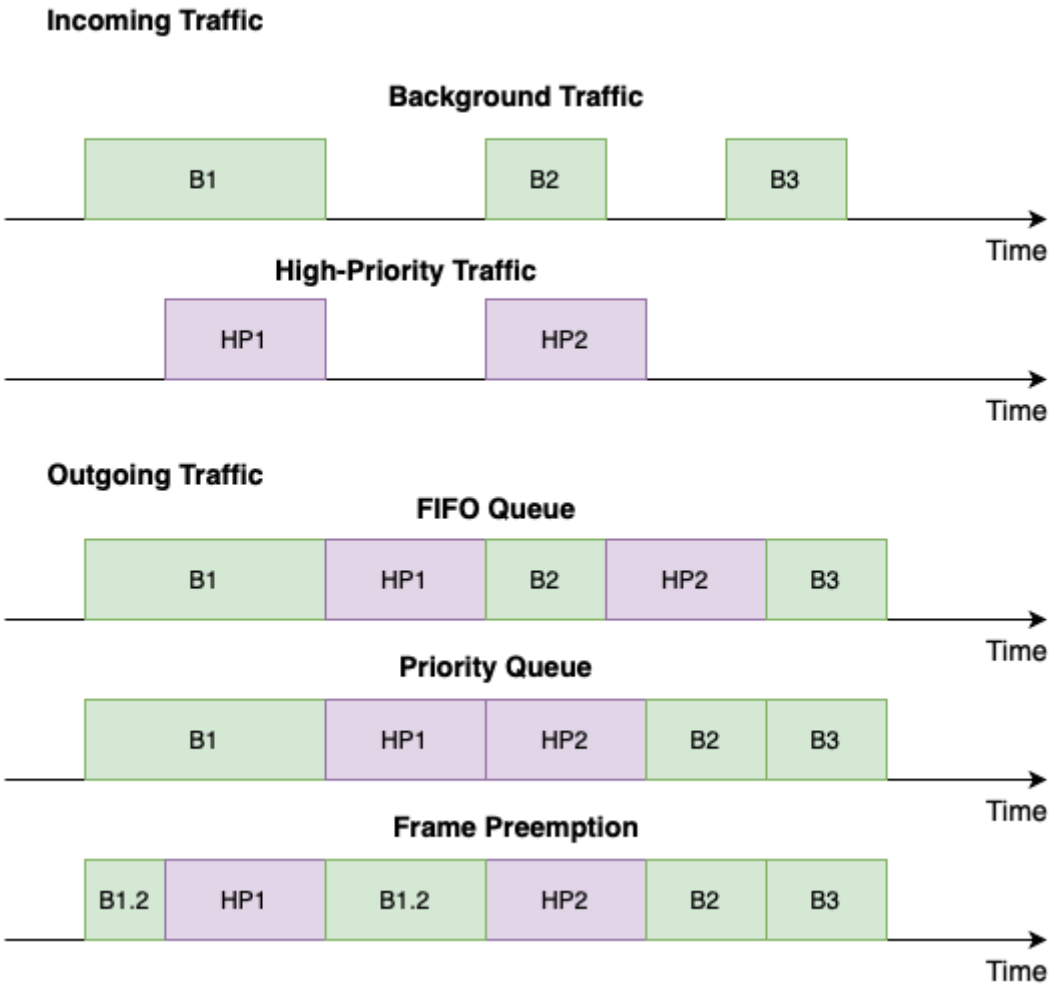

рис. 17 - Політики пріоритетності запланованого трафіку

Для демонстрації функції призупинення передачі кадрів змодельована мережа, яка складається з двох модулів StandardHost в трьох конфігураціях:

- черга FIFO - базова конфігурація, яка не використовує пріоритетну чергу або функцію призупинення передачі кадрів;
- пріоритетна черга - конфігурація, яка використовує чергу пріоритетів для зменшення затримки високо пріоритетних кадрів;

- функція призупинення передачі кадрів - використовує призупинення для високо пріоритетних кадрів для низької затримки із забезпеченням верхньої межі.

Host1 періодично генерує трафік для host2. Трафік, генеруємий модулем host1 є двох типів: фоновий - трафік з низьким пріоритетом і високо пріоритетний. Host1 додає теги VLAN до пакетів, а модуль Ethernet MAC використовує ідентифікатор VLAN, що міститься в тегах для класифікації трафіку за пріоритетністю. Всі три конфігурація включають в себе обмеження черг до чотирьох пакетів, щоб зменшити вплив часу на виміряну затримку. Тип кожної черги встановлено як DropTailQueue для відкидання зайвих пакетів, якщо черга заповнена.

Для аналізу функції призупинення передачі був розглянутий журнал передачі кадрів в мережі (*рис. 18*). Мост модуля host1 починає передачу фонового пакету (background-3). Під час передачі надходить високо пріоритетний пакет (ts-1). В цей час мост перериває передачу фонового пакету і після завершення передачі кадру з високим пріоритетом поновлює передачу залишку фонового пакету даних.

Event#	Time	Relevant Hops	Name	ID / Source	Kind / Destination	Length / Protocol	Type	Length
#66	0.000'427'861'908	host1 --> host2	background-3			Ethernet PHY		1254 B
#72	0.000'473'504'914	host1 --> host2	background-3-frag0:progress			Ethernet PHY		583 B
#74	0.000'474'501'908	host1 --> host2	background-3-frag0:end			Ethernet PHY		583 B
#76	0.000'475'461'908	host1 --> host2	ts-1	10.0.0.1:1026	10.0.0.2:1001	UDP		1254 B
#89	0.000'575'781'908	host1 --> host2	ts-1:end	10.0.0.1:1026	10.0.0.2:1001	UDP		1254 B
#94	0.000'576'741'908	host1 --> host2	background-3-frag1			Ethernet PHY		683 B
#97	0.000'631'381'908	host1 --> host2	background-3-frag1:end			Ethernet PHY		683 B

рис. 18 - Журнал пакетів

Щоб проаналізувати отримані результати для трьох конфігурації з однаковою довжиною пакетів, побудували графік наскрізної затримки (*рис. 19*).

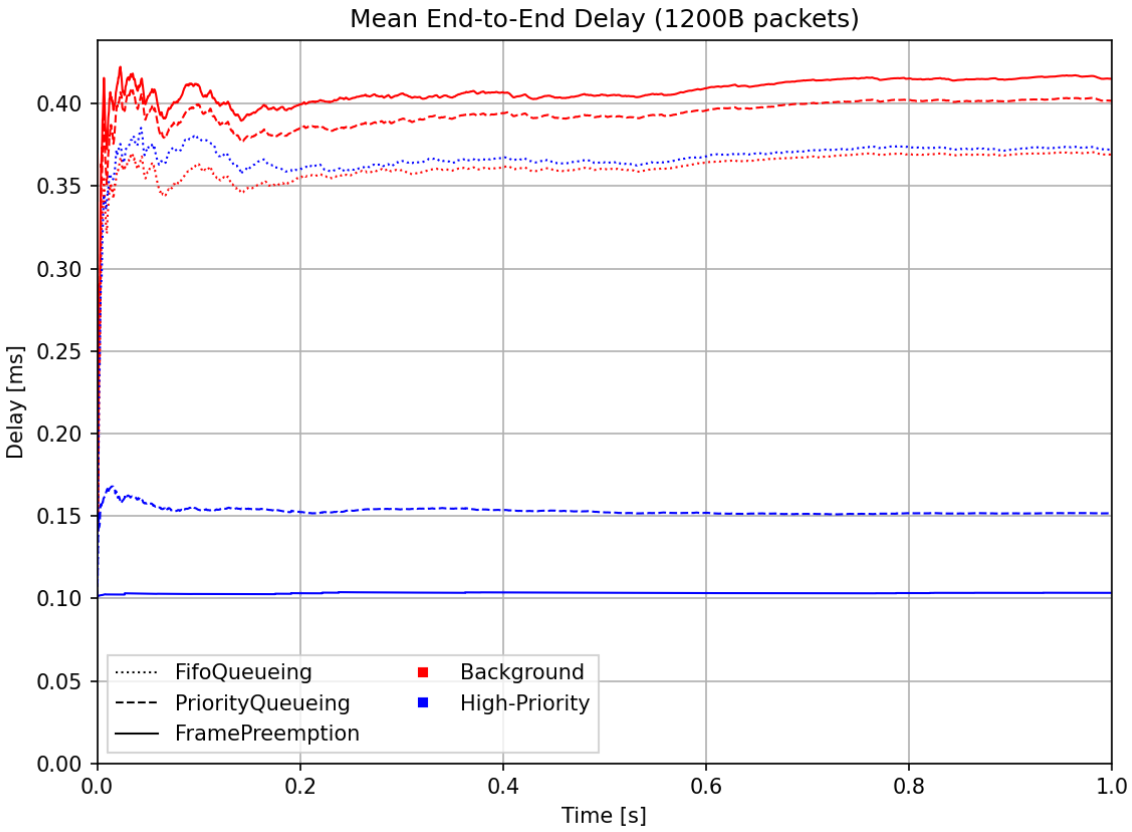

рис. 19 - Графік наскрізної затримки на відрізку [0, 1] для пакетів довжиною 1200Б

Наскрізна затримка приблизно дорівнює тривалості передачі кадру + затримці в черзі + міжкадровий проміжок. Було перевірено достовірність отриманих результатів для трьох всіх конфігурацій:

1. Черга FIFO

   Для даної конфігурації мост зберігає фонові і високо пріоритетні пакети в одній черзі. Звідси затримка для обох категорій трафіку приблизно однакова. Через високий трафік і обмеження черги в чотири пакети, існує верхня межа часу очікування кадру в черзі - приблизно час передачі чотирьох пакетів. Згідно статистики

середня довжина черги становить ~2.6, через це пакети зазнають середньої затримки в 2.6 тривалості передачі кадру. Тривалість передачі пакету розміром 1200 Б зі швидкість 100 Мбіт/с становить ~0.1 мс, а міжкадровий проміжок ~0.96 мкс, тому вважаємо його незначим. Отже, маємо

$$затримка \sim= 0.1 + 2.6 * 0.1 = 0.36мс$$

2. Пріоритетна черга

Дана конфігурації має власну чергу для високо пріоритетних кадрів. Коли даний кадр надходить в чергу, мост завершує передачу фонового пакету, якщо такий є, перш ніж почати передачу високо пріоритетного. Таким чином у порівнянні з чергою FIFO, маємо що використання черги пріоритетів зменшує затримку високо пріоритетних кадрів і збільшує затримку фонових кадрів. Через високий фоновий трафік кадр завжди присутній у фоновій черзі, тож високо пріоритетний кадр повинен чекати поки закінчиться передача поточного фонового пакету. В середньому час очікування становить половині тривалості передачі фонового кадру. Звідси маємо, що

$$затримка \sim= 0.1 + 0.5 * 0.1 = 0.15мс$$

3. Функція призупинення передачі кадрів

В даній конфігурації існує власна черга для високо пріоритетних даних, як тільки даний кадр поступає в чергу, передача поточного фонового пакету відразу припиняється. Таким чином маємо, що

$$затримка \sim= 0.1 + 0 * 0.1 = 0.1мс$$

У випадку реального трафіку на затримку фонових пакетів не впливає ні використання черги пріоритетів, ні функція призупинення передачі кадрів (*рис. 20*). Затримка високо пріоритетних кадрів значно зменшується за рахунок того, що трафік сильно відрізняється за довжиною пакетів.

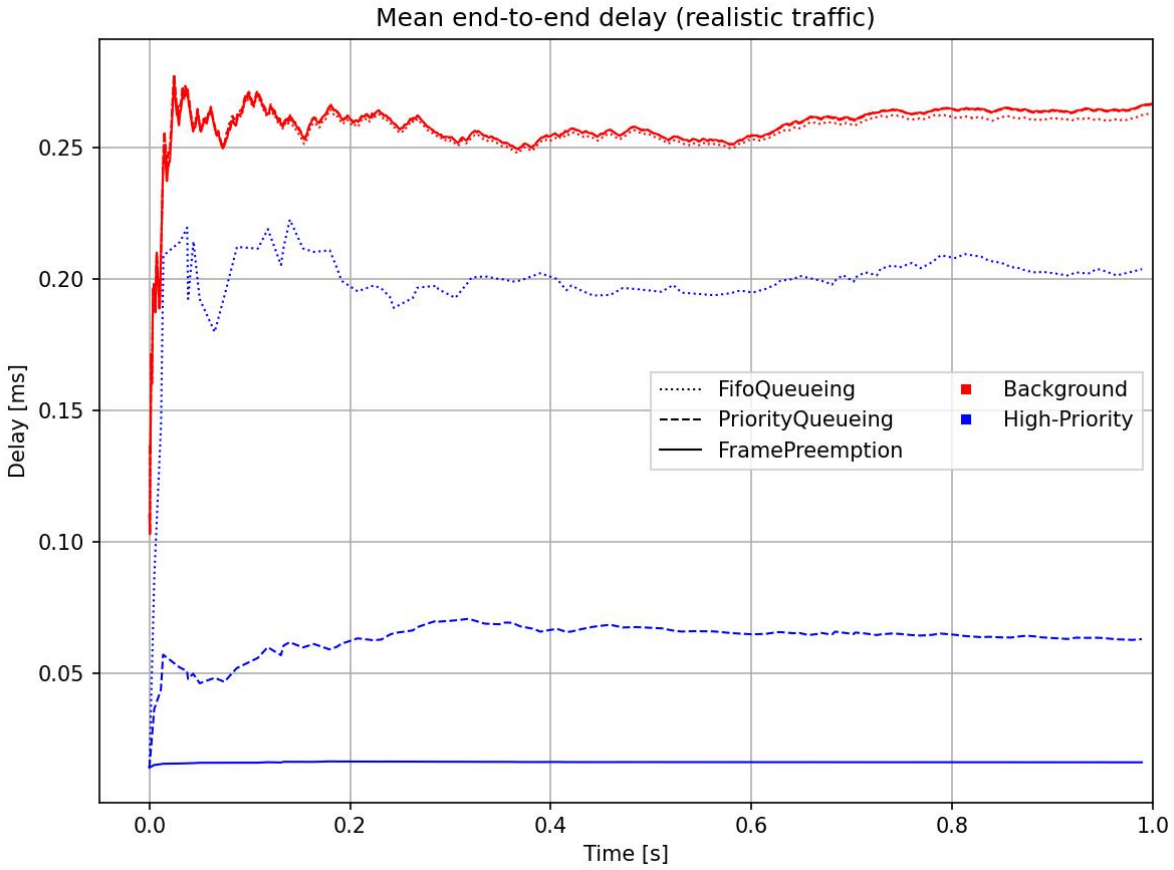

рис. 20 - Графік наскрізної затримки на відрізку [0, 1] для трафіку реального часу

2.9 Наскрізна комутація

Наскрізна комутація - це технологія, яка використовується в системах комутації пакетів для пересилання кадрів в мережі [15]. Вона, на

відміну від комутації зі зберіганням і пересиланням кадру тільки після завершення отримання, передбачає початок процесу пересилання до того, як буде отримано весь кадр (*рис. 21*).

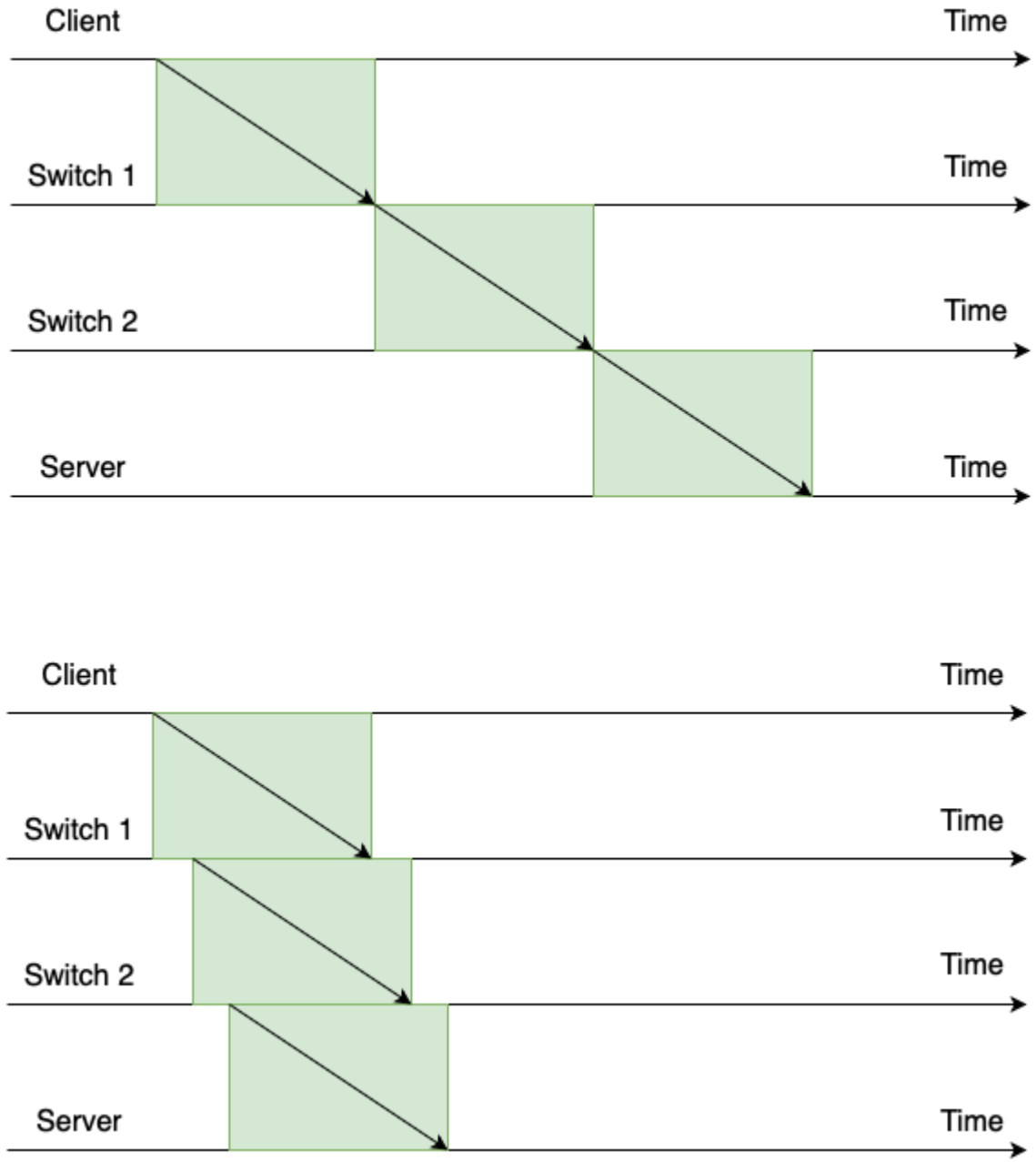

рис. 21 - Порівняння тактик пересилання кадрів

Дана технологія має плюси і мінуси. З переваг - це зменшення наскрізної затримки пересилання кадрів, оскільки комутатор починає відправку до повного отримання. З мінусів - це вища частота помилок,

якщо порівнювати з пересиланням кадрів після завершення отримання його, тому що дана технологія не передбачає перевірку кадру на наявність помилок перед початком пересилання.

Для аналізу даної технології була змодельована наступна мережа (*рис. 22*), яка складається з чотирьох модулів: клієнт і сервер є модулями TSNDevice, а switch1 і switch2 - TSNSwitch. Для моделювання в мережі був визначений наступний трафік (*табл. 4*).

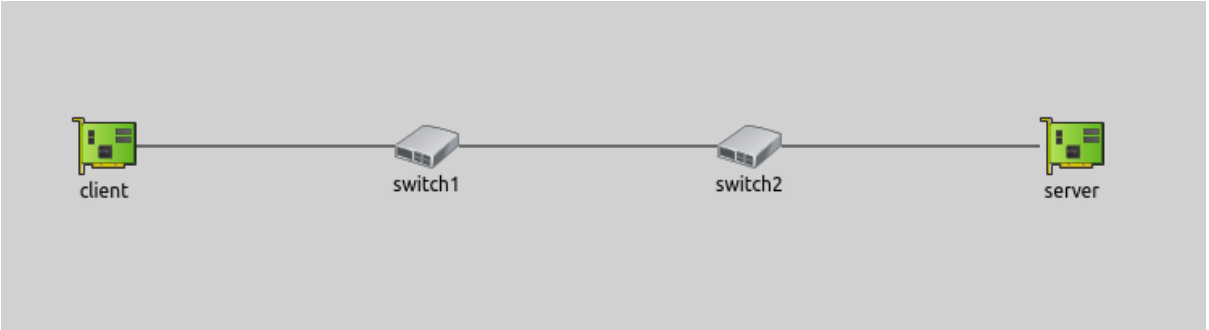

рис. 22 - Мережа для демонстрації наскрізної комутації

Джерело	Пункт призначення	Тип трафіку	Інтервал передачі	Розмір корисного навантаження
client	server	video	100 мс	1200

табл. 4 - Параметри трафіку мережі

Детально проаналізовані і винесені в діаграму (*рис. 23*) результати моделювання для двох випадків - пересилання кадру після завершення отримання його і технологія наскрізною комутації.

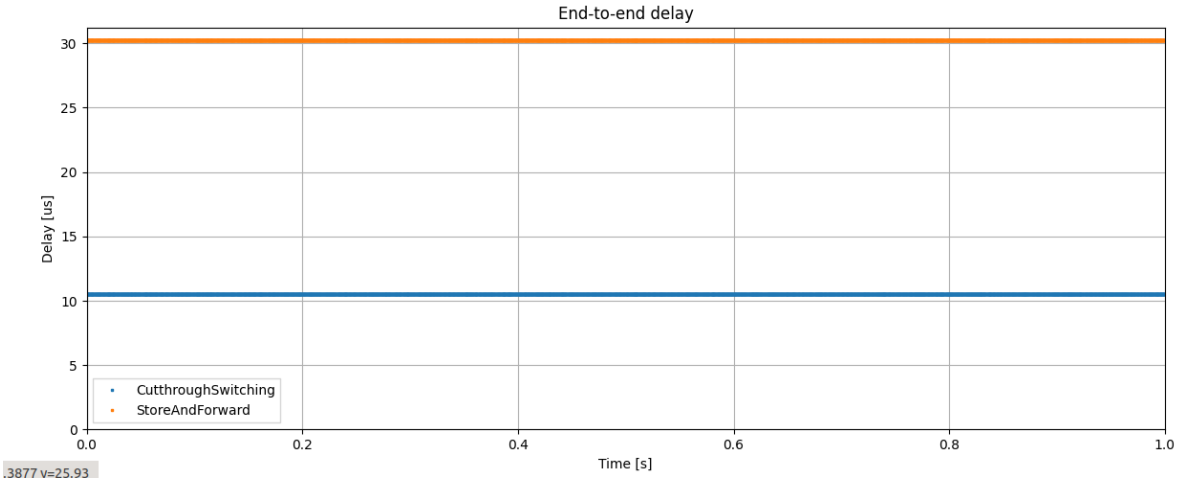

рис. 23 - Графік наскрізної затримки на відрізку [0, 1]

2.10 Комбіновані функції в мережі реального часу

Для демонстрації комбінованих функцій TSN мережі змодельована наступна топологія (*рис. 24*). Вона складається з двох комутаторів (TSN Switch), які з'єднані між собою, чотирьох хостів-джерел (TSN Talker), які надсилають запланований трафік чотирьом хостам приймачам (TSN Listener), одного генератора трафіку (Traffic Generator), одного приймача трафіку (Traffic Receiver) й головного годинника мережі (MasterClock). Параметри трафіку мережі визначені в таблиці нижче (*табл. 5*). Товстими лініями позначені канали з пропускною спроможністю в 1 Гбіт/с, а тонкими - 100 Мбіт/с.

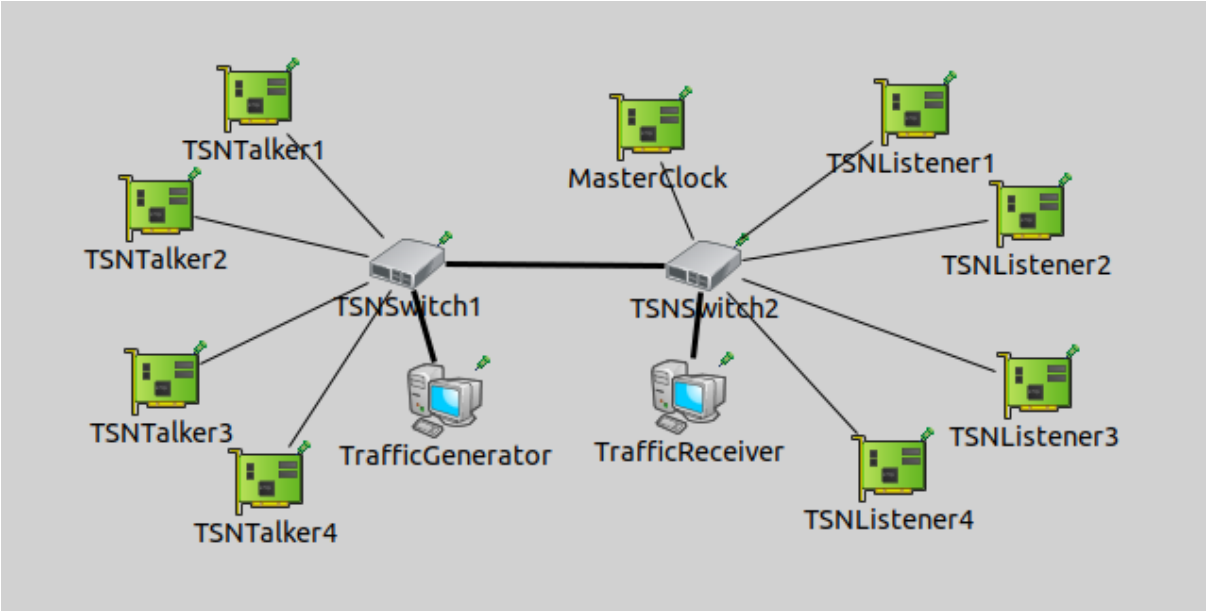

рис. 24 - Топологія моделювання TSN мережі

Джерело	Пункт призначення	Інтервал передачі	Пріоритет	Розмір корисного навантаження
TSN Talker 1	TSN Listener 1	10 мс	5	50
TSN Talker 2	TSN Listener 2	10 мс	5	100
TSN Talker 3	TSN Listener 3	10 мс	5	200
TSN Talker 4	TSN Listener 4	10 мс	5	300
TG	TR	[1 мкс, 100 мс]	0	[1, 500]

табл. 5 - Параметри трафіку мережі

За допомогою програмного пакету CNC Cisco визначений розклад керування інтервалами для передачі запланованого трафіку [16]. Для конфігурування центрального контролера необхідні топологія мережі, яку ми використовуємо для симуляції, специфікація запланованого трафіку (*табл. 5*) і максимально допустима затримки від модуля TSN Talker до модуля TSN Listener. Таким чином наскрізна затримка всіх запланованих потоків трафіку повинно бути нижчим за максимально допустиму затримку. Результат роботи зі сформованим розкладом наведений нижче (*табл. 6*), який демонструє конкретні інтервали для передачі запланованого трафіку.

Розклад мкс	TSN Talker		TSN Switch 1		TSN Switch 2	
	Відкриття	Закриття	Відкриття	Закриття	Відкриття	Закриття
TSN Talker 1	119	248	654	667	688	816
TSN Talker 2	250	379	668	680	719	847
TSN Talker 3	381	509	682	694	718	846
TSN Talker 4	511	640	696	708	830	958

табл. 6 - Розклад керування воротами від CNC Cisco

З метою ізолювання запланованого трафіку від іншого і гарантування достатньої пропускносної здатності стандартом IEEE802.1Qbv [11] вводиться захисна смуга (GB). Всі інші часові

інтервали, за винятком інтервалів для запланованого трафіку і трафіку захисної смуги, призначені для передачі фонового трафіку. Нижче (*рис. 25*) продемонстровано розподіл часових інтервалів для кожного потоку трафіку, який передається хостами-джерелами і комутаторами.

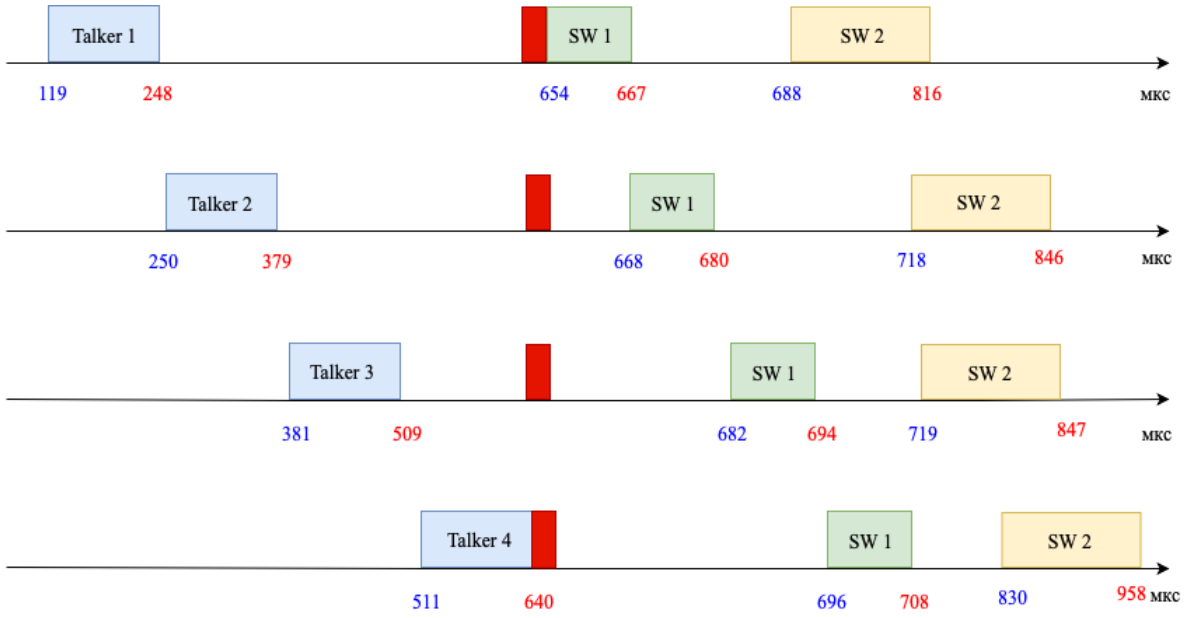

рис. 25 - Розподіл часових інтервалів для запланованого трафіку

Для кожного потоку трафіку між хостом-джерелом і хостом-слухачем була розрахована наскрізна затримка за формулою (*1*),

$$затримка = T\_destination - T\_source \quad (1)$$

де T_destination і T_source - це часові мітки, отримані при виході з джерела і вході в слухача відповідно. Вимірювання затримки було проведено на 1000 пакетах запланованого трафіку в найгіршому випадку, тобто інтервал незапланованого трафіку дорівнював 1 мкс, результат був усереднений і занесений в таблицю нижче (*табл. 7*).

	Trafic 1	Trafic 2	Trafic 3	Trafic 4
Середнє значення затримки	569	469	338	319

табл. 7 - Середнє значення затримки для запланованого трафіку

Окрім ситуації з найгіршим випадком, був проведений ряд випробувань, в яких змінювалась кількість незапланованого трафіку. Аналогічно попередньому моделюванню значення наскрізної затримки було проаналізовано відносно 1000 пакетів запланованого трафіку. На основі отриманих даних побудований лінійний графік (*рис. 26*), де вісь X представляє інтервал передачі незапланованого трафіку, вісь Y відображає затримку трафіку.

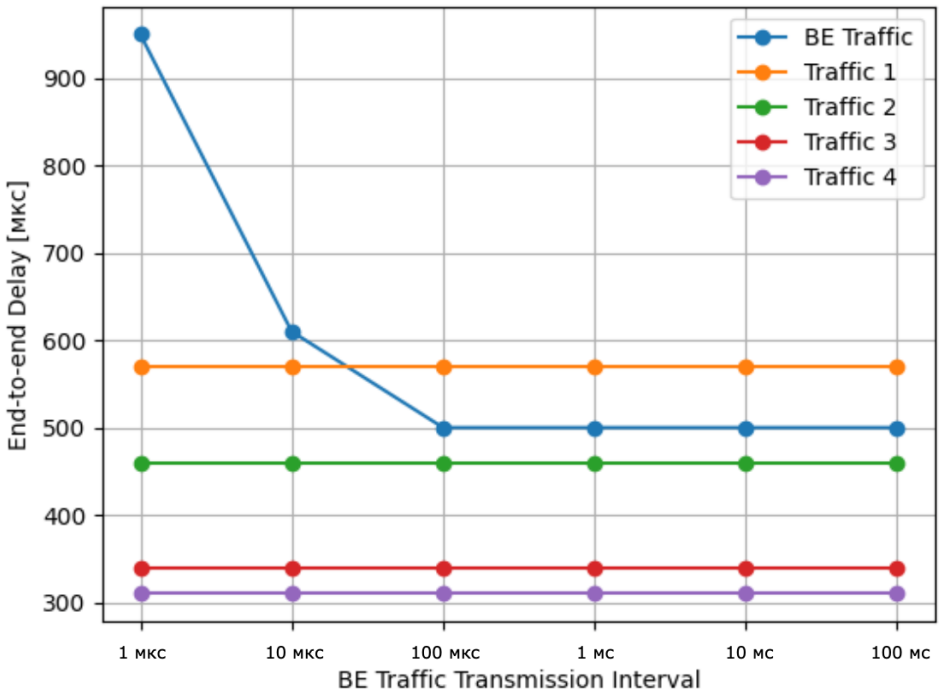

рис. 26 - Наскрізна затримка для запланованого і фонового трафіку

У випадку, коли інтервал надсилання незапланованого трафіку перевищує відмітку в 100 мкс, затримка його має постійне значення, тому що канал для передачі даних здебільшого простоює. Якщо збільшити обсяг фонового трафіку, то бачимо, що наскрізна затримка зростає майже з експоненціальною щвидкістю. Однак затримка запланованого трафіку залишається постійною в будь-якому випадку. Навіть в найгіршому випадку, коли канал повністю завантажений пакетами незапланованого трафіку, розроблена функціональність здатна належним чином планувати трафік і задовольняти вимоги детермінності мережі.

3. ВИСНОВКИ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ

В даній дипломній роботі було детально вивчено існуючі стандарти мереж реального часу. Результатом стало формування таблиці з назвами стандартів і сферами використання. Для подальшого аналізу був обраний стандарт TSN, який дозволяє забезпечувати надійний зв’язок в режимі реального часу та підвищує універсальність в промислових мережах. Окрім цього було досягнуто наступних результатів:

- досліджена проблема досягнення глобального часу в мережі;
- розглянуті різні методи планування трафіку, а саме формування з урахуванням часу і формування на основі кредитів;
- визначена необхідність призупинення передачі кадрів в TSN мережі;
- встановлена важливість використання технології наскрізної комутації;
- розроблена імітаційна модель TSN мережі реального часу методом модульного проектування і реалізована функціональність TSN для планування трафіку;
- проаналізовані отримані аналітичні результати на відповідність специфікації TSN мережі.

Розроблена імітаційна модель, яка описана в розділі “Комбіновані функції в мережі реального часу”, однозначно відповідає основним властивостям TSN мережі:

- детермінованість передачі даних;
- гарантована пропускна здатність;
- резервування пропускної здатності;

- забезпечення низької затримки передачі даних;
- функціонування в реальному часі.

В процесі моделювання було деталізовано розподіл часових інтервалів для всього трафіку на основі розкладу управління воротами пересилання трафіку в мережі. У результаті симуляції даної мережі, було отримано досить точну і детальну характеристику її функціональності, а саме проаналізована наскрізна затримка для різних типів трафіку, що властиво для мережі реального часу. Так як представлені імітаційні модулі точно відповідають специфікаціям TSN для детермінованого зв'язку, то дана модель є ефективним інструментом верифікації для подальшого дослідження фізичної моделі.

На майбутнє передбачено перенести імітаційну модель на фізичну і зібрати наступну мережу (*рис. 27*), яка складається з центрального мережевого контролера (Cisco CNC), двох комутаторів (TSN Switch), які з’єднані між собою, чотирьох хостів-джерел (TSN Talker), які надсилають запланований трафік чотирьом хостам приймачам (TSN Listener), одного генератора трафіку (Traffic Generator) й одного приймача трафіку (Traffic Receiver).

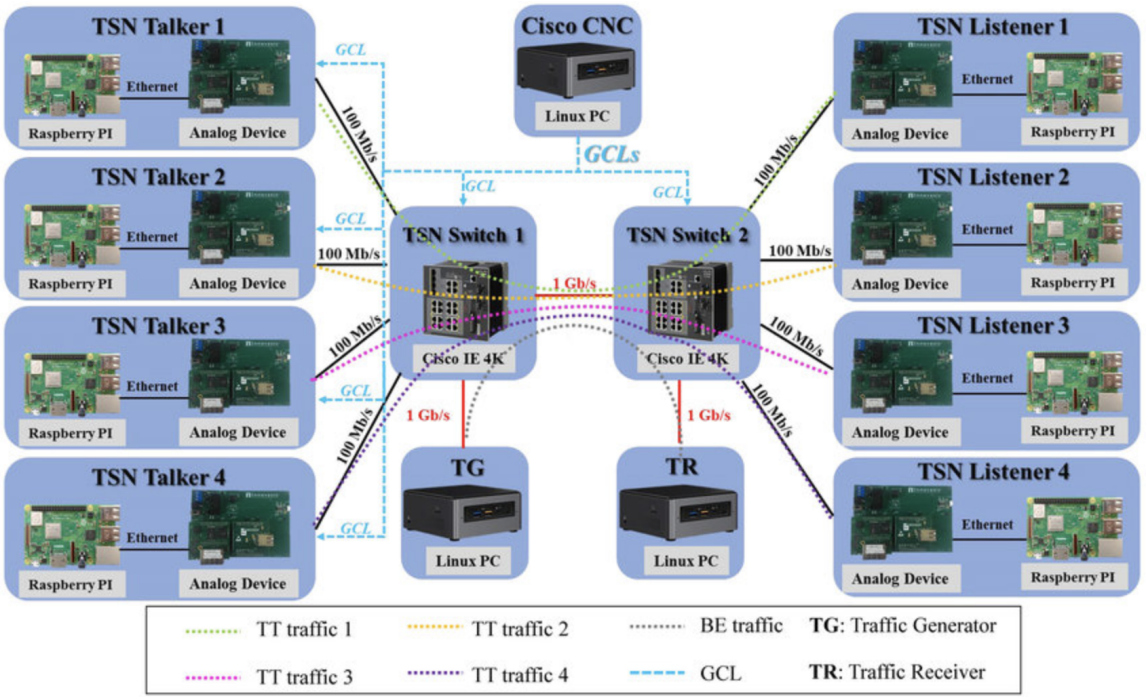

рис. 27 - Апаратна реалізація TSN мережі

Результати даної роботи є корисними для науковців та фахівців, що займаються проектуванням та розробкою мереж реального часу, зокрема TSN мереж у різних галузях, де вимагається висока точність та надійність передачі даних в реальному часі. Також можуть використовуватися для забезпечення оптимального функціонування мережі та досягнення високої ефективності.

4. СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. IEEE, “802.3 Standard for Ethernet,” 2015.
2. “Time-Sensitive Networking Task Group,” IEEE 802.1, 2016. [Електронний ресурс]. Доступно: http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html.
3. “IEEE 802.1 AV Bridging Task Group,” Mar. 2013. [Електронний ресурс]. Доступно: https://www.ieee802.org/1/pages/avbridges.html
4. H. Kopetz, Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications, 2nd ed., ser. Real-Time Systems Series, 2011.
5. K. C. Lee і S. Lee, “Performance evaluation of switched Ethernet for real-time industrial communications,” Computer Standards & Interfaces. [Електронний ресурс]. Доступно: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920548902000703
6. Wolfgang Hilbert і Franklin Kepner, "Time-Sensitive Networks: Architectures and Protocols".
7. Radu Butkusu і Michael Bernhard, "Time-Sensitive Networking: An Introduction".
8. ”OMNeT++ Discrete Event Simulator”, 2022. [Електронний ресурс]. Доступно: https://omnetpp.org/.
9. “OMNeT++ Simulation Manual.” [Електронний ресурс]. Доступно: https://www.omnetpp.org/doc/omnetpp/manual/
10. “NS-3 Network Simulator”. [Електронний ресурс]. Доступно: https://www.nsnam.org/

11. “P802.1AS-Rev – Timing and Synchronization for Time Sensitive Applications,” IEEE 802.1. [Електронний ресурс]. Доступно: https://1.ieee802.org/tsn/802-1as-rev/.
12. “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Bridges and Bridged Networks.
13. Uyless Black, "Quality of Service in Ethernet Networks: Advanced Topics, 2nd Edition".
14. P. Heise, F. Geyer, R. Obermaisser, ”TSimNet: An industrial time sensitive networking simulation framework based on OMNeT++”, Proc. IEEE/IFIP Int. Conf. New Tech. Mobility Security (NTMS) 2016.
15. Charles E. Spurgeon, "Ethernet Switches: An Introduction to Network Design with Switches".
16. Junhui Jiang, “A Simulation Model for Time-sensitive Networking (TSN) with Experimental Validation”.

АНОТАЦІЯ

Основною метою дипломної роботи є моделювання критичних за часом мереж з ціллю дослідження ефективності різних методів управління трафіком реального часу.

У рамках дипломної роботи були ретельно проаналізовані існуючі стандарти мереж реального часу. Детальну увагу було приділено технології TSN (Time Sensitive Network), розглянута проблема досягнення глобального часу, досліджені різні методи формування трафіку в мережі і перевірені отримані аналітичні результати на відповідність специфікації TSN мережі. Для моделювання було використано програмне забезпечення OMNeT++. Для кожного методу формування трафіку були побудовані графіки наскрізної затримки в різних умовах, що специфічно для мереж реального часу.

ANNOTATION

The main objective of the thesis is to model time-critical networks in order to investigate the effectiveness of various methods of real-time traffic management.

As part of the thesis, the existing standards for real-time networks were thoroughly analyzed. Detailed attention was paid to the TSN (Time Sensitive Network) technology, the problem of achieving global time was considered, various methods of traffic shaping in the network were investigated, and the analytical results obtained were checked for compliance with the TSN network specification. OMNeT++ software was used for modeling. For each method of traffic shaping end-to-end delay graphs were plotted under different conditions, which is specific to real-time networks.