

УДК (UDC) 004.7(075.8)

- Руккас Кирило Маркович** д.т.н., доцент, професор закладу вищої освіти кафедри теоретичної та прикладної інформатики
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, Харків, Україна, 61022
e-mail: rukkas@karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0002-7614-0793>
- Шкловський Валерій Борисович** здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки, освітньо-професійної програми "Інформатика" кафедри теоретичної та прикладної інформатики
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, Харків, Україна, 61022
e-mail: xa11800826@student.karazin.ua
<https://orcid.org/0009-0006-3223-8680>
- Морозова Анастасія Геннадіївна** к.т.н., доцент закладу вищої освіти кафедри теоретичної та прикладної інформатики
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, Харків, Україна, 61022
e-mail: a.morozova@karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0003-2143-7992>
- Кузнєцова Вікторія Олександрівна** к.ф.-м.н., доцент закладу вищої освіти кафедри вищої математики та інформатики
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, Харків, Україна, 61022
e-mail: vkuznietcova@karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0003-3882-1333>

Керування трафіком реального часу в комп'ютерних мережах

У роботі розглянуто задачу моделювання критичних за часом мереж з метою дослідження ефективності різних методів управління трафіком реального часу.

Актуальність. 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 ефективну передачу даних у реальному часі. Робота присвячена моделюванню чутливих за часом мереж, використовуючи різні методи керування трафіком реального часу.

Мета. Метою роботи було проаналізувати існуючі стандарти мереж реального часу, розробити імітаційну модель мережі реального часу та дослідити ефективність різних методів управління трафіком реального часу.

Методи дослідження. Методи дослідження базуються на сучасних теоріях математичного моделювання, імітаційного моделювання, телекомунікаційних стандартах, а саме Time-Sensitive Networking (TSN).

Результати. Було ретельно проаналізовано існуючі стандарти мереж реального часу. Детальну увагу було приділено технології TSN (Time Sensitive Network), досліджена проблема досягнення синхронізації в таких мережах, 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.

Висновки. В роботі було розглянуто мережі стандарту TSN, які дозволяє забезпечувати надійний зв'язок в режимі реального часу та підвищують універсальність в промислових мережах. Для TSN була досліджена проблема досягнення синхронізації пристроїв в мережі, розглянуті різні методи планування трафіку, встановлена важливість використання технології наскрізної комутації, розроблена імітаційна модель мережі TSN, реалізована функціональність такої мережі для планування трафіку.

Ключові слова: комп'ютерні мережі, трафік, мережі реального часу, TSN, наскрізна затримка, мережевий протокол, Ethernet, наскрізна комутація, вузол мережі, gPTP, UDP, комутатор, синхронізація часу.

Як цитувати: Руккас К. М., Шкловський В. Б., Морозова А. Г., Кузнєцова В. О. Керування трафіком реального часу в комп'ютерних мережах. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології.*

Автоматизовані системи управління. 2024. вип. 64. С.79-89. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2024-64-08>

How to quote: K. Rukkas, V. Shklovskiy, A. Morozova, V. Kuznietcova, “Real-time traffic management in computer networks”, *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 64, pp. 79-89, 2024. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2024-64-08>[in Ukrainian]

1 Вступ

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 забезпечує надійний зв'язок в реальному часі та підвищує універсальність в промислових мережах. Такі мережі жорстко налаштовані під виконання специфічних задач, тому для перевірки нових функцій в реальному часі неможливе і постає задача створення симуляції у віртуальному середовищі для демонстрації своїх переваг і недоліків. Це дозволяє провести дослідження в контрольованих умовах без небезпеки втручання в реальне середовище.

2 Постановка задачі. Огляд відомих результатів в області дослідження.

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, а також використання удосконалених методів збору інформації для покращення продуктивності мережевих систем [3]. Одним з відомих результатів моделювання мереж реального часу є мережевий стек протоколів Ethernet AVB (Audio Video Bridging) [4], 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.

Задачею цієї роботи полягала в моделюванні критичних за часом мереж з метою дослідження ефективності різних методів управління трафіком реального часу. Виходячи з існуючих стандартів TSN було визначено, що наступні мережі повинні відповідати певним критеріям, а саме 1) доставка даних з низькою затримкою та мінімальним відхиленням від заданого графіка; 2) розділення трафіку на групи з різними пріоритетами; 3) синхронізація часу в мережі; 4) захист від мережевих колізій та переповнень.

Дана задача пов'язана з наступними науковими та технічними завданнями:

1. Дослідження проблеми досягнення глобального часу в мережі.
2. Огляд різних методів планування трафіку, а саме формування з урахуванням часу і формування на основі кредитів.
3. Визначення необхідності призупинення передачі кадрів в TSN мережі.
4. Встановлення важливості технології наскрізної комутації.
5. Розробка імітаційної моделі TSN мережі реального часу методом модульного проектування і реалізація функціональності TSN для планування трафіку.
6. Аналіз отриманих аналітичних результатів на відповідність специфікації TSN мережі.

3 Виклад основного матеріалу з обґрунтуванням отриманих наукових та практичних результатів

3.1. Мережі реального часу

Комп'ютерна мережа, яка може гарантувати відповідь протягом визначеного проміжку часу, так званого «дедлайну», можна класифікувати як мережу реального часу [5]. 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. У випадку, коли декілька звичайних пристроїв Ethernet надсилають серію пакетів на один і той самий порт приймача, може виникнути непередбачена затримка, 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 пропускну здатності. Кожен з них має свої особливості і використовується в різних галузях. Основні стандарти мереж реального часу відображено нижче (табл. 1) [6].

Таблиця 1. Основні стандарти мереж реального часу

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

Серед вище зазначених стандартів для подальшого дослідження був обраний стандарт TSN. 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.

3.2. Time Sensitive Networking (TSN)

Time Sensitive Networking (TSN) [7] – 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 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 переносу 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 трафіків у мережі. На рис. 1 продемонстровано використання комутації «зберегти і переслати» проти наскрізної комутації для надсилання одного пакету даних від вузла А до вузла В через два мости Ethernet.

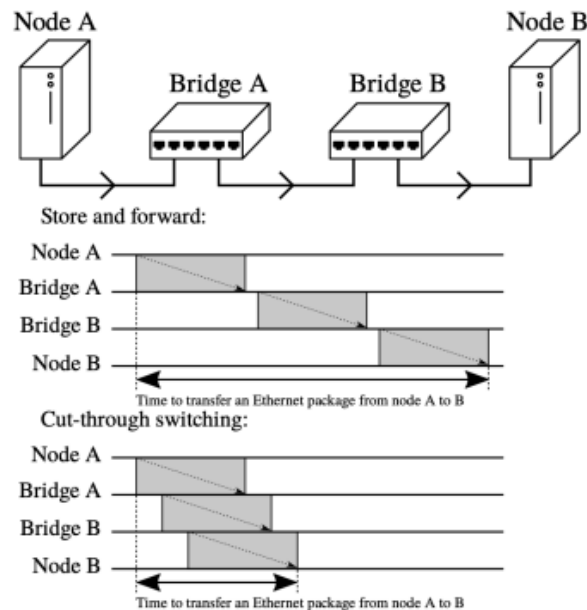


Рис. 1. Формування трафіку в TSN мережах.

Технологія TSN складається з набору стандартів, розроблених для підтримки вимог реального часу та гарантованої якості обслуговування [8].

3.3. Синхронізація часу

Станом на сьогодні 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 відрізнятись. 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 [9], 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.

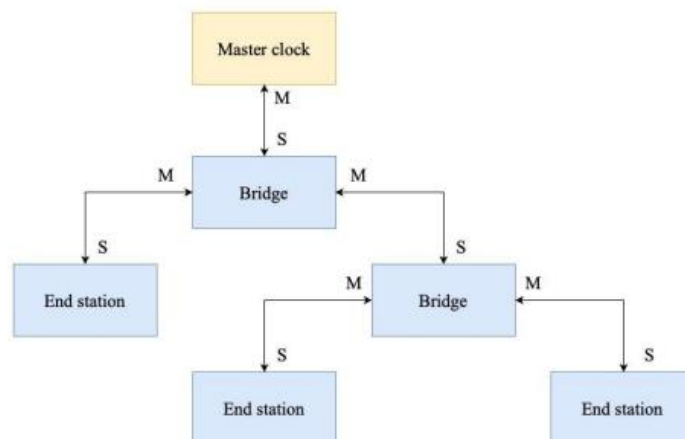


Рис. 2. Приклад мережі, побудованої згідно протоколу gPTP, де М – Ethernet порт має роль головного, а S – підлеглого.

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.

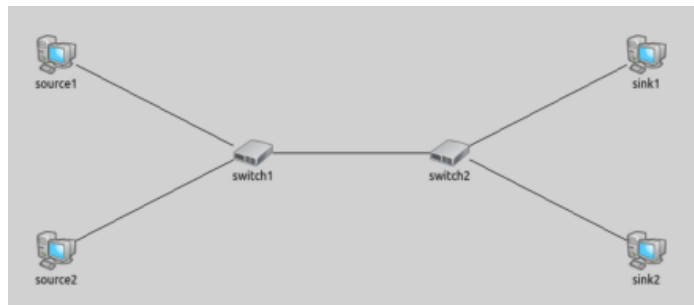


Рис. 3. Топологія мережі для виявлення проблеми глобального часу

В даній мережі всі вузли мають випадкову швидкість дрейфу годинників, яка періодично змінюється і всі годинники синхронізуються з часом модуля switch 1 (рис. 4).

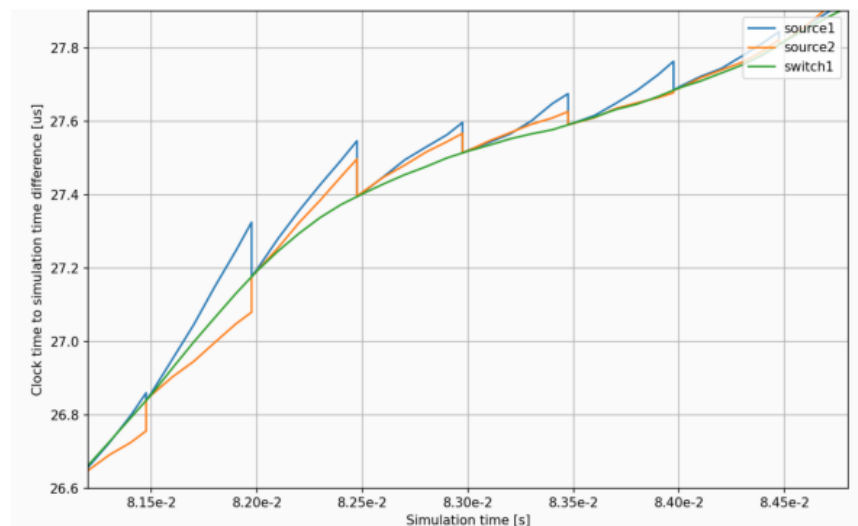


Рис. 4. Дрейф годинників з періодичною синхронізацією

Також була виміряна наскрізна затримка пакетів на шляху від хоста-джерела до відповідного хоста-приймача у різних випадках.

3.4. 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:

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

Формування з урахуванням часу

Стандарт IEEE 802.1Qbv [10] визначає спосіб передачі 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.

Для демонстрації необхідності формування трафіку з урахуванням часу в TSN мережах була змодельована наступна мережа (рис. 5). Вона складається з наступних модулів: клієнт і сервер є

модулями TSNDDevice, TrafficGenerator і TrafficReceiver – StandardHost, а комутатор – TSNSwitch. Клієнт створює високопріоритетні дані, а генератор трафіку – фонові дані з низьким пріоритетом. Пакети надсилаються клієнтом і генератором трафіку у випадкові проміжки часу, але комутатором у мережі вони пересилаються тільки згідно встановленого графіку відкриття дверей.

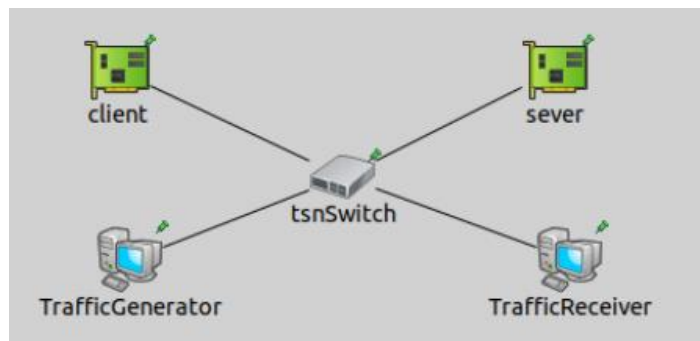


Рис.5. Мережа для демонстрації формування трафіку з урахуванням часу

На діаграмі нижче (рис. 6) 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.

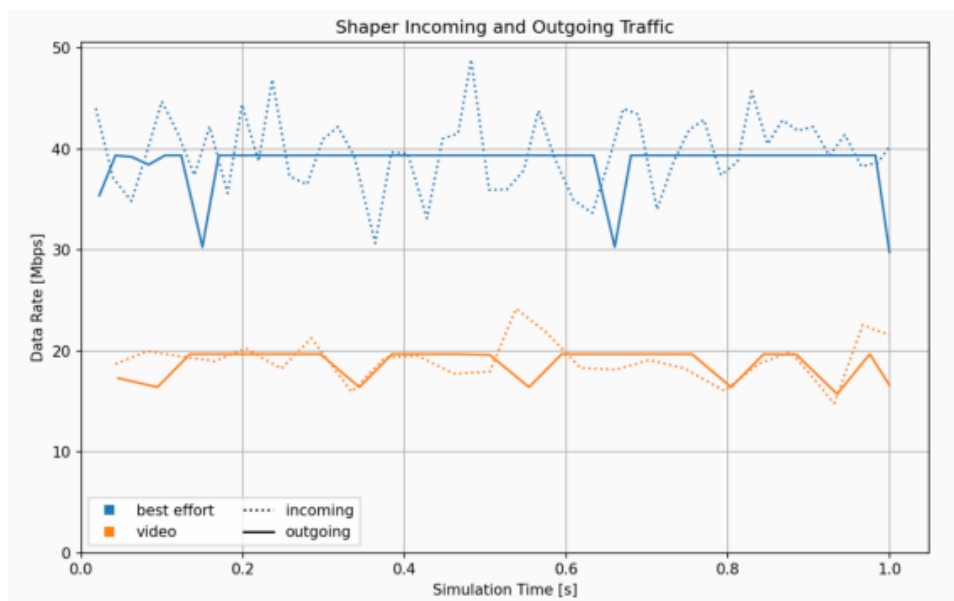


Рис.6. Формування трафіку з урахуванням часу

Формування на основі кредитів

Формування трафіку на основі кредитів досягається за допомогою алгоритма 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.

Для демонстрації роботи формувальника трафіку була використана та ж сама мережа, що і для формування трафіку з урахуванням часу (рис. 5). На діаграмі нижче (рис. 7) 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.

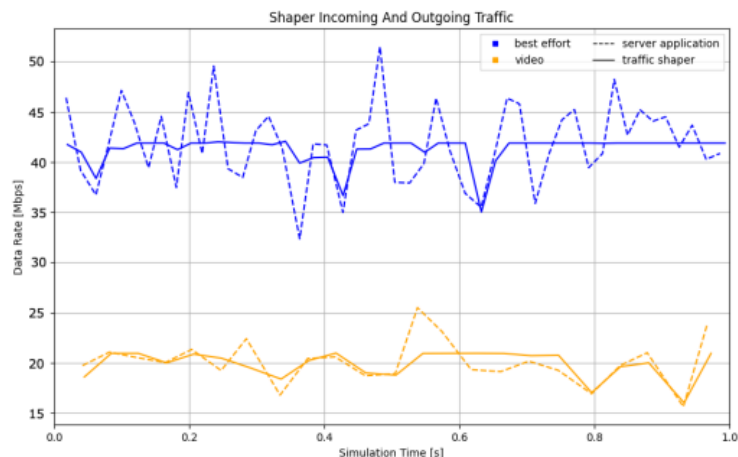


Рис.7. Формування трафіку на основі кредитів

3.5. Призупинення передачі кадрів

Технологія призупинення передачі кадрів (Frame Preemption) [11], 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. Дана технологія разом з фрагментацією дає можливість мосту призупинити передачу Ethernet кадру в тому випадку, якщо необхідно відправити пакет вищого пріоритету. 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.

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

- 1) черга FIFO – базова конфігурація, яка не використовує пріоритетну чергу або функцію призупинення передачі кадрів;
- 2) пріоритетна черга – конфігурація, яка використовує чергу пріоритетів для зменшення затримки високо пріоритетних кадрів;
- 3) функція призупинення передачі кадрів – використовує призупинення для високо пріоритетних кадрів для низької затримки із забезпеченням верхньої межі.

Для кожної з конфігурацій було визначено наскрізна затримка для пакетів однакової довжини, яка дорівнює сумі часу передачі кадру, затримці в черзі та міжкадровому проміжку.

У випадку реального трафіку на затримку фонових пакетів не впливає ні використання черги пріоритетів, ні функція призупинення передачі кадрів. Затримка високопріоритетних кадрів значно зменшується за рахунок того, що трафік сильно відрізняється за довжиною пакетів.

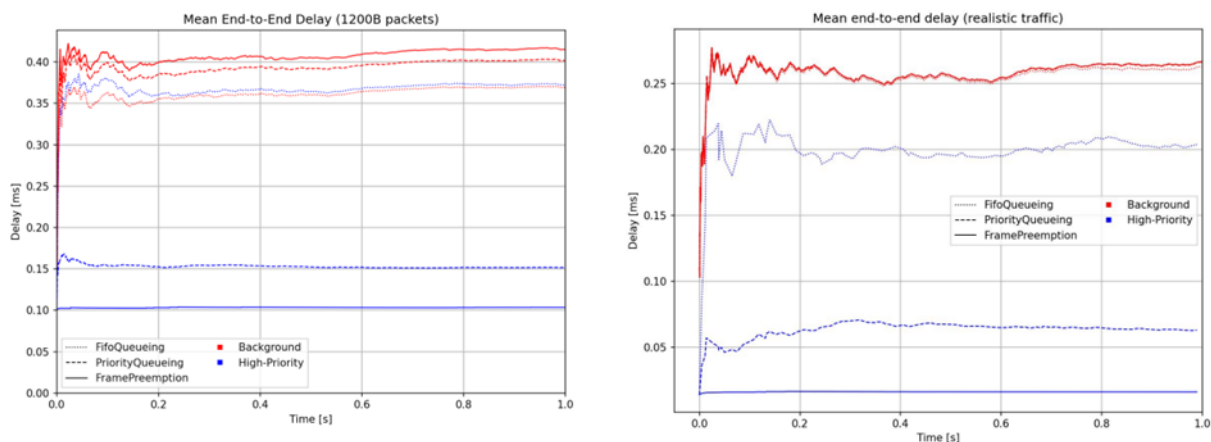


Рис.8. Графік наскрізної затримки на відрізьку [0, 1] ліворуч – для пакетів довжиною 1200Б; праворуч – для трафіку реального часу

3.6. Наскрізна комутація

Наскрізна комутація – це технологія, яка використовується в системах комутації пакетів для пересилання кадрів в мережі [12]. 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. До переваг цієї технології можна віднести зменшення наскрізної затримки пересилання кадрів, оскільки комутатор починає відправку до повного отримання. Недоліком є 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 мережа, яка складається з чотирьох модулів: клієнт і сервер є модулями TSNDevice, а switch1 і switch2 – TSNSwitch. Для моделювання в мережі був визначений наступний трафік: джерело – клієнт; пункт призначення – сервер; тип трафіку – video; інтервал передачі – 100 мс; розмір корисного навантаження – 1200.

Детально проаналізовані і винесені в діаграму (рис. 9) результати моделювання для двох випадків – пересилання кадру після завершення отримання його і технологія наскрізною комутації.

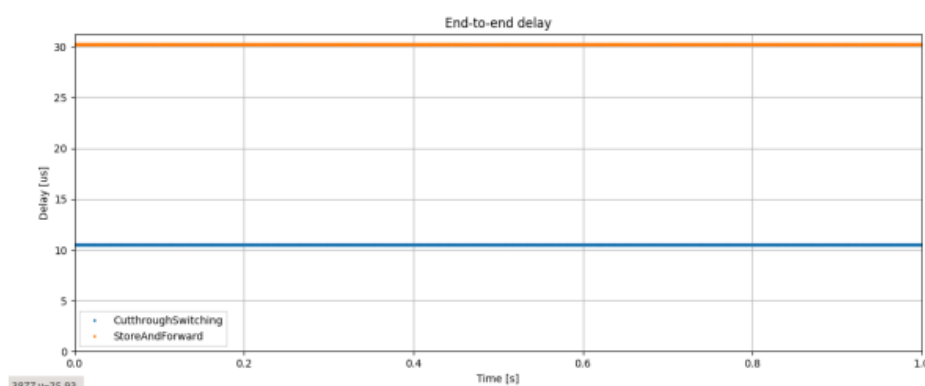


Рис.9. Графік наскрізної затримки на відрізок [0, 1]

3.7. Комбіновані функції в мережі реального часу

Для демонстрації комбінованих функцій TSN мережі змодельована наступна топологія (рис. 10). 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). Товстими лініями позначені канали з пропускною спроможністю в 1 Гбіт/с, а тонкими – 100 Мбіт/с.

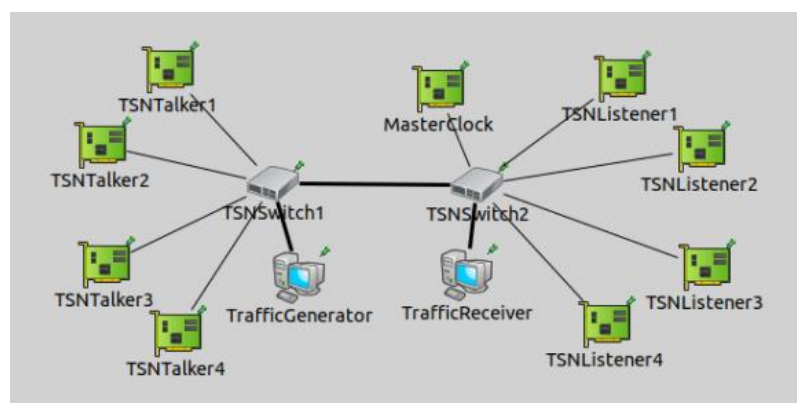


Рис. 10. Топологія моделювання TSN мережі

За допомогою програмного пакету CNC Cisco визначений розклад керування інтервалами для передачі запланованого трафіку. З метою ізолювання запланованого трафіку від іншого і гарантування достатньої пропускної здатності стандартом IEEE802.1Qbv [9] вводиться захисна смуга (GB). Всі інші часові інтервали, за винятком інтервалів для запланованого трафіку

і трафіку захисної смуги, призначені для передачі фонового трафіку. Для кожного потоку трафіку між хостом-джерелом і хостом-слухачем була розрахована наскрізна затримка за формулою (3.1)

$$\text{затримка} = T_{\text{destination}} - T_{\text{source}} \quad (3.1)$$

де $T_{\text{destination}}$ 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 наведений у таблиці 2.

Таблиця 2. Середнє значення затримки для запланованого трафіку

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

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. 11), де вісь X представляє інтервал передачі незапланованого трафіку, вісь Y відображає затримку трафіку.

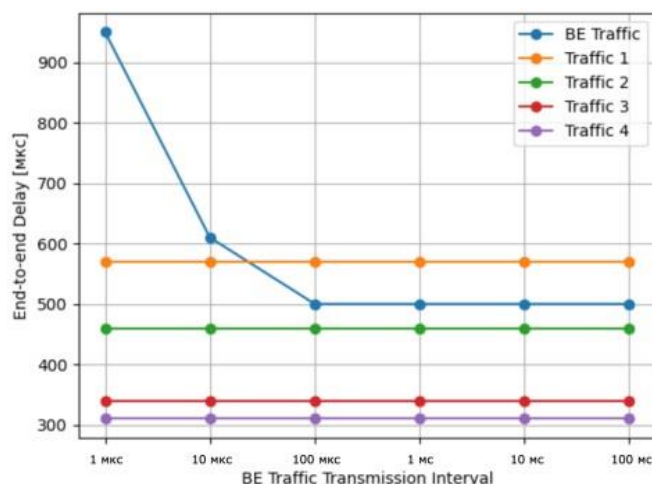


Рис. 11. Наскрізна затримка для запланованого і фонового трафіку

У випадку, коли інтервал надсилання незапланованого трафіку перевищує відмітку в 100 мкс, затримка його має постійне значення, тому що канал для передачі даних здебільшого простоє. Якщо збільшити обсяг фонового трафіку, то бачимо, що наскрізна затримка зростає майже з експоненціальною швидкістю. 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.

4 Conclusions

В роботі було детально вивчено існуючі стандарти мереж реального часу. 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: 1) досліджена проблема досягнення глобального часу в мережі; 2) розглянуті різні методи планування трафіку, а саме формування з урахуванням часу і

формування на основі кредитів; 3) визначена необхідність призупинення передачі кадрів в TSN мережі; 4) встановлена важливість використання технології наскрізної комутації; 5) розроблена імітаційна модель TSN мережі реального часу методом модульного проектування і реалізована функціональність TSN для планування трафіку; 6) проаналізовані отримані аналітичні результати на відповідність специфікації TSN мережі. Розроблена імітаційна модель відповідає основним властивостям TSN мережі, а саме: детермінованість передачі даних; гарантована пропускна здатність; резервування пропускної здатності; забезпечення низької затримки передачі даних; функціонування в реальному часі. В процесі моделювання було визначено 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. Представлені імітаційні модулі точно відповідають специфікаціям TSN для детермінованого зв'язку, а розроблена модель є ефективним інструментом верифікації для подальшого дослідження фізичної моделі мережі.

REFERENCES

1. "IEEE Standard for Ethernet - Corrigendum 1: Multi-lane Timestamping," in *Corrigendum to IEEE Std 802.3-2015 as amended by IEEE Std 802.3bw-2015, IEEE Std 802.3by-2016, IEEE Std 802.3bq-2016, IEEE Std 802.3bp-2016, IEEE Std 802.3br-2016, IEEE Std 802.3bn-2016, IEEE Std 802.3bz-2016, IEEE Std 802.3bu-2016, IEEE Std 802.3bv-2017*, vol., no., pp.1-16, 21 April 2017, <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2017.7907155>.
2. ISO/IEC/IEEE International Standard - Telecommunications and information exchange between information technology systems - Requirements for local and metropolitan area networks - Part 1CM: Time-sensitive networking for fronthaul," in *ISO/IEC/IEEE 8802-1CM:2019(E)*, vol., no., pp.1-66, 23 Aug. 2019, <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8811785>.
3. Rukkas, K., Morozova, A., Uzlov, D., Kuznietcova, V., & Chumachenko, D. (2024). Optimizing information support technology for network control: a probabilistic-time graph approach. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2024(2), 85-97. <https://doi.org/10.32620/reks.2024.2.08>
4. 802.1AS - Timing and Synchronization. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.ieee802.org/1/pages/802.1as.html>
5. H. Kopetz, *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*, 2nd ed., ser. Real-Time Systems Series, 2011.
6. Lee, Kyung-Chang & Lee, Suk. Performance evaluation of switched Ethernet for real-time industrial communications. *Computer Standards & Interfaces*. 24. 411-423. [https://doi.org/10.1016/S0920-5489\(02\)00070-3](https://doi.org/10.1016/S0920-5489(02)00070-3).
7. Finn, Norman. (2018). Introduction to Time-Sensitive Networking. *IEEE Communications Standards Magazine*. 2. 22-28. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2018.1700076>.
8. Pruski, A., Ojewale, M. A., Gavrilut, V., Yomsi, P. M., Berger, M. S., & Almeida, L. (2021). Implementation Cost Comparison of TSN Traffic Control Mechanisms. In *Proceedings of 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation* IEEE. <https://doi.org/10.1109/ETFA45728.2021.9613463>
9. P802.1AS-Rev – Timing and Synchronization for Time Sensitive Applications," IEEE 802.1. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://1.ieee802.org/tsn/802-1as-rev/>
10. "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Network--Bridges and Bridged Networks," in *IEEE Std 802.1Q-2018 (Revision of IEEE Std 802.1Q-2014)*, vol., no., pp.1-1993, 6 July 2018, <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8403927>.
11. TSN Technology: Ethernet Frame Preemption, Part 1. Part 2. Industrial ethernet book. Technology. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://iebmmedia.com/technology/tsn/tsn-technology-ethernet-frame-preemption/>
12. J. Jiang, Y. Li, S. H. Hong, M. Yu, A. Xu and M. Wei, "A Simulation Model for Time-sensitive Networking (TSN) with Experimental Validation," *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Zaragoza, Spain, 2019, pp. 153-160, <https://doi.org/10.1109/ETFA.2019.8869206>

13. V. Gavriluț, A. Pruski, and M. S. Berger, “Constructive or optimized: An overview of strategies to design networks for time-critical applications,” *ACM Computing Surveys*, vol. 55, no. 3, Feb. 2022. <https://doi.org/10.1145/3501294>
14. OMNeT++ Discrete Event Simulator, 2022. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://omnetpp.org/>.

Rukkas Kyrylo

DSc, Associate Professor, Full Professor, Department of Theoretical and Applied Computer Science

V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq 4, Kharkiv, Ukraine, 61022

e-mail: rukkas@karazin.ua;

<https://orcid.org/0000-0002-7614-0793>

Shklovskiy Valerii

Master's student, Department of Theoretical and Applied Computer Science

V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq 4, Kharkiv, Ukraine, 61022

e-mail: xq11800826@student.karazin.ua

<https://orcid.org/0009-0006-3223-8680>

Morozova Anastasiia

PhD, Associate Professor, Department of Theoretical and Applied Computer Science

V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq 4, Kharkiv, Ukraine, 61022

e-mail: a.morozova@karazin.ua;

<https://orcid.org/0000-0003-2143-7992>

Kuznietcova Victoriya

Doctor of Philosophy, Associate professor, Associate professor of higher mathematics and computer sciences department, V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 4, Kharkiv, Ukraine, 61022

e-mail: vkuznietcova@karazin.ua

<https://orcid.org/0000-0003-3882-1333>

Real-time traffic management in computer networks

The paper considers the problem of modeling time-critical networks in order to study the effectiveness of various real-time traffic management methods.

Relevance. Real-time network modeling is an active area of research in computer science and information technology. Research in this area is aimed at developing methods and algorithms for efficient real-time data transmission. The work is devoted to modeling time-sensitive networks using various real-time traffic management methods.

Goal. The purpose of the work was to analyze existing real-time network standards, develop a simulation model of a real-time network, and investigate the effectiveness of various real-time traffic management methods.

Research methods. The research methods are based on modern theories of mathematical modeling, simulation modeling, and telecommunications standards, namely Time-Sensitive Networking (TSN).

The results. The standards of real-time networks were thoroughly investigated. Detailed attention was paid to TSN (Time Sensitive Network) technology, the problem of achieving synchronization in such networks and various methods of traffic generation were investigated; the obtained analytical results were checked for compliance with the TSN network specification. OMNeT++ software was used for modeling real-time networks. End-to-end delay graphs were constructed for each traffic generation method under different conditions of real-time networks.

Conclusions. The paper considered TSN standard networks for reliable real-time communication and increase versatility in industrial networks. The problem of achieving synchronization of devices in the TSN network was investigated, various methods of traffic planning were considered, the importance of using end-to-end switching technology was established, a simulation model of the TSN network was developed.

Keywords: computer networks, traffic, real-time networks, TSN, end-to-end delay, network protocol, Ethernet, end-to-end switching, network node, gPTP, UDP, switch, time synchronization.