

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління  
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Комп'ютерна система розпізнавання аномального  
трафіку з використанням машинного навчання

(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,

групи КІУКІ-21-2

Катерина МАСЛЕННІКОВА

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність

123 «Комп'ютерна інженерія»

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма

Комп'ютерна інженерія

(повна назва освітньої програми)

Керівник: ас. Олександр РОМАНЮК

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ЕОМ

(підпис)

Андрій КОВАЛЕНКО

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ комп'ютерної інженерії та управління \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ електронних обчислювальних машин \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший (бакалаврський) \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 123 «Комп'ютерна інженерія» \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма \_\_\_\_\_ Комп'ютерна інженерія \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

здобувачеві \_\_\_\_\_ Масленніковій Катерині Дмитрівні \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Комп'ютерна система розпізнавання аномального трафіку з використанням машинного навчання

затверджена наказом по університету від “ 26 ” травня 2025 р. № 424 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 17 червня 2025 р.

3. Вхідні дані до роботи \_\_\_\_\_  
моніторинг

мережа Петрі

Комп'ютерна система

Машинне навчання

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі \_\_\_\_\_

Мережеві технології передачі трафіку

Методи передачі кадрів за технологією TTE

Реалізація комп'ютерної системи з використанням машинного навчання

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій 13 слайдів

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз проблеми та огляд існуючих рішень	26.05.2025–30.05.2025	
2	Вибір технології розробки та інструментальних засобів	31.05.2025–03.06.2025	
3	Розробка системи	04.06.2025–08.06.2025	
4	Моделювання та реалізація	09.06.2025–11.06.2025	
5	Аналіз результатів	12.06.2025–13.06.2025	
6	Оформлення ПЗ	14.06.2025–16.06.2025	

Дата видачі завдання “ 26 ” травня 2025 р.

Здобувач

  
(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

ас. Олександр РОМАНЮК

(посада, власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 58 с., 20 рис., 2 дод., 18 джерел.

АВТОЕНКОДЕР, ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ, МЕРЕЖЕВИЙ ТРАФІК, МАШИННЕ НАВЧАННЯ, РЕКОНСТРУКЦІЯ ОЗНАК, ПОХИБКА ВІДНОВЛЕННЯ, НЕЙРОННА МЕРЕЖА, НОРМАЛІЗАЦІЯ ДАНИХ, ПОРОГОВЕ ЗНАЧЕННЯ, STTE, КОЛЬОРОВІ МЕРЕЖІ ПЕТРІ, КОНТРОЛЬ ВІДХИЛЕНЬ, АНОМАЛЬНИЙ ТРАФІК.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка програмних засобів моніторингу передачі даних у корпоративній мережі.

У ході виконання кваліфікаційної роботи розроблена комп'ютерна система розпізнавання аномального трафіку з використанням машинного навчання. Побудована модель дозволяє імітувати як регулярний, так і стохастичний трафік, що є важливим для дослідження реакції системи на змішані типи навантаження, а також виявляти аномальний трафік. Застосування генераторів трафіку з підтримкою QoS і використанням маркерів, які відповідають полям кадрів Ethernet, забезпечило можливість гнучкої перевірки системи на наявність ознак ненормованого або потенційно шкідливого трафіку.

## ABSTRACT

Bachelor's thesis: 58 pages, 20 figures, 2 appendices, 18 sources.

AUTOENCODER, ANOMALY DETECTION, NETWORK TRAFFIC, MACHINE LEARNING, FEATURE RECONSTRUCTION, RECONSTRUCTION ERROR, NEURAL NETWORK, DATA NORMALIZATION, THRESHOLD VALUE, STTE, COLORED PETRI NETS, DEVIATION CONTROL, ANOMALOUS TRAFFIC.

The major goal of this thesis is the development of software tools for monitoring data transmission in a corporate network.

In order to a computer system for detecting anomalous traffic using machine learning techniques was developed. The constructed model enables the simulation of both regular and stochastic traffic, which is essential for analyzing the system's behavior under mixed load conditions and for identifying anomalous network activity. The implementation of traffic generators with QoS support and the use of markers corresponding to Ethernet frame fields provided a flexible environment for evaluating the system's capacity to detect non-normative or potentially malicious traffic patterns.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ .....	7
ВСТУП .....	8
1 ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕДАЧІ ТРАФІКУ .....	11
1.1 Множина доступу з тимчасовим розподілом.....	13
1.2 Організація мережі за допомогою TTE.....	14
1.3 Формат кадра та види трафіку .....	15
1.4 Конфлікти між кадрами.....	18
1.5 Захисник системи .....	21
1.6 Інструменти моделювання .....	23
2.1 Аналіз методів .....	26
2.2 Використання методу передачі кадрів.....	27
2.3 Алгоритми роботи компонентів .....	29
2.4 Використання мереж цифрових автоматів .....	30
3 РЕАЛІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ .....	34
3.1 Імітаційні моделі .....	34
3.2 Аналіз кадрів.....	36
3.3 Результати моделювання.....	41
ВИСНОВКИ.....	48
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	49
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	51

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

AI – штучний інтелект

API – програмний інтерфейс додатків

CNN – згорткова нейронна мережа

CPN – кольорова мережа Петрі

CRUD – створити, прочитати, оновити, видалити

CSS – каскадні таблиці стилів

ET – найкращі зусилля (Best Effort)

ERD – діаграма сутність-зв'язок

FIFO – черга з пріоритетом

GAN – генеративна змагальна мережа

GSA – граф-схема алгоритму

HTML – мова розмітки гіпертексту

HTTP – протокол передачі гіпертексту

ML – машинне навчання

NN – нейронна мережа

PCF – протокол синхронізації кадрів

QoS – якість обслуговування

RE – похибка відновлення

STTE – передача кадрів за розкладом у TTE

TTE – детермінований Ethernet із часовим тригером

TT – кадр із часовим тригером

VL ID – ідентифікатор логічного каналу

WRR – зважене циклічне обслуговування

## ВСТУП

У сучасних мережевих технологіях, призначених для обробки трафіку, провідну позицію продовжує займати Ethernet. Одним із ключових аспектів цієї технології є реалізація концепції якості обслуговування (Quality of Service, QoS), яка дозволяє класифікувати трафік за пріоритетами та здійснювати його обробку відповідно до заданих правил маршрутизації у комутаційних пристроях. Водночас, попри підтримку QoS, традиційний Ethernet виявляється малоефективним у забезпеченні передачі даних у режимі реального часу, що призводить до небажаних затримок у доставці кадрів.

Подальшим етапом еволюції мережевих технологій у сфері розподілених систем з жорсткими часовими вимогами стало впровадження Time-Triggered Ethernet (TTE). Цей підхід забезпечує гарантовану доставку критичного трафіку, зокрема керуючих повідомлень, сигналів авіоніки або синхронізаційних даних, із суворо контрольованими часовими параметрами, зокрема з мінімізацією коливань затримок (джіттеру). У таких системах саме величина затримки під час передачі кадру виступає одним із визначальних чинників ефективності.

Разом з тим, технологія TTE має низку обмежень, які ускладнюють її повноцінне впровадження. Зокрема, вона вимагає апаратної реалізації фіксованих часових параметрів кадру, що тягне за собою витрати на відповідні технічні засоби захисту. Крім того, у разі тимчасових конфліктів між різнотипним трафіком або при повторній передачі кадру, спровокованій системними механізмами контролю, знижується загальна пропускна здатність мережі. Це обумовлює необхідність пошуку та впровадження нових методів оптимізації процесів маршрутизації трафіку.

Одним з ефективних підходів до вирішення цієї проблеми є використання імітаційного моделювання для аналізу архітектури мережевих

протоколів, їх взаємодії та алгоритмів обробки даних у комп'ютерних мережах. Такий підхід дозволяє не лише перевіряти коректність нових рішень, а й проводити порівняльне тестування різних методів передачі інформації.

Особливої актуальності набуває моделювання поведінки алгоритмів у ситуаціях, коли характеристики функціонування комутаційних пристроїв у нестандартних умовах не є повністю визначеними. Метою такого моделювання виступає верифікація відповідності розроблених алгоритмів вимогам системи.

Попри те, що апарат мереж Петрі де-факто вважається одним із найефективніших засобів моделювання процесів у комп'ютерних мережах, його застосування для аналізу Time-Triggered Ethernet поки залишається недостатньо опрацьованим. Це створює підґрунтя для подальших досліджень у напрямі побудови моделей передачі трафіку на основі мереж Петрі з урахуванням специфіки ТТЕ та пошуком шляхів підвищення її ефективності.

Кваліфікаційна робота орієнтована на розробку програмних інструментів, призначених для моніторингу процесів передачі інформації в межах корпоративної мережі. Серед базових вимог до таких систем варто відзначити мінімальне навантаження на апаратні ресурси, відкриту архітектуру з доступом до початкового коду, гнучку масштабованість, а також використання стандартних протоколів для виведення діагностичної інформації.

Мета цієї роботи: розробка комп'ютерної системи моніторингу передачі даних та розпізнавання аномального трафіку у корпоративній мережі.

- провести аналіз існуючих методів моніторингу трафіку та виявлення аномалій у корпоративних мережах;
- проаналізувати сучасні алгоритми та підходи до класифікації та детектування мережевих аномалій, зокрема із використанням методів машинного навчання;

- обґрунтувати вибір моделі виявлення аномального трафіку, враховуючи специфіку корпоративного середовища;
- розробити архітектуру комп'ютерної системи моніторингу з урахуванням модулів збору, обробки, зберігання та візуалізації трафіку;
- спроектувати та реалізувати модуль виявлення аномалій у трафіку.

## 1 ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕДАЧІ ТРАФІКУ

ТТЕ є комунікаційною технологією, яка інтегрує класичний Ethernet із протоколом Time-Triggered Protocol (ТТР), утворюючи середовище обміну повідомленнями, що здатне забезпечувати синхронізовану передачу як критичних (реального часу), так і некритичних (нереального часу) даних у межах єдиної мережевої інфраструктури. Ця інтеграція дає змогу передавати звичайні Ethernet-пакети у форматі ТТЕ без потреби в додаткових програмно-апаратних модифікаціях. Некритичні дані у цьому контексті не потребують жорстких часових гарантій доставки.

Вбудована розподілена система, візуалізована на рисунку 1.1, включає набір взаємопов'язаних комп'ютерних вузлів (node), кожен з яких містить апаратні та програмні підсистеми. Передача інформації між цими вузлами відбувається через мережу з часово-детермінованою комунікацією, що забезпечує гарантовану та контрольовану передачу даних у реальному часі.

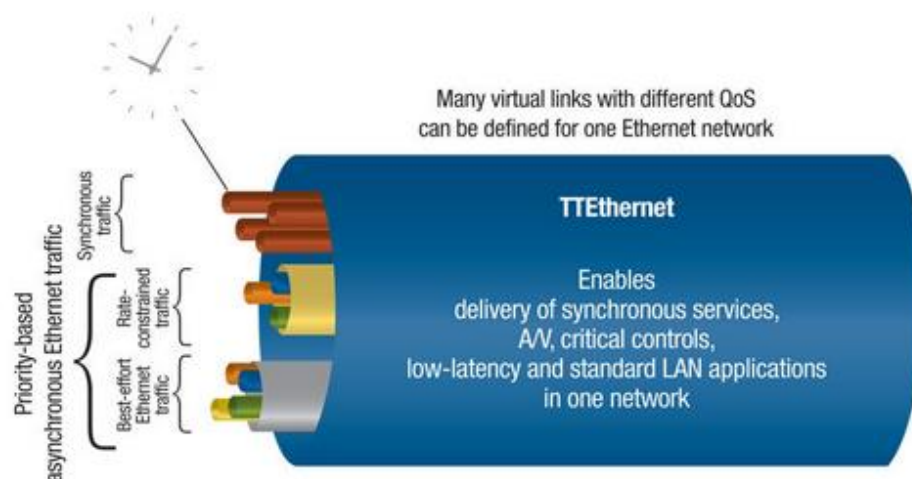


Рисунок 1.1 – Технологія ТТЕ

Структура кожного вузла в системі Time-Triggered Ethernet (ТТЕ) включає дві основні компоненти: хост-комп'ютер та контролер зв'язку,

орієнтований на протокол ТТР. Хост відповідає за виконання функцій операційної системи та прикладного програмного забезпечення, тоді як контролер забезпечує керування комунікаціями згідно з часовими тригерами. Взаємодія між цими частинами здійснюється через спеціалізований комунікаційний інтерфейс, що дає змогу передавати повідомлення й синхронізуватись з глобальним часом системи.

Топологічна структура мережі, реалізованої на основі ТТЕ, може набувати форми шини, зірки або кільця. У конфігураціях із високими вимогами до надійності застосовується резервування каналів, зокрема шляхом використання двох паралельних комунікаційних шляхів: основного й дублюючого. У разі виявлення помилки в основному каналі передача автоматично перенаправляється через резервний. Найпростішою реалізацією є шинна топологія, де вузли з'єднані спільним передавальним середовищем, що дає змогу реалізувати широкомовну передачу. Топологія зірка, що передбачає зв'язок кожного вузла з центральним комутатором, дає змогу ефективно управляти потоком даних і забезпечує підвищену ізоляцію від помилок, що є критично важливим для безпечних застосувань.

Ключовою характеристикою ТТЕ є здатність до ізоляції помилок. Під збоєм розуміється ситуація, коли система перестає функціонувати відповідно до свого стандартного сценарію, а помилка – це стан, що передуює відмові. Помилки можуть мати фізичну (наприклад, пошкодження кабелів чи мікросхем), програмну або апаратну природу. Для підвищення надійності в ТТЕ заздалегідь моделюються так звані помилкові гіпотези, які є узагальненим уявленням про можливі збої в системі. Ці гіпотези лежать в основі архітектурної реалізації механізмів відмовостійкості [7].

Однією з фундаментальних властивостей ТТЕ є використання глобального часу [10], який забезпечує синхронну роботу всіх вузлів мережі. Локальні годинники кожного вузла синхронізуються до спільного часу, що гарантує координованість подій у системі. Після завершення процедури ініціалізації синхронізації всі обчислення та передача даних здійснюються з

урахуванням глобального часу, точність якого визначається параметром П.

Система підтримує два типи спрацьовувань: тригери за часом (time-triggered, TT) та за подією (event-triggered, ET) [12]. У першому випадку подія ініціюється в конкретну точку глобального часу й забезпечується сервісом синхронізації, тоді як у другому випадку спрацювання зумовлюється змінами в стані системи або контрольованого середовища, зокрема у відповідь на сигнали сенсорів чи інші події в операційному контексті.

### 1.1 Множина доступу з тимчасовим розподілом

У системі TTE управління доступом до мережного середовища реалізується на основі механізму множинного доступу з поділом у часі (TDMA – Time Division Multiple Access). Цей механізм передбачає розподіл часу на дискретні часові інтервали – таймслоти, кожен з яких асоціюється з окремим вузлом мережі. Розподілення таких слотів регламентується розкладом, що визначає точний момент активації передачі для кожного вузла. Усі таймслоти згруповано в TDMA-раунди, які, у свою чергу, впорядковано у цикли кластера, що формують цілісний графік комунікаційної активності системи [7].

Ця технологія розроблена у Віденському технологічному університеті як відповідь на потребу поєднання в одному середовищі передачі даних, що відносяться як до категорії реального часу (у вигляді TT-повідомлень), так і до категорії нереального часу (у вигляді ET-повідомлень). Такий підхід забезпечує гнучке функціонування системи та одночасне задоволення вимог до жорсткої синхронізації критичних процесів і обробки подієво-залежного трафіку.

Усі типи повідомлень у технології TTE передаються спільним фізичним каналом Ethernet, однак між ними існують принципові відмінності у способі обробки. Повідомлення, що формуються за подією (ET), не синхронізовані з глобальним часом і можуть призводити до тимчасових

колізій із повідомленнями жорсткого реального часу (ТТ). Для розв’язання цієї проблеми ТТ-повідомлення маркуються унікальним ідентифікатором, який дозволяє комутатору ТТЕ точно визначити момент їхнього прийому. Після виявлення такого кадру система тимчасово призупиняє обробку всіх ЕТ-повідомлень до завершення обслуговування пріоритетного ТТ-паketу.

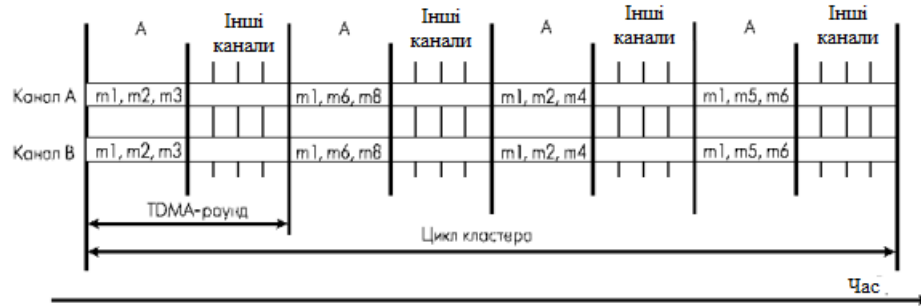


Рисунок 1.2 – TDMA

Цей механізм забезпечує збереження фіксованої, мінімальної затримки під час проходження ТТ-кадру через мережу, що є критично важливим для розподілених систем реального часу. Завдяки закладеній у структуру кадру інформації про затримку, досягається надзвичайно низький рівень джиттера, тобто варіацій у часі затримки доставки (рисунок 1.2). Для систем, де своєчасна доставка керівної інформації безпосередньо впливає на функціональність, ця властивість набуває вирішального значення. Саме тому технологія ТТЕ забезпечує детерміновану передачу інформації реального часу з точністю до мікросекунди [7].

## 1.2 Організація мережі за допомогою ТТЕ

ТТЕ була стандартизована інженерним об’єднанням SAE у вигляді стандарту SAE AS6802 у 2010 році, що стало відповіддю на зростаючі вимоги до надійності та детермінованості передачі даних у високочитичних розподілених системах керування. Цей стандарт визначає концептуальні засади побудови відмовостійких мереж для кінцевих пристроїв і комутаторів,

які функціонують за принципами, закладеними в архітектурі ТТЕ. Завдяки цим властивостям ТТЕ знайшов широке впровадження в сучасних керуючих системах мобільних об'єктів, зокрема в авіаційній, автомобільній та космічній техніці, де критично важливим є забезпечення високої точності передачі команд і синхронізації дій.

Мережа ТТЕ містить кінцеві системи, комутатори та двонаправлені комунікаційні канали, що з'єднують усі компоненти. У деяких реалізаціях кінцевий пристрій може бути об'єднаний із комутатором в єдину апаратну одиницю. Для досягнення глобальної синхронізації в ТТЕ-мережі застосовується модель, що включає три типи ролей: синхронізований майстер (СМ), синхронізований клієнт (СК) і майстер стиснення затримки (СЗМ) [9]. Ключова роль у підтримці точного часу відводиться СЗМ, який виконує обчислення глобального часу. Початкову ініціалізацію цього процесу забезпечує СМ, тоді як СК приймає й налаштовується на обчислений час.

Передача інформації між пристроями для синхронізації реалізується за допомогою кадрів управління, які відповідають протоколу PCF (Protocol Control Frames) [7,9]. Цей протокол є багаторівневим механізмом, у межах якого СМ на початку кожного кластерного циклу надсилає кадр із часовими параметрами до СЗМ. Після збору таких кадрів СЗМ виконує розрахунок нового значення глобального часу та поширює його серед усіх пристроїв шляхом ширококомовного розсилання оновленого кадру PCF. Цей процес гарантує точну синхронізацію всіх локальних годинників у системі, забезпечуючи стійкість до відмов і високу точність керування часом.

### 1.3 Формат кадра та види трафіку

У межах архітектури передбачено роботу з декількома типами трафіку, що дає змогу адаптувати систему до потреб як детермінованих, так і недетермінованих сценаріїв передачі даних. Основними категоріями, які

розрізняє TTE, є трафік жорсткого реального часу (ТТ-трафік), еластичний або звичайний Ethernet-трафік (ЕТ-трафік), а також трафік з обмеженням пропускної здатності. Ключовим чинником у розмежуванні цих типів є синхронізація, пріоритетність та управління затримками при передачі кадрів [7].

ТТ-трафік має визначений тип у структурі Ethernet-кадру, що дозволяє йому відрізнитися на рівні форматування. Ці кадри містять поле глобального часу або затримки, що забезпечує синхронізовану передачу у жорстко визначені часові проміжки. Такий механізм дає змогу гарантувати мінімальні затримки та практично нульовий джиттер, що робить ТТ-трафік ідеальним для критичних застосувань у розподілених системах реального часу, зокрема у сфері авіоніки чи автономного керування.

На противагу цьому, ЕТ-трафік відповідає стандартному режиму функціонування Ethernet, без гарантій жорсткої затримки або синхронізації. Через це передача таких кадрів може супроводжуватися значними варіаціями у часі доставки, особливо в умовах високого навантаження мережі. ЕТ-трафік має нижчий пріоритет у системі TTE порівняно з ТТ-трафіком і може бути тимчасово призупинений комутатором у разі потреби обслуговування критичних кадрів.

Ще одним типом є трафік із обмеженою швидкістю, що наслідую концепції протоколу ARINC 664 і продовжує розвиток моделі обслуговування з урахуванням пріоритетів (QoS). Цей трафік, хоч і належить до недетермінованих потоків, все ж має встановлені обмеження на пропускну здатність, що дозволяє більш ефективно регулювати навантаження та уникати перевантаження каналів у критичних системах. У межах TTE обидва ці типи трафіку – ЕТ і обмежений за швидкістю – розглядаються уніфіковано, оскільки вони базуються на ідеології розмежування трафіку за пріоритетністю всередині стандарту Ethernet з QoS.

TTE залишається повністю сумісною з форматом кадру Ethernet, стандартизованого в рамках специфікації IEEE 802.3, що забезпечує

інтеграцію цієї технології в наявні мережеві інфраструктури без потреби у радикальному оновленні апаратної частини.

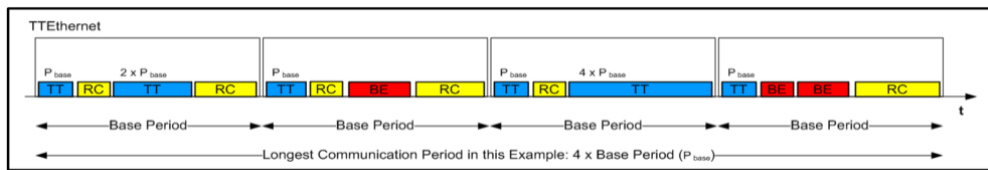


Рисунок 1.3 – TTEthernet

У структурі кадру, що використовується в технології TTE, було впроваджено розширення формату адреси призначення з метою підтримки диференціації трафіку за рівнем критичності та маршрутизації в межах розподілених систем реального часу. Зокрема, адресне поле у форматі кадру поділяється на дві логічні частини. Перша з них, 32-бітове константне поле (Constant Field, CFld), слугує для визначення типу трафіку – реального або нереального часу. Друга частина складається з 16-бітового ідентифікатора віртуального зв'язку (Virtual Link Identifier, VL ID), який забезпечує однозначне призначення маршруту пакету в межах мережевої інфраструктури, що підтримує TTE.

Комутатори в мережі зберігають ідентифікатори VL ID у формі попередньо сконфігурованої статичної таблиці маршрутизації, яка дозволяє визначити конкретний вихідний порт для пересилання кадру залежно від його призначення. Такий підхід гарантує ефективну маршрутизацію з низькими затримками та підтримку детермінованої передачі в системах жорсткого реального часу.

Окрім модифікації адресного поля, у формат кадру TTE додаються два додаткових поля: TT-параметр розміром 2 байти, який вміщує службову інформацію про тип або властивості кадру, та 8-байтне поле глобального часу, що забезпечує точну часову координацію під час передачі. Завдяки цим розширенням забезпечується повноцінна підтримка синхронізованої доставки даних з мікросекундною точністю в умовах критично важливих

розподілених систем.

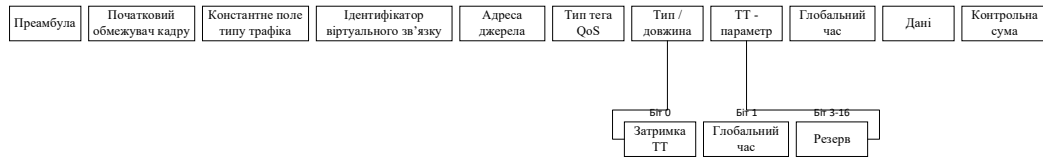


Рисунок 1.4 – Формат кадру по ТТЕ

У разі, коли в полі параметрів ТТ-кадру активується біт, що вказує на використання поля «Глобальний час» як величини затримки, відповідне 8-байтне значення трактується комутатором як фіксована затримка для даного кадру під час його обробки та маршрутизації. Такий механізм дозволяє реалізувати точне керування часом доставки повідомлень у межах системи з жорсткими часовими обмеженнями. Якщо ж у параметрах ТТ встановлено біт, який позначає використання поля «Глобальний час» як джерела синхронізації, тоді це поле застосовується для підстроювання локального годинника пристрою відповідно до глобального часу системи.

У контексті взаємодії кадрів реального та нереального часу виникають потенційні конфлікти, пов'язані з одночасною потребою в доступі до комунікаційного середовища. Зокрема, типовим є сценарій, за якого ТТ-кадр починає передачу в той момент, коли ЕТ-кадр лише готується до надсилання. Для вирішення такого конфлікту використовується механізм пріоритетності, згідно з яким кадри ТТ мають вищий пріоритет порівняно з ЕТ. Таким чином, ТТ-кадр передається в першу чергу, тоді як ЕТ-кадр затримується, що запобігає порушенню детермінізму передачі даних у системах реального часу.

#### 1.4 Конфлікти між кадрами

У ситуації, коли передача ТТ-кадра вже ініційована, а ЕТ-кадр лише перебуває на етапі підготовки до передачі, виникає конкуренція за доступ до

каналу. Для усунення конфлікту в таких випадках застосовується стратегія динамічного управління пріоритетами, відповідно до якої кадрам ТТ надається абсолютний пріоритет над кадрами ЕТ. Завдяки цьому кадр реального часу має змогу бути негайно переданим без перешкод, тоді як передача кадра нереального часу відкладається до завершення обслуговування ТТ-кадра. Такий підхід дозволяє забезпечити передбачува



Рисунок 1.5 – Передача ТТ-кадру попереду ЕТ-кадру

У разі, коли кадр ЕТ вже перебуває в процесі передачі (рисунок 1.5), а кадр ТТ лише готується до відправлення, виникає інша форма тимчасового конфлікту, вирішення якого потребує спеціалізованих механізмів, здатних гарантувати дотримання часових обмежень для трафіку реального часу. До таких механізмів належать резервування каналу, що передбачає виділення фіксованих часових інтервалів виключно для ТТ-повідомлень, оперативне блокування передачі кадрів ЕТ у разі виявлення колізії, а також застосування методики змішування, коли обидва типи трафіку адаптуються до розкладу, сформованого на основі пріоритетності та часових вимог. Ці підходи дозволяють зменшити джиттер і зберегти предиктивність передачі ТТ-кадрів навіть у високонавантаженому мережному середовищі.

У випадку виникнення тимчасового конфлікту між кадрами типу ЕТ і ТТ можуть застосовуватись кілька стратегій керування доступом до каналу передачі. Одним із підходів є резервування кадру ЕТ, що полягає в призупиненні його передачі з метою гарантування своєчасної доставки ТТ-кадра. Водночас така методика пов'язана з нераціональним використанням пропускної здатності, оскільки після завершення передачі ТТ-кадра потрібно

повторно передавати ET-кадр, що збільшує загальне навантаження на канал.

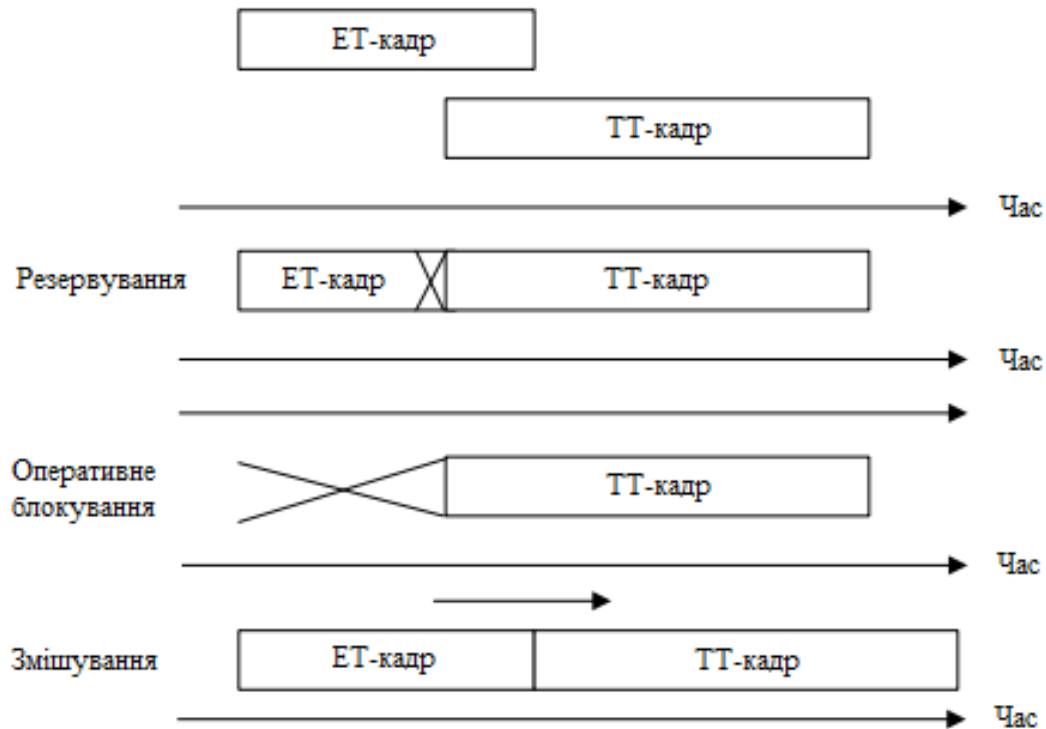


Рисунок 1.6 – Передача ET-кадру попереду TT-кадру

Альтернативним підходом є оперативне блокування, яке базується на концепції тригерного спрацювання за часом. Якщо виявляється, що передача кадру ET загрожує своєчасній доставці TT-кадру, передача ET-поток припиняється (рисунок 1.6). Такий підхід є ефективним у випадках коротких кадрів ET, де втрати часу на блокування є мінімальними.

Ще одним методом є перемішування трафіку, при якому допускається незначна затримка TT-кадру. У цьому разі обмеженням виступає граничний розмір кадру Ethernet, що не перевищує 1526 байт, що дозволяє точно розрахувати максимальну затримку TT-кадру. Завдяки цим властивостям у сучасних розподілених системах, що реалізують технологію TTE, як правило, поєднують оперативне блокування з механізмом перемішування, досягаючи збалансованості між гарантованою доставкою критичного трафіку та ефективністю використання каналу.

## 1.5 Захисник системи

У системі ТТЕ особливу роль відіграє так званий «захисник системи», функціонал якого інтегровано в апаратну частину комутатора. Основне призначення цього компонента полягає у забезпеченні цілісності та надійності передачі даних шляхом моніторингу потенційних помилок під час комунікації в мережі. У рамках цього механізму кожен клієнт мережі має локальну таблицю розкладу, яка визначає точні моменти формування й передачі ТТ-кадрів. Ці розклади синхронізовані з глобальним часом, що забезпечує одночасність дій усіх вузлів системи.

Процес передачі кадра розпочинається з досягнення визначеного моменту часу – точки видачі (`dispatch_pit`), після чого відбувається вибірка відповідного ТТ-кадра згідно з таблицею розкладу. Проте фактична передача кадра до комутатора (`send_pit`) може бути зміщена в часі, що пов'язано з необхідністю адаптації до особливостей мережного середовища, зокрема – взаємодії синхронізованого та асинхронного трафіку.

Затримка моменту відправки кадра визначається максимально допустимим відхиленням –  $\max(\text{send\_delay})$ , що встановлює верхню межу допустимої затримки. Таким чином, момент прийому кадра комутатором контролюється відповідно до формалізованих обмежень, що унеможливорює хаотичну поведінку в мережі та гарантує прогнозованість у системах жорсткого реального часу. Формула, яка описує допустимий момент прийому кадра комутатором, надається у вигляді формального виразу (формула 1), що використовується для верифікації часових параметрів доставки кадрів.

$$\text{receive\_pit} = \text{send\_pit} + \text{link\_latency}, \quad (1.1)$$

де `link_latency` визначає часову затримку, що виникає безпосередньо під час фізичної передачі кадру мережею. Комутатор, який підтримує

протокол TTE, налаштовується таким чином, щоб здійснювати перевірку відповідності часу надходження кадру встановленому часовому інтервалу, тобто вікну прийому. Прийом ТТ-кадра є допустимим лише в тому випадку, якщо момент `receive rit` потрапляє у межі заданого вікна. У разі, коли цей момент не виникає в межах очікуваного періоду, комутатор відкидає кадр, не здійснюючи його ретрансляцію по мережі.

На рисунку 1.7 представлено тимчасові діаграми, що відображають логіку роботи захисника системи в процесі перевірки часу надходження кадрів. Така схема забезпечує одну з ключових переваг архітектури TTE – потужну ізоляцію від помилок. Якщо в мережі виникає збій, система здатна локалізувати його, зберігаючи свою стабільність і переходячи до обробки помилки без припинення основного функціонування. У випадках, коли на стороні клієнта виникає несправність, що спричиняє неконтрольоване багаторазове надсилання кадрів, система сприймає цю поведінку як помилкову і, відповідно, вживає заходів, спрямованих на виключення такого вузла з подальшого обміну, тим самим підтримуючи цілісність і коректність функціонування розподіленого середовища передачі даних.

Відмовостійка конфігурація мережі TTE розглядається як вдосконалене розширення базового варіанту її побудови [7]. У межах цієї конфігурації впроваджується додатковий комутатор, що також оснащується функціональністю захисника системи. Такий підхід дозволяє підвищити рівень надійності системи за рахунок забезпечення підтримки у випадках виникнення більш ніж однієї помилки, зокрема двох одночасних збоїв на стороні клієнтських вузлів. Це суттєво розширює можливості системи щодо підтримки коректного функціонування навіть за умов порушення штатного режиму, у той час як стандартна конфігурація обмежується здатністю обробки лише одного критичного відхилення. Відповідно, відмовостійка архітектура забезпечує вищий ступінь гарантованої працездатності, що є особливо актуальним для критично важливих застосувань, таких як бортові системи керування або інші розподілені обчислювальні середовища з

підвищеними вимогами до безперервності функціонування.

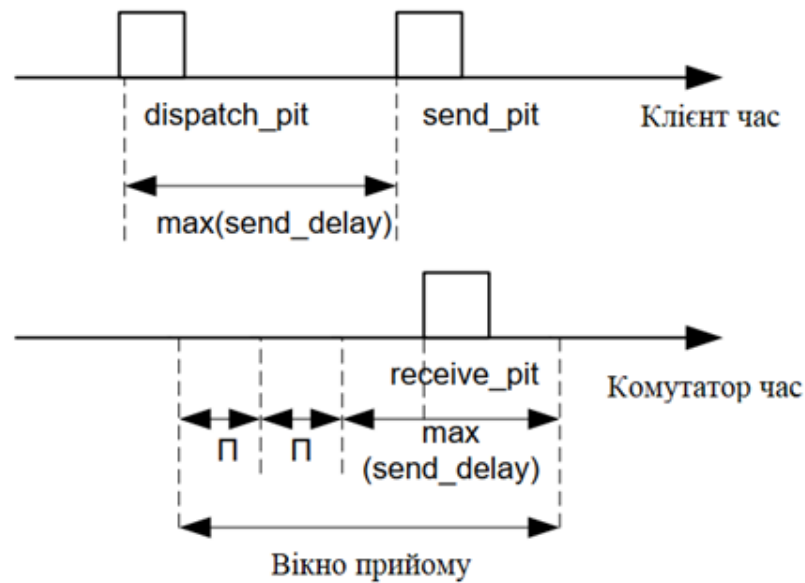


Рисунок 1.7 – Часова діаграма захисника системи

## 1.6 Інструменти моделювання

У процесі розробки нових алгоритмів, удосконалення апаратного забезпечення та оптимізації параметрів у системах керування комп'ютерними мережами важливо обґрунтувати доцільність запропонованих змін і експериментально підтвердити їхню ефективність. Для цього необхідно порівнювати алгоритми передачі кадрів у мережах стандарту TTE, орієнтуючись на такі показники, як ймовірність втрати кадрів, величина затримки при передачі, а також рівень завантаженості мережевого каналу. Визначальним критерієм ефективності є оцінка ймовірнісно-часових характеристик трафіку, що дозволяє встановити кількісні параметри продуктивності системи. Єдиним інструментом, здатним надати ці характеристики з належною точністю, є імітаційне моделювання, яке забезпечує можливість об'єктивного аналізу функціонування мережі.

Серед численних середовищ, що використовуються в галузі моделювання комп'ютерних мереж, існують як універсальні, так і

вузькоспеціалізовані рішення. Проте більшість із них має обмеження, що унеможливають використання для дослідження особливостей функціонування TTE. Наприклад, симулятори з орієнтацією на конкретне обладнання, попри зручність інтерфейсів, не дозволяють створювати уніфіковані моделі систем із високим рівнем абстракції. Інші платформи, такі як PRISM чи GPSS, зосереджені на перевірці ймовірнісних властивостей або аналізі систем масового обслуговування, що не відповідає специфіці розподілених реальних мереж.

Попри потужність середовища MATLAB та його можливості створення моделей у Simulink, недоліками є складність масштабування, обмежена підтримка ієрархії та незручності при обробці результатів симуляції. Автоматні підходи не забезпечують підтримки складних типів даних, характерних для форматів мережевих протоколів, і не дозволяють повноцінно працювати з імовірнісними і часовими залежностями, властивими системам реального часу.

У цьому контексті мережі Петрі виступають як ефективний інструмент для побудови динамічних моделей дискретних систем із можливістю формального опису структури, логіки і поведінки розподілених компонентів. Завдяки поєднанню різних типів розширень, таких як кольорові, ієрархічні, стохастичні та тимчасові мережі, цей підхід дозволяє детально моделювати процеси обміну даними, затримки та взаємодії в мережах типу TTE. Найбільш доцільним для реалізації дослідження виявився програмний пакет CPN Tools, який був розроблений на базі Орхуського університету та поєднує в собі інструменти моделювання, підтримку кольорових типів даних, часових затримок і можливості збору статистичних показників. Завдяки мові CPN ML, інтегрованій у середовище, користувач може точно описувати типи повідомлень, логіку переходів та реалізувати повноцінні моделі протоколів і мережевого функціонування. Платформа також дозволяє збирати дані за допомогою моніторів, що істотно спрощує процес аналізу ефективності алгоритмів обробки трафіку.

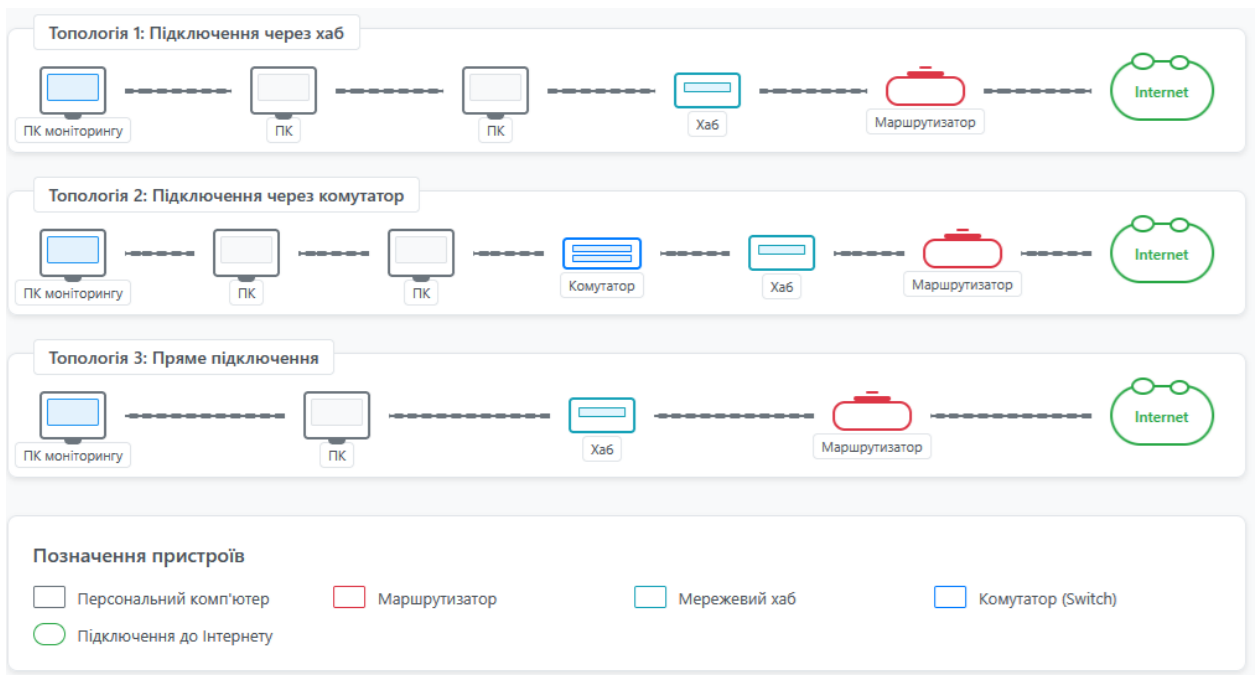


Рисунок 1.8 – Моніторинг мережі

На рисунку 1.8 представлено три варіанти мережевої топології для організації локальної мережі. Перша топологія демонструє підключення персональних комп'ютерів через мережевий хаб, друга - через комутатор з подальшим з'єднанням до хабу, третя показує спрощену схему прямого підключення через хаб. Кожна конфігурація включає комп'ютер моніторингу, звичайні робочі станції та завершується підключенням до глобальної мережі через маршрутизатор. Внизу схеми наведено легенду з позначеннями основних мережевих компонентів: персональних комп'ютерів, маршрутизаторів, мережевих хабів, комутаторів та підключення до Інтернету.

## 2 ВИКОРИСТАННЯМ МЕРЕЖ ПЕТРІ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ КАДРІВ ЗА ТТЕ

### 2.1 Аналіз методів

Одним із початкових етапів дослідження є побудова компонентів моделей, що відображають роботу обладнання комп'ютерної мережі типу ТТЕ, із застосуванням апарату мереж Петрі. Під таким обладнанням розуміється сукупність функціональних елементів, зокрема синхронізований майстер, клієнт із підтримкою синхронізації, пристрій для обчислення затримок, захисник мережевої інфраструктури та комунікаційні вузли, об'єднані каналами зв'язку. Функціонування передачі кадрів у системі ТТЕ базується на низці послідовних процесів, які включають початкову ініціалізацію з визначенням затримок усіх вузлів, обчислення глобального часу із подальшим коригуванням локального часу пристроїв, формування службових полів у форматі кадру відповідно до стандарту SAE ТТЕ, розрахунок допустимих часових вікон прийому кадрів, а також стандартні етапи комутації й буферизації кадрів.

У центрі уваги дослідження перебуває моделювання механізму роботи захисника системи, що виконує ключову роль у забезпеченні своєчасної доставки кадрів реального часу й мінімізації затримок. Саме цей компонент має істотний вплив на загальний рівень втрат кадрів та часові характеристики передачі, що зумовлює необхідність його поглибленого аналізу в межах даної моделі. При цьому всі компоненти, які використовуються для імітації передачі кадрів, трафіку ТТЕ та взаємодії обладнання, не є відображенням реальних фізичних пристроїв, а слугують абстрактним уособленням принципів і функцій, визначених у специфікаціях ТТЕ.

З огляду на це, у розроблених моделях не передбачається залежність від конкретних апаратних реалізацій, запропонованих комерційними виробниками. Такий підхід забезпечує незалежність від платформи і дозволяє

зосередитися на вивченні архітектурних особливостей, які мають системоутворюючий характер. Основна структура моделі комп'ютерної мережі TTE включає такі ключові елементи, як синхронізовані вузли, обчислювальні блоки глобального часу, мережеве середовище для передачі кадрів та інтерфейси з вхідними й вихідними портами. Комунікаційна підсистема об'єднує функціонал комутатора стандарту Ethernet із додатковим захисним механізмом, реалізованим на апаратному рівні. У подальших розділах буде докладно розглянуто модель такого комутатора із вбудованим захисником системи.

## 2.2 Використання методу передачі кадрів

Запропонований підхід передачі кадрів у системах TTE, реалізований на основі механізму STTE (Schedule Time-Triggered Ethernet), спрямований на усунення обмежень, притаманних класичному методу селекції кадрів, який базується на дії захисника системи при вході в комутатор. У новій концепції функції управління передачею кадрів типу TT делегуються безпосередньо комутатору, який керує процесом у межах вихідного порту відповідно до попередньо встановленого розкладу. На етапі ініціалізації виконується конфігурування системи, яке передбачає генерацію та поширення розкладів, призначених для кожного вузла, і параметризацію часових вікон прийому кадрів. Крім того, встановлюються відповідні часові слоти всередині циклу кластерного управління мережею.

Комутатор надсилає ширококомовний кадр, який несе значення локального часу. Отримавши цей кадр, мережеві вузли здійснюють синхронізацію своїх локальних годинників відповідно до протоколу PCF. Подальша обробка прийнятого кадру полягає в його аналізі планувальником розкладу, який здійснює класифікацію трафіку та відстежує момент надходження кадру. Якщо зафіксований час надходження кадру перевищує передбачений розкладом момент його передачі, такий кадр розцінюється як

недійсний. Для коректно отриманих кадрів визначається подальша дія залежно від порівняння фактичного часу надходження з моментом, зазначеним у розкладі. Якщо вони збігаються, кадр негайно передається, навіть за умови незавершеної буферизації; якщо ж час надходження менший, кадр тимчасово зберігається в окремому буфері до настання моменту його відправлення.

Кадри, що належать до трафіку типу ET, також обробляються відповідно до встановленого класу обслуговування та потрапляють до спеціалізованих черг із відповідним маркуванням, яке вказує на їх розмір. Роботу з чергами здійснює диспетчер, який активується лише за наявності вільного каналу та ненульового вмісту черг. Його задача полягає у визначенні можливості передавання кадру типу ET до того, як настане момент відправлення чергового кадру TT. Якщо поточний час із урахуванням довжини кадру дозволяє здійснити передачу, кадр типу ET передається, інакше очікується призначений момент, у який передається відповідний кадр типу TT.

Особливістю цього підходу є здатність комутатора забезпечити передачу кадрів типу TT точно у визначені розкладом часові інтервали, що гарантує детерміновану поведінку системи. При цьому планувальник у комутаторі виконує відстеження й обробку всіх подій, пов'язаних із надходженням і передачею кадрів. У разі несвоєчасного надходження кадру TT система фіксує це як порушення, а блокування каналу, встановлене для запобігання конфлікту з кадрами типу ET, знімається після закінчення відповідного тимчасового вікна або ж при відсутності очікуваного кадру. Передавання кадрів типу ET дозволяється лише за умови завершення усіх процедур обробки кадру TT та зняття відповідного блокування. Таким чином, метод STTE забезпечує підвищений рівень точності, надійності та передбачуваності при управлінні передачею трафіку в мережах, де використовуються механізми часової тригерації.

## 2.3 Алгоритми роботи компонентів

Узагальнене представлення функціональної структури методу передачі кадрів за принципом STTE подано на рисунку 2.1, де відображено взаємозв'язки між ключовими компонентами системи, алгоритмічну послідовність обробки трафіку та часову координацію процесів передавання.

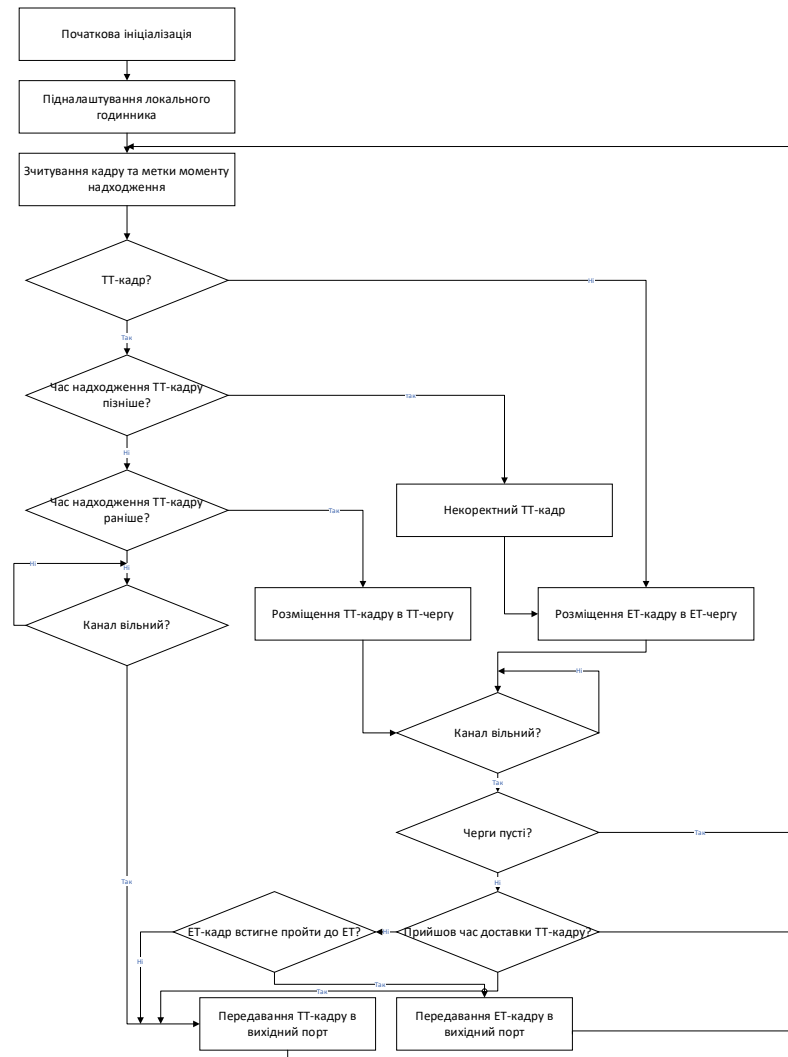


Рисунок 2.1 – Алгоритм розробленого методу

У межах моделювання розглядається алгоритм роботи з використанням трьох таймслотів, де два перших призначено для передачі кадрів типу ТТ, а третій – для кадрів типу ЕТ. Така конфігурація обрана з метою аналізу впливу інтенсивності трафіку на ймовірність втрати кадрів у мережі з

технологією TTE. Принцип маршрутизації кадрів у слотах базується на значенні ідентифікатора віртуального зв'язку (VL ID): якщо VL ID дорівнює 1, кадр передається в перший таймслот; якщо значення VL ID перевищує 1, кадр потрапляє в другий таймслот; при VL ID, що дорівнює нулю, кадр призначено для передачі в третій таймслот, зарезервованій для некритичних повідомлень.

## 2.4 Використання мереж цифрових автоматів

Загальний принцип функціонування методу передачі кадрів STTE може бути формалізовано за допомогою цифрових автоматів, які вважаються частковим випадком реалізації мереж Петрі. Такий підхід дозволяє ефективно описувати послідовності станів та переходів у мережевому обладнанні. У контексті кольорових мереж Петрі маркери мають визначені типи даних (кольори), що можуть бути використані як аргументи у виразах, які керують логікою передачі по дугах. Завдяки цьому кількість елементів моделі – переходів і позицій – зменшується, адже у функціональну частину переходів можуть бути закладені умови, пов'язані з кольором маркера.

У середовищі моделювання CPN Tools мережа Петрі визначається кортежем з дев'яти компонентів: множини позицій, множини переходів, множини орієнтованих дуг, множини кольорів (типів маркерів), змінних, функцій типізації позицій, функцій умов спрацювання переходів, функцій, що описують дуги, та функцій ініціалізації позицій. Ці функції використовують вирази на мові CPN ML, де кожен вираз має визначений тип значення і може містити змінні. Вирази, що задають ініціалізацію, повинні бути замкненими, тобто не містити вільних змінних.

Таким чином, модель цифрового автомата, представлена у вигляді кольорової мережі Петрі, забезпечує можливість формального та гнучкого опису алгоритму STTE, дозволяючи створити компактну й ефективну імітаційну модель передачі кадрів у системах на базі TTE.

За графом ЦА Мура збудуємо таблицю переходів автомата (рисунок 2.3) під дією вхідних сигналів, перша колонка  $S_i(t)$  – стан № $i$  автомата в поточний момент часу  $t$ ,  $S_j(t+1)$  – стан № $j$  автомата наступного моменту часу  $t$ ,  $X_{i,j}(t)$  – вхідний сигнал у поточний час  $t$ ,  $U_j(t+1)$  – вихідний сигнал наступного часу  $t$ . У таблиці переходів послідовно перераховуються всі переходи, починаючи з нульового стану по останнє. І так далі.

MAC-адреса	Канал	Тип	SSID	Шифр...	Сигнал	Швидк...	Байт	Пакети	Повтор	По...
D-LinkE9:05:00	11	AP	PINOC...	WEP	68/83/100	1/16.22/54	440,651	2,024	117	0
GemtekTech2...	11	STA		WEP	46/75/100	1/44.75/54	24,117	258	36	0
D-Link69:0B:B3	11	STA		WEP	40/54/75	1/52.96/54	336,040	1,168	83	0
Comrex37:62...	10	AP	comrex		1/13/100	1/1/1	51,318	474	32	0
D-LinkE9:05:00	42	AP	PINOC...	WPA-CCMP	70/74/76	6/6/6	17,055	170	39	0

Захоплення: Увімк. | Пакети: 3,322 | Ключі: Немає

Автозберег.: Вимк. | З'явилося: Вимк. | Попередж.: Ви

Рисунок 2.2 – Типова картина вузлів бездротової мережі за допомогою мережевого аналізатора

Інші цифрові автомати, що описують функціонування окремих компонентів системи передачі кадрів у мережах ТТЕ, формуються аналогічним чином, тобто шляхом трансформації блок-схем алгоритмів у формальні структури автоматів. Така трансформація дозволяє перейти від інтуїтивно зрозумілої візуалізації логіки до чітко структурованого математичного опису. Застосована методика перетворення цифрових автоматів у мережі Петрі базується на формальних принципах узагальнення алгоритмічних структур, і вона вже використовувалася в попередніх

дослідженнях для здійснення формалізованого переходу від цифрових автоматів до моделей на основі мереж Петрі.

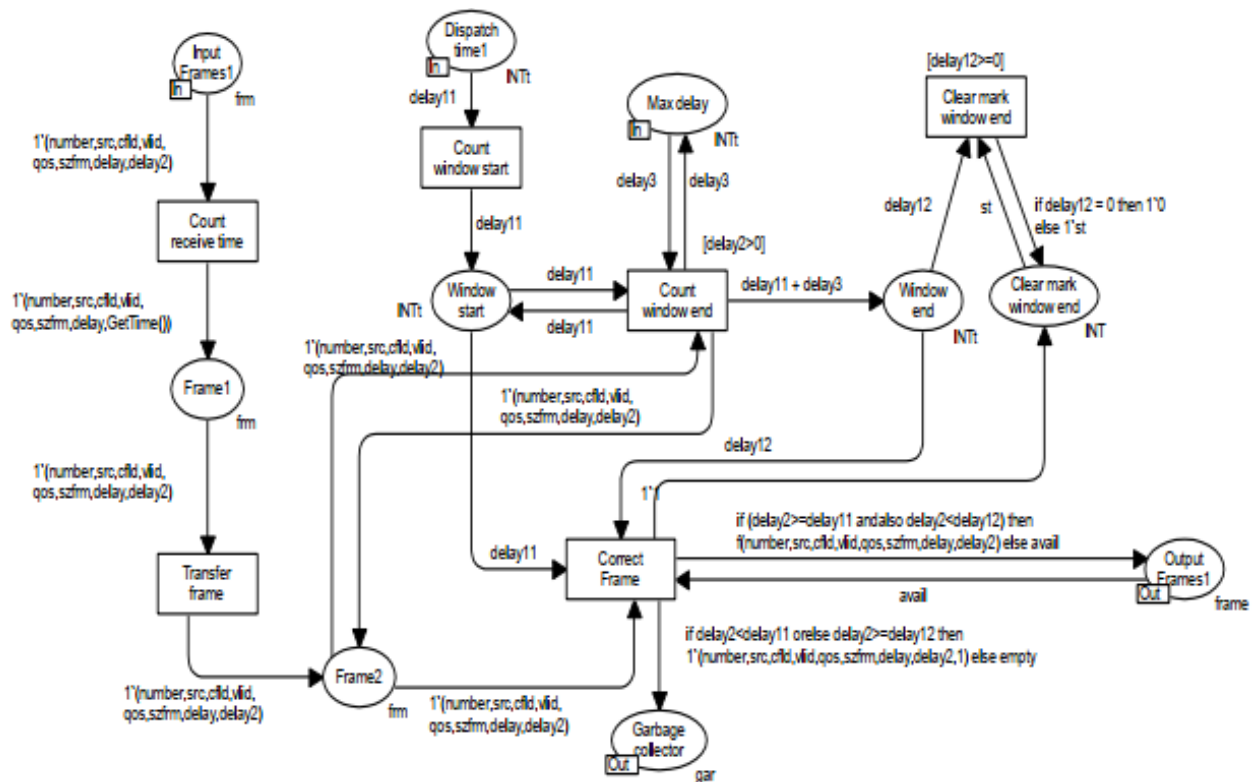


Рисунок 2.3 – Підмережа захисника системи

На рисунку 2.3 представлено фрагмент ієрархічної моделі, яка описує функціонування захисника системи у складі комп'ютерної мережі з передачею кадрів за технологією TTE. Сконструйована підмережа ґрунтується на раніше визначеному цифровому автоматі та реалізована відповідно до методології формального переходу від автоматного опису до структури кольорової мережі Петрі. У цій моделі кожен стан автомата відображає окрему позицію в мережі Петрі, що відповідає певному логічному етапу обробки кадрів у межах заданого часової політики.

Зокрема, позиції, що позначаються як S3 та S4, репрезентують моменти відкриття та завершення тимчасового вікна, у межах якого допускається передача кадрів реального часу. Позиції S1 та S2 відображають стадії прийому кадру пристроєм-захисником, фіксуючи сам факт надходження та початкову перевірку. Позиція S6 відповідає за логіку перевірки відповідності

часових параметрів кадра встановленим обмеженням, що критично для забезпечення детермінованої доставки. У свою чергу, позиції S7 і S8 реалізують реакцію на події, пов'язані з досягненням контрольних часових меж, що визначають допустимість подальшої обробки або відхилення кадру.

Застосування такого формального представлення на основі мереж Петрі дає змогу відтворити часову поведінку системи з високою точністю та забезпечує гнучку платформу для подальшого аналізу і модифікацій алгоритмів передачі в мережах TTE.

## 3 РЕАЛІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ

### 3.1 Імітаційні моделі

Було побудовано імітаційну модель, яка формалізує взаємодію ключових компонентів комп'ютерної мережі, що функціонує за стандартом (TTE). Основна мета моделі – відтворити механізми обміну даними та синхронізації між базовими вузлами мережі, зосередивши увагу на логіці їхньої роботи, а не на конкретних апаратних реалізаціях. Архітектура моделі включає чотири основні функціональні блоки: клієнт, комутатор (який виконує також роль майстра синхронізації), блок глобального часу та комунікаційний канал.

Розроблена модель є масштабованою: початкова конфігурація охоплює один клієнтський вузол і один комутатор, однак структура дозволяє легко розширити кількість вузлів до будь-якого значення  $N$ , що дає змогу моделювати як локальні, так і розподілені системи з великою кількістю учасників обміну. Імітація здійснюється на основі абстрактного часу, що забезпечує спрощене відображення функціонування системи без прив'язки до реальних одиниць часу, дозволяючи зосередитися на аналізі логіки та узгодженості процесів у мережі.

Ключовим параметром у моделі виступає змінна `globtime`, яка забезпечує глобальну синхронізацію між клієнтом і комутатором. Ця змінна ініціалізується у модулі глобального часу та передається до решти вузлів, що гарантує узгодженість локальних годинників у межах мережі. Додатково задається константа `val numberpart = 2`, яка визначає кількість учасників моделі (один клієнт і один комутатор) і використовується для формування кольору `GlobTime` – параметра, який описує можливі значення глобального часу в межах симуляції.

На рисунку 3.1 зображено верхній рівень імітаційної моделі, що наочно демонструє компонування системи та взаємозв'язки між її елементами: блоком синхронізації, комунікаційним каналом, клієнтським вузлом та комутатором. Така структуризація дозволяє здійснити подальшу деталізацію внутрішньої логіки кожного блоку та формалізувати моделі взаємодії в рамках концепції кольорових мереж Петрі.

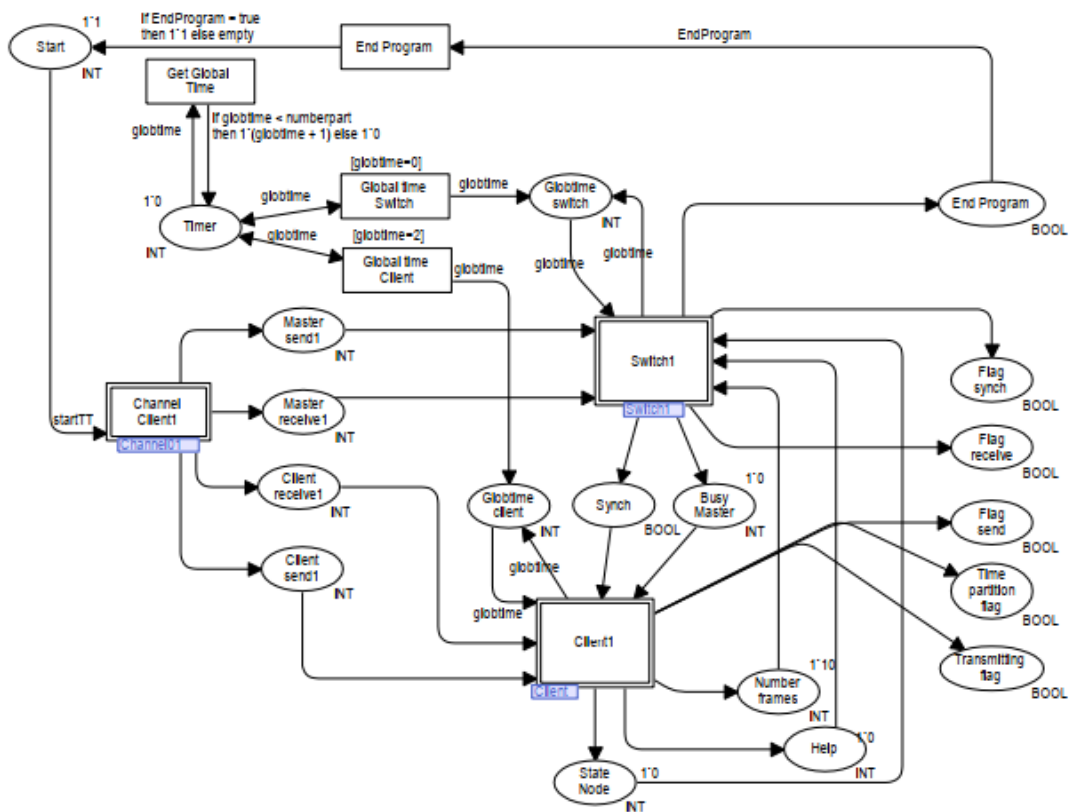


Рисунок 3.1 – Модель системи по технології TTE

Функціонування системи TTE реалізується за допомогою алгоритму, в основі якого лежить чітко визначена послідовність дій, що забезпечують ініціалізацію системи, встановлення синхронізації між компонентами та обчислення глобального часу. Робота системи починається з формування стартового сигналу, що позначається позицією Start. Цей сигнал активує комунікаційний канал, який слугує основним засобом взаємодії між клієнтом і комутатором.

Комунікаційний канал, після активації, генерує чотири типи сигналів,

які відповідають за двосторонню передачу та прийом даних обома сторонами: сигнал передачі від комутатора, сигнал прийому на комутаторі, сигнал передачі від клієнта та сигнал прийому на клієнті. Ці сигнали забезпечують необхідну основу для обміну інформацією між учасниками мережі та дозволяють реалізувати логіку протоколу передачі кадрів. Деталізація механізмів роботи комунікаційного каналу розглядається окремо, з урахуванням часової координації дій.

Паралельно з цим, у системі ініціюється процес формування глобального часу, що є фундаментальним елементом усього функціонування мережі TTE, оскільки від нього залежить точність синхронізації та своєчасність передачі кадрів. Глобальний час представляється у моделі за допомогою позиції `Timer`, яка слугує сховищем актуального значення часу, доступного всім вузлам мережі. Початкове значення цієї позиції дорівнює нулю, а подальше оновлення здійснюється через перехід `Get Global Time`, що відповідає за інкрементування змінної `globtime` на кожному циклі.

Циклічність цього процесу регулюється константою `numberpart`, яка визначає кількість логічних елементів у мережі, синхронізованих за глобальним часом. Така організація дозволяє досягти високої точності у визначенні моментів передачі кадрів та підтримувати надійність мережі в умовах реального часу.

### 3.2 Аналіз кадрів

У представленій імітаційній моделі системи передачі кадрів у мережі TTE реалізовано концепцію, в якій відсутній апаратний захисник системи. Це спрощення дозволяє зменшити обчислювальну складність та виключити необхідність формального формування тимчасового вікна, яке зазвичай застосовується для фільтрації та обробки ТТ-кадрів. Водночас зберігається головна властивість – дотримання детермінованого розкладу передачі ТТ-кадрів, що забезпечує своєчасність їх обробки відповідно до специфікацій

систем реального часу.

Архітектура моделі має чітко визначену модульну структуру та включає декілька ієрархічно організованих підмереж, кожна з яких відповідає за окремий етап обробки кадрів. Підмережа «Reader» реалізує завантаження кадрів із зовнішнього джерела та їх відновлення згідно з часовими мітками, що імітує надходження даних у реальному часі. Буферна підсистема «Buffer» відповідає за тимчасове зберігання кадрів перед подальшою обробкою, забезпечуючи гнучке управління потоком вхідних даних.

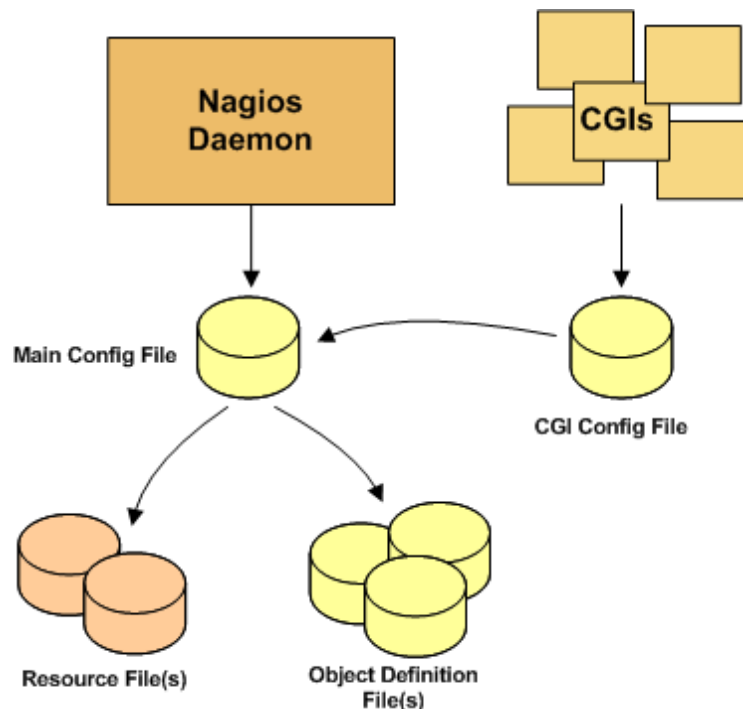


Рисунок 3.2 – Вибір ядра системи моніторингу мережі

Модуль «Scheduler» виконує генерацію розкладу передачі кадрів, задаючи часову координату для кожного ТТ-кадра згідно з циклом кластера. Це дозволяє синхронізувати передачу з системним глобальним часом. Підсистема «Classifier» класифікує вхідні кадри за типом (ТТ або ЕТ), що є ключовим етапом у контексті реалізації політик пріоритетності. Підмережа «Time\_checker» здійснює перевірку відповідності часу доставки ТТ-кадрів встановленому розкладу, дозволяючи фільтрувати несвоєчасні кадри та

позначати їх як недопустимі (рисунок 3.2).

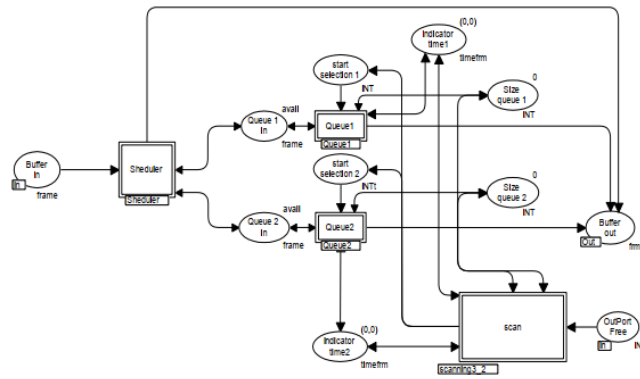


Рисунок 3.3 – Підмережа буфера комутатора

У розробленій моделі системи передачі кадрів ТТЕ порти буфера комутатора виконують ключову роль в організації прийому, зберігання та передачі кадрів згідно з розкладом і доступністю вихідних каналів. Порт Buffer In відповідає за прийом кадрів на вхідному інтерфейсі комутатора й служить точкою входу кадрів з підмережі читання. Порт Buffer Out є вихідним інтерфейсом, через який кадри направляються у відповідні вихідні канали після обробки. Порт OutPort Free приймає сигнали, які інформують систему про те, що відповідний вихідний канал вільний для передачі кадру.

Сигнали start selection N є ініціаторами вибірки кадрів із відповідної черги, причому індекс N визначає конкретну чергу відповідного класу обслуговування. Вони формуються диспетчером черг на основі актуального часу та наявності кадрів у чергах.

Позиції Size queue N відображають фактичну кількість кадрів у кожній з черг, що дозволяє системі оцінювати завантаженість і приймати рішення про обслуговування. Позиції Indicator time N містять списки з параметрами кадрів, зокрема затримкою та розміром, що є критично важливими для визначення можливості передати кадр до настання моменту доставки наступного кадру реального часу. Ці позиції безпосередньо впливають на логіку роботи диспетчера, оскільки дозволяють точно оцінити часові межі, у яких можлива передача кадру без конфлікту з ТТ-розкладом.

Підмережа Scheduler, представлена на рисунку 3.4, реалізує функціональність формування та перевірки розкладу передачі ТТ-кадрів. Саме в цій підмережі зіставляється момент надходження кадру з очікуваним моментом його доставки згідно з попередньо сформованим розкладом. За результатами порівняння приймається рішення про передачу, буферизацію або відхилення кадру. У такий спосіб Scheduler забезпечує дотримання часових обмежень, необхідних для детермінованої передачі трафіку реального часу, що є критичним для гарантованої якості обслуговування в ТТЕ-системах.

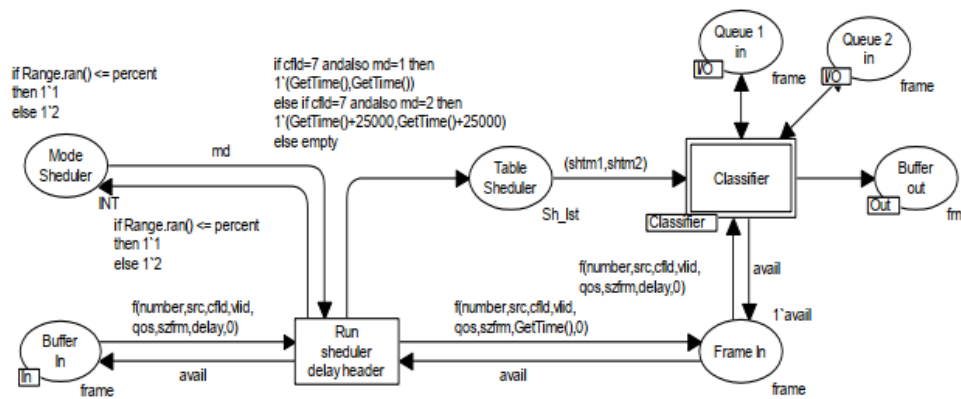


Рисунок 3.4 – Підмережа генерації розкладу

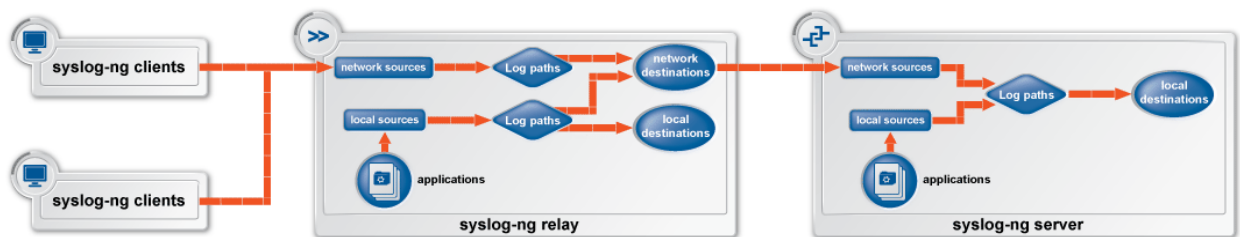


Рисунок 3.5 – Підмережа генерації кадрів

Підмережа класифікації кадрів, наведена на рисунку 3.5, виконує функцію розподілу трафіку відповідно до його типу та призначення. Основними портами цієї підмережі є Frame In, який слугує точкою входу для всіх кадрів у систему; Table Scheduler, що забезпечує доступ до розкладу передачі для ТТ-кадрів; Queue N in, який виконує роль як вхідного, так і вихідного інтерфейсу для відповідних черг; та Buffer out, що забезпечує

передачу кадрів у напрямку вихідного порту комутатора.

Коли кадр надходить до підмережі через порт Frame In, він спершу аналізується на переході Classifier. Рішення про тип кадру приймається на основі значення поля ConstFld: якщо воно не дорівнює 7, кадр класифікується як Ethernet (ET) і надсилається до черги Queue 1in; якщо ж поле має значення 7, кадр визначається як тайм-тригерний (TT) і спрямовується до підмережі Time\_checker разом із інформацією про поточний розклад. У Time\_checker оцінюється відповідність кадру визначеним часовим параметрам, після чого він або надходить до черги Queue 2in для TT-кадрів, або відразу передається на вихідний порт комутатора.

Диспетчер черг у цій моделі суттєво відрізняється від класичних реалізацій на основі стратегій FIFO, WRR чи DRR. Його особливістю є здатність враховувати як час надходження кадру, так і його розмір, що дозволяє реалізувати алгоритм, притаманний технології STTE. Позиції Indicator time1 та Indicator time2 виконують функції буферів для кадрів класів ET та TT відповідно, зберігаючи інформацію про їх затримку та розмір.

Запуск диспетчера черг ініціюється, коли принаймні одна черга не є порожньою, а вихідний порт доступний для передачі. Формування сигналу вибірки кадру з ET-черги відбувається в ситуаціях, коли або лише вона заповнена, або обидві черги активні, але кадр ET може бути переданий без перешкод до моменту доставки найближчого TT-кадра. Якщо ж умови не дозволяють передати кадр ET, а TT-черга не порожня, тоді пріоритет передається TT-кадру. Передача TT-кадра ініціюється точно в заздалегідь визначений момент часу, забезпечений механізмом затримки ind2-GetTime().

Для повноцінного аналізу часових характеристик і продуктивності моделей, у системі використовується генератор трафіку, який моделює вхідні потоки кадрів як для класичного Ethernet, так і для тайм-тригерного Ethernet. Завдяки цьому стає можливим вивчення впливу типу трафіку, розкладу передачі та архітектури диспетчеризації на величину затримок і ефективність

пропускної здатності мережі TTE.

### 3.3 Результати моделювання

Генератор трафіку відіграє ключову роль у моделюванні й аналізі процесів передачі даних у комп'ютерних мережах, зокрема у системах із комутацією кадрів типу Ethernet. Його основне призначення полягає у створенні навантаження на мережеву інфраструктуру з метою оцінки поведінки комутатора в умовах різних режимів трафіку. Зокрема, він дозволяє дослідити ефекти, пов'язані з формуванням затримок на вихідних портах комутатора, процесами завантаження буферних черг, втратами кадрів унаслідок переповнення, а також оцінити ефективність використання пропускної здатності мережевого каналу.

У рамках моделювання реалізовано генератор регулярного трафіку, який продукує кадри з фіксованим періодом надходження. Щоб уникнути одночасного прибуття кількох кадрів, до моделі інтегровано механізм затримки, що забезпечує розведення сигналів у часі. Це дозволяє точніше моделювати ситуації, наближені до реальних умов експлуатації мережі.

Застосований підхід передбачає підтримку як регулярного, так і еластичного трафіку. Регулярний трафік відповідає характеристикам систем реального часу, де важливими є сталі часові інтервали між кадрами та контроль затримки їх доставки. Такий трафік у моделі формується відповідно до заданого періоду та використовується для аналізу часових характеристик передачі. Еластичний трафік, навпаки, не має жорстких часових обмежень і відповідає класичному найкращому зусиллю у системах Ethernet. Його генерація відбувається стохастично, із заданими статистичними розподілами довжин кадрів і часу надходження, що дозволяє оцінити вплив нестабільного трафіку на поведінку системи в цілому.

Кожен з кадрів, згенерованих у рамках цієї моделі, має параметри, які дозволяють ідентифікувати його пріоритет (QoS), MAC-адресу джерела і

призначення, а також довжину і момент прибуття. Таке детальне представлення кадру забезпечує можливість реалізації повноцінної політики обслуговування в чергах комутатора та здійснення селекції відповідно до заданих критеріїв.

Змішувач трафіку, що є частиною генератора, виконує функцію агрегування вхідних потоків у єдиний транспортний потік, що надходить до комутатора. Цей модуль також контролює щільність потоку, регулюючи довжину та частоту кадрів, що генеруються, що є особливо важливим при дослідженні продуктивності мережі в умовах змішаного трафіку.

Узагальнений вигляд моделі генератора трафіку представлено на рисунку 3.5, який візуалізує архітектуру системи генерації даних та демонструє її взаємодію з іншими компонентами моделі комп'ютерної мережі. Завдяки цьому забезпечується достовірна імітація різних сценаріїв експлуатації, що, у свою чергу, дозволяє провести повноцінний аналіз і оптимізацію параметрів передачі кадрів у мережах з підтримкою технологій TTE та Ethernet.

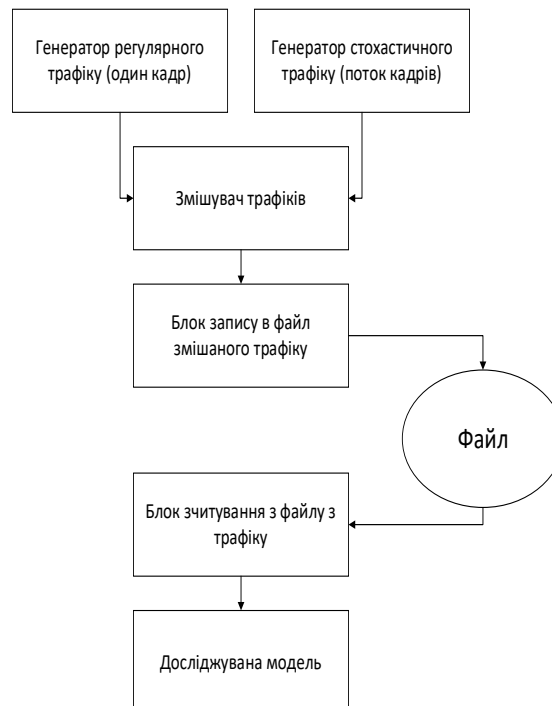


Рисунок 3.5 – Узагальнений вид моделі генератора трафіку

У процесі моделювання проведено порівняльний аналіз трафіку,

сформованого генератором у рамках досліджуваної імітаційної моделі, з теоретичним розподілом довжин кадрів, характерним для комутатора Ethernet. Очікуваний розподіл, згідно з теоретичними положеннями, має форму U-подібної кривої. Така форма обумовлена особливостями побудови трафіку в мережах Ethernet, де переважають короткі керувальні пакети та великі пакети передачі даних, тоді як середні значення спостерігаються значно рідше.

З метою верифікації відповідності моделі реальним умовам, було зчитано дані з файлу, що містив результати генерації змішаного трафіку. Після цього здійснено відокремлення лише стохастичного (еластичного) компоненту трафіку, який не має фіксованого періоду надходження й характерний для фонові або непередбачуваної активності в мережі.

Подальший аналіз передбачав виявлення граничних значень довжин кадрів, тобто визначення мінімального та максимального розміру пакета, присутнього у згенерованому трафіку. На основі цього діапазону було здійснено розбиття отриманих значень на певну кількість інтервалів, що дозволило побудувати гістограму розподілу. Такий підхід дає змогу візуалізувати щільність розміщення кадрів різної довжини та перевірити, наскільки емпіричний розподіл наближається до очікуваної теоретичної кривої.

Цей етап аналізу є ключовим для оцінки достовірності моделі генерації трафіку, а також для подальшого налаштування моделі комутатора та механізмів обробки кадрів, орієнтованих на забезпечення якісного обслуговування в умовах змішаного та варіативного навантаження на мережу.

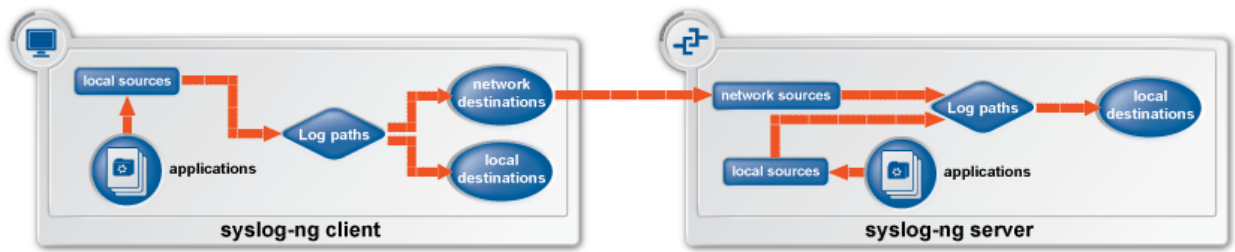


Рисунок 3.6 – Профіль трафіку

На рисунку 3.6 подано профіль згенерованого трафіку, який відображає зміну інтенсивності надходження кадрів у часі. Цей графік дозволяє простежити характер формування навантаження на комутатор, включаючи моменти підвищеної або зниженої активності мережевих пристроїв. Профіль демонструє динаміку генерованих потоків як регулярного, так і стохастичного трафіку, що дозволяє оцінити здатність моделі до репрезентації змішаного середовища передачі даних.



Рисунок 3.7 – Гістограма розподілу довжини кадрів

На рисунку 3.7 зображено гістограму розподілу довжин кадрів для теоретичного та експериментального трафіку. Теоретичний розподіл, що очікується у вигляді U-подібної кривої, підтверджує гіпотезу про переважання коротких та довгих кадрів у стандартному Ethernet-трафіку. Експериментальний розподіл, сформований у результаті роботи моделі,

демонструє близькість до теоретичної форми, що свідчить про коректність параметризації генератора трафіку. Виявлена відповідність також засвідчує здатність моделі відтворювати реалістичні сценарії навантаження на мережу, що є важливим для подальшого дослідження механізмів буферизації, планування та обробки кадрів у системах з підтримкою QoS та технологією STTE.

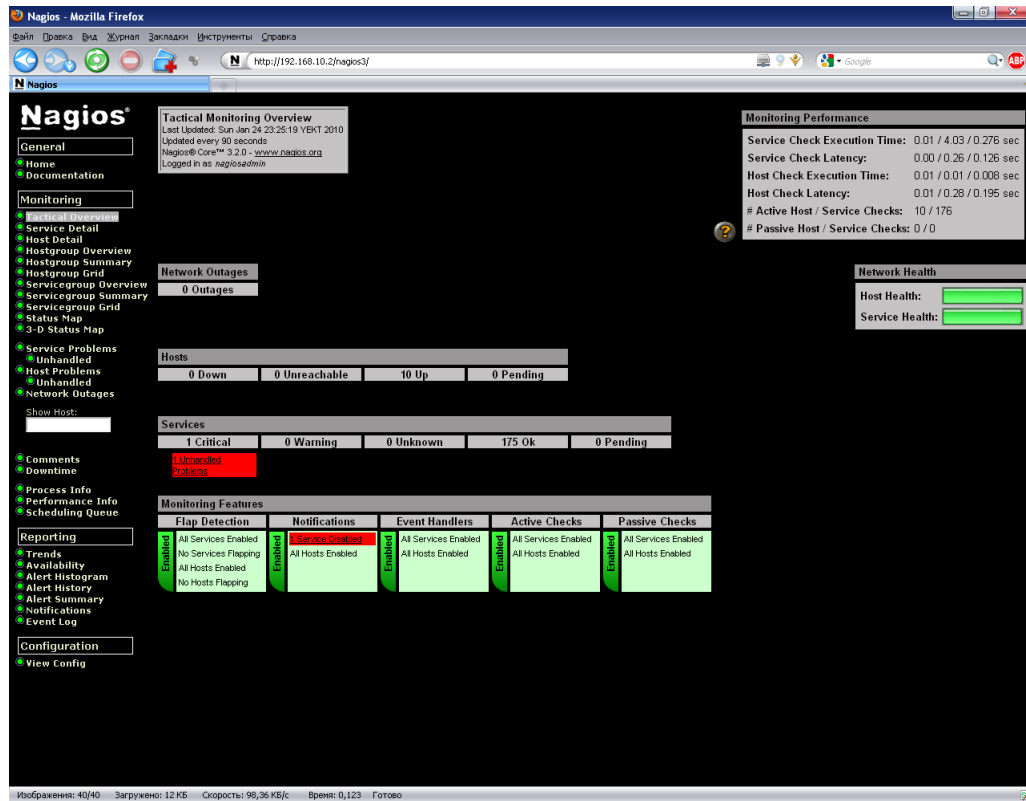


Рисунок 3.8 – Web-інтерфейс ПЗ

На рисунку 3.8 представлено гістограму розподілу інтервалів між моментами надходження кадрів у системі, яка побудована на основі машинного часу моделі, що відповідає тактовим імпульсам (TI). Цей розподіл відображає частоту виникнення певних часових проміжків між сусідніми кадрами, що дозволяє оцінити ступінь регулярності або стохастичності трафіку. Виявлений характер розподілу інтервалів є ключовим показником для аналізу навантаження на комутаційну підсистему та перевірки здатності мережі забезпечувати визначені часові обмеження при

передачі даних. Побудована гістограма також демонструє відхилення від ідеально регулярного трафіку, що дозволяє моделювати та досліджувати сценарії з впливом джитерів і варіативністю надходження кадрів.

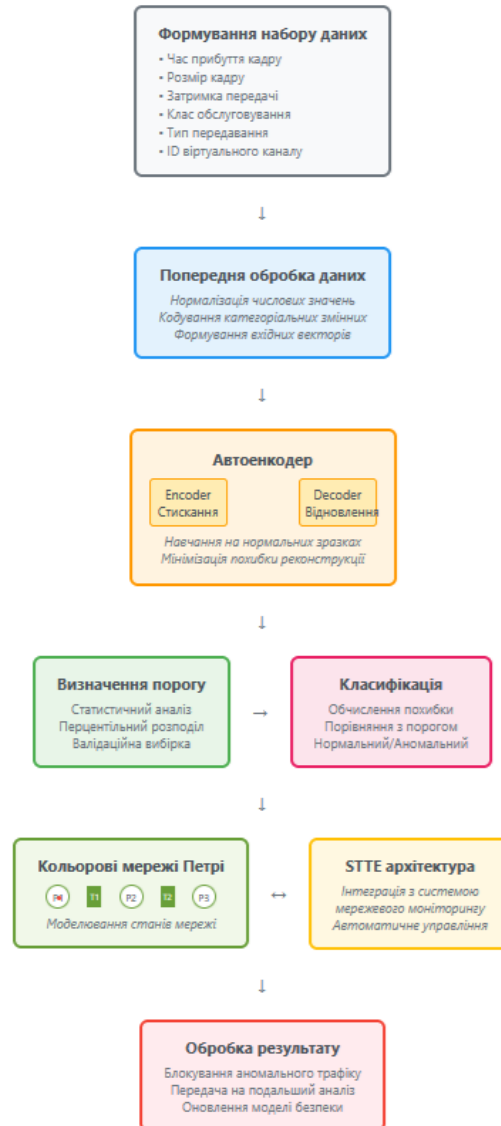


Рисунок 3.9 – Модуль виявлення аномалій з використанням машинного навчання

На представленій схемі рисунку 3.9 відображено архітектуру інтегрованої системи виявлення аномалій у мережевому трафіку, що базується на поєднанні методів машинного навчання без учителя та формальних підходів моделювання. Система реалізує послідовний процес обробки даних, починаючи від збору та підготовки вхідної інформації до

прийняття кінцевих рішень щодо класифікації трафіку.

Початковий етап передбачає формування набору даних, що включає ключові характеристики мережевого трафіку, такі як час прибуття пакетів, їх розмір, параметри затримки, класи обслуговування та типи передавання. Подальша попередня обробка забезпечує нормалізацію числових значень та кодування категоріальних змінних для формування узгоджених вхідних векторів.

Центральним компонентом архітектури є автоенкодер, реалізований як симетрична нейронна мережа з компонентами кодування та декодування. Цей елемент здійснює навчання на нормальних зразках трафіку, набуваючи здатності до точної реконструкції типових векторів при демонстрації значних похибок для аномальних прикладів.

Критичним аспектом функціонування системи є визначення порогового значення похибки реконструкції через статистичний аналіз валідаційних даних, що забезпечує основу для подальшої класифікації вхідних зразків. Інтеграція з кольоровими мережами Петрі забезпечує формальне моделювання станів системи, тоді як архітектура STTE створює платформу для комплексного мережевого моніторингу з урахуванням просторово-часових характеристик трафіку.

Кінцевий етап передбачає обробку результатів класифікації та реалізацію відповідних заходів реагування, включаючи блокування потенційно небезпечного трафіку або його передачу на поглиблений аналіз відповідно до встановлених політик безпеки.

## ВИСНОВКИ

Розроблено комп'ютерну систему для зберігання та обробки файлів статистичних даних, що стосуються управління особистим з використанням SaaS технологій. Розроблена система демонструє високий рівень функціональної інтеграції, об'єднуючи модулі управління активностями, аналітичної обробки даних, управління файлами та адміністративного керування в єдину цілісну платформу.

Реалізована архітектура забезпечує масштабованість системи та можливість подальшого розширення функціональності без суттєвих змін у базовій структурі програмного коду. Аналітичний компонент системи реалізує комплексну візуалізацію даних через динамічне генерування кругових діаграм та статистичних звітів, що дозволяє користувачам отримувати наочне представлення про структуру власної активності та приймати обґрунтовані рішення щодо оптимізації розподілу часу. Алгоритми обчислення ключових показників ефективності забезпечують точність аналітичних розрахунків та релевантність генерованих рекомендацій.

Модуль управління файлами розширює функціональні можливості системи, надаючи користувачам інструменти для централізованого зберігання та організації документів, пов'язаних із процесами планування та контролю часу. Інтеграція файлового менеджера з основною аналітичною системою створює синергетичний ефект, підвищуючи загальну ефективність робочих процесів користувачів. Система безпеки та розмежування доступу реалізована через багаторівневу модель авторизації, що забезпечує захист персональних даних користувачів та адміністративних функцій системи. Диференційований підхід до надання привілеїв користувачам різних ролей гарантує відповідність принципам інформаційної безпеки та мінімізує ризики несанкціонованого доступу до критично важливих компонентів системи.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Оліфер, В.Г., Оліфер, Н.О. Комп'ютерні мережі. Принципи, технології, протоколи/В.Г. Оліфер, Н.А. Оліфер. - 4-те вид. - СПб.: Пітер, 2010. - 943 с.
2. Кучерявий, Є.А. Управління трафіком та якість обслуговування в мережі Інтернет/Є.А. Кучерявий. - СПб.: Наука та Техніка, 2004. - 336 с. 3. Оліфер, В.Г., Оліфер, Н.А. Базові технології локальних мереж [Електронний ресурс]/В.Г. Оліфер, Н.А. Оліфер.
3. Яновський, Г.Г. Якість обслуговування у мережах IP. / Г.Г. Яновський. // Вісник зв'язку. №1, 2008. - С. 65-74.
4. Vegesna, S. IP Quality of Service / S. Vegesna. Cisco press, 2001 - 368 p.
5. Ishak, M. H., Herrmann, G., Pearson, M. Reducing delay і jitter для реального часу комунікацій в Ethernet / М. Н. Ishak, G. Herrmann, М. Pearson // Transactions on Advanced Communications Technology. - 2013. - p. 162-168.
6. Kopetz, H. Real-time systems design principles for distributed embedded applications / H. Kopetz. - New York: Springer, 2011. - 396 p.
7. Laplante, P. A. Real-time systems design and analysis / P. A. Laplante. - IEEE Press, 2004. - 499 p.
8. Kopetz, H., Bauer, G. Time-Triggered architecture / H. Kopetz, G. Bauer // In Proceedings of the IEEE. - 2003. - p. 112–126.
9. Kopetz, H., Ademaj, A., Grillinger, P., Steinhammer K. TimeTriggered Ethernet (TTE) design/H. Kopetz, A. Ademaj, P. Grillinger, K. Steinhammer //International Symposium on Object-oriented Real-time Distributed Computing. - 2005. - P. 22-33.
10. Розробки та продукти Time-Triggered Ethernet [Електронний ресурс] – Режим доступу // <https://www.tttech.com>.
11. Steinhammer, K., Grillinger, P, Ademaj, A., Kopetz H. A Time-

Triggered Ethernet (TTE) switch/K. Steinhammer, P. Grillinger, A. Ademaj, H. Koretz // In Proc. Конференція про проектування, Автоматизацію та випробування в Європі. - 2006. - p. 794-799.

12. Elmenreich, W., Ipp, R. Introduction до TTP/C і TTP/A/W. Elmenreich, R. Ipp // У ходах роботи на Time-Triggered and RealTime Communication. - Switzerland. - 2003. - p. 1-9.

13. Elmenreich, W., Haidinger, W., Kirner, R., Losert, T., Obermaisser, R., Trddhandl, C. TTP/A smart transducer programming - A beginner's guide / W. Elmenreich, W. Haidinger, R. Kirner, T. Losert, R. Obermaisser, C. Trddhandl // Research Report 1-3/182-1, 1040, Vienna, Austria, 2005.

14. Elmenreich, W. Time-triggered fieldbus networks – state of the art and future applications / W. Elmenreich // Proc. IEEE on Object Oriented Real-Time Distributed Computing. - Orlando: USA. - 2008. - p. 436-442.

15. Steiner, W. Synthesis static communication schedules for mixed criticality systems / W. Steiner // 14th IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing Workshops. - 2011. - p. 11-18.

16. Obermaisser, R. Event-triggered і time-triggered control paradigms/R. Obermaisser// Boston: Springer. - 2005. - 164 p.

17. Pedreiras, P., Gai, P., Almeida, L., Buttazzo G. C. FTT-Ethernet: a flexible real-time communication protocol that supports dynamic QoS management on Ethernetbased systems / P. Pedreiras, P. Gai, L. Almeida, G. C. Buttazzo // IEEE Transactions on industrial informatics. - 2005. - Vol. 1. - №3. - p. 162-172.

18. Steiner, W., Bauer, G., Hall, B., Paulitsch, M., Varadarajan, S. TTEthernet dataflow concept / W. Steiner, G. Bauer, B. Hall, M. Paulitsch, S. Varadarajan // Eighth IEEE International Symposium on Network Computing and Applications. - 2009. - p. 319-322.