

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 _____ другий (магістерський)

Методи обробки трафіку в реальному часі з
використанням мереж Петрі
(тема)

Виконав:
студент _____ II _____ курсу, групи _____ КСМм-21-1
Калюга В.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність _____
123 «Комп'ютерна інженерія»
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми _____ освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____
Комп'ютерні системи та мережі
(повна назва освітньої програми)

Керівник: _____ проф. Міхаль О.П.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ _____ Коваленко А.А.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

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

Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Комп'ютерні системи та мережі _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ ____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Калюзі Владиславу Вадимовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи обробки трафіку в реальному часі з використанням мереж Петрі

затверджена наказом по університету від “ 07 ” листопада 2022 р. № 1453 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 13 грудня 2022 р.

3. Вхідні дані до роботи _____

згортоква штучна нейронна мережа

кластеризація

обробка зображень

AlexNet

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

Обробка зображень

Модифіковані методи кластеризації методом k-середніх

Розробка штучної нейронної мережі для кластеризації та ранжування зображень

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) 18 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	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання. Аналіз літератури	08.11.2022–14.11.2022	
2	Огляд існуючих алгоритмів.	15.11.2022–21.11.2022	
3	Аналіз існуючих архітектур ЗНМ.	22.11.2022–29.11.2022	
4	Реалізація розглянутих алгоритмів	30.11.2022–02.12.2022	
5	Вибір баз даних для тестування.	03.12.2022–04.12.2022	
6	Отримання результатів	05.12.2022–06.12.2022	
7	Оформлення ПЗ	07.12.2022–12.12.2022	

Дата видачі завдання 07 листопада 2022 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. Міхаль О.П.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 62 с., 24 рис., 1 дод., 20 джерел.

ТТЕ, ETHERNET, МЕРЕЖІ ПЕТРІ, ЦИФРРОВИЙ АВТОМАТ, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, FPGA.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка методу обробки трафіку в реальному часі з використанням мереж Петрі.

У ході виконання кваліфікаційної роботи розроблено метод передачі трафіку за розкладом у комутаторах, що забезпечує доставку кадрів реального часу одержувачу у призначені моменти часу за розкладом, що встановлюються заздалегідь для кожного вихідного порту комутатора. Застосування методу сприяє усуненню тимчасових конфліктів різнорідного трафіку, повністю виключаються втрачені кадри, які не потрапляли до тимчасового вікна захисника по ТТЕ, підвищується пропускна здатність мережі, а також відсутнє підвищення завантаження комутатора.

ABSTRACT

Master's thesis: 62 pages, 24 figures, 1 appendices, 20 sources.

TTE, ETHERNET, PETRI NETS, DIGITAL AUTOMATA,
SIMULATION, FPGA.

The major goal of this thesis is to develop a method of real-time traffic processing using Petri nets.

In order to method of scheduled traffic transmission in switches was developed, which ensures the delivery of real-time frames to the recipient at the designated time points according to the schedule, which are set in advance for each output port of the switch. Application of the method contributes to the elimination of temporary conflicts of heterogeneous traffic, lost frames that did not fall into the temporary window of the TTE defender are completely eliminated, the network bandwidth increases, and there is no increase in the switch load.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП	8
1 МЕРЕЖЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕДАЧІ ТРАФІКУ	10
1.1 TDMA	12
1.2 Організація мережі за допомогою TTE.....	14
1.3 Формат кадра та види трафіку	15
1.4 Конфлікти між кадрами.....	16
1.5 Захисник системи	18
1.6 Інструменти моделювання комп'ютерних систем.....	19
2 МЕТОДИ ПЕРЕДАЧІ КАДРІВ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ TTE З ВИКОРИСТАННЯМ АПАРАТУ МЕРЕЖ ПЕТРІ.....	26
2.1 Аналіз методів	26
2.2 Розробка методу передачі кадрів.....	27
2.3 Алгоритми роботи компонентів	30
2.4 Формалізація алгоритму з використанням мереж цифрових автоматів	31
3 МОДЕЛЮВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ	35
3.1 Моделювання систем, які використовують технологію TTE.....	35
3.2 Моделювання методу передачі кадрів за розкладом.....	37
3.3 Результати моделювання імітаційних моделей	41
ВИСНОВКИ.....	49
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	50
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	53

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ЦА – цифровий автомат

FPGA – програмована користувачем вентиляна матриця

QoS – якість обслуговування

STTE – передача трафіку по розкладом

TDMA – множина доступу з тимчасовим розподілом

TTE – мережна технологія передачі трафіку жорсткого реального часу

ВСТУП

Серед мережних технологій обробки трафіку на сьогодні найбільш затребуваною залишається технологія Ethernet. Важливим для Ethernet поняттям є якість обслуговування (Quality of Service QoS), відповідно до якого переданий трафік сортується за пріоритетів у комутаторі та обслуговується залежно від типу пріоритету. Однак Ethernet з підтримкою QoS не забезпечує швидкої передачі трафіку реального часу, що призводить до затримки кадрів. Подальшим етапом у розвитку технологій комп'ютерних мереж у розподілених системах реального часу стала поява технології Time-Triggered Ethernet (TTE), що дозволяє передавати трафік жорсткого реального часу (керівна інформація, авіоніка, система мережевої синхронізації) контрольованою затримкою кадрів (джіттер). В результаті критичним параметром у системах реального часу стає поняття затримки кадрів під час передачі кадру через мережу.

Недоліками технології TTE є:

- необхідність апаратних обчислень константної затримки у форматі кадру; витрати на підключення апаратного «захисника системи»;
- зниження пропускної спроможності мережі у разі тимчасового конфлікту між різнорідним трафіком чи повторної передачі кадру з вини «захисника системи». Тому постає завдання удосконалення методів обробки трафіку.

Для виявлення шляхів підвищення ефективності комп'ютерних мереж використовують імітаційне моделювання загальної архітектури мережних технологій, протоколів, передачі трафіку мережею. Моделювання ставить за мету верифікацію нових алгоритмів і методів передачі трафіку по мережі, а також порівняльну оцінку ефективності розроблених алгоритмів.

Серед інших завдань моделювання особливої уваги заслуговує моделювання алгоритмів у тих випадках, коли відсутні повні дані про

поведінку компонентів комутатора в умовах, відмінних від нормальної роботи. Моделювання при цьому проводиться з метою встановлення відповідності алгоритмів за вимогами.

Хоча найефективнішим інструментом імітаційного моделювання комп'ютерними мережами є, де-факто, апарат мереж Петрі, технологія TTE мало досліджувалась з допомогою цього апарату. Це зумовлює актуальність досліджень у області моделювання процесів передачі трафіку з використанням мереж Петрі, які враховують специфіку технології TTE та спрямовані на підвищення її ефективності.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка методу обробки трафіку в реальному часі з використанням мереж Петрі.

Об'єкт дослідження: комп'ютерні мережі Ethernet з технологією Time-Triggered Ethernet.

Завдання:

- розробка методу передачі трафіку в комутаторах за допомогою технології TTE, що забезпечує зниження затримки та частки втрачених пакетів;

- розробка апаратної реалізації ядра комутатора Ethernet на ПЛІС типу FPGA, що використовує при синтезі ядра розроблений метод передачі та методику переходу від формалізації на основі мереж Петрі до його опису мовою VHDL.

1 МЕРЕЖЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕДАЧІ ТРАФІКУ

ТТЕ – це комунікаційна система, що поєднує в собі технологію Ethernet та протокол Time-Triggered Protocol (ТТР). ТТЕ підтримує обробку розподілених даних нереального та реального часу в одному й тому ж мережному середовищі, при цьому стандартні Ethernet дані передаються за ТТЕ форматом у мережу без додаткових апаратних та програмних засобів. Дані нереального часу характеризуються некритичністю доставки користувачеві за часом.

Розподілена система, що вбудовується (рисунк 1.1) складається з комп'ютерних вузлів (вузол node). Кожен вузол складається з апаратних та програмних підсистем, що взаємодіє з іншими вузлами через мережу тимчасово спрацьовуючого зв'язку (Time-Triggered communication).

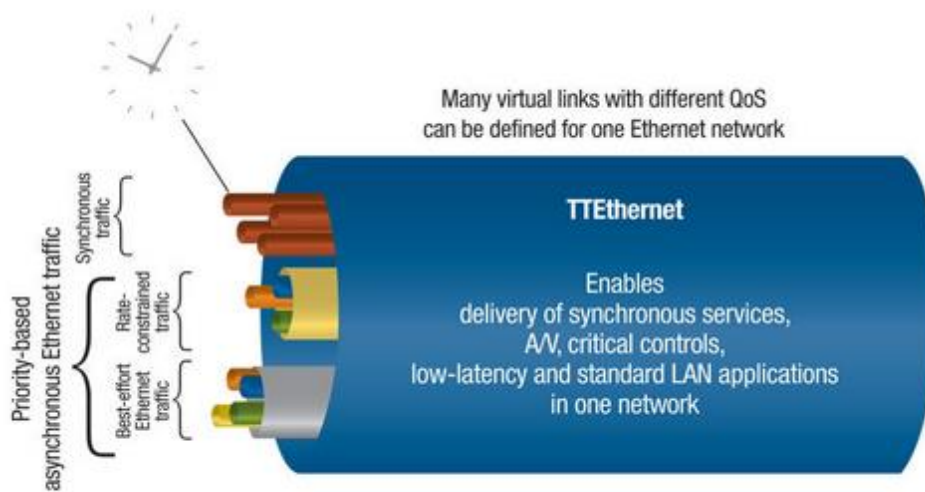


Рисунок 1.1 – Технологія ТТЕ

Структура вузла підрозділяється на хост-комп'ютер і контролер тимчасово спрацьовуючого зв'язку. Контролер функціонує з урахуванням протоколу ТТР. Хост-комп'ютер обробляє функції операційної системи та

прикладного програмного забезпечення. Кордоном між хост-комп'ютером та контролером зв'язку є комунікаційний інтерфейс. Цей інтерфейс забезпечує передачу повідомлень та здійснює доступ до глобального часу.

Топології за ТТЕ: шина, зірка та кільце. Поодиноким мережним комунікаційним каналом уражає небезпечно-критичні додатки. Резервування комунікаційних каналів у разі виникнення помилок використовується у безпечно-критичних системах. Зазвичай використовується двоканальна комунікаційна система, де один канал призначений для дублювання основного каналу.

У разі виникнення помилок в основному каналі використовуватиметься резервний комунікаційний канал. Найбільш поширена та проста топологія – шина, де кожен комунікаційний канал кожного вузла з'єднується за допомогою окремого кабелю. Ця топологія підтримує широкомовний режим, кожен вузол може передавати на шину повідомлення.

У топології зірка кожен вузол підключається через центральний пристрій та забезпечується зв'язок точка-точка. Повідомлення передається від вузла, проходячи через центральний пристрій, який перенаправляє повідомлення до обраних вузлів приймачів. Основна перевага цієї топології – можливість багатоадресної передачі до обраного підмножини вузлів, ефективно використовуючи смугу пропускання. Іншою перевагою є удосконалена ізоляція від помилок, тому в безпечно-критичних системах використовується резервування з топології зірка.

Основна властивість ТТЕ – надійність системи від помилок, сильна ізоляція від них. Збій відбувається, коли система відхиляється від виконання звичайних дій. Помилка є частиною системного стану, який може призвести до повної відмови системи.

Захист від помилок буває різного роду: фізична помилка вузла (розрив дроту, помилка мікросхеми), програмна помилка, помилка апаратного забезпечення (збій апаратури). Тому в ТТЕ закладається набір хибних гіпотез.

Помилкова гіпотеза є поєднанням типових помилок у вузлах, які можуть спричинити збою системи. Помилкова гіпотеза використовується в безпечно-критичних системах і є центральним поняттям відмовостійких механізмів у TTE [7]. Для TTE помилкові гіпотези поділяються на помилки, які перевіряють відмовостійкі механізми системи та зовнішні помилки на рівні програми (алгоритмічна надмірність, аварійне відключення при відмові).

Наступна властивість – світовий час [10]. Всі локальні годинники вузлів суворо синхронізовані з глобальним часом системи. Поділ годинника – мікротики, що вираховують час. У системі передбачено зміщення щодо обчисленого часу та точність Π годин, з якою годинник повинен рахувати. Глобальний час стійкий до відмови. Після виконання кроку ініціалізації синхронізації TTE, всі вузли повинні працювати з глобальним часом упродовж усього часу.

Наступна властивість – відмінність спрацювання у разі передачі повідомлень чи виконання завдань у системі. Розрізняють спрацювання за часом (time trigger TT) та спрацювання за подією (event trigger ET) [12]. Спрацювання за подією є сигналом керування, який виникає за подією у системі. Подія може виникнути або від діяльності в цілому системі (створення/видалення задачі), або від зміни стану в контрольованому об'єкті (зчитування інформації про зміну з сенсорів). Спрацювання за часом є сигналом, що управляє, який створюється в певній часовій точці синхронізованого глобального часу. Спрацювання за часом виникає за зміни глобального часу, що забезпечується сервісом синхронізації годинника.

1.1 TDMA

Управління доступом до середовища здійснюється на основі множини доступу з тимчасовим розподілом (TDMA Time Division Multiple Access). TDMA поділяється на кількість слотів (таймслот), кожному вузлу надається

унікальний слот. Комунікаційна діяльність кожного вузла контролюється розкладом кожного вузла. Набір слотів поєднуються в TDMA-раунди [7]. Послідовність TDMA-раундів поєднується, утворюючи цикл кластера (рисунок 1.2). Технологія TTE була розроблена у Віденському технологічному університеті. TTE дозволяє передавати трафік реального часу (ТТ-повідомлення) та нереального часу (ЕТ-повідомлення).

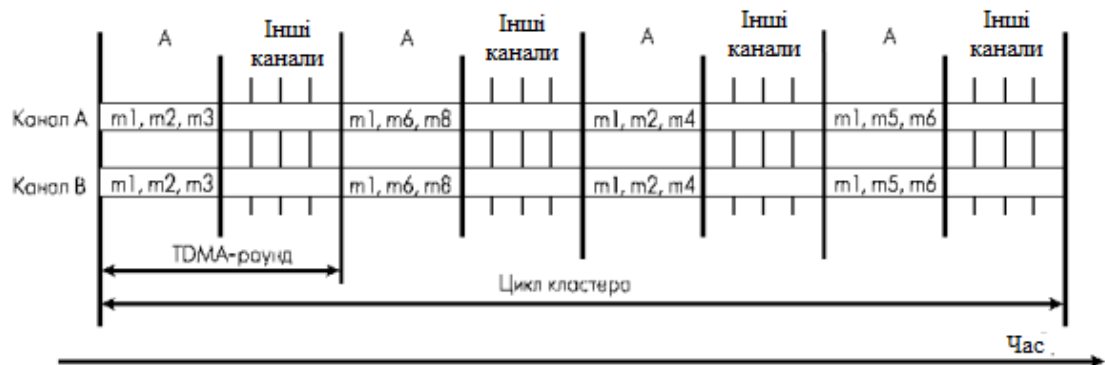


Рисунок 1.2 – TDMA

Всі повідомлення передаються по тому самому фізичному середовищі Ethernet. ЕТ-повідомлення не синхронізовано, вони можуть створювати тимчасові конфлікти з ТТ-повідомленнями. ТТ-повідомлення мають ідентифікатор, який їх відрізняє від інших повідомлень. Комутатор TTE визначає момент прийому ТТ-кадра з допомогою ідентифікатора в кадрі та зупиняє передачу всіх ЕТ-кадрів, доти, доки не обслужиться ТТ-кадр. Таким чином, виникає така перевага: мінімальна константна затримка під час передачі ТТ-кадра зберігається у структурі кадру, і з її допомогою досягається мінімальне відхилення затримки (джиттер) на виході комутатора. Для розподілених систем реального часу ця перевага є головною, оскільки доставка кадрів реального часу може бути критичною для працездатності всієї системи. TTE забезпечує гарантовану доставку інформації жорсткого реального часу з точністю до мікросекунди [7].

1.2 Організація мережі за допомогою TTE

TTE стандартизований SAE. Стандарт SAE AS6802 був розроблений у 2010 році. У розподілених кінцевих системах та комутаторах відмовостійкість здійснюється за концепцією TTE. На сьогоднішній день механізми функціонування мереж TTE знаходять широке застосування у сучасних бортових системах управління мобільними об'єктами (авіація, автомобілі, супутники). Тому TTE був стандартизований об'єднанням інженерів американської автомобільної індустрії SAE, оскільки торкаються питання розробки нових механізмів та підвищення швидкодії в бортових системах управління.

TTE мережа складається з кінцевих користувачів систем, комутаторів і двонаправлених комунікаційних зв'язків, спрямованих до кожного влаштування. Кінцева користувальницька система та комутатор можуть об'єднуватись, утворюючи окремий пристрій. У TTE використовуються три різні ролі для синхронізації: синхронізований майстер (СМ), синхронізований клієнт (СК) та майстер стиснення затримки (СЗМ) [9].

СЗМ обчислює глобальний час. РМ запускає процес ініціалізації системи. СК приймає отриманий глобальний час. Синхронізація пристроїв залежить від обміну інформацією між цими пристроями. Обмін кадрів із параметрами синхронізації забезпечується протоколом кадрів управління (Protocol Control Frames PCF) [7,9].

Протокол кадрів управління є багатоступінчастий алгоритм, і зрештою посиляється повідомлення про новий глобальному часі всім СК та РМ. Глобальний час обчислюється за алгоритмом: кожен СМ відправляє PCF кадр до СЗМ на початку циклу кластера, СЗМ збирає всі PCF кадри з параметром глобального часу та обчислює новий глобальний час, за яким встановлюється весь локальний годинник пристроїв, СЗМ відправляє ширококомове розсилання PCF-кадра з новим глобальним часом.

1.3 Формат кадру та види трафіку

TTE передбачає роботу з різними видами трафіку. TTE розрізняє такі види трафіку: трафік реального часу (ТТ-трафік), звичайний (еластичний) трафік Ethernet (ЕТ-трафік) та обмежений за швидкістю трафік. ТТ-кадри відрізняються типом у форматі кадру, мають поле глобального часу/затримки у форматі кадру [7]. ТТ-кадри жорстко синхронізовано. Вони мають мінімальну затримку. ТТ-кадри оптимально підходять для обробки трафіку жорсткого реального часу у розподілених системах.

ЕТ-трафік є стандартним трафіком по Ethernet. Тут не гарантується передача з мінімальною затримкою, тим самим на виході комутатора може спостерігатися великий розкид затримок. ЕТ-трафік має менший пріоритет у порівнянні з ТТ-трафіком. Передача ЕТ-трафіку може призвести до тимчасових конфліктів у комутаторі. Обмежений за швидкістю трафік є різновидом трафіку по ARINC 664 (продовженням розвитку QoS). Тому ЕТ-трафік і обмежений за швидкістю трафік розглядаються в єдиному вигляді через те, що технологія Ethernet з QoS передбачає внутрішній поділ трафіку за пріоритетами. TTE повністю підтримує формат кадру Ethernet [20], стандартизованого в IEEE 802.3

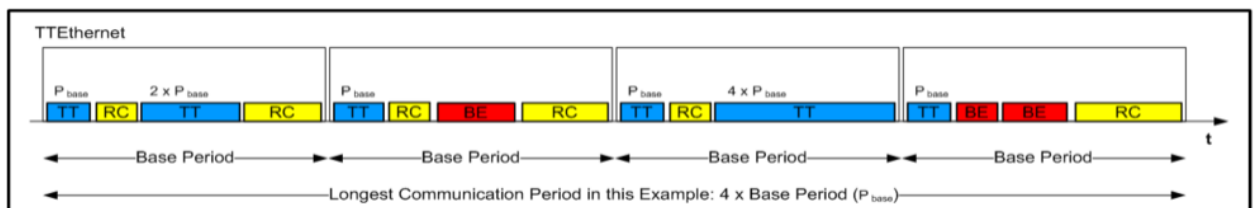


Рисунок 1.3 – TTEthernet

У формат кадру TTE вводиться зміна на адресу призначення [20]. Поле адреси призначення поділяється на два параметри: 32-бітове константне поле, що дозволяє визначити трафік реального або нереального часу Constant

Field (CFld), та 16-бітне поле – унікальний ідентифікатор віртуального зв'язку Virtual Link Identifier (VL ID) (рисунок 1.4). Комутатор зберігає ідентифікатори VL ID у вигляді статичної конфігурованої таблиці. За рахунок таблиці комутатор знає, який вихідний порт відправити кадр. Також додаються два поля у формат кадру: ТТ-параметр (2 байти) та глобальний час (8 байти).

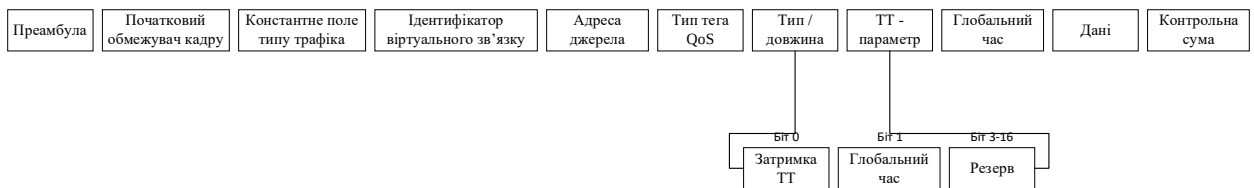


Рисунок 1.4 – Формат кадру по ТТЕ

Якщо встановлено біт «затримка ТТ» у ТТ-параметрах, то поле «Глобальне час» використовується як затримка для ТТ-кадру. Якщо встановлено біт "Глобальний час" у ТТ-параметрах, то поле "Глобальний час" використовується як підстроювання локального годинника пристроїв.

1.4 Конфлікти між кадрами

Конфлікти між ТТ- та ЕТ-кадрами:

а) випадок, коли ТТ-кадр передається, а ЕТ-кадр готується передачі. Рішенням у цьому випадку є зниження пріоритету ЕТ-кадру, тим самим передається ТТ-кадр, а ЕТ-кадр матиме затримку;

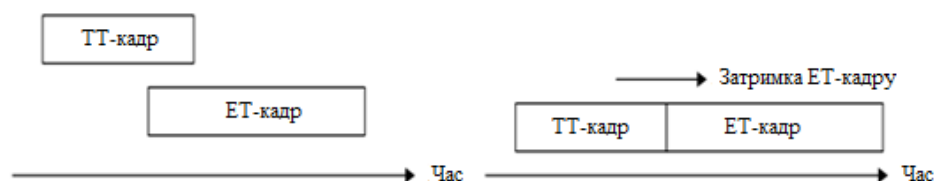


Рисунок 1.5 – Передача ТТ-кадру попереду ЕТ-кадру

б) випадок, коли ЕТ-кадр передається, а ТТ-кадр готується до передачі. Вирішення тимчасового конфлікту в цьому випадку матиме кілька різновидів: резервування, оперативне блокування та змішування.

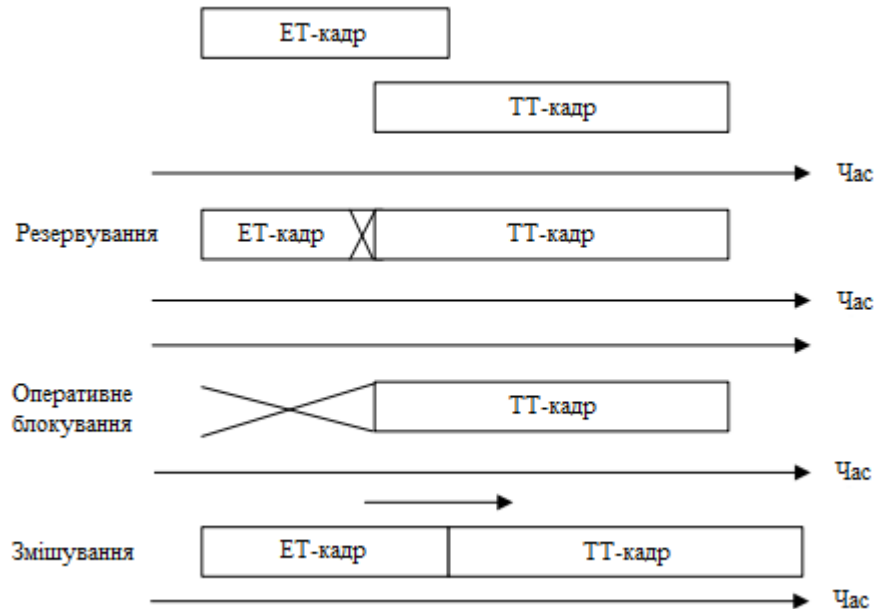


Рисунок 1.6 – Передача ЕТ-кадру попереду ТТ-кадру

Резервування: Кадр ЕТ резервується, щоб вчасно передати ТТ-кадр.

Недоліки:

- витрата смуги пропускання каналу, тому що після передачі ТТ-кадра заново буде здійснена передача ЕТ-кадра;
- оперативне блокування: ґрунтується на понятті спрацювання кадру з часу, тобто якщо визначається тимчасовий конфлікт між ТТ- та ЕТ-кадром, то не передається ЕТ-кадр, якщо за ним слідує і не встигає передатися ТТ-кадр. Такий метод добре підходить, якщо ЕТ-кадр має невелику довжину кадру;
- перемішування: ТТ-кадр може бути затриманий.

Однак, визначена верхня межа затримки, оскільки максимальний розмір кадру Ethernet обмежений 1526 байт. Тому в сучасних системах за допомогою ТТЕ використовується оперативне блокування та перемішування.

1.5 Захисник системи

Особливе місце у системі ТТЕ займає захисник системи. Функціональність захисника закладено у комутатор ТТЕ. Захисник контролює систему помилок. У кожного клієнта є своя локальна таблиця розкладу кадрів, за яким у строго визначений час клієнт має передавати кадр. Усі таблиці розкладів синхронізовані з глобальним часом. Коли досягається точка видачі кадру у часі (`dispatch_pit`) на клієнті, за таблицею розкладу визначається вибірка потрібного ТТ-кадру. Вибірка кадру відбувається в певний час.

Після цього повинен настати момент передачі самого кадру від клієнта в комутатор (`send_pit`). Момент настає не миттєво, а залежно від методу зміщення синхронізованого та несинхронізованого трафіку, тому точку відправки у часі `send_pit` може бути затримано. Затримка `send_pit` обмежена максимальним значенням затримки під час передачі – `max(send_delay)`. Момент прийому кадрів за комутатора обмежений формулою 1:

$$\text{receive_pit} = \text{send_pit} + \text{link_latency}, \quad (1.1)$$

де `link_latency` – затримка самої передачі. Комутатор ТТЕ налаштовується виконання перевірки вікна прийому кадру. Точка отримання ТТ-кадру в часі має розташовуватися в межах вікна прийому.

Комутатор перенаправлятиме ТТ-кадр лише тоді, коли буде доступний момент `receive_pit`. Якщо момент часу `receive_pit` не виникає в відведеному часовому вікні прийому, кадр видаляється з мережі. Тимчасові діаграми роботи захисника при обробці кадрів представлені на рисунку 1.7.

Таким чином, виникає така властивість ТТЕ – сильна ізоляція від помилок. Якщо відбувається помилка в мережі, то враховується її обробка та система працює у звичайному режимі. ТТЕ обробляє помилку на клієнта, яка

починає призводити до постійної відправки кадрів до мережі. Це говорить про те, що на клієнті стався збій, і він має бути в системі.

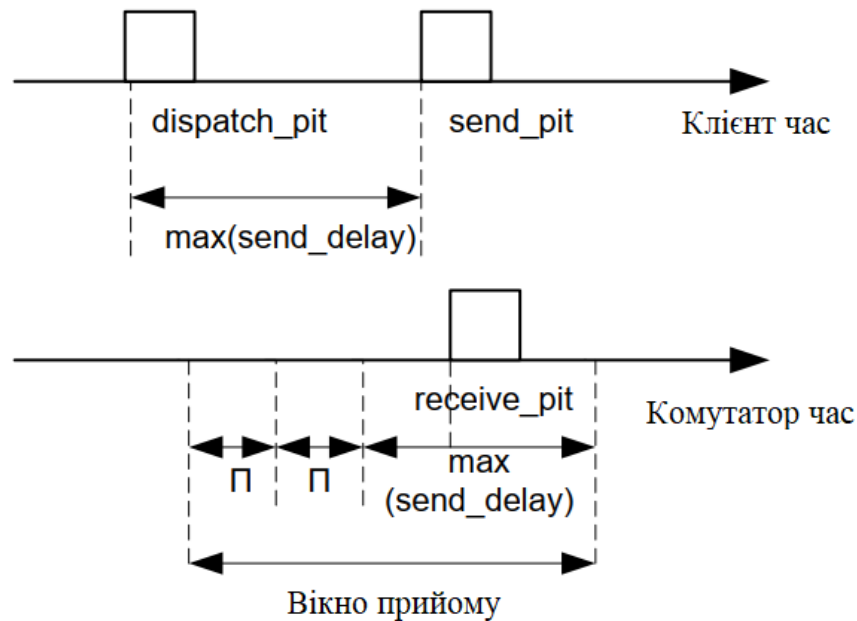


Рисунок 1.7 – Часова діаграма захисника системи

Відмовостійка конфігурація TTE є розширенням стандартної конфігурації [7]. У цій конфігурації додається ще один комутатор з захисником. Таким чином, передбачена можливість виникнення двох помилок на клієнті, на відміну від урахування можливості виникнення однієї помилки, що виникає у стандартній конфігурації.

1.6 Інструменти моделювання комп'ютерних систем

При розробці нових алгоритмів, нових апаратних компонентів, оптимізації параметрів у системах управління комп'ютерними мережами потрібно обґрунтування введених удосконалень у системі і експериментально побачити ефективність чи неефективність удосконалень. При цьому для порівняння алгоритмів передачі кадрів по TTE можна

використовувати такі критерії: частка втрачених кадрів у мережі, загальна затримка кадрів у мережі, завантаження смуги пропускання каналу. У якості критерію оцінки передбачається використовувати імовірно-тимчасові характеристики трафіку та кількість втрачених кадрів (збільшення загальної кількості кадрів на виході комутатора). Оцінка імовірно-часових характеристик трафіку дозволить довести ефективність запропонованих алгоритмів під час передачі кадрів по ТТЕ. Імовірно-тимчасові характеристики трафіку можна отримати тільки з за допомогою імітаційного моделювання.

В області комп'ютерних мереж використовуються як універсальні системи, і спеціалізовані системи. До спеціалізованих систем належать:

- Network Simulator (ns2) – можливо реалізувати різні рівні моделі OSI (рівня програм, транспортний рівень, фізичний рівень). Недоліки програми: команди пишуться через скрипти, складно орієнтуватися без графічного інтерфейсу;
- Cisco Packet Tracer – дозволяє імітувати роботу комп'ютерних мереж Cisco (маршрутизатори, комутатори, мережні принтери). Зручний графічний інтерфейс, можливість введення команд мережевих пристроїв;
- Boson NetSim – імітує роботу трафіку за допомогою засобів передачі віртуальних кадрів. Визначений набір мережевих пристроїв;
- OMNeT++ – здійснює переклад існуючого коду моделі на формальна мова NED, а також переклад з мови SDL, розбиття отриманих діаграм на компоненти, тестування алгоритмів мережевих протоколів, модульна ієрархія компонентів. Недоліки: не дозволяє моделювати затримки передачі кадрів, затримки суворо визначені, відсутні деякі мережеві протоколи.

Недолік систем імітаційного моделювання конкретних фірм-виробників мережного обладнання полягає в тому, що можна моделювати лише устаткування, протоколи цих фірм-виробників. При цьому в таких системах немає принципу єдності технологій, і кожна компанія вносить свої нововведення, непридатні для обладнання інших фірм. Усі перелічені вище

недоліки спеціалізованих систем не дозволяють їх використовувати на вирішення поставлених завдань.

GPSS (General Purpose Simulation System) – мова моделювання, використовується для імітаційного моделювання різних систем. Система GPSS орієнтована системи масового обслуговування (СМО). Процес, що моделюється, представляється у вигляді процесу, що проходить через обслуговуючі пристрої, черги, ключі та інші елементи СМО. Система GPSS орієнтована збір статистики імітаційної моделі. У рамках дослідження поведінка імітаційних моделей, динаміка їх роботи є першочерговим показником у достовірності роботи, а збір статистичних даних є експериментальним підтвердженням результати роботи моделей. Тому система GPSS не підходить для досліджень.

PRISM (probabilistic model checker) – інструмент для моделювання та аналізу систем, у яких закладено випадкову чи ймовірнісну поведінку. Інструмент дозволяє проаналізувати такі системи: комунікаційні та мультимедійні протоколи, протоколи безпеки даних, розподілені алгоритми та інші.

Недоліки: відсутність графічного інтерфейсу створення модулів, компонентів системи, відсутність динамічних показників у ході роботи системи, складність наочності взаємозв'язку моделей системи одна від одної, потрібна розробка стороннього програмного забезпечення (C++). У зв'язку з вищепереліченими недоліками інструмент PRISM не підходить для дослідження.

MATLAB (Matrix Laboratory) – пакет прикладних програм для вирішення задач технічних обчислень та однойменна мова програмування, використовуваний у цьому пакеті. Мова MATLAB є високорівневою мовою програмування, що інтерпретується, що включає засновані на матрицях структури даних, широкий спектр функцій, інтегроване середовище розробки, об'єктно-орієнтовані можливості та інтерфейси до програм, написаних іншими мовами програмування. До складу MATLAB входить

графічне середовище імітаційного моделювання Simulink, яка дозволяє створювати динамічні моделі за допомогою блок-діаграм.

У пакеті MATLAB досліджувалися протоколи передачі, стохастичні алгоритми диспетчеризації черг стандартної технології Ethernet із підтримкою QoS.

Недоліки MATLAB та Simulink: складність та велика громіздкість моделей, відсутність ієрархічності компонентів моделі, складність при обробці одержаних результатів. У зв'язку з вищезгаданими недоліками пакет MATLAB не підходить для дослідження.

Автоматний підхід до побудови моделей ґрунтується на понятті автомата. Автомат є у вигляді перетворювача, що функціонує в часу і здатного сприймати вхідні сигнали x зі значеннями деякої множини X , видавати вихідні сигнали зі значеннями з множини Y та знаходитися у кожний момент часу у деякому стані s з множини S . Можливо створювати моделі, що складаються з детермінованих і недетермінованих автоматів. Зокрема, може бути використаний пакет Supremica, що дозволяє працювати із розподіленими протоколами.

Недоліки: при розробці складних моделей на основі автоматів швидко збільшується зростання кількості станів автомата, кінцевий автомат не дозволяє створювати складні типи даних (списки, об'єднання, структури), які необхідні для подання форматів мережевих протоколів, відсутність отримання ймовірно-часових характеристик трафіку (затримка кадру, розмір черг, імовірнісних функцій), відсутність ієрархічності компонентів моделі. У зв'язку з переліченими вище недоліками автоматний підхід до побудови моделей та використання пакетів на основі автоматів не підходить для дослідження.

Мережі Петрі – математичний апарат для динамічного моделювання дискретні системи. Вперше описані Карлом Петрі в 1962. Мережа Петрі є дводольним орієнтованим графом, що складається з вершин двох типів – позицій та переходів, з'єднаних між собою дуги. Вершини одного типу

неможливо знайти з'єднані безпосередньо. У позиціях можуть розміщуватися мітки (маркери), здатні переміщатися по мережі. Подією називають спрацювання переходу, при якому мітки з вхідних позицій цього переходу переміщуються у вихідні позиції. Події відбуваються миттєво, чи одночасно, і під час деяких умов.

Виділяють такі види мереж Петрі:

- тимчасова мережа Петрі – переходам надається ваги, які визначають тривалість спрацювання (затримки) переходу;
- стохастична мережа Петрі – у вигляді мереж Петрі основну роль відіграють затримки, які є випадковими величинами;
- функціональна мережа Петрі – функції деяких аргументів мережі Петрі (кількості міток у позиції, стану деяких переходів) визначаються як затримки;
- кольорова мережа Петрі – дозволяє описувати будь-які типи даних на мітках (кольори), тип мітки може бути використаний як аргумент у функціональних мережах;
- інгібіторна мережа Петрі – можливі інгібіторні дуги, які забороняють спрацювання переходу, якщо у вхідній позиції, пов'язаній з переходом інгібіторною дугою, знаходиться мітка;
- ієрархічна мережа Петрі - містить ієрархію підмереж.

Підмережі зображується у вигляді не миттєвих переходів, кожна підмережа складається з набору позицій та переходів, може містити в собі інші вкладені підмережі. Спрацювання підмережі на верхньому рівні ієрархії характеризує виконання повного життєвого циклу вкладеної мережі.

В результаті аналізу систем імітаційного моделювання перевагу було віддано апарату мереж Петрі та програмним продуктам, що використовують апарат мереж Петрі.

Переваги апарату мереж Петрі такі:

- мережі Петрі дозволяють описувати будь-які довільні об'єкти, у тому складні системи комп'ютерних мереж, алгоритми обробки даних, розподілену передачу даних;
- кольори дозволяють задавати будь-яку необхідну структуру даних, у тому числа форматів кадрів за технологіями Ethernet і TTE та описувати алгоритми, залежні від значення позначки кольору;
- тимчасові мережі Петрі дозволяють описувати динаміку поведінки моделі, задавати та обробляти необхідні затримки на переходах та мітках;
- ієрархічні мережі Петрі дозволяють створювати компактні та легко моделі будь-якої складності, що сприймаються, через це модель не виходить громіздкою, легко реалізується взаємодія між усіма компонентами моделі.

Недолік апарату мереж Петрі полягає в тому, що не передбачено можливість збирання статистичних показників під час роботи моделі. Однак, у деяких програмних продуктах, які використовують апарат мереж Петрі, передбачена можливість збору статистичних даних та вбудованої бібліотеки імовірнісних функцій.

На сьогоднішній момент створено пакети моделювання, які поєднують у собі кілька видів мереж Петрі. З цих позицій було обрано пакет моделювання CPN Tools, який дозволить створити складні системи комп'ютерних мереж, промоделювати роботу систем та отримати статистичні дані. Зокрема, статистичні дані легко реалізуються з за допомогою вбудованого інструменту моніторів. Монітори дозволяють записувати у файл будь-яку сформовану інформацію.

Пакет моделювання CPN Tools був розроблений в університеті Орхуса (Данія). Моделі дослідження використовують апарат ієрархічних часових кольорових мереж Петрі у пакеті моделювання CPN Tools. Було доведено, що вони еквівалентні машині Тьюринга і становлять Універсальну алгоритмічну систему. Таким чином, довільний об'єкт може бути описаний за допомогою цього класу мереж.

CPN Tools дозволяє будувати моделі з використанням поєднання елементів мережі Петрі (позицій, переходів, спрямованих дуг) та спеціального мови програмування CPN ML.

CPN ML забезпечує опис множин кольорів (типів даних), змінних, функцій, величин (констант). Кожна позиція кольорової мережі Петрі містить обов'язковий атрибут – певну безліч кольорів. Позиція може містити фішки лише зазначеної безлічі кольорів. CPN Tools дозволяє досліджувати різні аспекти поведінки складних систем комп'ютерних мереж. За допомогою пакета CPN Tools було досліджено різноманітні протоколи в області комп'ютерних мереж: дослідження мережі за допомогою комутатора Ethernet у роботах, алгоритми диспетчеризації черг у комутаторі, дослідження ймовірності тимчасових характеристик трафіку.

Можливості пакету CPN Tools широкі в області комп'ютерних мереж: дозволяє описувати специфікації та верифікації протоколів, оцінювати пропускну спроможність мережі, проектувати складні системи комп'ютерних мереж, оцінювати зміну розміру черг у комутаторі Ethernet.

2 МЕТОДИ ПЕРЕДАЧІ КАДРІВ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ TTE З ВИКОРИСТАННЯМ АПАРАТУ МЕРЕЖ ПЕТРІ

2.1 Аналіз методів

Однією з перших завдань є розробка компонентів моделей з використанням апарату мереж Петрі для моделювання обладнання комп'ютерної мережі TTE.

Під обладнанням комп'ютерної мережі TTE розуміються: синхронізований майстер, синхронізований клієнт, майстер стиснення затримки, захисник системи, комунікаційний контролер з комунікаційним каналом зв'язку [7].

Передача кадрів за технологією TTE має на увазі наступні складники:

- ініціалізація - збір з усіх кінцевих користувачів систем затримок;
- стиск затримки – обчислення глобального часу майстром стиснення затримки та підстроювання локального годинника всіх пристроїв;
- формування затримки/глобального часу у форматі кадру стандарту SAE TTE;
- обчислення тимчасового вікна захисником системи;
- інші етапи стандартні у зв'язку з передачею кадрів комутатору (поширення кадрів, комутація кадрів та буферизація кадрів).

Основним елементом з доставки кадрів реального часу та формуванню мінімальної затримки є захисник системи. Тому цю складову розглядатимемо в рамках роботи, оскільки вона надає сильний вплив частку втрачених кадрів і затримку кадрів. Усі моделі, що реалізують метод передачі кадрів, взаємодія обладнання комп'ютерної мережі, генератор трафіку по TTE, не є реальними моделями пристроїв по TTE, а описую основні терміни та становища TTE.

У зв'язку з цим відсутня прив'язка до конкретної архітектурної реалізації комутації кадрів по TTE фірм-виробників, цим дозволяє виділити

загальносистемні особливості архітектурних реалізацій та дослідити реалізацію моделей.

Структура обладнання комп'ютерної мережі TTE представлена на може складатися з декількох елементів. Основні елементи структури: синхронізований клієнт, синхронізований майстер, комунікаційна мережа (канал), блок обчислення глобального часу, вхідні та вихідні порти комунікаційного каналу. Комунікаційна мережа поєднує поняття комутатора Ethernet з захисником системи. Надалі буде представлено структуру комутатора. Ethernet із включеним до нього апаратним захисником.

2.2 Розробка методу передачі кадрів

Перелічені недоліки за класичним методом передачі кадрів за TTE усуваються новим методом передачі кадрів за розкладом STTE (Schedule Time-Triggered Ethernet). Ідея методу передачі STTE полягає в тому, що реалізація функцій щодо забезпечення доставки ТТ-кадрів абоненту відповідно до заздалегідь встановленим розкладом покладається не так на захисник системи, що реалізує селекцію кадрів на вході комутатора, а безпосередньо на комутатор Ethernet по його вихідному порту. Під час запуску системи відбувається конфігурування системи, яке полягає у завданні планувальника розкладів кожному мережному вузлу обладнання та завдання параметрів підстроювання тимчасових вікон прийому ТТкадрів, розміщення таймслотів циклу кластера алгоритму управління TTE.

Комутатором виконується розсилання широкомовного ТТ-кадра, який містить значення локального часу. За отриманим локальним часом підлаштовуються локальні годинники мережеских вузлів, які синхронізовані за протоколу РСF. Прийнятий комутатором кадр просувається до планувальника розкладу, де класифікується за типом трафіку (ЕТ- або ТТ-кадр).

Після цього відбувається фіксація моменту надходження кожного ТТ-кадра, отримане значення часу порівнюється із встановленим значенням моменту його доставки розкладом. Якщо момент прибуття кадру пізніше наперед відомого часу доставки, то ТТ-кадр позначається як некоректний. Контролюється час доставки ТТ-кадрів для кожного вихідного порту комутатора, де:

- якщо поточний час надходження ТТ-кадра дорівнює значенню часу доставки в розкладі, прийнятий ТТ-кадр відразу ж передається на вихідний канал, навіть якщо його буферизація не закінчена;

- якщо поточний час надходження ТТ-кадра менший за значення часу доставки в розкладі, то ТТ-кадр міститься у спеціальний окремий буфер (Черга). ЕТ-кадри класифікуються за класом якості обслуговування QoS і також як ТТ-кадри записуються в окремі черги відповідних класів, при цьому вони маркуються мітками, які вказують на розмір кадру.

Таймер перевіряє настання моменту доставки чергового ТТ-кадра, і якщо час доставки ТТ-кадра не настало, таймер передає керування диспетчеру черг.

Диспетчер черг починає працювати лише при виникненні непорожніх черг та наявності вільного вихідного каналу. Він перевіряє можливість передачі ЕТ-кадра до моменту доставки чергового ТТ-кадру.

У результаті можливість передачі ЕТ-кадра обчислюється виходячи з наступної умови: поточний системний час та час передачі ЕТ-кадра з обліком його довжини повинні бути меншими або рівними часу доставки чергового ТТ-кадра, тоді:

- вибирається ЕТ-кадр із необхідної черги та передається у вихідний канал;

- інакше очікується настання моменту доставки чергового ТТ-кадра, і в у разі виникнення цього моменту, вибирається ТТ-кадр з черги та передається у вихідний канал. Після цього відбувається наступна ітерація, і

керування знову переходить до планувальника розкладу, де він знову просуває наступний кадр у комутатор.

Особливості методу:

- комутатор здійснює доставку ТТ-кадрів кінцевому мережному вузлу. (користувачеві) у заздалегідь призначені моменти часу за розкладом, який встановлюється при ініціалізації системи для кожного вихідного порту комутатора спеціальними конфігураційними кадрами, у свої моменти часу доставки кадрів та розкладу встановлюються щодо початку циклу кластера управління;

- комутатор приймає кадр і просуває його у вихідний порт призначення, у своїй кадр класифікується за типом трафіку;

- кадри (ЕТ або ТТ) можуть поміщатись у спеціальні буфери, при цьому момент надходження чергового ТТ-кадра фіксується, і значення порівнюється зі значенням моменту його доставки у розкладі. Якщо ж ТТ-кадр приходить після наперед відомого часу в розкладі, він позначається як некоректний;

- контролюється час доставки ТТ-кадрів, що надійшли в комутатор для передачі у відповідний вихідний порт. При досягненні локального часу спеціального вікна, що визначається за розкладом, здійснюється передача ТТ-кадра, що буферизується, навіть якщо його буферизація не закінчено;

- для кожного моменту доставки ТТ-кадрів, зазначених у розкладі, обчислюється час блокування початку передачі ЕТ-кадрів. Величина якого обмежується максимальною довжиною ЕТ-кадра, при цьому чергове блокування знімається після передачі чергового коректного ТТ-кадра, у випадку некоректного ТТ-кадра блокування знімається після закінчення спеціального вікна або відсутність надходження чергового ТТ-кадра;

- ЕТ-кадр передається з відповідного буфера у вихідний порт комутатора після передачі чергового ТТ-кадра за умови відсутності блокування;

- здійснюється розсилання широкомовного ТТ-кадра комутатором, якому міститься значення локального часу, за яким відбувається підстроювання локального годинника мережних вузлів та їх синхронізація.

2.3 Алгоритми роботи компонентів

Велика схема роботи методу передачі кадрів по STTE представлена на рисунку 2.1.

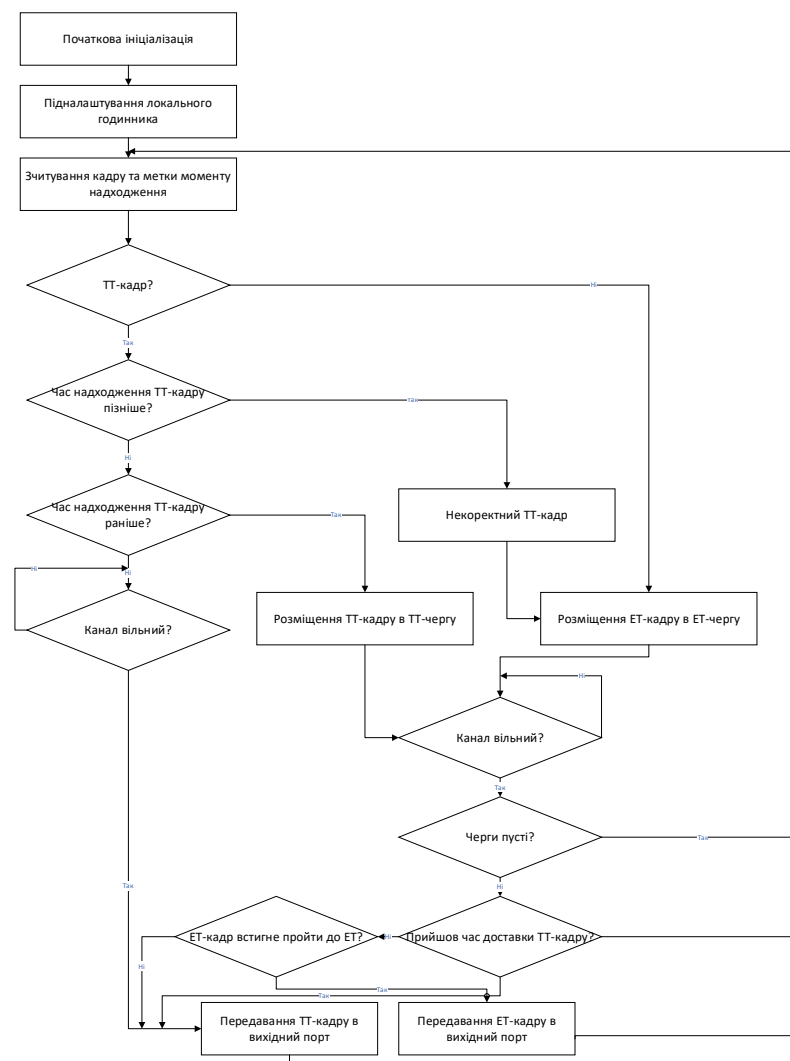


Рисунок 2.1 – Алгоритм розробленого методу

Розглядається алгоритм роботи з трьома слотами, де перші два таймслота передають ТТ-кадри, а третій – ЕТ-кадри. Це рішення було

зроблено через те, щоб досліджувати частку втрачених кадрів за TTE за рахунок великий передачі кадрів через мережу. Якщо $VL\ ID = 1$, кадр передається в таймслот №1; $VL\ ID > 1$, кадр передається в таймслот №2; $VL\ ID = 0$, то кадр передається в таймслот №3.

2.4 Формалізація алгоритму з використанням мереж цифрових автоматів

Загальний алгоритм роботи методу передачі кадрів STTE можна подати з використанням цифрових автоматів (ЦА). У кольорових мережах Петрі колір маркера використовується у функціях передачі маркера по дугах мережі Петрі, тому використання кольорових мереж Петрі дозволяє зменшити кількість переходів та позицій за рахунок призначення дугам або переходів (у сегменті коду переходу) функцій передачі маркера. ЦА може бути окремим випадком побудови мереж Петрі.

Розрізняють такі види опису цифрового автомата: граф-схема алгоритму (ГСА), система канонічних рівнянь та вихідних функцій, таблиця переходів станів. Мережа Петрі задається кортежем, але відрізняється від цифрового автомата. У пакеті CPN Tool кортеж складається з дев'яти елементів CPN $(P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I)$, де: P – кінцева множина позицій; T – кінцева множина переходів; $A - A \subseteq P \times T \cup T \times P$ безліч спрямованих дуг; Σ – не порожня кінцева множина кольорів; V – кінцева множина типів змінних; $C: P \rightarrow \Sigma$ – функція множини кольору; $G: T \rightarrow EXPRV$ – функція умови спрацьовування переходу; $E: A \rightarrow EXPRV$ – функція опису дуги; $I: P \rightarrow EXPR0$ – функція ініціалізації.

$EXPR$ означає безліч виразів, представлених написами мови CPN ML і $Type[e]$ позначає тип виразу $e \in EXPR$, тобто. тип значень, одержаних при обчисленні виразу e . Безліч вільних змінних у виразі e позначається як $Var[e]$, і тип змінної v позначається як $Type[v]$. Вільна змінна – це змінна, яка не пов'язана у локальній середовище виразу. $Var[e]$ позначається як $EXPRV$.

Вираз ініціалізації I має бути закритим виразом, тобто воно не може містити будь-які вільні змінні, тому $EXPR0$.

У кольорових мережах Петрі колір маркера використовується у функціях передачі маркера по дугах мережі Петрі, тому використання кольорових мереж Петрі дозволяє зменшити кількість переходів та позицій за рахунок призначення дугам або переходів (у сегменті коду переходу) функцій передачі маркера. ЦА може бути окремим випадком побудови мереж Петрі, тому може бути легко розроблено імітаційну модель на основі мереж Петрі з використанням ЦА.

ЦА представляється у вигляді орієнтованого графа, що складається з станів автомата (вершин) та вхідних сигналів. Розрізняють детерміновані ЦА Мілі та Мура. Відмінною особливістю ЦА Мура від ЦА Мілі є те, що вихідний сигнал залежить від вхідного сигналу, лише від стану переходу. Розглянемо орієнтований граф ЦА Мура з STTE, граф представлений рисунку 2.2. З стану S_0 під дією одиничного вхідного сигналу, ЦА перетворюється на стан S_1 . Зі стану S_1 під дією одиничного вхідного сигналу – у S_2 . З стану S_2 під дією $X_1 \& X_2 \& X_3 \& X_4$ – в стан S_3 , де символ $\neg$ – заперечення, під дією $X_1 \& \neg X_2 \& \neg X_3 \& X_4$ – у стан S_8 , під дією $X_1 \& X_2 \& X_3$ – у стан S_4 , під дією $\neg X_1$ – у стан S_6 , під дією $X_1 \& X_2$ – у стан S_5 .

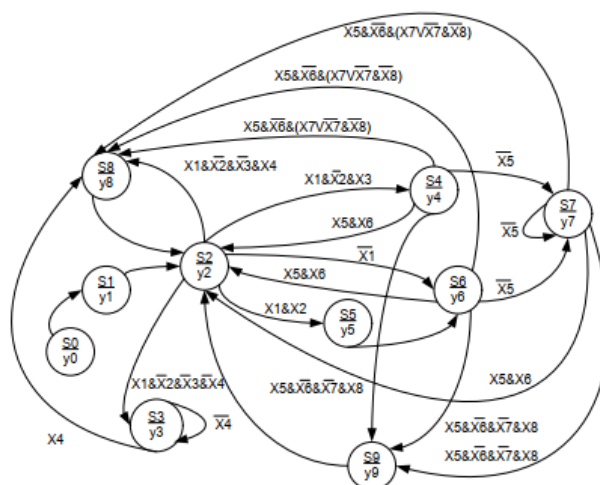


Рисунок 2.2 – Формалізація алгоритмів з використанням цифрових автоматів

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 , $Y_j(t+1)$ – вихідний сигнал наступного часу t . У таблиці переходів послідовно перераховуються всі переходи, починаючи з нульового стану по останнє. І так далі.

$S_i(t)$	$X_{i,j}(t)$	$S_j(t+1)/Y_j(t+1)$
S_0	1	S_1/y_1
S_1	1	S_2/y_2
S_2	$X_1 \& \neg X_2 \& \neg X_3 \& \neg X_4$	S_3/y_3
	$X_1 \& \neg X_2 \& X_3$	S_4/y_4
	$X_1 \& X_2$	S_5/y_5
	$\neg X_1$	S_6/y_6
	$X_1 \& \neg X_2 \& \neg X_3 \& X_4$	S_8/y_8
S_3	$\neg X_4$	S_3/y_3
	X_4	S_8/y_8
S_4	$X_5 \& X_6$	S_2/y_2
	$\neg X_5$	S_7/y_7
	$X_5 \& \neg X_6 \& (X_7 \vee \neg X_7 \& \neg X_8)$	S_8/y_8
	$X_5 \& \neg X_6 \& \neg X_7 \& X_8$	S_9/y_9
S_5	1	S_6/y_6
S_6	$X_5 \& X_6$	S_2/y_2
	$\neg X_5$	S_7/y_7
	$X_5 \& \neg X_6 \& (X_7 \vee \neg X_7 \& \neg X_8)$	S_8/y_8
	$X_5 \& \neg X_6 \& \neg X_7 \& X_8$	S_9/y_9
S_7	$X_5 \& X_6$	S_2/y_2
	$\neg X_5$	S_7/y_7
	$X_5 \& \neg X_6 \& (X_7 \vee \neg X_7 \& \neg X_8)$	S_8/y_8
	$X_5 \& \neg X_6 \& \neg X_7 \& X_8$	S_9/y_9
S_8	1	S_2/y_2
S_9	1	S_2/y_2

Рисунок 2.2 – Таблиця переходів ЦА

Інші ЦА компонентів будуються подібним чином шляхом перетворення блок-схем алгоритмів на ЦА. Запропонована методика перетворення цифрових автоматів у мережі Петрі використовувалась у роботах = для переходу формалізації від ЦА до мереж Петрі. На рисунку 2.3 представлена підмережа захисника системи, яка вийшла, використовуючи розглянутий вище цифровий автомат та методику перетворення ЦА на мережу Петрі.

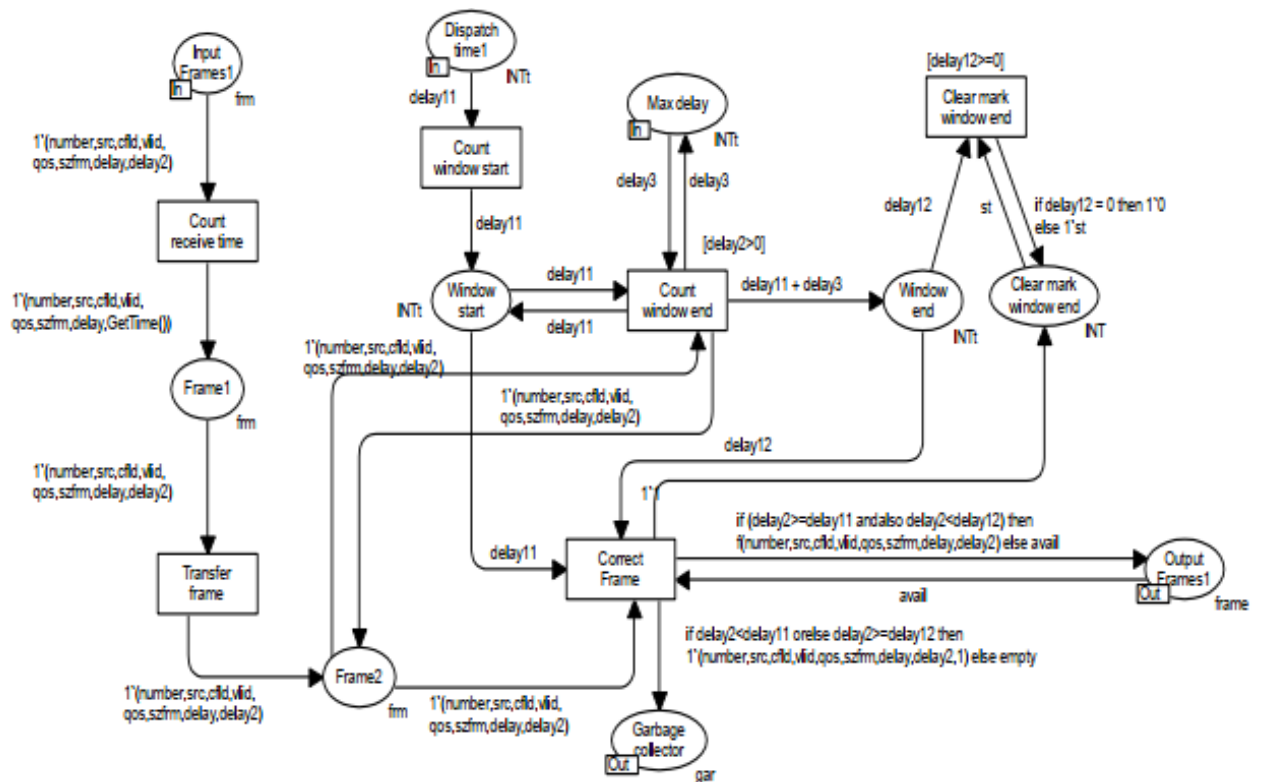


Рисунок 2.3 – Підмережа захисника системи

Стан S3, S4 відповідають за початок та закінчення тимчасового вікна захисника; стану S1, S2 показують прийнятий захисником кадр; стан S6 відповідає позиції у мережі Петрі коректності прийнятого кадру тимчасовим обмеженням; стану S7, S8 – реакція на спрацювання тимчасових умов.

3 МОДЕЛЮВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ

3.1 Моделювання систем, які використовують технологію TTE

Розроблено імітаційну модель, що реалізує обмін та взаємодію основних пристроїв TTE. Модель складається з наступних основних частин: клієнта, комутатора (майстра), блоку синхронізації глобального часу та комунікаційного каналу. У моделі розглядається один клієнт та один комутатор.

Модель є гнучкою і її можна легко переналаштувати, доповнивши модель N-м кількістю клієнтів та комутаторів. У ході моделювання не розглядалися реальні часові відрізки, а використовувався абстрактний час, який зручний тим, що досліджується функціонування самої системи. Розглянемо основні кольори, константи та деякі змінні, які використовуються у моделі.

Колір GlobTime фарбує змінний діапазон від 0 до n , де n = сума кількості клієнтів та кількості комутаторів. У моделі $n = 2$, оскільки використовуються один клієнт та комутатор. Опис кольору GlobTime представлено нижче.

Основною змінною в імітаційній моделі є `globtime`, оскільки відповідає за синхронізацію годинника вузлів комунікаційної мережі. Цей час передається клієнту та комутатору, тим самим забезпечується синхронізація локального годинника всіх пристроїв. Константа, яка задає суму кількості клієнтів та комутаторів у моделі представлена нижче: `val numberpart = 2`.

На рисунку 3.1 представлений верхній рівень моделі, модель складається з: блоку синхронізації глобального часу, комунікаційного каналу, клієнта та комутатора.

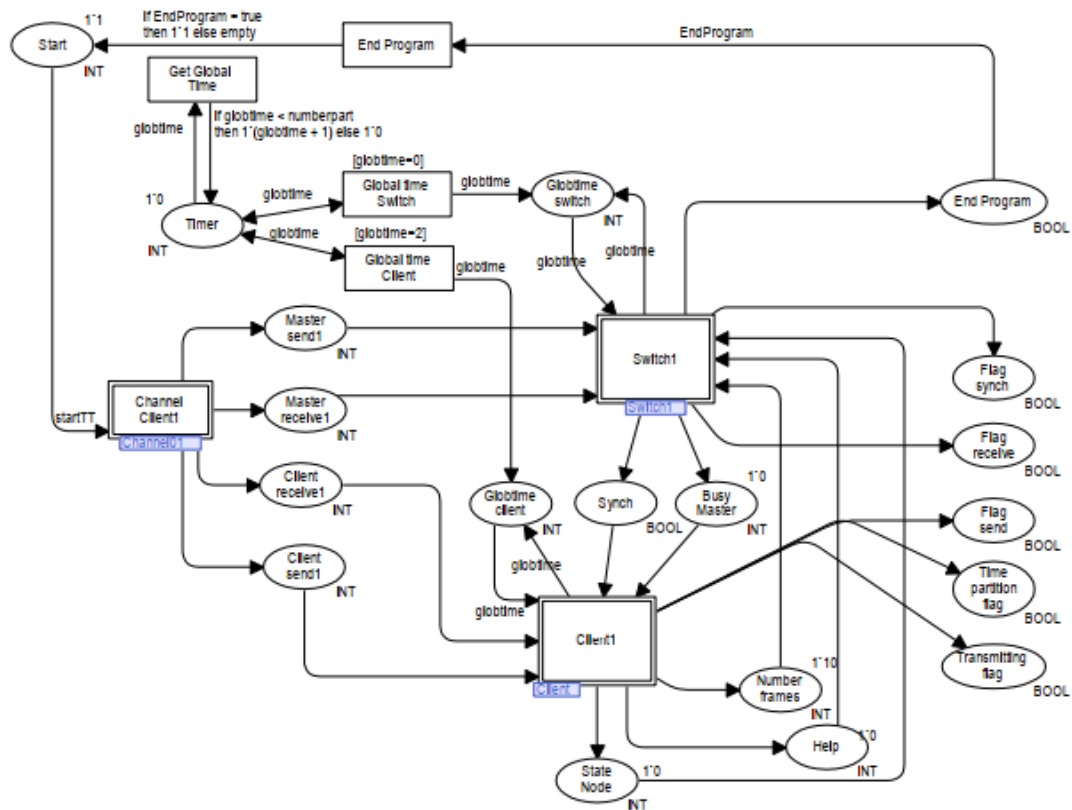


Рисунок 3.1 – Модель системи по технології TTE

Алгоритм роботи системи TTE працює наступним чином: виробляється сигнал запуску системи (позиція Start), сигнал передається в комунікаційний канал, для того щоб почалася робота, та проведена синхронізація між клієнтом та комутатором. Комунікаційний канал виробляє чотири сигнали: сигнал передачі комутатора, сигнал прийому комутатора, сигнал передачі клієнта та сигнал прийому клієнта. Детальний алгоритм роботи комунікаційного каналу буде описано нижче. Одночасно з виробленням сигналів від комунікаційного каналу, обчислюється глобальне час. Формування глобального часу є одним з важливих завдань у передачі даних з TTE. Глобальний час формується так: позиція Timer зберігає глобальний час, який використовують усі вузли системи. Початкове маркування позиції Timer дорівнює нулю. Значення глобального часу обчислюється на переході Get Global Time, що здійснює циклічне інкрементування змінної globtime. Цикл обмежує константу numberpart.

3.2 Моделювання методу передачі кадрів за розкладом

У даній моделі відсутній апаратний захисник системи, тим самим знижується вимога щодо формуванню тимчасового вікна, але ТТ-кадри передаються заздалегідь встановленим розкладом. Модель складається з наступних основних частин: підмережі читання кадрів із файлу та відновлення кадрів за часом «Reader»; підсіти буфера комутатора "Buffer"; підмережа генерації розкладу «Sheduler»; підсіти класифікації кадрів "Classifier"; підсіти перевірки часу доставки ТТ-кадрів "Time_checker"; підмережі черг Queue N; підмережа обслуговування черг "scan"; підсіти вихідного порту OutPort. На рисунку 3.2 представлений верхній рівень ієрархії розробленої моделі.

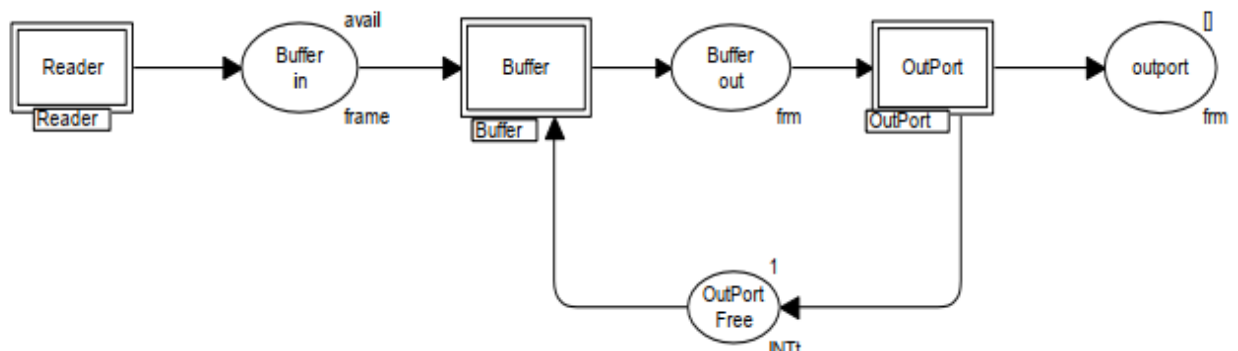


Рисунок 3.2 – Верхній рівень ієрархії моделі

Основна відмінність від розробленої моделі від ТТЕ відсутність поділу кадрів по таймслотам, які надходять до свого захисника.

Підмережа буфера комутатора представлена на слайді знизу. Кадр надходить на вхідний порт буфер з підмережі читання кадрів. Потім кадр надходить у підмережу Sheduler, де перевіряється момент доставки ТТ-кадру.

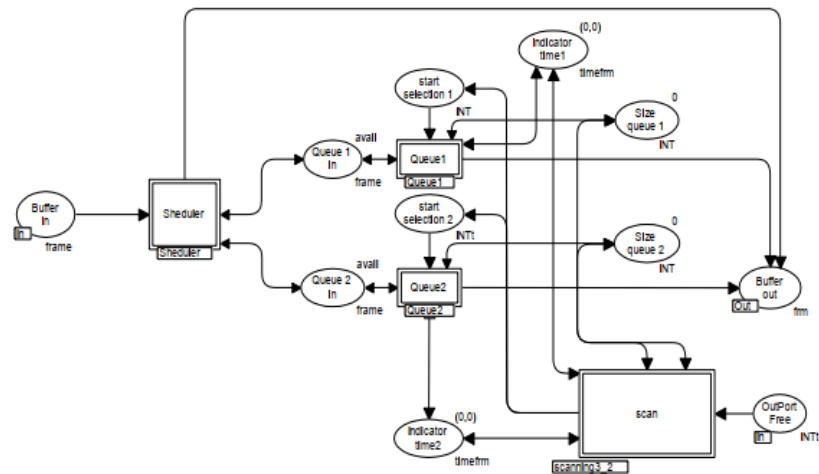


Рисунок 3.3 – Підмережа буфера комутатора

Порти буфера комутатора: Buffer In – вхідний порт комутатора; Buffer out – вихідний порт комутатора; OutPort Free – вхідний порт, що вказує на наявність сигналу вільного вихідного порту. Сигнали start selection N означають запуск вибірки кадру з відповідної черги. Позиції Size queue N означають наявність кадрів у чергах. Позиція Indicator time N містить список, що складається з двох параметрів: затримки та розміру кадру. Позиції Indicator time N необхідні роботу диспетчера управління чергами.

Підмережа генерації розкладу «Sheduler» представлена на рисунку 3.4.

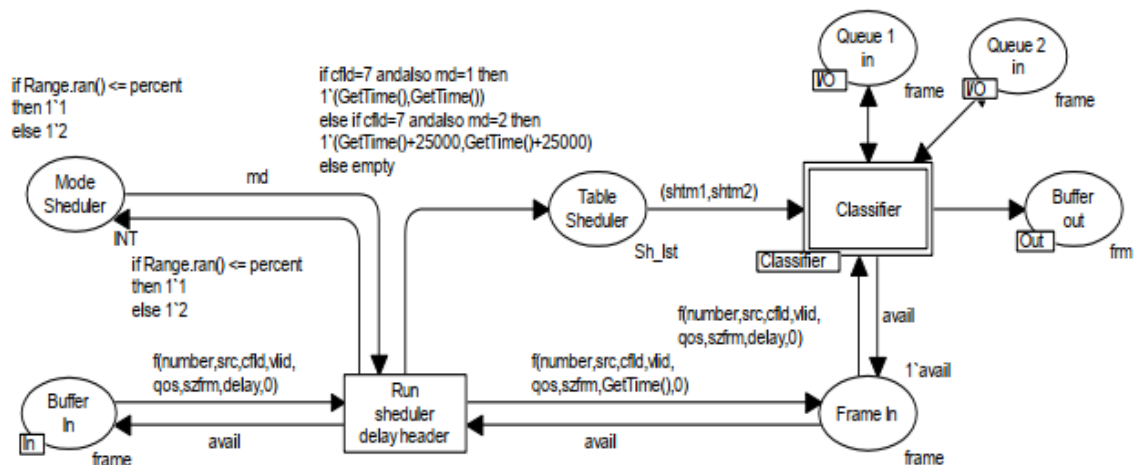


Рисунок 3.4 – Підмережа генерації розкладу

Кадр з вхідного порту буфера переміщується для аналізу підмережі «Sheduler». Порти підмережі генерації розкладу: Buffer In – вхідний порт підмережі; Queue N in – вхідний/вихідний порт черги; Buffer out – вихідний порт комутатора. На початку прибуття кожного кадру генерується режим роботи розкладу: момент доставки ТТ-кадру дорівнює часу в розкладі; момент прибуття ТТ-кадру заздалегідь у розкладі. Таким чином, даний режим дозволяє імітувати реальну систему, яка враховує час прибуття ТТ-кадру.

Після цього генерується розклад залежно від режиму роботи розкладу. Розклад являє собою список часів за таймслотами. Розклад генерується лише для ТТ-кадрів. Для розкладу створено свій спеціальний копір Sh_lst (у моделі розклад складається з двох таймслотів ТТкадрів, як і моделі TTE). Реалізується копір Sh_lst наступним чином: $\text{colset Sh_lst} = \text{product INTt} * \text{INTt}$. Якщо змінна режиму розкладу $\text{md} = 1$, то в розклад записується поточний час моделювання за таймслотами через функцію $\text{GetTime}()$. Якщо змінна розкладу $\text{md} = 2$, то записується збільшене час моделювання на деяку константу, щоб імітувати роботу приходу ТТ-кадра раніше доставки в розкладі. Потім отримані дані відправляються в мережу класифікації кадрів.

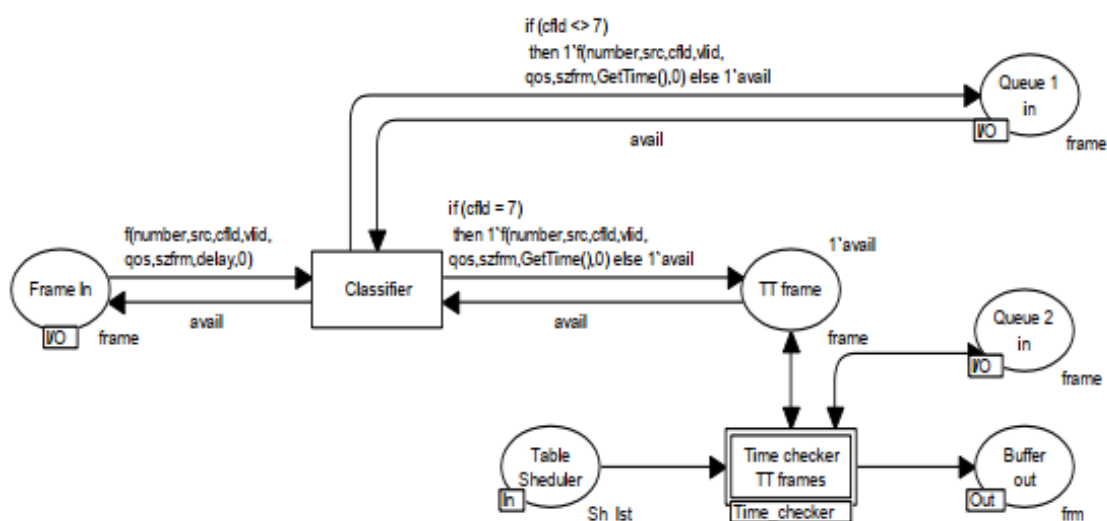


Рисунок 3.5 – Підмережа генерації кадрів

Підмережа класифікації кадрів представлена на рисунку 3.5. Підмережа Порти підмережі класифікації кадрів: Frame In – вхідний порт підмережі; Table Scheduler - Вхідний порт розкладу; Queue N in – вхідний/вихідний порт черги; Buffer out – вихідний порт комутатора.

Вхідний кадр надходить на перехід Classifier, де аналізується вид кадру: якщо константне поле ConstFld не дорівнює 7, тоді ET-кадр передається в чергу Queue 1in, інакше кадр передається в підмережу перевірки часу доставки TT-кадрів разом із згенерованим розкладом. Підмережа «Time_checker» прийме рішення, куди потрібно передати TT-кадр: у чергу для TT-кадрів Queue 2in або відразу ж на вихідний порт комутатора.

Диспетчер управління чергами відрізняється від класичних диспетчерів черг FIFO, WRR, DRR та від диспетчера черг у моделі TTE. Диспетчер черг враховує час надходження кадру та його розмір, таким чином, він реалізує розроблений алгоритм передачі кадрів за технологією STTE. Позиція Indicator time1 відповідає додатковому буферу ET-кадрів, а позиція Indicator time2 – буфер TT-кадрів. Диспетчер черг запускається при наявності, хоча б однієї не пустої черги та сигналу вільного вихідного порту. Сигнал вибірки кадру з ET-черги формується наступним чином: якщо ETчерга не порожня та TT-черга порожня, або не порожні обидві черги та час надходження ET-кадра та його розмір дозволяють передати кадр до настання часу доставки TT-кадра.

Сигнал вибірки кадру з TT-черги формується так: якщо не порожня TT-черга і порожня ET-черга, або не порожні обидві черги, але ETкадр не може передатися, оскільки більше часу доставки TT-кадра, тому передаватиметься TT-кадр. Сигнал виробляється чітко в строго відведеному час доставки TT-кадра, це досягається тимчасовою затримкою ind2-GetTime().

Перш ніж безпосередньо переходити до аналізу результатів імітаційних моделей, необхідно розглянути генератор трафіку, який використовувався в імітаційних моделях як за технологією Ethernet, і по TTE. Генератор трафіку

дозволив дослідити тимчасові затримки під час передачі кадрів по ТТЕ та розробленому методу.

3.3 Результати моделювання імітаційних моделей

Генератор трафіку необхідний для дослідження в галузі передачі кадрів комутатору, у сфері формування неконтрольованої затримки на вихідних портах комутатора, в області завантаження та вибірки кадрів з відповідних черг, в області обліку втрачених кадрів по мережі та обчислення завантаження смугою пропускання каналу у комутаторі. Щоб покращити показники в досліджуваних областях комп'ютерних мереж, поліпшити показники якості обслуговування, підвищити швидкодію, необхідно дослідити вхідний трафік комутатора Ethernet.

Генератор регулярного трафіку виробляє кадри з певним постійним періодом. Одночасно в моделі генеруються 4 кадри регулярного трафіку, для усунення одночасності приходу кадрів у комутатор була додана невелика затримка.

Генератор трафіку комутатора Ethernet є складовою частиною роботи комп'ютерної мережі. Тільки у разі глибокого та повного дослідження алгоритму генерації кадрів Ethernet та змішування трафіку різного типу можна проаналізувати роботу комутатора. Модель є узагальненою моделлю реального трафіку, яка має свою гнучкість і може підлаштовуватися до різних конфігурацій комутатора.

У роботі розглядаються регулярний та еластичний (стохастичний) трафік. Вибір цих типів трафіку не випадковий. Для передачі трафіку реального часу генерується кадр із заданим у моделі періодом та відповідним тимчасовим інтервалом, це необхідно для того, щоб обчислювати затримку кадру через певні часові інтервали в моделі, тому цей трафік буде відноситися до регулярного. Еластичний трафік пов'язаний із стандартною передачею кадру в комутаторі, і тут не важливі поняття швидкодії та

мінімізації затримки кадру. Генератори регулярного та стохастичного трафіку виробляють послідовність маркерів, які відповідають формату кадрів Ethernet з підтримкою QoS. Кадри розфарбовуються відповідно до MAC-адрес джерела та приймача, типом пріоритету трафіку QoS, заданими розподілами довжини пакета та часу його надходження. Змішувач трафіку здійснює агрегування окремих потоків кадрів та контролює довжину їх генерованого потоку. На рисунку 3.5 наведено узагальнений вигляд моделі генератора трафіку.

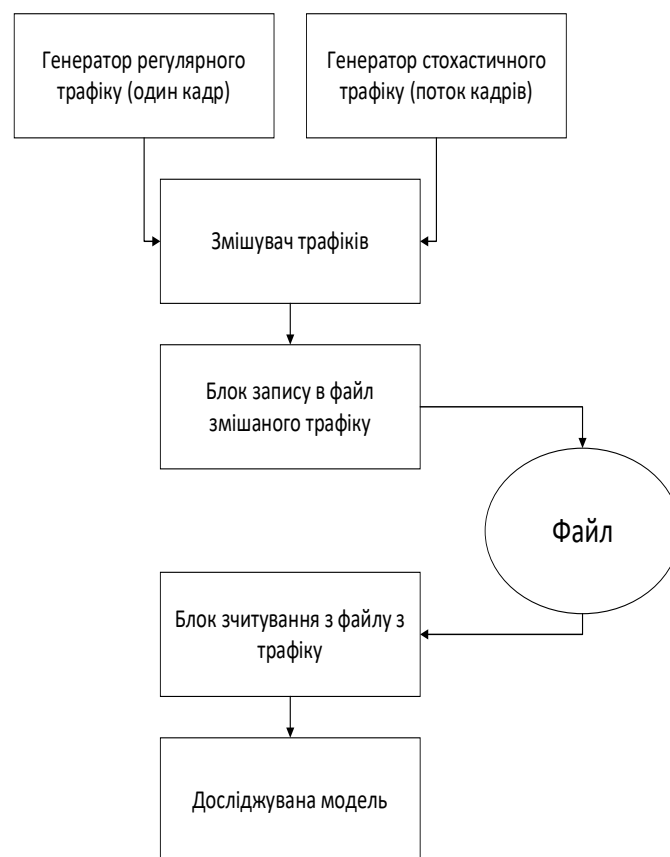


Рисунок 3.5 – Узагальнений вид моделі генератора трафіку

У файл записується згенерований потік кадрів. У ході проведення експериментів спеціальний блок у моделі зчитував безліч маркерів з файла і відновлював тимчасову послідовність передачі кадрів у досліджуваних моделях пристроїв комп'ютерної мережі. Прискорення процесу моделювання

та забезпечення повторюваності експериментів при зміні або корекції досліджуваної моделі досягається за рахунок попередньої фіксації отриманого трафіку у файл.

Модель генератора трафіку дозволяє вивчити та досліджувати наступні необхідні характеристики кадрів: міжкадровий інтервал, інтенсивність надходження регулярного трафіку, визначення величини пріоритету кадру основі ваги пріоритету. Для визначення міжкадрового інтервалу необхідно обчислити кількість інтервалів. Після цього визначається, який відсоток інтервалів відноситься до області мінімальної довжини кадру, максимальної довжини і до рівно розподіленої довжини кадру. Виходячи з вище сказаного, обчислюється кінцевий розмір кадру в залежності від області влучення кадру. У моделі генератора трафіку обчислення кінцевої довжини кадру відповідає функція `SetSizeFull`.

Інтенсивність надходження регулярного трафіку є іншою. менш важливою характеристикою дослідження трафіку. За допомогою інтенсивності можна задавати періодичність кадрів (у разі кадрів 108 реального часу). Це дозволяє змішувати регулярний та стохастичний трафіку. Потім кадри реального часу можна аналізувати у комутаторі Ethernet, визначити ефективність обробки даного трафіку та джиттер в комутаторі.

У моделі інтенсивність регулярного трафіку встановлюється в позиції `Period`. Наступною характеристикою генерації кадру є визначення величини пріоритету кадру на основі ваги пріоритету. Визначення кількості інтервалів дозволяє визначити пріоритет кадру, кількість інтервалів аналогічно визначенню з міжкадровим інтервалом, але тут обмежується кількість пріоритетів. Визначається відсоток влучення пріоритету в заданий інтервал для кожного пріоритету та обчислюється пріоритет, який потрапляє в мінімальну, максимальну та рівно розподілену області. Після цього в моделі виходить кінцевий пріоритет кадру за вищеописаною методиці. Опис формалізації мережі Петрі для генератора не будується.

Модель генератора трафіку представлена рисунку 3.6. Досліджувані трафікуи в моделі генератора є гнучкими і можуть змінюватися в залежно від різних вимог, які можуть бути застосовані до моделі.

Генератор регулярного трафіку виробляє кадри з певним постійним періодом. Одночасно в моделі генеруються 4 кадри регулярного трафіку, для усунення одночасності приходу кадрів у комутатор було додано невелика затримка. Для першого кадру додається одиниця, для другого - двійка і т.д. Методи усунення одночасного приходу кадрів у комутатор застосовуються і реальних системах управління комутатором Ethernet. Використовувалась додаткова функція RandDelay, помножена на 10, яка перемішувала 4 кадри між собою і генерувала різну черговість між цими кадрами. Функція RandDelay приймає рівно розподілене значення від 1 до 4.

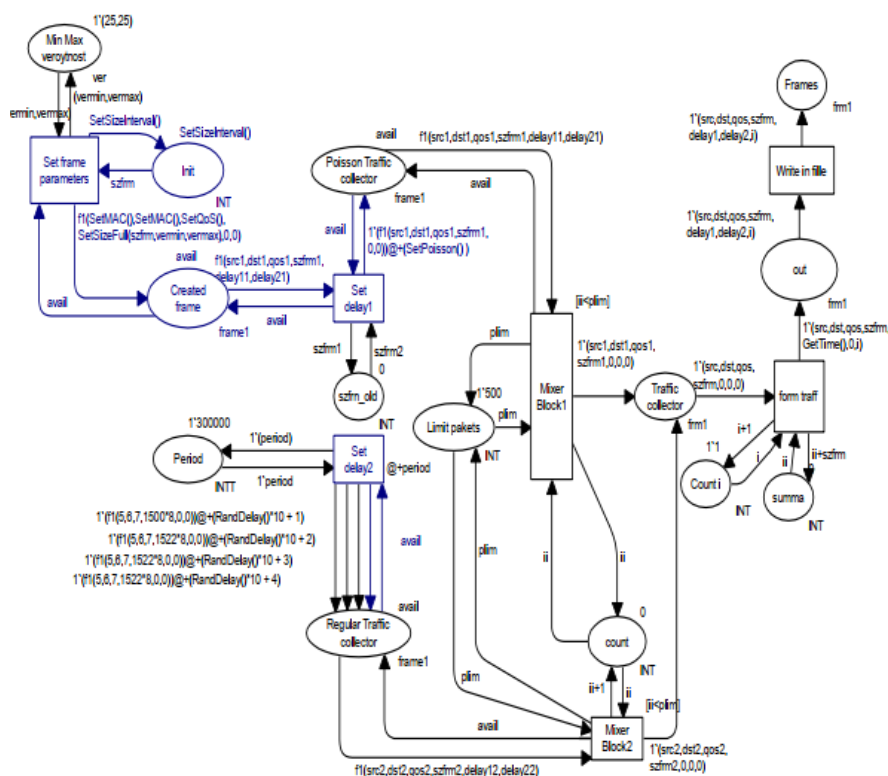


Рисунок 3.6 – Модель генератора трафіку на мережах Петрі

Трафік досліджуваної моделі генератора трафіку порівнювався з теоретичним трафіком комутатора Ethernet. Теоретичний графік розподілу

довжини кадру за алгоритмом, описаним вище, повинен являти собою U-подібну криву. Для того, щоб проаналізувати отримані дані, зчитується з файл змішаний трафік, потім аналізується тільки стохастичний трафік. Визначаються отримані мінімальне та максимальне значення довжини кадру. Довжини кадрів розбиваються певну кількість інтервалів.

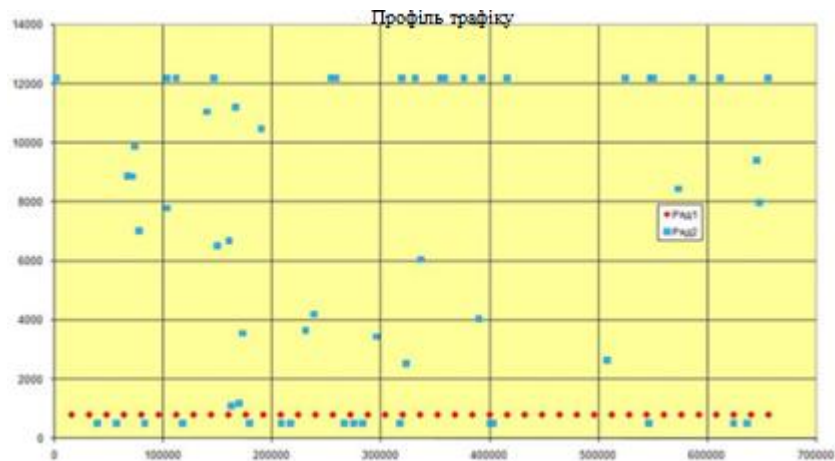


Рисунок 3.7 – Профіль трафіку

На рисунку 3.7 – профіль згенерованого трафіку. На рисунку 3.8 представлена гістограма розподілу довжин кадрів теоретичного та експериментального трафіку.



Рисунок 3.7 – Гістограма розподілу довжини кадрів

На рисунку 3.9 – гістограма розподілу інтервалів між моментами надходження кадрів (ТІ – тактові імпульси, моделі – машинний час).

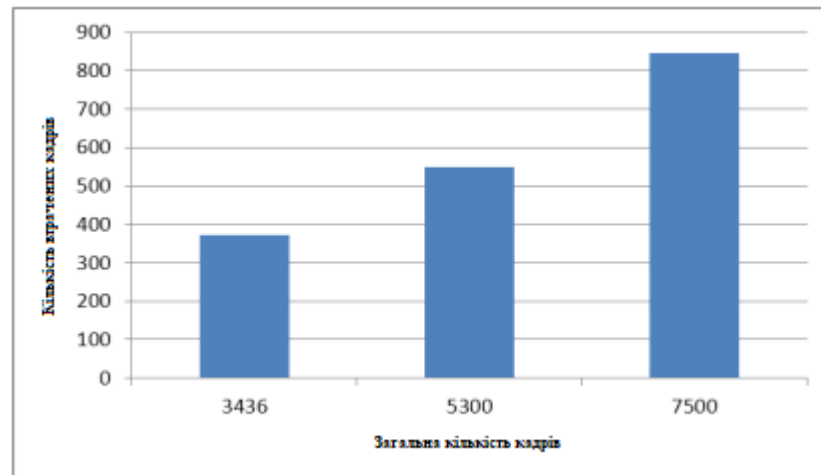


Рисунок 3.9 – гістограма розподілу інтервалів між моментами

Експериментальний трафік підтвердив гнучкість та ефективність розробленої моделі, та експериментально доведено подібність експериментального та теоретичного трафіку з використанням апарату мереж Петрі.



Рисунок 3.10 – Обмін інформацією з використанням Ethernet та TTE

призначення комутатора, спрямовані на даний порт. Поточний момент надходження ТТ-кадра порівнюється з моментом доставки у планувальнику розкладу.

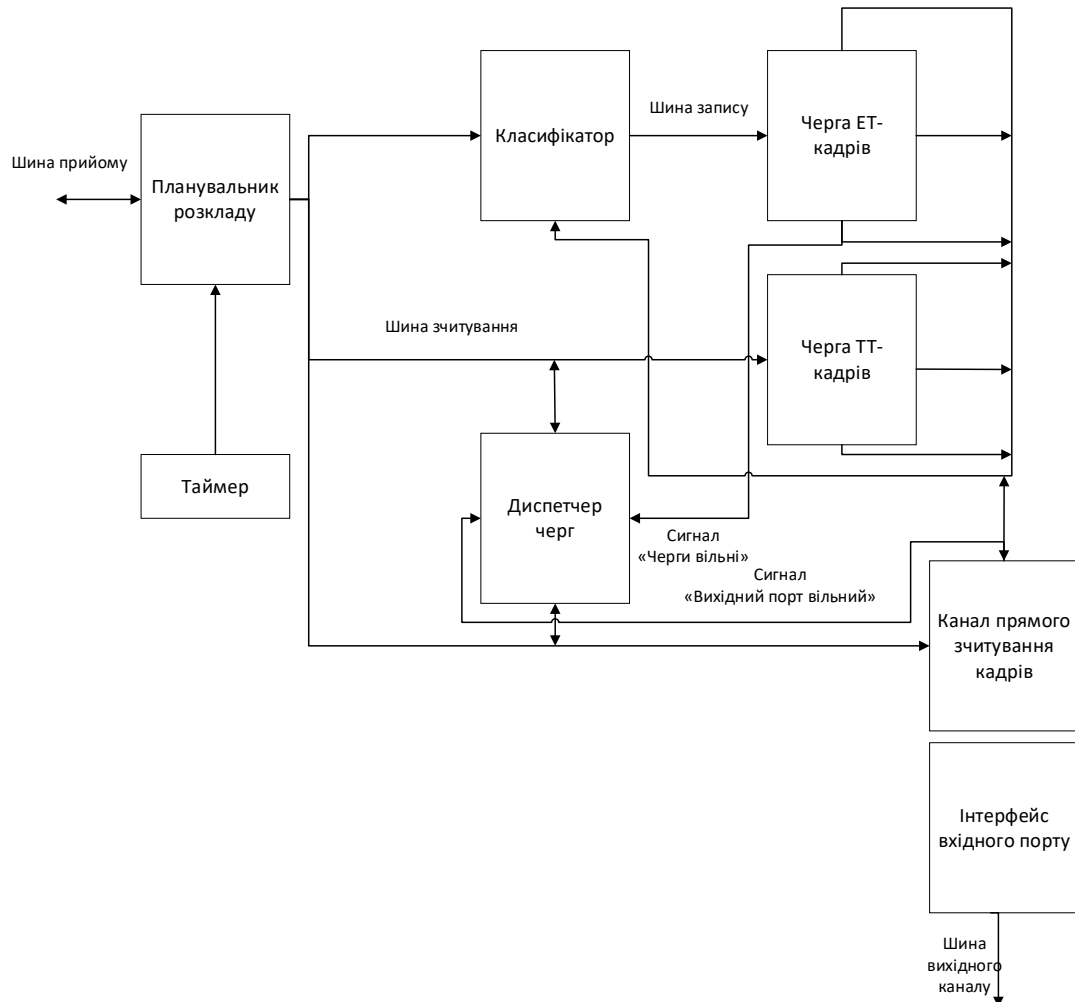


Рисунок 3.12 – Структура пристрою

Планувальник розкладу представляє собою пам'ять (набір регістрів), у якій зберігаються значення моментів доставки ТТ кадрів. Таймер перевіряє час доставки ТТ-кадрів. Планувальник розкладу може або передавати ЕТ-кадр або некоректний ТТ-кадр в класифікуючий пристрій (класифікатор), або поміщати ТТ-кадр черга ТТ-кадрів або передавати ТТ-кадр відразу ж у вихідний канал.

ВИСНОВКИ

У ході підготовки кваліфікаційної роботи розроблено метод передачі трафіку за розкладом у комутаторах, що забезпечує доставку кадрів реального часу одержувачу у призначені моменти часу за розкладом, що встановлюються заздалегідь для кожного вихідного порту комутатора. Застосування методу сприяє усуненню тимчасових конфліктів різнорідного трафіку, повністю виключаються втрачені кадри, які не потрапляли до тимчасового вікна захисника по ТТЕ, підвищується пропускна здатність мережі, а також відсутнє підвищення завантаження комутатора.

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, M. 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. Kopetz // 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.

19. Kopetz, H. Communication method and system for transmission of time-driven and event-driven Ethernet messages / H. Kopetz // Patent Application

Publication No.: US 2005/0117596A1. Pub. date: June 2, 2005.

20. Калюга В.В., Дяченко В.О., Міхаль О.П. Методи обробки трафіку в реальному часі// Проблеми інформатизації : десята міжнародна науково-технічна конференція. Черкаси – Баку – Бельсько-Бяла – Харків, 2022, т.2, с.93.