

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ І ГЛОБАЛЬНОГО
ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЄЛІССАВІ КАМАЛ КХАЛІФА А

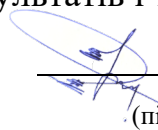
УДК 621.394/396

ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ СТАЛОСТІ МЕРЕЖЕВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ В
СУЧАСНІЙ МУЛЬТИСЕРВІСНІЙ МАКРОМЕРЕЖІ

Спеціальність 05.13.06 – інформаційні технології
Технічна галузь 05 «Технічні науки»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Єліссаві Камал Кхаліфа А.
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: ХЛАПОНІН Юрій Іванович
доктор технічних наук, професор.

Ідентичність всіх примірників дисертації засвідчую:

Учений секретар спеціалізованої вченої ради



/ О. Г. ЛЕБІДЬ /

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Єлісаві Камал Кхаліфа А. Методи підвищення сталості мережевої синхронізації в сучасній мультисервісній макромережі – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 “Інформаційні технології”. – Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота, присвячена вирішенню **науково-прикладної задачі** підвищення сталості функціонування мережевої синхронізації шляхом розробки та удосконалення механізму динамічної адаптації дерева синхронізації, що дозволяє забезпечити працездатність мережевої синхронізації при збільшенні зв'язності мережі і значному збільшенні кількості аварійних ситуацій в мультисервісній макромережі.

Активний еволюційний розвиток технологій веде до створення мультисервісних макромереж, метою яких буде вирішення принципово нових задач.

Необхідність забезпечення сигналами точного часу вкрай важлива, а саме - для забезпечення технологічності функціонування рівня послуг інформаційних технологій. Крім того, для узгодженої роботи білінгової системи з рівнем управління викликами також необхідно зв'язування шкал часу для коректного формування файлів CDR білінгу на вузлах мережі.

Тому одним з головних завдань є побудова мережевої синхронізації, надійність якої має не поступатися надійності мережі передачі даних. Оскільки в мережах передачі даних існують механізми захисту трафіку від можливих аварій, то мережа синхронізації має бути спроектована з врахуванням можливих змін в маршрутах передачі даних. Для виконання такої вимоги в мережах синхронізації постає необхідність побудови оптимального “логічного” дерева синхронізації. Якість функціонування мережевої синхронізації в мультисервісній макромережі залежить від якості планування дерева синхронізації.

Розробка та застосування механізму динамічної адаптації “логічного” дерева синхронізації суттєво сприяє підвищенню сталості мережевої синхронізації. Цей механізм дозволяє залежно від зміни ситуації на мережі формувати оптимальне для даної ситуації дерево синхронізації.

У вступі наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми, сформувано мету, основні завдання досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення основних результатів, наведено відомості про їхню апробацію та реалізацію.

В першому розділі розглянуто загальні властивості, основні принципи побудови й функціонування мережевої синхронізації в мережах синхронної цифрової ієрархії та в мережах пакетних технологій IP/MPLS.

Проведено аналіз існуючих типів мережних елементів мережевої синхронізації в мережах синхронної цифрової ієрархії та в мережах пакетної технології IP/MPLS. Для формування сигналів синхронізації в мережі тактової синхронізації використовують первинні джерела та пристрої сигналів синхронізації.

Другий розділ дисертації присвячено оцінці впливу сигналів синхронізації на навантаження мережі на ієрархічних рівнях доступу, розподілення та ядра мультисервісної макромережі. Розглянуто основні принципи реалізації мережі синхронізації в пакетних мережах IP/MPLS та методи синхронізації. Розглянуто трирівневу ієрархічну структуру мережі передачі даних. Запропоновано рекомендації щодо планування мережі синхронізації в пакетних мережах IP / MPLS. Проведено вимірювання параметрів стабільності сигналів синхронізації в пакетних мережах.

Третій розділ дисертації присвячений розробці методів підвищення сталості функціонування мережевої синхронізації в мультисервісній макромережі, які полягають в: - визначенні сукупності параметрів, що впливають на сталість функціонування мережевої синхронізації; - розробці рекомендацій щодо оптимальної побудови мережевої синхронізації на основі комбінацій топологічних структур, які складаються з досліджуваних фрагментів; - дослідженні залежності сталості функціонування фрагмента мережевої синхронізації від інтенсивності

відмов, інтенсивності відновлень й обраної топології; - в виборі оптимальної топології, яка забезпечує максимальну сталість мережевої синхронізації при заданих інтенсивностях потоків відмов і відновлень; - в дослідженні можливості використання типових фрагментів мережі синхронізації для побудови дерева синхронізації, що динамічно адаптується.

Четвертий розділ дисертації присвячений оцінці ефективності запропонованих методів підвищення сталості функціонування мережевої синхронізації в мультисервісній макромережі.

Шляхом математичного моделювання була проведена оцінка введення методу динамічної адаптації дерева синхронізації при плануванні мережевої синхронізації в мультисервісній макромережі.

Основні положення та зміст дисертації відображено в 19 наукових публікаціях: 11 наукових статтях (3 з яких одноосібні [3, 12,13]), одна опублікована у виданні, що індексується в наукометричній базі Scopus [16], одна у зарубіжному виданні [14], одна у виданні держави, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку [18] та у фахових виданнях ДАК України [2,10,11,15,17] та в 8 тезах і матеріалах доповідей на конференціях.

В роботі: – вперше розроблено метод визначення сталості функціонування мережевої синхронізації з врахуванням інтенсивностей потоків відмов і відновлень, топології мережі й алгоритмів функціонування мережевих елементів з врахуванням імовірнісних характеристик подій, що відбуваються в мережі синхронізації; - удосконалено метод аналізу працездатності фрагмента мережі синхронізації довільної топології і протоколів взаємодії між мережевими елементами для формування дерева синхронізації, що дозволяє запобігати появі часових петель в замкнутих топологічних структурах шляхом зміни пріоритетів і введення механізму програмованої затримки в алгоритм формування повідомлень про статус синхронізації; - встановлено, що використання удосконаленого методу динамічної адаптації дерева синхронізації на основі замкнутої топології є доцільнішим, ніж використання існуючих алгоритмів на даній топології та дозволить на 25% збільшити надійність та сталість мережі при виникненні аварійних ситуацій під час

надання послуг; - удосконалено метод переконфігурування мережевої синхронізації в мережах IP/MPLS, який дозволить збільшити ефективність планування та використання алгоритмів функціонування мережевих елементів з урахуванням імовірнісних характеристик подій, що відбуваються в мережі синхронізації на 10-13%.

Якість функціонування фрагмента мережі синхронізації, в якому мережні елементи функціонують за алгоритмом з динамічною адаптацією дерева синхронізації може досягати якості функціонування фрагмента з ідеальним алгоритмом, тобто може бути досягнута теоретична межа якості функціонування.

Ключові слова: мультисервісна макромережа, мережева синхронізація, мережеві вузли, єдине джерело синхронізації, адаптивне дерево синхронізації.

ABSTRACT

Elissavi Kamal Khalifa A. Method of improving the sustainability of network synchronization of a modern multiservice macro network - Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.13.06 «Information technologies» Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation work, devoted to the decision of a scientific and applied problem of increase of stability of functioning of network synchronization by development and perfection of the mechanism of dynamic adaptation of a tree of synchronization that allows to provide serviceability of network synchronization at increase of network connectivity. Active evolutionary development of technologies leads to the creation of multiservice macronetworks, the purpose of which will be to solve fundamentally new problems.

The need to provide accurate time signals is extremely important, namely - to ensure the manufacturability of the level of information technology services. In addition, for the coordinated operation of the billing system with the level of call management, it is also necessary to compare the time scales for the correct formation of CDR billing files on network nodes.

Therefore, one of the main tasks is to build a network synchronization, the reliability of which should not be inferior to the reliability of the data network. Since there are mechanisms in the data transmission networks to protect traffic from possible accidents, the synchronization network should be designed taking into account possible changes in data transmission routes. To fulfill this requirement in synchronization networks, it is necessary to build an optimal "logical" synchronization tree. The quality of network synchronization in a multiservice macro network depends on the quality of the synchronization tree planning.

The development and application of the mechanism of dynamic adaptation of the "logical" synchronization tree significantly contributes to increasing the sustainability of network synchronization. This mechanism allows, depending on the changing situation on the network to form the optimal synchronization tree for this situation.

The introduction gives a general description of the work, substantiates the relevance of the topic, formed the purpose, main objectives of research, identifies the scientific novelty and practical significance of the main results, provides information about their testing and implementation.

The first section considers the general properties, basic principles of construction and operation of network synchronization in synchronous digital hierarchy networks and in IP / MPLS packet technology networks.

The analysis of existing types of network elements of network synchronization in networks of synchronous digital hierarchy and in networks of packet technology IP / MPLS is carried out. Primary sources and devices of synchronization signals are used to generate synchronization signals in the clock synchronization network.

The second section of the dissertation is devoted to the assessment of the influence of synchronization signals on the network load at the hierarchical levels of access, distribution and core of the multiservice macronetwork. The basic principles of synchronization network implementation in IP / MPLS packet networks and synchronization methods are considered. The three-level hierarchical structure of the data transmission network is considered. Recommendations for planning a synchronization

network in IP / MPLS packet networks are offered. The parameters of stability of synchronization signals in packet networks are measured.

The third section of the dissertation is devoted to the development of methods to increase the sustainability of network synchronization in a multiservice macronetwork, which consists in: - determining a set of parameters that affect the sustainability of network synchronization; - development of recommendations for the optimal construction of network synchronization based on combinations of topological structures, which consist of the studied fragments; - research of dependence of constancy of functioning of a fragment of network synchronization on intensity of failures, intensity of restorations and the chosen topology; - in the choice of the optimal topology, which provides maximum consistency of network synchronization at a given intensity of failure and recovery flows; - in the study of the possibility of using typical fragments of the synchronization network to build a synchronization tree that dynamically adapts.

The fourth section of the dissertation is devoted to the evaluation of the effectiveness of the proposed methods to increase the sustainability of network synchronization in a multiservice macro network.

By means of mathematical modeling the estimation of introduction of a method of dynamic adaptation of a tree of synchronization at planning of network synchronization in a multiservice macronetwork was carried out.

The main provisions and content of the dissertation are reflected in 19 scientific publications: 11 scientific articles (3 of which are individual [3, 12,13]), one published in a publication indexed in the scientometric database Scopus [16], one in a foreign publication [14] , one in the publication of the state, which is part of the Organization for Economic Cooperation and Development [18] and in professional publications of the SAC of Ukraine [2,10,11,15,17] and in 8 abstracts and conference reports.

The paper: - for the first time developed a method for determining the stability of network synchronization taking into account the intensities of failure and recovery flows, network topology and algorithms for network elements, taking into account the probabilistic characteristics of events occurring in the synchronization network; - improved method of analysis of the fragment of the synchronization network of arbitrary

topology and protocols of interaction between network elements to form a synchronization tree, which prevents the occurrence of time loops in closed topological structures by changing priorities and introducing a programmable delay mechanism in the algorithm - it is established that the use of an improved method of dynamic adaptation of the synchronization tree based on a closed topology is more appropriate than the use of existing algorithms on this topology and will increase by 25% network reliability and stability in case of emergencies during service provision; - the method of reconfiguration of network synchronization in IP / MPLS networks is improved, which will increase the efficiency of planning and use of algorithms for functioning of network elements taking into account the probabilistic characteristics of events occurring in the synchronization network by 10-13%.

The quality of functioning of the fragment of the synchronization network, in which the network elements operate according to the algorithm with dynamic adaptation of the synchronization tree can achieve the quality of functioning of the fragment with the ideal algorithm, the theoretical limit of quality of functioning can be reached.

Keywords: multiservice macro networks, network synchronization, network nodes, single synchronization source, adaptive synchronization tree.

Список публікацій здобувача

1. Єліссаві Камал Кхаліфа А. Метод аналізу працездатності фрагмента мережі синхронізації довільної топології /Ю.І. Хлапонін, К. К. Єліссаві //Перспективы предоставления услуг на основе сетей пост-NGN, 4G и 5G. Организационные и технические решения по их построению и защите: регіон. міжнар. наук.-техн. конф. МСЕ для країн Європи і СНД, м. Київ, 7-9 червня 2017 р., С. 168-169.

2. Єліссаві Камал Кхалифа А. Контроль использования трафика в мультисервисной макросети / К. К. Єліссаві, Н.В. Федорова // *ІЗ УНДІЗ*. 2017 р., №4(48). – С.43-48.

3. Єліссаві Камал Кхалифа А. Первичные источники синхронизации в современных мультисервисных макросетях мобильной связи// *Сучасний захист інформації*. 2017 р., № 4(32). – С.50 – 54. **Фахове видання**

4. Елиссави Камал Кхалифа А. Сетевая синхронизации в мультисервисных макросетях // X Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми інформатизації". – 12-13 квітня 2018 р. - С.106-108.

5. Елиссави Камал Кхалифа А. Контроль использования трафика в мультисервисной макросети / К. К. Елиссави, Н.В. Федорова // X Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми інформатизації". – 12-13 квітня 2018 р. - С.108 -110.

6. Елиссави Камал Кхалифа А. Разработка показателей стабильности сигналов синхронизации для сетей мобильной связи поколения 4G // Региональный семинар Международного союза электросвязи для стран Европы и СНГ «Цифровое будущее на основе 4G/5G». – 14-16 травня 2018, С. 41-43.

7. Елиссави Камал Кхалифа А. Мониторинг качества опорных сигналов синхронизации при переходе на пакетные сети / Елиссави Камал Кхалифа А, Н.В. Федорова, В.И. Вакась // Региональный семинар Международного союза электросвязи для стран Европы и СНГ «Цифровое будущее на основе 4G/5G». – 14-16 травня 2018 р.- С. 88-90.

8. Елиссави Камал Кхалифа А. Синхронизации частоты и времени в мультисервисных макросетях / Елиссави Камал Кхалифа А, Н.В. Федорова // VI Міжнародна науково-технічна конференція студентства та молоді «Світ телекомунікації та інформатизації». - 17 травня 2018 р. - С.34-35.

9. Елиссави Камал Кхалифа А. Эволюция развития первичных источников синхронизации // VI Міжнародна науково-технічна конференція студентства та молоді «Світ телекомунікації та інформатизації». - 17 травня 2018р. - С.36-37.

10. Елиссави Камал Кхалифа А. Контроль использования трафика в мультисервисной макросети / Елиссави Камал Кхалифа А, Н.В. Федорова // *НЗ УНДІЗ*. 2017 р., № 4(48). – С.43-48.

11. Елиссави Камал Кхалифа А. Способы синхронизации частоты и времени в мультисервисных макросетях / Елиссави Камал Кхалифа А, Н.В. Федорова // *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2018, № 1(58), С. 60-65. **Фахове видання**

12. Елиссави Камал Кхалифа А. Принципы сетевой синхронизации в мультисервисных макросетях // *Зв'язок*. 2018, № 1. - С. 88-93. **Фахове видання**

13. Елиссави Камал Кхалифа А. Разработка показателей стабильности сигналов синхронизации для сетей мобильной связи поколения 4G // *Сучасний захист інформації*. 2018 р., №2(34). – С.31 – 35. **Фахове видання**

14. Елиссави Камал Кхалифа А. Модификация параметров стабильности сигналов синхронизации при переходе на пакетные сети / К. К. Елиссави , Н.В. Федорова, В.И. Вакась, А.А. Манько // *Веснік Сувязі*. – 2019. –№1 (148). – С. 56 -59. **Фахове видання**

15. Єліссаві К. К. Узагальнюючий алгоритм аналізу працездатності фрагмента мережі синхронізації довільної топології / Ю.І. Хлапонін, К. К. Єліссаві // *Вісник інженерної академії*. 2019. – Вип. 4 – С. 134-139. **Фахове видання**

16. Ellisavi K.K. Method of improving the stability of network synchronization in a multiservice macro network / K. Ellisavi, Y. Khlaponin, D. Khlaponin, A. Selyukov// *CEUR Workshop*, Vol-2654 P. 786 – 797. – ISSN 1613-0073 **Scopus**.

17. Єліссаві К. К. Вибір інформаційної технології для підвищення точності синхронізації сигналу, що приймається системою супутникового зв'язку при кутовій демодуляції сигналу/К. К. Єліссаві, О.Л. Туровський// *Вісник інженерної академії* – 2020. – Вип. 1 – С. 126-132. **Фахове видання**

18. Khlaponin Yu., Elissawi Kamal Khalifa A, Khlaponin D. Analysis of services management methods in multiservice macronets. *Norwegian Journal of development of the International Science*. Oslo, Norway. 2020. Vol. 51. Pp. 42–48. ISSN 3453-9875.

19. Єліссаві К. К. Інформаційна технологія підвищення сталості мережевої синхронізації в сучасній мультисервісній макромережі /К.К. Єліссаві, Ю.І. Хлапонін// Перспективні напрями захисту інформації: 6-а Всеукраїнська науково-практична конференція, 2- 6 вересня 2020 р., ОНАЗ, 2020 р., тези доп. – С.9-11, м. Одеса.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	14
ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ МЕРЕЖЕВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ В СУЧАСНІЙ МУЛЬТИСЕРВІСНІЙ МАКРОМЕРЕЖІ	23
1.1. Перехід до мультисервісних макромереж	23
1.1.1. Поняття мультисервісної макромережі	25
1.2. Аналіз принципів побудови мережевої синхронізації	28
1.2.1. Вимоги до транспортної інфраструктури.....	28
1.2.2. Мережева синхронізація мультисервісної макромережі	33
1.2.2.1. Функціонування мережевої синхронізації в мережах синхронної цифрової ієрархії.....	34
1.2.2.2. Функціонування мережевої синхронізації в пакетних мережах	41
1.3. Класифікація і принципи функціонування елементів мережевої синхронізації	48
1.3.1. Принципи функціонування елементів мережевої синхронізації в мережах синхронної цифрової ієрархії	48
1.3.2. Первинні джерела синхронізації в пакетних мережах	53
1.4. Формулювання завдання дослідження.	59
1.4.1. Постановка завдань дослідження	59
1.4.2. Дослідження предмету, задач та структури дисертаційного дослідження	59
1.5. Висновки	60
РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА ВПЛИВУ МЕРЕЖЕВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ НА РІВНІ ДОСТУПУ, РОЗПОДІЛЕННЯ ТА ЯДРА МУЛЬТИСЕРВІСНОЇ МАКРОМЕРЕЖІ .	62
2.1. Реалізація мережі синхронізації в пакетних мережах IP/MPLS.....	62
2.1.1. Трирівнева ієрархічна структура мультисервісної макромережі	62
2.1.2. Рекомендації щодо планування мережі синхронізації в IP / MPLS.....	67
2.2. Оцінка впливу сигналів синхронізації на навантаження мережі на всіх ієрархічних рівнях.....	74
2.2.1. Оцінка впливу сигналів синхронізації на навантаження мережі на рівнях доступу та агрегації.....	74

2.2.2. Оцінка впливу сигналів синхронізації на рівні ядра мультисервісної макромережі.....	80
2.3. Вимірювання параметрів стабільності сигналів синхронізації в пакетних мережах	87
2.4. Висновки	93
РОЗДІЛ 3. ПІДВИЩЕННЯ СТАЛОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ В МУЛЬТИСЕРВІСНІЙ МАКРОМЕРЕЖІ	95
3.1. Метод визначення сталості функціонування мережевої синхронізації	96
3.1.1. Аналіз фрагмента мережі з трикутною топологічною структурою.....	96
3.1.2. Аналіз фрагмента мережі з деревовидною топологічною структурою....	119
3.1.3. Аналіз фрагмента мережі з кільцевою топологічною структурою.....	132
3.2. Удосконалення методу аналізу працездатності фрагмента мережі синхронізації довільної топології	141
3.3. Удосконалення методу динамічної адаптації дерева синхронізації в мережах синхронної цифрової ієрархії.....	143
3.4. Удосконалення методу переконфігурування мережевої синхронізації в мережах IP/MPLS	146
3.5. Порівняльний аналіз функціонування фрагментів мережі синхронізації.....	152
3.6. Висновки	158
РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МЕТОДИКИ ПІДВИЩЕННЯ СТАЛОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ В МУЛЬТИСЕРВІСНІЙ МАКРОМЕРЕЖІ.....	160
4.1. Розробка механізму підвищення сталості функціонування мережевої синхронізації шляхом введення алгоритму динамічної адаптації дерева синхронізації.....	160
4.2. Дослідження впливу алгоритму динамічної адаптації дерева синхронізації .	162
4.2.1. Дослідження впливу алгоритму динамічної адаптації дерева синхронізації на сталість кільцевого фрагменту мережевої синхронізації.....	162
4.2.2. Дослідження впливу алгоритму динамічної зміни дерева синхронізації на сталість деревовидного фрагменту мережевої синхронізації	167
4.2.3. Дослідження впливу алгоритму динамічної зміни дерева синхронізації на надійність трикутного фрагменту мережевої синхронізації	172

4.3. Розробка моделі мережевого пристрою для дослідження схем синхронізації	177
4.4. Імітаційне моделювання фрагментів мережі синхронізації типових топологічних структур в мережах синхронної цифрової ієрархії.....	180
4.4.1. Імітаційне моделювання кільцевого фрагменту мережі синхронізації.....	180
4.4.2 Імітаційне моделювання деревовидного фрагменту мережі синхронізації	183
4.4.3. Імітаційне моделювання трикутного фрагменту мережі синхронізації....	185
4.5. Експериментальне дослідження умов виникнення петель синхронізації в мережах синхронної цифрової ієрархії.....	186
4.6. Висновки	193
ВИСНОВКИ.....	195
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	200
ДОДАТКИ.....	210
ДОДАТОК А. ПРИНЦИП СИНХРОНІЗАЦІЇ В СЦІ ТА ETHERNET ТЕХНОЛОГІЯХ.....	210
ДОДАТОК Б	221
ДОДАТОК В.....	222
ДОДАТОК Г	223

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

а) україномовні

ВПС	Вторинний пристрій синхронізації
ГЛОНАСС	Глобальна навігаційна супутникова система
ЕМ	Елемент мережі
ППС	Провідний пристрій синхронізації
ПЦІ	Плезіохронна цифрова ієрархія
СЦІ	Синхронна цифрова ієрархія
ФАПЧ	Фазове автопідстроювання частоти

б) англomовні

ATM	Asynchronous Transfer Mode
DNU	Don't Use
E-BER	Excessive Bit Error Rate
ETSI	European Telecommunications Standard Institute
E	Ethernet
FE	Fast Ethernet
GE	1 Gigabit Ethernet
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
IP	Internet Protocol
ITU-T	International Telecommunications Union – Telecommunications standardization sector
MPLS	MultiProtocol Label Switching
NGN	Next Generation Network
OTH	Optical Transport Hierarchy

PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PRC	Primary Reference Clock
PRS	Primary Reference Source
QL	Quality Level
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SEC	SDH Equipment Clock
SSM	Synchronization Status Message
SSU	Synchronization Supply Unit
STM-N	Synchronous Transport Module of level N
TDM	Time Division Multiplexing
WDM	Wavelength Division Multiplexing

а) латинські

a_{ij}	Елемент фрагменту мережі
A, B, C	Джерело сигналу синхронізації
dis	Вимкнення обраного входу
QL	Рівень якості сигналу синхронізації

ВСТУП

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку мереж зв'язку спостерігається активний еволюційний розвиток технологій, збільшення використання телекомунікаційних засобів і систем, а також зростання числа компаній, що займаються проектуванням й експлуатацією мереж телекомунікацій.

Активний еволюційний розвиток технологій веде до створення мультисервісних макромереж, метою яких буде вирішення принципово нових задач. Вже не рідкість, коли в одного оператора кількість вузлів, які потребують забезпечення сигналом синхронізації, досягає більш ніж 1000, а топологічна структура мережі при цьому, набуває вигляду решітчастої. Причиною такого ускладнення топологічної структури є розширення функціональності обладнання. Тому, для ефективного функціонування мультисервісних макромереж стає необхідним адекватне ускладнення топологічної структури мережевої синхронізації.

Необхідність забезпечення сигналами точного часу вкрай важлива, а саме - для забезпечення технологічності функціонування рівня послуг інформаційних технологій. Крім того, для узгодженої роботи білінгової системи з рівнем управління викликами також необхідно зв'язування шкал часу для коректного формування файлів CDR білінгу на вузлах мережі.

Одним з головних завдань є побудова мережевої синхронізації, надійність якої має не поступатися надійності мережі передачі даних. Оскільки в мережах передачі даних існують механізми захисту трафіку від можливих аварій, то мережа синхронізації має бути спроектована з врахуванням можливих змін в маршрутах передачі даних. Виконання такої вимоги в мережах синхронізації пов'язане з необхідністю побудови оптимального “логічного” дерева синхронізації. Від якості планування дерева синхронізації залежить якість функціонування мережевої синхронізації в мультисервісній макромережі.

Підвищення сталості мережевої синхронізації можливо за рахунок використання механізму динамічної адаптації “логічного” дерева синхронізації. Цей

механізм дозволяє залежно від зміни ситуації на мережі формувати оптимальне для даної ситуації дерево синхронізації.

Реалізація даного механізму є найбільш ефективною при використанні мережевої синхронізації замкнутої топології. Проте наявність замкнутих топологічних структур пов'язана з можливою появою петель синхронізації, наприклад, на ділянках синхронної цифрової ієрархії в мультисервісній мережі. Виникнення петель синхронізації призводить до ряду проблем, зокрема до погіршення характеристик сигналу синхронізації за рахунок присутнього позитивного зворотного зв'язку, появи в мережі короточасних або тривалих збоїв, іноді з випадковим періодом тривалості, причину або первинне джерело яких дуже важко виявити.

Тому існує необхідність дослідження причин і умов появи петель синхронізації в замкнутих фрагментах складних мереж, а також методів, що дозволяють визначати і запобігати виникненню петель на етапах проектування і експлуатації.

Для створення механізму динамічної адаптації дерева синхронізації необхідно доопрацювати існуючі алгоритми функціонування мережевих вузлів й протоколів взаємодії між ними.

Для прийняття рішень за оцінкою якості функціонування мережевої синхронізації необхідне здобуття залежності сталості функціонування мережевої синхронізації від сукупності параметрів таких, як інтенсивність потоку відмов і відновлень, топології мережі, ефективності планування, алгоритмів функціонування мережевих елементів. Таким чином, необхідна розробка методики аналізу функціонала, для якого в якості незалежних функцій використовуються функціональні залежності між параметрами, приведеними вище.

Дисертаційна робота, яка присвячена вирішенню задачі підвищення сталості функціонування мережевої синхронізації шляхом розробки механізму динамічної адаптації дерева синхронізації і методики визначення значень узагальненого функціонала надійності та сталості мережевої синхронізації, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в рамках Закону України “Про телекомунікації”, діяльності Українського науково-дослідного інституту зв'язку, річних планів наукової, науково-технічної та інноваційної діяльності Державного університету телекомунікацій на 2016 та 2018 роки. Дослідження проведено в межах науково-дослідної роботи (№ 0114U000757) “Система управління телекомунікаційною мережею”.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення сталості мережевої синхронізації шляхом розробки інформаційної технології динамічної адаптації дерева синхронізації, що дозволяє забезпечити працездатність мережевої синхронізації при збільшенні зв'язності мережі і значному збільшенні кількості аварійних ситуацій в мультисервісній макромережі.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні завдання:

1. Проведення аналізу працездатності існуючих топологічних структур з врахуванням дії на них сумарного потоку відмов і відновлень.
2. Розробка методу визначення сталості функціонування мережевої синхронізації з врахуванням інтенсивностей потоків відмов і відновлень, топології мережі й алгоритмів функціонування мережевих елементів.
3. Удосконалення методу аналізу працездатності фрагмента мережі синхронізації довільної топології.
4. Удосконалення методу динамічної адаптації дерева синхронізації в мережах синхронної цифрової ієрархії.
5. Удосконалення методу переконфігурування мережевої синхронізації в мережах IP/MPLS.
6. Розробка системи автоматизованого проектування, що дозволяє аналізувати існуючі й планувати нову мережеву синхронізації, з використанням запропонованих топологічних структур і механізму формування динамічної адаптації дерева синхронізації.

Об'єктом дослідження є процес підвищення сталості функціонування мережевої синхронізації в мультисервісній макромережі.

Предметом дослідження є алгоритми функціонування й протоколи взаємодії мережевих елементів синхронізації, а також типові топологічні структури мережевої синхронізації в мультисервісній макромережі.

Основні методи дослідження. Вирішення поставлених завдань здійснювалося за допомогою математичного аналізу із застосуванням теорії графів, методу аналізу марковських процесів з дискретними станами і безперервним часом; методу аналізу структурної надійності; методу чисельного вирішення диференціальних рівнянь; методу об'єднання простих ланцюгів з врахуванням ефекту поглинання; методи теорії кінцевих автоматів і методів лінійного програмування.

Підтвердження правильності вирішення поставлених завдань було виконане за допомогою методів прямого машинного моделювання основних положень і висновків.

Для всіх розроблених алгоритмів, а також імітаційного моделювання фрагментів мережі синхронізації було використано пакет Simulink програми Matlab.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. **Вперше розроблено метод** визначення сталості функціонування мережевої синхронізації з врахуванням інтенсивностей потоків відмов і відновлень, топології мережі й алгоритмів функціонування мережевих елементів, який на відміну від існуючих дозволить підвищити сталість мережевої синхронізації, завдяки зменшенню ймовірності втрат пакетів в мультисервісній макромережі;

2. **Удосконалено метод** аналізу працездатності фрагмента мережі синхронізації довільної топології і протоколів взаємодії між мережевими елементами для формування дерева синхронізації, що дозволяє запобігати появі часових петель в замкнутих топологічних структурах шляхом зміни пріоритетів і введення механізму програмованої затримки в алгоритм формування повідомлень про статус синхронізації;

3. **Удосконалено метод** динамічної адаптації дерева синхронізації в мережах синхронної цифрової ієрархії, реалізація якого, на відміну від існуючих, можлива на основі механізму динамічного переконфігурування пріоритетів, що привласнюються вхідним інтерфейсам мережевих елементів синхронізації. Цей

механізм передбачає набір правил, за якими здійснюється переконфігурування дерева синхронізації при виникненні аварійних ситуацій або ситуацій, що призводять до зміни значень якості сигналу синхронізації.

4. Удосконалено метод переконфігурування мережевої синхронізації в мережах IP/MPLS, який на відміну від відомих заключається у врахуванні сталості та живучості мережі синхронізації, він відхиляє канали без достатніх ресурсів, які не відповідають обмеженням або сформованій політиці.

Достовірність отриманих результатів досягається завдяки коректному використанню методів досліджень і математичного апарату. Адекватність вибраних моделей підтверджується узгодженістю між результатами аналітичних досліджень, імітаційного моделювання, а відповідність висновків витікає зі змісту роботи.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблений метод визначення сталості функціонування мережевої синхронізації з врахуванням інтенсивностей потоків відмов і відновлень, топології мережі дозволить підвищити сталість мережевої синхронізації на 15%, завдяки зменшенню ймовірності втрат пакетів в мультисервісній макромережі.

2. Удосконалений метод аналізу працездатності фрагмента мережі синхронізації довільної топології і протоколів взаємодії між мережевими елементами для формування дерева синхронізації, що дозволяє запобігати появі часових петель в замкнених топологічних структурах шляхом зміни пріоритетів і введення механізму програмованої затримки в алгоритм формування повідомлень про статус синхронізації;

3. Встановлено, що використання методу динамічної адаптації дерева синхронізації на основі замкнутої топології є доцільнішим ніж використання існуючих алгоритмів на даній топології та дозволить на 25% збільшити надійність та сталість мережі при виникненні аварійних ситуацій під час надання послуг.

4. Удосконалений метод переконфігурування мережевої синхронізації в мережах IP/MPLS дозволить збільшити ефективність планування та використання алгоритмів функціонування мережевих елементів з урахуванням імовірнісних характеристик подій, що відбуваються в мережі синхронізації на 10-13%.

5. Якість функціонування фрагмента мережі синхронізації, в якому мережні елементи функціонують за алгоритмом з динамічною адаптацією дерева синхронізації може досягати якості функціонування фрагмента з ідеальним алгоритмом, тобто може бути досягнута теоретична межа якості функціонування.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у Державному підприємстві «Науковий центр точного машинобудування» Державного космічного агентства України (акт впровадження № 013 від 4.04.2018 р.), ТОВ "Світ-ІТ", (акт впровадження № 1211-19 від 11.12.2019 р.), у навчальному процесі в Київському національному університеті будівництва і архітектури (Довідка про впровадження від 25.09.2020 р. № 17).

Практичні результати підтверджуються актами впровадження, які приведені в Додатках до дисертаційної роботи.

Особистий вклад автора. Результати, що становлять основний зміст роботи, отримані автором самостійно. Основні наукові результати дисертації отримані здобувачем особисто, опубліковано в [1] - визначено залежність надійності типових топологічних фрагментів мережевої синхронізації від сумарного потоку відмов і відновлень та обраної топології; [2] - визначено узагальнений функціонал надійності та сталості мережевої синхронізації, що визначає залежність надійності мережевої синхронізації від функціональних залежностей між інтенсивностями потоків відмов і відновлень, топології мережі, ефективності планування, алгоритмів функціонування мережевих елементів; [3] - отримано значення теоретичної межі для якості функціонування типових фрагментів мережевої синхронізації; [4, 5] - розроблено механізм формування динамічної адаптації дерева синхронізації, на основі замкнутої топології; [6] - розроблено алгоритм функціонування мережевого елементу, що дозволяє запобігати появі петель в замкнутих топологічних структурах шляхом зміни пріоритетів на основі подій, що відбуваються в мережі синхронізації; [13] - розроблено показники стабільності сигналів синхронізації для мереж мобільного зв'язку 4G; [15] - розроблено узагальнюючий алгоритм аналізу працездатності фрагмента мережі синхронізації довільної топології.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень представлені на наукових і науково-технічних конференціях і семінарах: Регіональна міжнародна науково-технічна конференція МСЕ для країн Європи і СНД «Перспективы предоставления услуг на основе сетей пост-NGN, 4G и 5G. Организационные и технические решения по их построению и защите», 7-9 червня 2017 р. (м. Київ, Україна), X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатизації», 12-13 квітня 2018 р. (м. Київ, Україна), Регіональний семінар Міжнародного союзу електрозв'язку для стран Європи та СНД «Цифровое будущее на основе 4G/5G», 14-16 травня 2018 р. (м. Київ, Україна), VI Міжнародна науково-технічна конференція студентства та молоді «Світ телекомунікації та інформатизації», 17 травня 2018 р. (м. Київ, Україна), 6-а Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективні напрями захисту інформації», 2-6 вересня 2020 р. (м. Одеса, Україна).

Публікації. Основні положення та зміст дисертації відображено в 19 наукових публікаціях: 11 наукових статях (3 з яких одноосібні [3, 12,13]), одна опублікована у виданні, що індексується в наукометричній базі Scopus [16], одна у зарубіжному виданні [14], одна у виданні держави, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку [18] та у фахових виданнях ДАК України [2,10,11,15,17] та в 8 тезах і матеріалах доповідей на конференціях.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 223 сторінок друкарського тексту, із них 8 сторінок анотації, 212 сторінок основного тексту у тому числі містить 63 рисунків та 4 таблиці, список використаних джерел із 101 найменування на 10 сторінках та 14 сторінок додатків.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ МЕРЕЖЕВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ В СУЧАСНІЙ МУЛЬТИСЕРВІСНІЙ МАКРОМЕРЕЖІ

Метою даного розділу є дослідження основних принципів побудови мережевої синхронізації в сучасних мультисервісних макромережах. Розглянуто загальні властивості, основні принципи побудови й функціонування мережевої синхронізації в мережах синхронної цифрової ієрархії та мережах пакетної технології IP/MPLS. Проведено аналіз існуючих типів мережних елементів мережевої синхронізації в мережах синхронної цифрової ієрархії та мережах пакетної технології IP/MPLS. А також в даному розділі уточнена і сформульована наукова задача дослідження яка полягає у необхідності розробки методів підвищення сталості мережевої синхронізації в сучасній мультисервісній макромережі за рахунок створення механізму динамічної адаптації дерева синхронізації до різних станів макромережі.

Огляд існуючих нормативних документів та публікацій щодо існуючих концепцій побудови та використання мережевої синхронізації, а також систематизація матеріалу дозволяє сформулювати напрямок подальших досліджень.

1.1. Перехід до мультисервісних макромереж

Результатом еволюції телекомунікаційної індустрії з'явився перехід від телекомунікаційної мережі до Глобальної інформаційної інфраструктури, від телекомунікаційних послуг до інфокомунікаційних послуг. На сьогодні інформаційного буму набувають не лише послуги високошвидкісного доступу до мережі, але і інформаційного наповнення цих послуг, так звані контент - послуги.

Розвиток інфокомунікаційних послуг вимагає вирішення завдань ефективного управління інформаційними ресурсами з одночасним розширенням функціональності телекомунікаційних мереж. Ідея об'єднання телефонних мереж, мобільного зв'язку, Internet, отримала свій розвиток в концепції NGN (Next Generation Network), в основу якої був покладений принцип розділу функцій перенесення і комутації, функцій управління викликом і функцій управління послугами.

Сьогодні прийнято керуватися загальним визначенням Next Generation Network, наведеним в рекомендації Y.2001 Міжнародного союзу електрозв'язку (International Telecommunication Union ITU): «NGN – мережа з комутацією на базі пакетів, яка здатна надавати телекомунікаційні послуги і можливість використовувати декілька широкосмугових, забезпечуючих якості обслуговування транспортних технологій, і в якій функції, що відносяться до служб, незалежні від технологій, що розташовуються нижче і відносяться до транспортування. Вона гарантує вільний доступ для користувачів за їх вибором до мереж і конкуруючих постачальників послуг. Вона підтримує узагальнену мобільність, яка забезпечуватиме можливість постійного і повсюдного забезпечення служб для користувачів».

NGN характеризується наступними фундаментальними аспектами [72]:

- пакетна передача;
- розподіл функцій надання послуг і оператора мережі;
- підтримка широкого спектру послуг, застосувань і технологій (включаючи зв'язок в реальному часі, потокову передачу, послуги мультимедіа тощо);
- широкосмуговий зв'язок з заданою наскрізною якістю і прозорими з'єднаннями;
- взаємодія з існуючими мережами через відкриті інтерфейси;
- рухливість абонента;
- необмежений доступ користувача до послуг різних провайдерів;
- єдині характеристики для однієї і тієї ж послуги, що надається різними провайдерами;
- конвергенція фіксованого і рухомого зв'язку.

На сьогодні є актуальною тенденція переходу на post-NGN. Мережі post-NGN характеризуються створенням єдиного інфокомунікаційного простору, взаємопроникнення ідей та технологій автоматизації та телекомунікацій.

Передумовами такого переходу є: - насичення ринку телекомунікацій за кількістю користувачів та спектру послуг; - об'єднання телекомунікаційних технологій в одній мультисервісній макромережі; - збільшення кількості мобільних користувачів; - активне проникнення веб-технологій до інфраструктури населених пунктів (“розумне” місто, “розумний” дім); - розвиток автоматизації та комп'ютеризації транспортних засобів, медицини, засобів моніторингу.

Сучасна мережа – складна система з великою кількістю варійованих параметрів. Задачею post-NGN є штучно застосовувати принципи самоорганізації при побудові та/або розвитку мережі. Зони застосування самоорганізації – мережі рівнів доступу та агрегації, однорангові та mesh-мережі, накладені мережі.

1.1.1. Поняття мультисервісної макромережі

Огляд сучасного стану й основних змін навантаження на оператора сервісів дозволяє визначити тенденції сьогодення, а саме запровадження сервісів MNP, IoT та сервісів віртуалізації з різкою зміною структури трафіку, що значною мірою впливатимуть на ринок сучасних сервісів [56].

Активний еволюційний розвиток технологій в найближчому майбутньому призведе до створення мультисервісних макромереж, метою яких буде вирішення принципово нових задач. Почнуть з'являтися нові вимоги та задачі, що вже зараз можна визначити й позначити. Згідно концепції «неруйнівного» переходу, подібні рішення повинні дозволяти частково переводити окремі сегменти на нові технології без кардинальної зміни всієї структури мережі [1-3].

Аналіз сучасного стану мереж зв'язку дозволяє визначити передумови створення мультисервісних макромереж:

1. З розвитком мобільних мереж та їх адаптацією до нових пристроїв та послуг до них висуваються нові та найрізноманітніші вимоги;
2. Підхід «одна технологія для всіх» навряд чи буде ефективною для забезпечення зростаючого числа різноманітних потреб з боку бізнесу, суспільства і окремих користувачів;

3. Прозора інтеграція існуючих та нових технологій буде сприяти підвищенню якості користувацького досвіду і появи цілого ряду нових послуг;

4. Активний розвиток та функціонування технологій, що з'єднують суспільство в єдиному просторі, сприяє і веде до створення мультисервісної макромережі оператора.

Згідно визначень, мультисервісна мережа – це єдина телекомунікаційна структура, що здатна передавати різну інформацію (голос, відео, данні) зі швидкістю, що перевищує в десятки-сотні разів існуючі швидкості передачі даних [55], а макромережа формується зі спеціалізованих мереж для можливості надання різних сервісів оператора зв'язку.

Основна відмінність мультисервісних макромереж від традиційних мереж в тому, що вся інформація, яка циркулює в мережі, розбита на дві складові: сигнальна інформація, що забезпечує комутацію абонентів і надання послуг; та безпосередньо дані користувачів, які містять корисне навантаження, призначену абоненту (голос, відео, дані). Шляхи надходження сигнальних повідомлень і навантаження користувачів можуть не співпадати. На рис. 1.1 показана загальна архітектура мультисервісної макромережі [3].

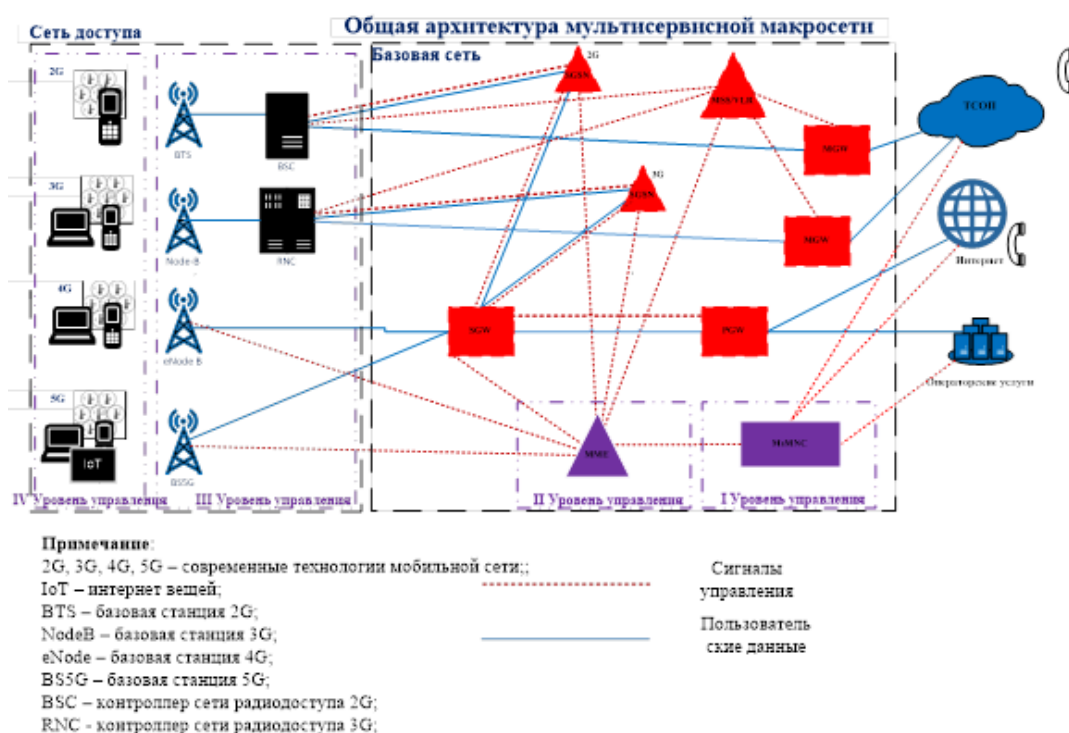


Рис.1.1. Загальна структура мультисервісної макромережі.

В даному дисертаційному дослідженні розглядається один із варіантів мультисервісної макромережі – це мультисервісна макромережа мобільного оператора сервісів (рис. 1.2).

З розвитком мобільних мереж та їх адаптацією до нових пристроїв та послуг - від інтелектуальних електролічильників, автомобілів та підключених побутових пристроїв до промислових об'єктів – до них висуваються нові та найрізноманітніші вимоги. У зв'язку з цим, підхід «одна технологія для всіх» навряд чи може бути ефективною для забезпечення зростаючого числа різноманітних потреб з боку бізнесу, суспільства і окремих користувачів. Технології продовжать свій розвиток у напрямку до більш високої продуктивності та все більшої кількості можливостей. На додаток до існуючих технологій радіодоступу, з'являються також нові технології, які дозволять вирішувати ті завдання, які вирішити за допомогою 2G / 3G / 4G неможливо [56].

Сучасний стан розвитку мереж зв'язку веде до різкої зміни структури трафіка через впровадження таких сервісів як інтернет речей, перенос номерів та сервісів віртуалізації, що вплине на ринок сучасних послуг зв'язку. А саме, як наслідок цього, відбудеться розширення функцій мобільних мереж.

Сьогодні, як ніколи, на ринку мобільних послуг спостерігається тенденція до постійного збільшення кількості користувачів, наприклад, тільки в третьому кварталі 2017 року кількість підключень до мережі 4G збільшилося на 160 млн, досягнув загальношвидкісного показника в 1,5 млрд. За прогнозами, до 2022 року на планеті буде 29 млрд. підключених пристроїв, 18 млрд. з яких — це пристрої інтернет речей. Це говорить про те, що на кожного активного користувача приходить одразу декілька "розумних" речей. Для їх ефективною та надійної роботи необхідно буде щось більш могутнє, чим високошвидкісна мережа [1, 2].

Згідно з прогнозами, в результаті такого розвитку вже до 2020 року з'явиться те, що називають 5G [49], тобто набір органічно інтегрованих технологій радіодоступу. Враховуючи, що технологія 4G - це еволюційний крок у розвитку технологій мобільного зв'язку, як, і розвиток HSPA і WI-Fi, в найближчому майбутньому вона не втратить своєї актуальності. Навіть GSM буде відігравати

важливу роль, продовжуючи залишатися домінуючою технологією в багатьох куточках земної кулі і після 2020 року. Тому мова йде не про заміну існуючих технологій на 5G, а, скоріше, про їх розвиток і доповнення новими технологіями радіодоступу, призначеними для конкретних сценаріїв та певних цілей.

Прозора інтеграція існуючих та нових технологій буде сприяти підвищенню якості користувацького досвіду і появи цілого ряду нових послуг [56].

Основні вимоги до макромережі спрямовані на досягнення наступних цілей:

- збільшення в рази максимальної швидкості передачі даних;
- забезпечення доступу в мережу Інтернет у будь-якій точці;
- перехід на хмарну інфраструктуру;
- використання масштабованої та економічної транспортної мережі;
- забезпечення гарантованої якості (QoS) для будь-яких видів послуг.

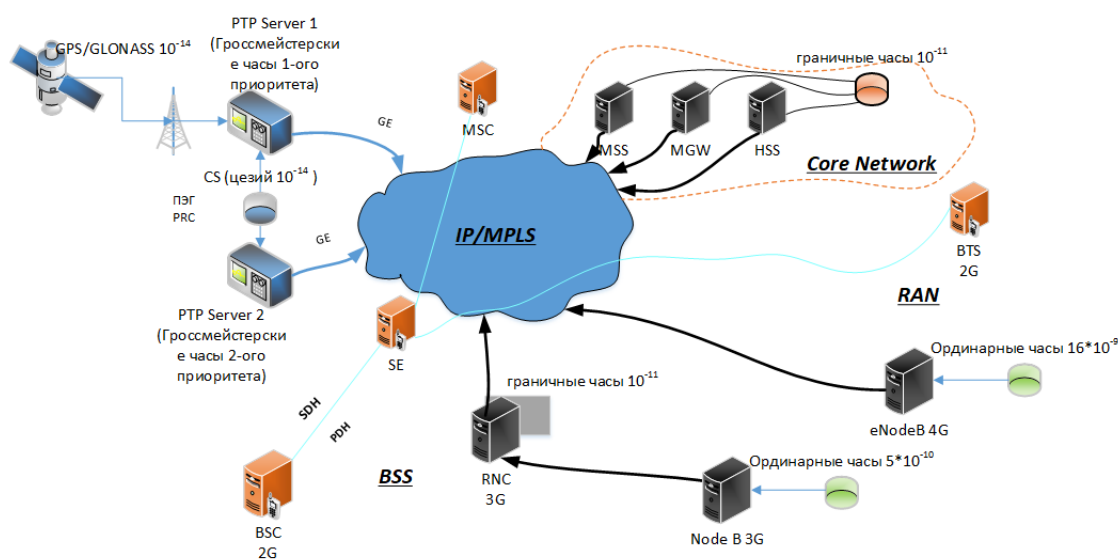


Рис. 1.2. Макромережа мобільного оператора.

1.2. Аналіз принципів побудови мережевої синхронізації

1.2.1. Вимоги до транспортної інфраструктури

Наразі для впровадження нових послуг потрібний відповідний розвиток мереж зв'язку і, зокрема, їх транспортної інфраструктури, на якій повинні базуватися

мережі наступного покоління. Отже, фундаментом post-NGN є мультипротокольна/мультисервісна транспортна мережа зв'язку на основі пакетної передачі даних, що забезпечує перенесення різнорідного трафіку з використанням різних протоколів передачі. До розширення поняття якості послуг post-NGN відноситься: - зміна структури та типів трафіка; - стійкість функціонування мережі з врахуванням оновлень; - показники якості обслуговування для нових типів трафіку; інформаційна безпека.

Сучасна транспортна мережа повинна забезпечувати економічно ефективну агрегацію будь-якого клієнтського трафіку і його надійну, високоякісну передачу каналами зв'язку. Технології, що базуються на принципах часового мультиплексування, основним представником яких є цифрова синхронна ієрархія SDH (Synchronization Digital Hierarchy), в даний час витісняються:

- на електричному рівні – технологіями Carrier Ethernet (інтерфейси E/FE, GE, 10GE, 40GE і 100GE) і MPLS-Transport Profile. Ці технології забезпечать широкі можливості для створення транспортних мереж з пакетною комутацією операторського класу, орієнтованих на встановлення з'єднань;

- на оптичному рівні – технологіями оптичної транспортної ієрархії OTN (Optical Transport Hierarchy), схожими на SDH, але на відміну від неї забезпечуючими прозорість передачі і крос-комутації сукупності TDM (Time Division Multiplexing-мультиплексування з розподілом за часом) – і пакетного трафіку в будь-якому поєднанні з подальшою їх передачею каналами систем з спектральним ущільненням каналів – WDM (Wavelength Division Multiplexing). Сервісні мережі IP/MPLS можуть надавати послуги, з'єднуючись між собою, з системами опорної мережі операторів фіксованого і мобільного зв'язку, з точками присутності провайдерів послуг, а також з системами широкосмугового доступу безпосередньо або поверх транспортної мережі операторського класу. Пакетні комутатори з функціональністю Carrier Ethernet/T-MPLS і MPLS-TP стають важливим елементом транспортного рівня мережі, взаємодіючи поверх існуючих мереж SDH і прозорого і гнучкого фотонного рівня OTN/WDM. Гнучкий

автоматизований WDM-фотоний рівень забезпечується реконфігурованими оптичними вузлами вводу/виводу.

Процеси переходу до технології IP (Internet Protocol) стимулювали дослідження щодо збільшення пропускної спроможності транспортних мереж як для традиційного (TDM), так і для пакетного трафіку. Для існуючих систем синхронної транспортної ієрархії SDH існують стандартні швидкості передачі від STM-1 (155 Мбіт/с) до STM-256 (40 Гбіт/с), що збільшуються від рівня до рівня з коефіцієнтом 4. Для систем оптичної транспортної ієрархії є стандартні швидкості передачі від OTU-1 (2,5/2,7 Гбіт/с) до OTU-3 (40/43 Гбіт/с), які також збільшуються від рівня до рівня з коефіцієнтом 4. Швидкість передачі за технологією Ethernet зростала з коефіцієнтом 10 і досягла на сьогоднішній день 100 Гбіт/с. Конвергенція цих технологій почалася зі швидкостей передачі 10G. Дослідження останніх років показали, що ця конвергенція розвивається у напрямі швидкостей передачі 40 Гбіт/с і 100 Гбіт/с. Запропоновані спочатку для центрів збору і обробки даних, а також для корпоративних комп'ютерних мереж системи 40GE, ймовірно, широко використовуватимуться і на рівні транспортних мереж з впровадженням коефіцієнта 4 (40GE по відношенню до 10GE). На магістральному рівні мереж буде реалізована швидкість передачі 100GE/OTN з коефіцієнтом 2,5 по відношенню до впроваджуваного сьогодні рівня 40GE/OTN.

Для нових протоколів і інтерфейсів 40G і 100G в даний час розробляються стандарти:

- 40GE для застосувань, пов'язаних з взаємодією серверів (server-to-server), а також серверів і пакетних комутаторів (server-to-switch);
- 100GE для застосувань, пов'язаних з взаємодією пакетних комутаторів (switch-to-switch), включаючи з'єднання «точка-точка» між мережними кластерами тощо.

Вибір нових технологій і рішень, включаючи нові методи лінійного кодування, дозволять найефективніше передавати високошвидкісні цифрові потоки 40 Гбіт/с і 100 Гбіт/с за каналами систем WDM, що працюють сьогодні в основному на швидкостях не вище 10 Гбіт/с (з розрахунку на кожен оптичний канал). Оптичні

транспортні мережі (Optical Transport Network – OTN) будуються з набору оптичних мережних елементів, з'єднаних оптоволоконними каналами, здатними забезпечити такі функції, як транспорт, мультиплексування, маршрутизація, управління, контроль і живучість каналів, по яких передаються сигнали.

Відмінною характеристикою OTN є її здатність транспортувати будь-який цифровий сигнал незалежно від специфіки клієнта. У OTN, як і в SDH, визначена ієрархія мережі, звана ієрархією оптичної передачі (Optical Transport Hierarchy – OTH). Оптична транспортна ієрархія (Optical Transport Hierarchy, OTH), як визначено в Рекомендаціях ITU-T G.709, G.798, передбачає методи розміщення, мультиплексування і управління мережами, що підтримують різні клієнтські сигнали в їх натуральному форматі, незалежно від типів використовуваних протоколів. В структурі Optical Data Unit (ODU) можна розмістити декілька існуючих фреймів потоків даних, а потім об'єднати їх з іншими сигналами і далі передавати і управляти в єдиному стилі з єдиною функціональністю, аналогічною тій, що прийнята в системах SDH.

Перша версія OTH була орієнтована переважно на клієнтські сигнали SDH. Тому спочатку в рекомендації G.709 були визначені лише 3 фіксованих типа ODU-контейнерів: ODU1, відповідний рівню STM-16 технології SDH, ODU2, відповідний рівню STM-64 і ODU3, відповідний рівню STM-256.

В даний час структури OTH розглядаються з врахуванням передачі таких сигналів в, як:

- Ethernet 1GE, 10GE WAN/LAN, 40GE, 100GE;
- OTH 2,5G, 10G, 40G, 100G;
- SDH 2,5G, 10G, 40G;
- FC 1G, 2G, 4G, 8G (10G).

Технологія OTN може використовуватися для створення конвергентних транспортних платформ, що забезпечують прозорість при передачі трафіку, що відноситься до будь-яких послуг поверх оптичних каналів WDM-систем, оскільки має власний окремий заголовок, схожий на заголовок в SDH і що дає можливість контролювати мережу і управляти нею. Це дозволяє підтримувати прозору спільну

передачу сукупності асинхронного (пакетного) і синхронного (TDM) трафіку в будь-яких поєднаннях.

Крім того, системи OTN дозволяють виявити і локалізувати відмови в мережі WDM, значно підвищуючи якість наданих послуг. OTN – єдина технологія, яка може передавати широко поширені в IP/Ethernet клієнтські сигнали 10GE LAN PHY, а також забезпечити спільну передачу синхронних і асинхронних сигналів поверх одного оптичного каналу системи WDM. У перспективі технологія OTN може стати універсальним прозорим електричним рівнем оптичних магістральних мереж зв'язку.

Виходячи з вищевикладеного, можливо зробити висновок про те, що високі темпи розвитку телекомунікаційних мереж, впровадження інфокомунікаційних послуг, які вимагають збільшення пропускної спроможності мережі передачі даних, використання модернізованих IP-протоколів для підтримки бездротових технологій, надання послуг віртуальних приватних мереж (VPN) – все це формує високі вимоги до продуктивності, гнучкості, адаптивності, вартості і якості сучасних транспортних мереж.

Визначено наступні вимоги, яким повинна відповідати сучасна транспортна пакетна мережа [1, 51, 57]. Транспортна пакетна мережа – це така мережна архітектура, яка володіє наступними характеристиками: 1) розташовується нижче за рівень IP-услуг і вище за рівень фізичного середовища передачі оптичної транспортної мережі. Ця архітектура розробляється відповідно до вимог, що пред'являються до корисного навантаження пакетної мережі і до статистичного мультиплексування; 2) ядро мережі дозволяє надавати мультисервісні послуги; 3) забезпечує традиційні переваги оптичної передачі, у тому числі: доступність і відмовостійкість; ефективний механізм управління пропускною спроможністю і трафіком, а також масштабованість.

Проводячи порівняння між мережами, що базуються на технології часового розділення каналів, і мережами з комутацією пакетів, необхідно зауважити наступне.

Традиційні мережі, засновані на синхронній цифровій ієрархії, мають високу вартість, і низьку адаптивність. Висока вартість обладнання SDH і його

обслуговування є істотними недоліками даної технології. Тим часом, традиційні пакетні мережі, неорієнтовані на з'єднання в змозі гарантувати задану якість деяких послуг. Технологія часового мультиплексування непридатна для надання мультисервісних послуг із-за її низької ефективності [57].

Формування транспортних мереж нового покоління на базі пакетних технологій створюють ряд серйозних проблем. Основою даних проблем є протиріччя між необхідністю дотримання чіткої черговості при передачі поточкових повідомлень і базовим принципом пакетної технології, що полягає в недотриманні черговості при здобутті пакетів. Таким чином, стає актуальним рішення задачі забезпечення передачі даних в мережах з комутацією пакетів з тією ж якістю, яку забезпечують мережі цифрової синхронної ієрархії. Це фактично означає необхідність емуляції синхронного комутованого каналу мережею з комутацією пакетів. Крім того, така транспортна мережа має бути прозорою для будь-якого типа термінального обладнання, включаючи SDH, що наводить до необхідності забезпечення сигналами синхронізації із заданою якістю крайового обладнання SDH. Ця мета може бути досягнута створенням загальної мережевої синхронізації, яка синхронізуватиме як обладнання SDH, так і обладнання пакетної мережі. При створенні цієї мережі необхідно враховувати той факт, що топологічна структура пакетних мереж набагато складніша за традиційні мережі з комутацією каналів. Наприклад, мережі цифрової синхронної ієрархії як правило є багатокільцевими структурами, а пакетні мережі мають решітчасту або зіркоподібну топологію. Таким чином, для забезпечення заданої якості функціонування транспортної мережі нового покоління необхідно забезпечити надійну доставку сигналів синхронізації до мережного обладнання, що досягається оптимальним плануванням мережевої синхронізації [1, 14, 56, 59, 65, 66].

1.2.2. Мережева синхронізація мультисервісної макромережі

Необхідною умовою для забезпечення покриття мобільного зв'язку та якості сервісів, що надаються є питання синхронізації транспортних мереж.

Необхідність забезпечення сигналами точного часу вкрай важлива, а саме: - для забезпечення технологічності функціонування рівня сервісів інформаційних технологій; - якість синхронізації впливає на ресурси мережі, оскільки на пряму вказує на кількість помилок; - для обліку мережевих ресурсів виконується синхронізація всіх пристроїв на мережі. А також необхідною вимогою до реалізації системи управління розподілом мережевих ресурсів мультисервісної макромережі є синхронізація мережевих вузлів від єдиного джерела.

1.2.2.1. Функціонування мережевої синхронізації в мережах синхронної цифрової ієрархії

Синхронізація при синхронному режимі передачі (СРП). До технологій з СРП, який ще називають режимом з комутацією каналів, відносяться цифрові системи передавання плезіохронної цифрової ієрархії (ПЦІ) та синхронної цифрової ієрархії (СЦІ), а також цифрові автоматичні телефонні станції (ЦАТС). Цьому режиму притаманна постійна швидкість передачі (CBR – Constant Bit Rate), циклічна структура сигналу та періодична “циклічна” підтримка “постійного” з’єднання, а також підтримання “прозорого” з’єднання протягом усього сеансу зв’язку [5].

Характерне навантаження мереж з СРП - це сигнали телефонії, звукового мовлення та інші сигнали реального часу, які складають головну частину для розрахунків якості передачі. Однією із важливіших властивостей мереж з СРП є досить високі вимоги до мережевої синхронізації, тобто підтримки високих показників довготривалої точності та стабільності тактових сигналів в різних точках мережі з метою зменшення розходжень частот генераторів і таким чином зменшення частоти проскакувань (збоїв) циклів. Ці збої неминуче виникають внаслідок розходження частот при наявності двох або більше генераторів на мережі.

Мережі з СРП є цифровими системами передавання, що розділяють на [5]:

- ПЦІ та ЦАТС;
- СЦІ та ЦАТС.

У випадку ПЦІ – ЦАТС потрібна синхронізація тільки ЦАТС.

Мережі ПЦІ базуються на вирівнюванні за бітами, що дозволяє мультиплексувати асинхронні компонентні сигнали зі значними зсувами частоти. Тому мережі передачі ПЦІ не потребують синхронізації [8]. Кожен пристрій синхронізації не залежить один від одного, але їх частоти утримуються близькими до номінальних значень в рамках встановлених стандартом припустимих інтервалів.

Для сигналів синхронізації, що містяться в цифрових сигналах, мережі передачі ПЦІ є прозорими [1-3]. Метод вирівнювання за бітами дозволяє передавати інформацію про синхронізацію, яка міститься в цифровому сигналі, по мережі, в якій пристрої синхронізації асинхронні.

У випадку СЦІ – ЦАТС потрібна синхронізація СЦІ та ЦАТС.

Найкращим та прямим методом передачі сигналу синхронізації в мережі СЦІ є передача безпосередньо у групових, лінійних сигналах STM-N. Тактовий сигнал, який виокремлений із сигналів STM-N, має найкращу якість, яку можливо досягнути в наш час [8, 9].

В мережах ПЦІ використовуються лише лінійні структури для передавання сигналів, а в мережах СЦІ – кільцеві та комірчасті, в яких значно підвищується ймовірність виникнення петель.

Синхронізація при асинхронному режимі передачі (АРП). За визначенням, АРП або режим із комутацією пакетів – це такий режим, в якому інформація передається в чарунках чи пакетах фіксованої або змінної довжини з відповідними позначками, які не обов'язково періодичні в часі [6, 8, 9]. До технологій з АРП відносяться: Ethernet, IP/MPLS (Internet Protocol/ MultiProtocol Label Switching).

Характерне навантаження мереж з АРП, особливо на перших стадіях розвитку, це сигнали даних – сигнали відносного часу.

Сучасний стан розвитку транспортних мереж характеризується впровадженням методів АРП на всіх ділянках мережі: від доступу до магістрального рівня. Мережі з АРП мають стати універсальними, мультисервісними (тобто такими, що можуть одночасно використовуватися для передавання мови, аудіо та відео, а також даних з різними протоколами) із гнучкими механізмами надання послуг та використання смуги передавання.

Для планування мереж з АРП синхронізація є досить важливим аспектом. Але це не зовсім те саме, що синхронізація в мережах з СРП. В мережах з АРП передавання всередині мережі є асинхронним, але прив'язка до часу вхідних та вихідних стиків необхідна.

На даний час все частіше виникає потреба синхронізації мереж з АРП [6].

Проблеми співіснування двох основних режимів передачі СРП та АРП найбільш яскраво визначилися в таких питаннях як [6]:

- перетворення форматів сигналів;
- підтримання рівнів мережевої синхронізації;
- збереження часових параметрів сигналів;
- забезпечення якісних показників передачі (затримок, помилок та ін.);
- управління мережами з різними технологіями;
- обмін системами мережевої сигналізації.

Аналізуючи сценарії взаємодії мереж [24, 52] з використанням СРП та АРП, які було розглянуто в багатьох нормативних документах та міжнародних рекомендаціях, приходимо до висновку, що всі варіанти взаємодії можна поділити за такими напрямками:

- передача навантаження АРП по трактам СРП (АРП через СРП), як приклад, передача чарунк АТМ або пакетів Ethernet по трактам СЦІ, ПЦІ;
- організація трактів СРП у середовищі АРП (СРП через АРП), наприклад, емуляція каналів E12, трактів ПЦІ або СЦІ у середовищі АТМ або мережі Ethernet.
- з'єднання “островів” СРП та АРП на рівні стандартних транспортних інтерфейсів для організації “прохідних” з'єднань користувачів.

Не зважаючи на те, що ідеологія розвитку телекомунікацій направлена, головним чином, на мережі з комутацією пакетів (АРП), головним форматом, який покладений в основу транспортних мереж, залишається все ж таки СЦІ, або IP, Ethernet у оболонці СЦІ.

Розвиток від мереж з комутацією каналів до мереж з комутацією пакетів висуває більш складні вимоги до апаратного забезпечення сучасних транспортних систем.

Властивості синхронізації СЦІ. Реальна мережа, зазвичай, містить області з різними топологіями [13]. Вибір тієї чи іншої топології мережі визначається насамперед економічними вимогами, а також вимогами щодо надійності, живучості та сталості транспортних телекомунікаційних мереж [4]. Основні типові структури транспортних мереж наведено в таблиці 1.1 [3, 8, 9, 20, 55].

Таблиця 1.1.

Основні типові структури транспортних мереж

Топологія мережі	Ранг вузла, $r(N)$	Кількість ребер, R	Зв'язність мережі, h
Деревоподібна			
зіркоподібна (радіальна)	$\rho \geq 1$	$R = N - 1$	$h = 1$
вузлова (радіально-вузлова)	$\rho \geq 1$	$R = N - 1$	$h = 1$
лінійна	$\rho = 1$	$R = N - 1$	$h = 1$
Сіткоподібна			
плоска (планарна)	$\rho \geq 2$	$R = 2(N - 1) - 1$	$h = 3$
неплоска (непланарна),	$\rho \geq 2$	$R = 2(N - 2)$	$h = 3$
радіально-петльова	$\rho > 2$	$R = 2(N - 1)$	$h = 3$
комірчаста	$\rho \geq 2$	$R \approx \rho \frac{N}{2}$	$h = 2$
Повнозв'язна	$\rho \geq 2$	$R = \frac{N(N-1)}{2}$	$h = N - 1$
Петльова	$\rho = 2$	$R = N$	$h = 2$

За ознаками транспортування доцільним є застосування виокремлених мереж, в яких передбачено процедуру міжстанційного, внутрішньостанційного розподілу сигналів корисного навантаження.

Частковим випадком мереж зв'язку загального виду – транспортних (первинних) мереж є мережа синхронізації, що основана на розподіленні сигналів синхронізації за певними маршрутами.

Основне завдання, яке повинна виконувати мережева синхронізації, полягає в забезпеченні сигналом синхронізації кожного вузла транспортної телекомунікаційної мережі, що досягається побудовою логічного дерева синхронізації на базі існуючої фізичної топології транспортної мережі [15, 16, 84, 85].

Архітектура мережі синхронізації залежить від обраного способу синхронізації. Існують два основні способи синхронізації: примусовий і взаємний [25]. В разі примусової синхронізації, яка називається також "ведучий -ведений" в мережі тактової синхронізації має бути присутнім основний (головний) задаючий генератор тактової частоти. В цьому випадку мережа тактової синхронізації може мати різну топологію, але дерево розподілу сигналу синхронізації в режимі номінального функціонування повинне мати ієрархічну структуру. Коренем дерева має бути основний задаючий генератор тактової синхронізації, а в гілках повинні розташовуватися ведені пристрої мережі тактової синхронізації [96, 99, 101].

Під номінальним функціонуванням розуміється набір дозволених станів, в яких може знаходитися мережа тактової синхронізації. Конкретний стан, в якому знаходиться мережа тактової синхронізації, визначається різними дестабілізуючими чинниками, що впливають на мережу. При деревовидному розподілі сигналу синхронізації всі вузли мережі повинні з максимальною точністю відстежувати сигнал синхронізації, що генерується головним джерелом опорного сигналу тактової синхронізації.

Однією з вимог, що пред'являються до дерева синхронізації, є можливість його перебудови при виникненні аварійної ситуації на лінії зв'язку або в мережному елементі [99, 100]. Ця перебудова не повинна погіршувати якість сигналу

синхронізації до неприйнятного рівня і, таким чином, впливати на працездатність транспортної телекомунікаційної мережі.

Перебудова дерева синхронізації може спричинити формування замкнутих траєкторій поширення сигналу синхронізації між вузлами мережі тактової синхронізації. Такі замкнуті траєкторії прийнято називати петлями синхронізації [20, 42, 43, 46]. В разі виникнення такої ситуації вузли синхронізації, що входять в петлю не мають матеріального джерела опорної частоти, що неминуче наводить до збільшення вірогідності прослизань.

Якість функціонування мережі тактової синхронізації залежить від характеристик джерела сигналу синхронізації, який використовується як задаючий генератор. Як задаючий генератор повинен використовуватися пристрій, що забезпечує автономність функціонування і найвищу точність і стабільність частоти (не гірше 10^{-11}). Основні вимоги, що пред'являються до даних пристроїв визначені в [87, 88, 93, 94 - 101].

Мережа тактової синхронізації є накладеної на фізичну топологію мережі передачі даних. Вимоги до надійності мережі тактової синхронізації залежать від вимог до транспортної мережі. Надійність мережі тактової синхронізації має бути, як мінімум, не гірше, ніж надійність самої транспортної мережі. Це обумовлено тим, що при виході з ладу мережі тактової синхронізації неможливо забезпечити задану якість функціонування мережі передачі даних. Однією з основних властивостей транспортних мереж наступного покоління є їх можливість, у разі потреби, здійснення гнучкої і швидкої перемаршрутизації трафіку (протягом 50 мс), що досягається використанням методів планування трафіку (Traffic Engineering). Використання цього механізму дозволяє формувати статичні маршрути проходження трафіку при виникненні аварійних ситуацій. Таким чином, при виникненні аварійної ситуації транспортна телекомунікаційна мережа перебудує маршрути проходження інформації, аби зберегти задану якість функціонування. У свою чергу і мережа синхронізації повинна забезпечити можливість перебудови дерева синхронізації з врахуванням зміни статичних маршрутів передачі трафіку.

Існує декілька способів вирішення цієї задачі. Перше рішення передбачає перебудову дерева синхронізації відповідно до статичних маршрутів транспортної мережі. Це означає попереднє планування можливих варіантів дерева синхронізації з врахуванням алгоритму функціонування мережних елементів мережі тактової синхронізації.

Друге рішення ґрунтується на створенні протоколів, що дозволяють обробляти інформацію про стан ліній і вузлів мережі тактової синхронізації, і поширювати дану інформацію по мережі синхронізації. При цьому підході кожен вузол володіє інформацією про стан мережі синхронізації і прийняття рішення є прерогативою цього вузла.

Перше і друге рішення даної задачі передбачають розподілене (децентралізоване) управління мережею синхронізації, причому, якщо в першому варіанті, здійснюється управління на основі еталонної моделі (заздалегідь визначеного плану), то другий варіант використовує управління на основі детермінованих правил прийняття рішень, закладених в алгоритмі функціонування вузла.

Третє рішення передбачає створення централізованої системи управління мережею тактової синхронізації, основу якої складає центральний вузол, обробляючий інформацію про стан мережі синхронізації. У функції даного вузла входять збір, обробка, вироблення рішень і трансляція цього рішення об'єкту управління з використанням архітектури "клієнт-сервер". Перевагою цього рішення є можливість оцінки фізичних характеристик сигналу синхронізації і вироблення команд управління на основі даних оцінок. Наприклад, пристрій контролю, що знаходиться на мережному вузлі, проводить вимір характеристики сигналу синхронізації, а центральний вузол отримує інформацію про проведений вимір, після чого виробляє управляюче рішення, що дозволяє або залишити тестоване джерело опорного сигналу синхронізації в якості задаючого генератора, або вибрати альтернативний. Недоліком цього рішення є збільшення обсягу переданого трафіку за рахунок передачі інформації управління.

Оптимальне рішення, як представляється авторів цієї роботи, повинне враховувати всі три підходи до рішення цієї задачі. Це інтегроване рішення передбачає формування чіткого плану побудови дерева синхронізації, що динамічно змінюється, за заздалегідь складеним сценарієм з можливістю виміру фізичних характеристик сигналу синхронізації і вироблення управляючих рішень на основі вимірів і з врахуванням плану синхронізації. Це напрям рішення задачі розроблюється в даний час найбільш передовими операторами телекомунікацій і виробниками телекомунікаційного обладнання.

Незалежно від вибраного варіанту основою побудови логічного дерева синхронізації є алгоритми функціонування мережних елементів мережі синхронізації.

1.2.2.2. Функціонування мережевої синхронізації в пакетних мережах

В даний час мережі операторів зв'язку в Україні стоять на порозі практичного впровадження мереж синхронізації, реалізованих на транспортній мережі IP / MPLS. За останні кілька років було проведено кілька тестувань і реалізовано кілька пілотних проектів. Були випробувані кілька протоколів і технологій.

На сьогоднішній день, на ринку телекомунікацій, досить нових ефективних методів для забезпечення синхронізації в мережах IP / MPLS: протоколи звірення часу NTP (Network Time Protocol) і PTP (Precision Time Protocol), а також технологія Sync-E (Synchronous Ethernet). Кожен з варіантів синхронізації пакетної мережі має як переваги, так і недоліки.

Тому доцільним в процесі планування такої мережі є розгляд комбінованого використання даних варіантів синхронізації мережі з комутацією пакетів на різних ієрархічних рівнях: основний мережі (ядра), агрегації і доступу. Також слід врахувати специфіку впровадження вузлів комутації наступного покоління з розподіленою архітектурою.

Порівняння різних методів синхронізації в мережах IP / MPLS. При виборі того чи іншого методу забезпечення синхронізації важливо розуміти їх можливості і обмеження. А саме:

- функціонуючий на фізичному рівні механізм Sync-E не залежить від завантаження мережі і дозволяє передавати сигнал синхронізації через транзитні пристрої, але забезпечує тільки частотну синхронізацію. Крім того, перехід на технологію Sync-E передбачає повну заміну обладнання IP / MPLS-мережі або його суттєве оновлення (і слід також врахувати, що не завершений процес стандартизації даної технології);

- працює на рівні каналу передачі даних протокол RTP забезпечує як частотну, так і тимчасову синхронізацію, але стабільність розповсюджуваного сигналу залежить від рівня завантаження мережі, а також від відстані між вузлами мережі і кількості переприйомів;

- працює на прикладному рівні протокол NTP широко використовується, як правило, для тимчасової синхронізації в пакетних мережах. Але в ряді рішень різних виробників обладнання, протокол NTP може бути використаний також і для частотної синхронізації. Наприклад, для синхронізації базових станцій мобільного зв'язку. Детально принципи синхронізації в пакетних мережах і відмінності в роботі протоколів звірення часу були представлені в публікаціях [32].

Звірення клієнта RTP з метою перевірки можливості використання цього протоколу для відновлення тактової частоти на перевалочному ділянці транспортної IP-мережі для синхронізації базових станцій дає кращі результати в порівнянні з сервером NTP, причому з істотним технологічним запасом [37, 39, 41 43]. Протокол NTP може бути альтернативою RTP для синхронізації, наприклад, базових станцій мобільного зв'язку, підключених по IP-мережі. Це може бути затребуване при наданні деяких послуг (наприклад, визначення місця положення абонента, що особливо актуально після введення в дію Національної версії 3.0 загальноканальної сигналізації №7).

Другою альтернативою, може бути тільки використання опорних частот від приймачів супутникових радіонавігаційних систем GPS або ГЛОНАСС (а також впроваджуваної системи Galileo в недалекому майбутньому) у кожній базовій станції мобільного зв'язку. На відміну від NTP, коли сервери часто працюють як

клієнти, а клієнти можуть працювати як сервери в режимі рівноправного обміну, мережу RTP суворо ієрархічна [42, 49, 50].

На вершині ієрархії синхронізації розташовують гросмейстерські годинники (grandmaster clock). Зазвичай їх підключають до зовнішнього джерела UTC (Universal Time Coordinated), як правило, до приймача GPS (ГЛОНАСС). Також вже зазначене обмеження RTP по відстані між вузлами мережі і кількості переприйомів також підлягає глибшому вивченню. В роботі [40] були представлені цікаві результати вимірювань параметрів стабільності при невеликій кількості переприймань, але на відстані кілька тисяч кілометрів.

Протокол NTP для мережі IP / MPLS та вузлів комутації з розподіленою архітектурою. Стандартними первинними компонентами мережі з розподіленою архітектурою є сервер, на рівні управління (MSC-S) і медіа-шлюз мобільного зв'язку (M-MGw), який знаходиться на рівні управління з'єднаннями. MSC-S обробляє сигналізацію мережі та інформацію для встановлення, відключення з'єднань і їх моніторингу. M-MGw займається обробкою і транспортом трафіку з'єднань, а також взаємодією із зовнішніми мережами, такими як телефонна мережа загального користування (PSTN), іншими мобільними мережами (PLMN) і міжнародними мережами. Як MSC-S (для трафіку сигналізації), так і M-MGw (для трафіку даних) здійснюють гнучкий контроль над транспортними технологіями мультимедійної передачі з ущільненням каналів (TDM), асинхронного режиму передачі (ATM) і IP / MPLS.

Необхідність забезпечення сигналами точного часу в цьому випадку вкрай важлива при взаємодії різних рівнів такої архітектури, а саме - для забезпечення технологічності функціонування рівня послуг IT при відповідній обробці повідомлень технічного обслуговування на рівнях управління викликами і з'єднань, а також для узгодженої передачі цих повідомлень по транспортній мережі IP / MPLS. Крім того, для узгодженої роботи білінгової системи з рівнем управління викликами також необхідно звірення шкал часу для коректного формування файлів CDR білінгу на вузлах мережі.

Мультисервісна мережа IP / MPLS може використовуватися для транспортної інфраструктури з набагато меншими витратами. Висока доступність мережі зв'язку забезпечується завдяки механізмам надмірності MGw, контролю та управління навантаженням, і використання механізмів перенаправлення трафіку в разі перевантажень мережі або відмови в вузлах мережі.

Загальна транспортна мережа IP / MPLS спочатку є більш ефективною, оскільки вона конфігурується для сумарного трафіку, кількість якого має зростати, а не трафіку підмножини послуг, який менш передбачуваний. Наприклад, транспортна мережа легко змінюється відповідно до ситуації, в якій можливе різке зростання кількості трафіку VoIP при заміні голосових послуг з комутацією каналів або послуг SMS послугами Push to Talk. Однак, в цьому випадку необхідно суворе узгодження шкал часу в вузлах і серверах мережі з маршрутизаторами транспортної мережі IP / MPLS. Поставлені завдання можуть вирішуватися за допомогою протоколу мережевого часу NTP [36, 37] або протоколу, РТР [37, 39, 41, 43].

В даний час найбільш поширений протокол NTP, на ринку пропонується досить широкий спектр пристроїв з його реалізацією і також можливостей використання високоточного підстроювання від супутникових радіонавігаційних систем (в переважній більшості - від американської GPS). Проведений моніторинг дозволив встановити ряд особливостей використання повідомлень протоколу NTP на транспортній мережі IP / MPLS. Завдяки можливості порівнювати шкали часу декількох територіально рознесених серверів NTP щодо одного з них на основі програмного забезпечення, призначеного для моніторингу підмереж NTP, встановлений характер взаємних відхилень шкал часу в залежності від завантаженості мережі IP / MPLS в різний час доби. Результати одного з таких сеансів моніторингу відображені на рис. 1.3.

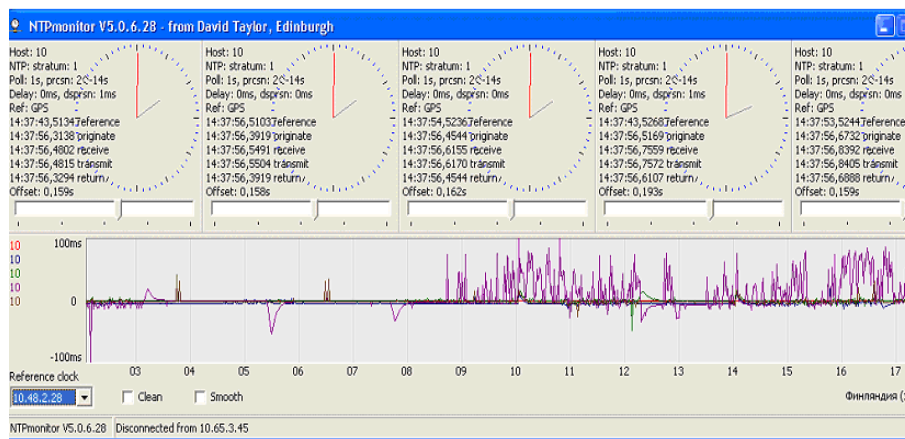


Рис.1.3. Моніторинг NTP-серверів.

Дані відхилення обумовлені використанням механізмів перенаправлення голосового і сигнального трафіку на вузлах M-MGw і MSC-S в разі перевантажень мережі або відмови в вузлах мережі з розподіленою архітектурою.

Даний моніторинг проводився на, ділянці мережі IP / MPLS під час тестування декількох вузлів мережі з розподіленою архітектурою. Наступною особливістю поширення сигналів NTP є постійне відхилення шкал часу різних NTP-серверів в разі навмисного відсутності тимчасової синхронізації на маршрутизаторах дослідної ділянки мережі IP / MPLS. Як і в першому випадку, відхилення становило близько 100 мс.

Отже, при проектуванні мережі тимчасової синхронізації на мережах з розподіленою архітектурою виникають завдання оптимізації кількості серверів сигналів точного часу з урахуванням їх швидкодії, схем їх резервування, територіального розміщення, а також створення єдиної і цілісної системи моніторингу зі звірення шкал часу.

Така система може бути створена, наприклад, на базі системи управління маршрутизаторами транспортної мережі IP / MPLS при наявності в ній відповідних програмно-апаратних засобів. При звірванні шкал часу, що власне і є основним завданням синхронізації в пакетній мережі, слід враховувати похибки, властиві повідомленнями NTP.

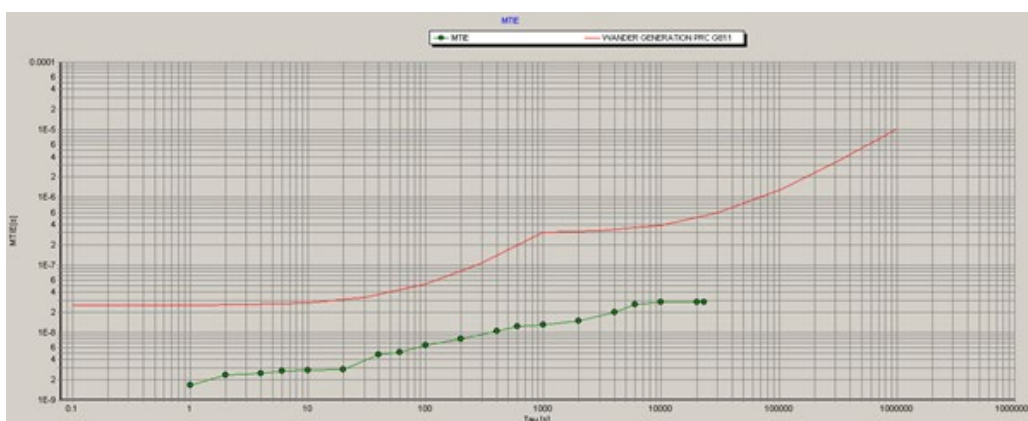
Синхронізація базових станцій підключених по IP-мережі. Результати вимірювань. Питання синхронізації базових станцій (БС) мобільного зв'язку є

найбільш актуальним в даний момент в аспекті синхронізації пакетних мереж. Результати аналізу і випробувань з цього питання були досить широко представлені в публікаціях [47, 48].

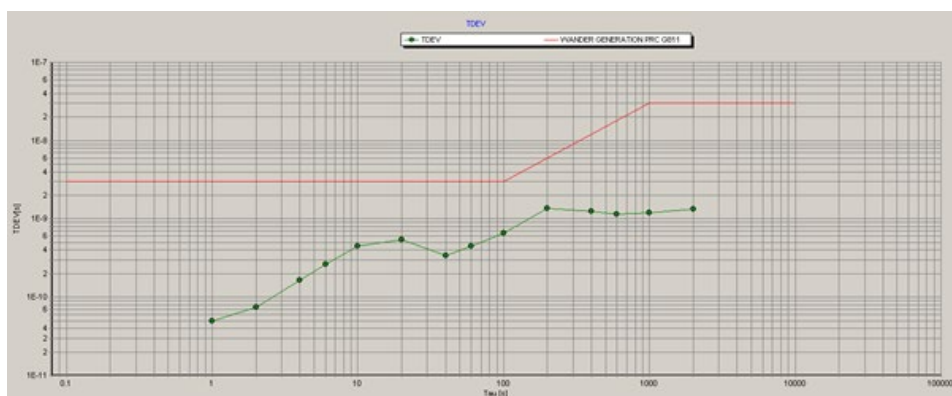
Розглянемо можливість комбінованого застосування методів забезпечення синхронізацією БС по Sync-E, а також із залученням протоколів NTP і PTP на структурі мережі з комутацією пакетів: основної мережі (ядра), агрегації і доступу. На рівні основної мережі найбільш оптимальною є реалізація синхронізації на технології Sync-E. Це обумовлено порівняно невеликими витратами на заміну / оновлення обладнання тільки на магістральному рівні і забезпеченням гарантовано якісної передачі сигналу синхронізації на великі відстані. На рис. 1.4 показані результати лінійних випробувань PTP для рівня агрегації. В даному випадку в якості опорної частоти для мережі IP / MPLS (точніше для Grandmaster clock PTP) використовувався сигнал мережі синхронізації, що транслюється по мережі SDH. Джерелами сигналу синхронізації є розподілені по мережі цезієві генератори і GPS-приймачі. Вимірювання параметрів стабільності частоти зроблені на рівні PE маршрутизатора при наявності трьох переприймів. З рівня PE сигнал може розподілятися, як на нижні рівні, наприклад на рівень Р і відповідно може бути використаний для синхронізації БС. На рис. 2.3 показана маска G.811 (рівень первинного джерела мережі синхронізації) для параметрів MTIE і TDEV. Сигнал придатний для БС, так як його стабільність вище, ніж $5 \cdot 10^{-8}$ за добу. Отже, протокол PTP може бути використаний на рівні доступу для синхронізації БС.



а) помилка часового інтервалу (TIE)



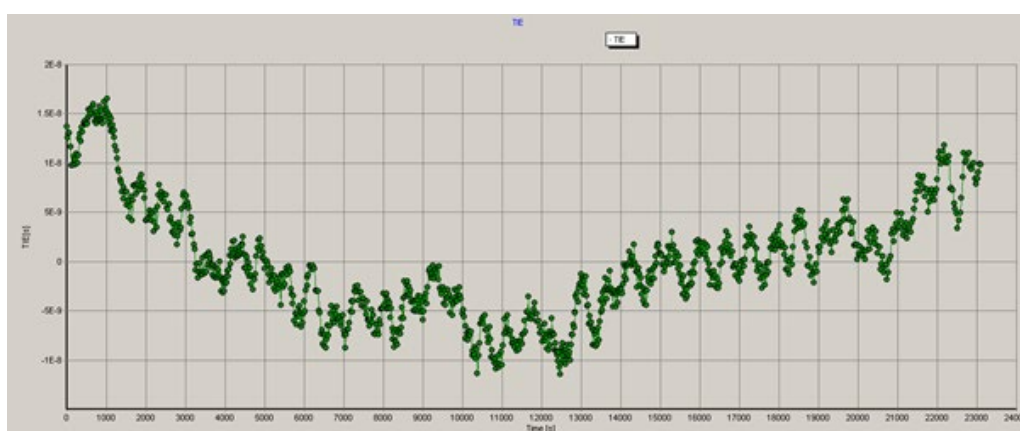
б) максимальна помилка часового інтервалу (МТІЕ)



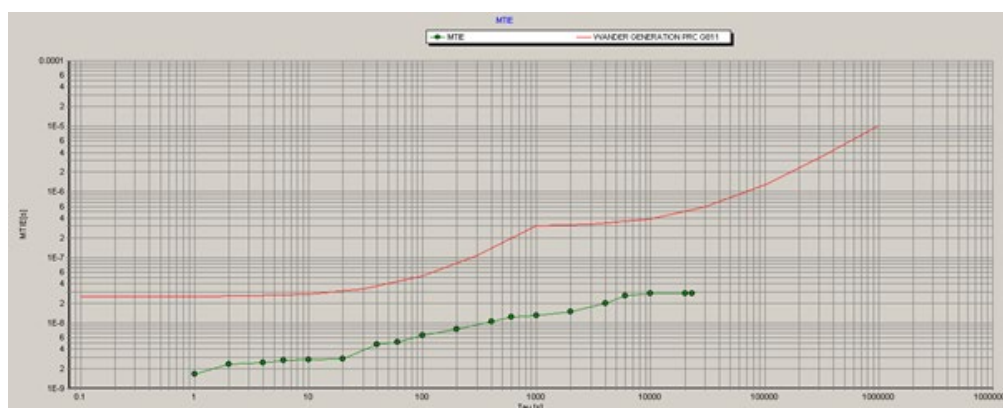
г) девіація часу (TDEV)

Рис.1.4. Вимірювання параметрів стабільності на ділянці RTP.

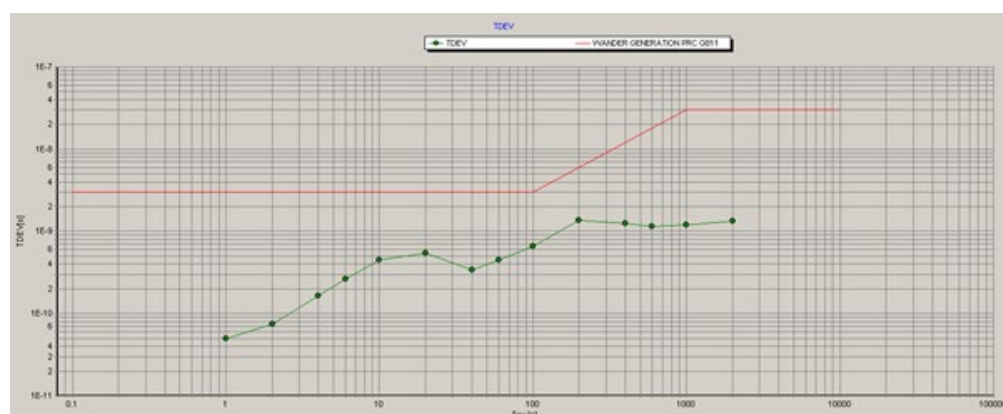
Результати лінійних випробувань на NTP для рівня доступу мережі (тобто на самому рівні БС) показано на рис. 1.5.



а) помилка часового інтервалу (TIE)



б) максимальна помилка часового інтервалу(MTIE)



г) девіація часу (TDEV)

Рис.1.5. Вимірювання параметрів стабільності на ділянці NTP.

В цілому, вимога щодо синхронізації БС також виконується. Слід зазначити, що в Україні планується ряд проектів, які потребуватимуть вирішення питання синхронізації БС на пакетній мережі. Ця тематика активно досліджується в різних напрямках в найближчому майбутньому. Істотний вплив в цьому питанні надають конкретні рішення, пропонувані постачальниками обладнання.

1.3. Класифікація і принципи функціонування елементів мережевої синхронізації

1.3.1. Принципи функціонування елементів мережевої синхронізації в мережах синхронної цифрової ієрархії

Для формування сигналів синхронізації в мережі тактової синхронізації використовують первинні джерела та пристрої сигналів синхронізації [87,101].

У якості джерел сигналів синхронізації використовують цезієві або водневі генератори, а також обладнання на базі приймачів навігаційних систем ГЛОНАСС та GPS (Global Positioning System). Комплекс, утворений складанням декількох первинних джерел, являє собою первинний пристрій синхронізації [83].

Для підтримки функціонування мережі або відновлення спотворених сигналів синхронізації застосовуються пристрої відновлення та підтримки синхронізації.

За якістю сигналів синхронізації, що формуються в пристроях та функціям, які виконуються на розподільчих мережах синхронізації розрізняють такі мережеві пристрої синхронізації (МПС):

- первинний пристрій синхронізації (ППС);
- пристрій синхронізації транзитного вузла (ПС-Т);
- пристрій синхронізації місцевого вузла (ПС-м);
- пристрій синхронізації обладнання СЦІ (ПС-СЦІ);
- пристрій синхронізації кінцевого обладнання.

Первинний пристрій синхронізації (ППС). Схема примусової синхронізації припускає наявність ППС від сигналів якого повинні синхронізуватися інші МПС, які входять до мережі синхронізації [14, 88]. До складу ППС входить генератор якості якого визначено в [101].

Для формування опорного сигналу синхронізації ППС як правило використовується трубка цезієвого випромінення, тому що при використанні цієї трубки не буде систематичного впливу подібного старінню, який може призвести до відхилення частоти.

Існують два типи ППС:

- автономні ППС з однією або декількома (до трьох) цезієвими трубками, які вбудовані в ППС та які використовуються в якості опорного джерела для ВПС;
- радіокеровані ППС, в яких використовуються віддалені цезієві трубки, наприклад, в супутниковій навігаційній системі GPS та ГЛОНАСС. У цьому випадку радіосигнали формуються на основі цезієвих трубок, приймаються в місці розміщення ППС та використовуються в якості опорного сигналу для ВПС.

З метою забезпечення високої надійності ППС містить декілька (у більшості випадків три) високостабільних генераторів.

Вторинні пристрої синхронізації (ВПС). Для внутрішньовузлового розподілу сигналів синхронізації рекомендуються пристрої синхронізації ВПС, що призначені для захоплення зовнішнього опорного сигналу синхронізації, який надходить із іншого вузла, та синхронізації усіх МПС даного вузла. Тому ВПС повинен бути найбільш стійким пристроєм синхронізації із самою вузькою шириною смуги захоплення частот (тобто пристроєм з найкращою фільтрацією вхідних фазових шумів), який має найкращі на цьому вузлі характеристики в режимі утримання частоти [80, 81, 89-91, 101].

Рівень якості ВПС визначається його ієрархічним рівнем в мережі синхронізації. Розрізняють вторинні ПС транзитного вузла та місцевого вузла.

Для надійності ВПС повинні приймати два або декілька опорних сигналів синхронізації з інших вузлів.

При нормальному режимі роботи (без виникнення аварій) ВПС отримує опорний сигнал синхронізації від ППС. У випадку втрати опорного сигналу синхронізації від ППС, ВПС входить до режиму утримування частоти. Внутрішній генератор ВПС запам'ятовує значення частоти опорного сигналу синхронізації з високою точністю та підтримує близьке до нього значення частоти на протязі часу, зазначеного в [101].

Вихідний сигнал синхронізації, який формується ВПС, характеризується відносно високою якістю. Так як в якості внутрішніх генераторів ВПС використовуються спеціальні високостабільні кварцові або рубідієві генератори.

Для забезпечення надійності роботи мережі синхронізації вихідний сигнал синхронізації ВПС повинний мати:

- вузькосмугову фільтрацію для ефективного придушення джитеру та дрейфу фази з вихідних сигналів синхронізації;
- високий ступінь точності частоти в режимі утримування частоти для забезпечення місцевого резерву синхронізації та можливості виконання технічного обслуговування при збоях синхронізації;

- допустиму перехідну характеристику при переключенні між вхідними опорними сигналами;
- безперервний контроль вхідних сигналів синхронізації 2 МГц і/або 2 Мбіт/с;
- забезпечення на призначених контрольних інтерфейсах безперервного вимірювання та спостереження якісних показників мережі синхронізації;
- забезпечення обробки даних вимірювань фази: максимальної відносної помилки вартового інтервалу та девіації вартового інтервалу.

Пристрій синхронізації обладнання СЦІ (ПС-СЦІ). Міжвузловий розподіл сигналів синхронізації визначає порядок надання сигналів синхронізації на всі МПС, які включені в мережу синхронізації [26, 54-56]. Для міжвузлового розподілу сигналів синхронізації рекомендуються МПС, що вбудовані в обладнання СЦІ та називаються пристроями синхронізації обладнанням СЦІ – ПС-СЦІ. Проте ПС-СЦІ, що входять до складу обладнання СЦІ мають низький рівень ієрархії. Для запобігання надходження опорного сигналу синхронізації від ПС-СЦІ на МПС більш високого рівня ієрархії, разом з сигналами STM-N передаються повідомлення ПСС. Повідомлення ПСС визначають рівень ієрархії МПС, який використовується для синхронізації, тобто рівень якості QL джерела синхронізації.

На вхід обладнання СЦІ надходять різні види сигналів, які можуть використовуватись для синхронізації [90, 93, 100]: цифровий лінійний сигнал або компонентний сигнал STM-N інформаційний сигнал, який належить передаванню в системі передачі СЦІ – сигнал E1, а також зовнішній сигнал синхронізації. Сигнал T1 отримують із сигналу STM-N, сигнал T2 – із E1, а T3 – із зовнішнього сигналу синхронізації.

За допомогою фільтру та системи пам'яті відбувається керування частотою внутрішнього генератору, яку забезпечує найкраще придушення фазових перешкод. Сигнал T0 приймає доля у формуванні вихідних сигналів обладнання СЦІ STM-N, а також може бути використаний для отримання вихідного сигналу синхронізації T4. Окрім того, сигнал T4 можна отримати безпосередньо із сигналу T1 без участі внутрішнього генератору.

При рівні якості QL гіршого ніж задане, сигнал синхронізації T4 на вихід не надходить. Сигнал T4 призначений для синхронізації інших МПС, які встановлені на тому ж вузлі, що і обладнання СЦІ. Якщо сигнал синхронізації, який сформовано ПС-СЦІ, надходить на вхід іншого МПС, то вихідний сигнал синхронізації T4 відключається, що виключає можливості синхронізації МПС більш високого рівню ієрархії від сигналу синхронізації МПС більш низького рівню.

При забезпеченні якості мережі синхронізації з боку ПС-СЦІ мають виконуватись такі вимоги: – помірна точність частоти в режимі утримування частоти для забезпечення можливості застосування генератора при помірній ціні; – низьке значення фазового шуму, що формується для забезпечення можливості каскадного з'єднання багатьох ПС-СЦІ в мережі розподілення синхронізації без порушень за рахунок накопичення надмірного фазового шуму; – смугу фільтрації, яка оптимізована для слідкування за вхідними опорними сигналами, але з достатньою можливістю фільтрації від джитеру; – якісні показники синхронізації, які повинні підтримуватися протоколами ВПС, для забезпечення можливості автоматичної реконфігурації підмереж ПС-СЦІ, щоб обмежити година роботи в режимі утримування частоти при несправностях синхронізації.

Застосування нових технологій на транспортних мережах характеризується зростанням обладнання, яку використовується на мережах, що в свою чергу, призводить до виникнення на розподільчих мережах синхронізації мережних пристроїв багатьох виробників, які мають певні відмінності між собою.

При плануванні мережі синхронізації необхідно враховувати: – відмінність функціональних параметрів елементів мережі синхронізації різних виробників або елементу мережі синхронізації одного виробника, але різних поколінь; – виконання або не виконання елементами мережі алгоритмів прийому, обробки та видавання повідомлень про статус синхронізації; – реакції елементів мережі на зникнення сигналу синхронізації, його відновлення, а також перехідні процеси, що виникають в мережі.

Формування необхідної кількості сигналів синхронізації виконується приладами розгалуження сигналів синхронізації [40].

1.3.2. Первинні джерела синхронізації в пакетних мережах

Розвиток сучасних мереж зв'язку неможливо без точних годинників - прецизійних стандартів частоти. Якщо десятикратне збільшення точності вимірювання маси, довжини та інших фізичних величин відбувається кожні 50 років, то десятикратне збільшення точності вимірювання часу і частоти - кожні 20 років [1]. Сучасна межа відносної точності вимірювання частоти і часу оцінена величиною 10^{-14} - 10^{-16} . У сучасних стандартах частоти застосовують, що найменше, 5 основних класів прецизійних джерел: кварцові генератори (OCXO), приймачі навігаційних повідомлень (GPS / GLONASS / GALILEO), осередки на парах рубідія (RB), атомні стандарти на цезієвих пучках (CS) і водневі мазери (HM). На даний момент в стаціонарних мережах для забезпечення синхронізації вузлів зв'язку будується накладена мережа тактової мережевої синхронізації. Вона забезпечує доставку сигналів синхронізації до всіх вузлів мультисервісної макромережі, побудованої на базі обладнання з часовим розподілом каналів [2]. Оператори мобільного зв'язку, що використовують 2G- і 3G-мережі з дуплексною передачею та розподілом по частоті, забезпечують задану якість надання послуг шляхом організації частотної синхронізації базових станцій. Стрімко розвивається в даний час процес конвергенції фіксованих і мобільних мереж в єдину мультисервісну макромережу, що реалізується на основі технологій пакетної передачі даних. Багато мобільних операторів планують реалізувати передачу трафіку по недорогим в експлуатації IP / MPLS-мережах. Однак перехід на них в більшості випадків досить складний, оскільки пов'язаний з відмовою від критично важливих сервісів, які потребують часової синхронізації. Виходом із ситуації є реалізація різних методів синхронізації в IP / MPLS-мережах, що дозволить забезпечити критично важливі сервіси синхронізацією необхідної точності. Потреба в сигналах точного часу і частоти в мобільних мережах обумовлена наступними факторами [2].

1. Синхронна комутація: комутація голосових каналів здійснюється в синхронних комутаторах, де синхронізація низької якості призведе до виникнення проковзувань і зниження якості обслуговування.

2. Стабільність частоти бездротового інтерфейсу (радіоінтерфейсу): синхронізація низької якості призведе до взаємного впливу з іншими каналами та відмові в наданні послуги кінцевому абоненту.

3. Процес передачі даних: синхронізація низької якості стане причиною втрати пакетів при їх передачі, що призведе до відмови в наданні послуги або значного збільшення затримки в її наданні.

4. Тимчасова синхронізація в CDMA вимагає прецизійної часової і фазової синхронізації. Мережам операторів мультисервісної макромережі, постачальникам послуг IPTV, мобільного та цифрового телебачення потрібно високоточна тактова синхронізація, необхідна для роботи мереж і виконання таких функцій, як мережевий моніторинг, робота додатків диспетчерського зв'язку і збору даних. Забезпечення високоточної синхронізації - основне завдання повноцінного функціонування мультисервісної макромережі. Адже на відміну від мереж TDM, в яких відомості про час передаються разом з даними, мережі з пакетною комутацією не підтримують цієї функції. Відсутність синхронізації породжує такі проблеми, як втрата даних, велика кількість помилок і значні затримки в отриманні інформації, критичною до затримок.

На зорі розвитку мереж синхронізації вважалось, що досить одного первинного еталонного генератора (PRC - Primary Reference Clock) на всю мережу і можна було б миритися з їх високою вартістю. У сучасних мережах PRC стає масовим виробом [3]. Тому виробники квантових стандартів частоти, бажаючи зберегти позиції на ринку обладнання синхронізації, постачають первинні джерела синхронізації (PRS - Primary Reference Source). Це просто стандарт частоти без резервування, як правило, забезпечений стиками.

Питання про застосування GPS / GLONASS / GALILEO для синхронізації мереж зв'язку широко представлений в монографіях [1, 3, 4]. Всі провідні оператори мереж зв'язку в Україні широко використовують апаратуру синхронізації на основі приймачів GPS / GLONASS / GALILEO. Але для досягнення необхідної надійності великі оператори використовують комбінацію CS + GPS / GLONASS / GALILEO,

що автоматично перетворює PRS в PRC. Як правило таке поєднання первинних джерел зустрічається на верхньому рівні ієрархії мереж синхронізації.

Важливим моментом у розвитку атомного годинника (Atomic Clocks) за останнє десятиліття є твердження нових вимог до точності і стабільності, а також поява вимог до фазової синхронізації, фактично до параметру "час" (що особливо важливо для мереж мобільного зв'язку 4G/LTE) [1, 3, 4]. На рис. 1.9 представлена еволюція розвитку первинних джерел синхронізації: - PRC - первинний еталонний генератор для "класичної" мережі синхронізації; - PRTC - первинний опорний генератор шкали часу в мережах з передачею пакетів; - ePRTC (enhanced Primary Reference Time Clock - вдосконалений первинний еталонний генератор сигналів частоти і часу для мультисервісної макромережі мобільного оператора.

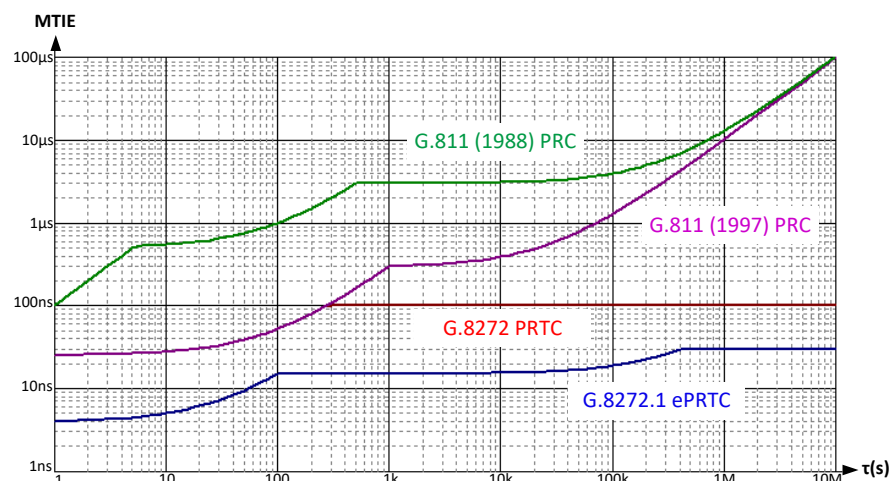


Рис.1.6. Еволюція розвитку первинних джерел синхронізації.

Первинний опорний генератор шкали часу PRTC, придатний для часової, фазової і частотної синхронізації в мережах з передачею пакетів. Дані вимоги застосовуються при нормальних умовах навколишнього середовища, визначених для обладнання. Типовий PRTC формує еталонний сигнал для часової, фазової і частотної синхронізації інших генераторів в межах мережі або сегмента мережі. Зокрема, PRTC здатний формувати еталонний сигнал для Грандмайстра електрозв'язку (T-GM) в межах мережевих вузлів, в яких знаходиться PRTC.

PRTC формує еталонний сигнал часу, який може бути перевірений на відповідність визнаному стандарту часу (наприклад, всесвітнім координованим часом (UTC)). Час UTC може бути визначено в лабораторії часу UTC,

zareestrovanoї v Mijnarodnomu byuro mir i vah (MBMB) (napriklad, natsionalnoju laboratoriju UTC) abo, v bilsjosti vipadkiv, za dopomogu Globalnoju Navigacijnoju Suputnikovoju Sistemi (GNSS). V Rekomendacijah viznachajutsja vimoги do vихidnih xarakteristik PRTC, a same tochnist PRTC povinna dotrimuvatisja zgidno vimoгам, zaznachenim v [5]. Pidviscennja vimoг do tochnosti синхронізації v мультисервісних макромережах ставить нові завдання перед розробниками спеціалізованого обладнання. Оновлюється і міжнародна нормативна база, зокрема, вимоги до генераторного обладнання різного класу. Прикладом може слугувати Рекомендація ITU-T G.8272.1 / Y.1367.1 [6], що нещодавно вийшла, яка визначає основні характеристики покращеного первинного еталонного генератора частоти і часу ePRTC. У порівнянні зі "звичайним" PRTC (Рекомендація ITU-T G.8272 / Y.1367 [5]), до генераторного обладнання ePRTC пред'являються більш жорсткі вимоги в частині рівня фазових шумів на виході: розрахунок максимальної помилки з часового інтервалу (MTIE) і часового відхилення (TDEV): - в режимі захоплення опорного сигналу максимальне відхилення часового ін-інтервалу (MTIE) не повинно перевищувати 30 нс при $\tau \geq 400\,000$ с (в той час як для "звичайного" PRTC значення MTIE не повинно перевищувати 100 нс при $\tau \geq 273$ с); - в режимі утримання максимальний догляд фази за 14 діб не повинен перевищувати 100 нс.

На рис. 1.7 показано показники часового відхилення TDEV для ePRTC.

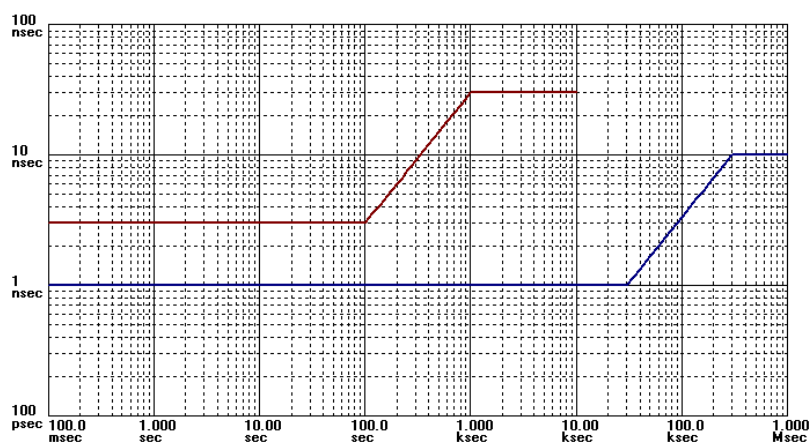


Рис.1.7. Показники часового відхилення TDEV для ePRTC.

Реалізація ePRTC являє собою комбінацію цезієвого джерела, приймача GPS / GLONASS / GALILEO і апаратуру порівняння шкал часу, а також опорних частот [6]. Крім того, масовий перехід транспортного середовища з технології синхронної цифрової ієрархії на сучасні технології IP / MPLS вимагає інтеграції PRC / PRTC в IP-середовище і забезпечення передачі опорних сигналів за новими протоколам, що власне і перетворює згідно вимогам всі сучасні джерела в ePRTC. В даний час найбільш вдалим способом передачі таких сигналів є протокол PTP (Precision Time Protocol або стандарт IEEE 1588v2), котрий був спеціально розроблений для вирішення завдань синхронізації в пакетних мережах. Він з'явився у вигляді стандарту IEEE 1588 [6] на етапі впровадження техніки Ethernet в контрольно-вимірювальні системи з можливістю узагальнення на інші мережі з багатоадресною розсилкою повідомлень. Для організації планування мережі синхронізації PTP необхідно визначити вимоги Рекомендації ITU-T G.8261.1 за кількістю переприйомів. Максимальна кількість може бути до 5 або до 10 в залежності від обраного принципу комутації на маршрутизаторах IP / MPLS. Другим обмежуючим фактором є кількість обслуговуваних PTP-клієнтів одним Cesium PTP-сервера (сам PTP-сервер є окремим пристроєм, але входить до комплексу з Cesium Clock).

Доступні PTP-сервера, як правило, дозволяють забезпечити належною якістю до 1000 PTP-клієнтів (залежить від виробників). Однак, ніколи не слід навантажувати Cesium PTP-сервер максимальним навантаженням, так як в цьому випадку буде ускладнено мережеве резервування. Під мережевим резервуванням мається на увазі можливість обслуговування PTP-клієнтів одного PTP-сервера сусіднім / сусідніми в разі аварійної ситуації.

Таким чином, раціональне рішення передбачає планування Cesium PTP-серверів з 50% навантаженням (до 500 базових станцій / PTP-клієнтів на кожен з трьох PTP-серверів). Слід також зазначити, що і самі Cesium PTP-сервера рівня ePRTC повинні мати резервування на апаратному рівні - два цезієвих генератора (CS), два Receivers GPS / GLONASS / GALILEO або one Receiver GPS / GLONASS / GALILEO плюс зовнішній - введення опорного сигналу синхронізації 2МГц / 1Е1

від класичної мережі синхронізації TDM (забезпечується трьома цезієвими первинними джерелами з резервуванням по GPS / GLONASS / GALILEO).

Питання планування і резервування мережі синхронізації РТР для забезпечення мобільного зв'язку рівня 4G в цілому схожі з напрацьованими принципами в 3G. Але є кілька суттєвих відмінностей.

Згідно [5, 6] в кожній базовій станції повинна забезпечуватися мікросекундних точність. Для цього необхідно дотримуватися необхідну точність до самої бази. Це можливо при залученні додаткового обладнання Boundary Clock (BC). BC розміщуються між РТР-серверами і РТР-клієнтами. На кожен регіон припадає від 2 до 5 BC. Також для технології 4G знадобиться програмне обладнання існуючих РТР-серверів зі збільшенням на них початкової точності, - це буде досягатися трансформацією цезієвих РТР в джерело рівня ePRTC, їх кількість на мережу в нашому випадку - 3. Також при плануванні РТР-мережі синхронізації необхідно враховувати "unicast" і "multicast" режими роботи обладнання.

При впровадженні нових технологій, зокрема 4G, не втрачають своєї актуальності питання, що відносяться до розділу частотно-часового забезпечення сеансу зв'язку, а також проблеми узгодження шкал місцевих зберігачів точного часу із територіально рознесеною інфраструктурою електрозв'язку. В умовах активного переходу від одних технологій до мультисервісних макромереж, питання синхронізації встають перед фахівцями зі все більшою силою, так як точне дотримання всесвітнього універсального часу, в кінцевому рахунку, зводиться до підвищення доступності та якості послуг, що надаються. Прагнучі досягти в мережах зв'язку ідеально точного відліку часу, спеціалісти служби єдиного часу і стандартних частот розробляють і пропонують різноманітні варіанти комп'ютерного моделювання технічних рішень в області часової синхронізації.

1.4. Формулювання завдання дослідження.

1.4.1. Постановка завдань дослідження

Огляд існуючих нормативних документів та публікацій щодо існуючих концепцій побудови мережевої синхронізації в мережах з передачею різнорідного трафіку та систематизація матеріалу дозволила сформулювати актуальну наукову задачу дисертаційного дослідження - підвищення сталості мережевої синхронізації в мультисервісній макромережі за рахунок створення механізму динамічної адаптації дерева синхронізації до різних станів макромережі.

Вимоги до мультисервісної макромережі визначаються, перш за все, забезпеченням можливості передачі різнорідного трафіку з використанням технології пакетної передачі інформації. Разом з низкою безперечних переваг (ефективного використання смуги пропускання і порівняно низькій вартості), пакетні мережі характеризуються складною топологічною структурою, що у свою чергу, викликає посилювання вимог до мереж підтримки, і, зокрема, до мережевої синхронізації. Вимоги до мережевої синхронізації для мультисервісних макромереж визначені в Рекомендаціях [88 - 96]. Концепція побудови мультисервісній макромережі передбачає побудову альтернативних маршрутів передачі інформації, як одного з методів підвищення працездатності. Цей метод буде досить ефективним лише за наявності високонадійних мереж підтримки, і, зокрема, мереж синхронізації [87].

1.4.2. Дослідження предмету, задач та структури дисертаційного дослідження

Вирішення наукової задачі реалізується шляхом розв'язання таких завдань: - проведення аналізу особливостей побудови мережевої синхронізації в сучасній мультисервісній макромережі; - проведення оцінки впливу синхронізації на мережеві ресурси на рівнях доступу, агрегації та ядра мережі; - проведення аналізу працездатності існуючих і запропонованих топологічних структур з врахуванням дії на них сумарного потоку відмов і відновлень; - отримання узагальненого функціонала сталості мережевої синхронізації, що визначає залежність надійності

мережевої синхронізації від функціональних залежностей між інтенсивностями потоків відмов і відновлень, топології мережі, ефективності планування, алгоритмів функціонування мережевих елементів; - розробка методу визначення сталості функціонування мережевої синхронізації з врахуванням інтенсивностей потоків відмов і відновлень, топології мережі й алгоритмів функціонування мережевих елементів; - удосконалення методу аналізу працездатності фрагмента мережі синхронізації довільної топології і протоколів взаємодії між мережевими елементами для формування дерева синхронізації; - розробка механізму введення програмованої затримки в алгоритм функціонування мережевого елементу з метою запобігання часових петель синхронізації; - розробка системи автоматизованого проектування, що дозволяє аналізувати існуючі й планувати нову мережеву синхронізації, з використанням запропонованих топологічних структур і механізму формування динамічної адаптації дерева синхронізації.

1.5. Висновки

1. Досліджено основні принципи функціонування мережевої синхронізації. Розглянуто різні варіанти розвитку мережевої синхронізації. Запропоновано основні підходи до вирішення задачі адаптації мережевої синхронізації до структури базової транспортної мультисервісної макромережі мережі.

2. Проведено аналіз і класифікацію мережних елементів мережевої синхронізації. Досліджено алгоритми функціонування мережних елементів.

Для формування сигналів синхронізації в мережі тактової синхронізації використовують первинні джерела та пристрої сигналів синхронізації. У якості джерел сигналів синхронізації використовують цезієві або водневі генератори, а також обладнання на базі приймачів навігаційних систем ГЛОНАСС та GPS (Global Positioning System). Комплекс, утворений складанням декількох первинних джерел, являє собою первинний пристрій синхронізації.

Для підтримки функціонування мережі або відновлення спотворених сигналів синхронізації застосовуються пристрої відновлення та підтримки синхронізації. За якістю сигналів синхронізації, що формуються в пристроях та функціям, які

виконуються на розподільчих мережах синхронізації розрізняють такі мережеві пристрої синхронізації (МПС):

- первинний пристрій синхронізації (ППС);
- пристрій синхронізації транзитного вузла (ПС-Т);
- пристрій синхронізації місцевого вузла (ПС-М);
- пристрій синхронізації обладнання СЦІ (ПС-СЦІ);
- пристрій синхронізації кінцевого обладнання.

Встановлено характеристики сигналів синхронізації, при яких мережева синхронізація функціонує із заданою якістю.

3. В розділі уточнена і сформульована наукова задача підвищення сталості мережевої синхронізації в мультисервісній макромережі за рахунок створення механізму динамічної адаптації дерева синхронізації до різних станів макромережі.

РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА ВПЛИВУ МЕРЕЖЕВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ НА РІВНІ ДОСТУПУ, РОЗПОДІЛЕННЯ ТА ЯДРА МУЛЬТИСЕРВІСНОЇ МАКРОМЕРЕЖІ

Метою даного розділу є оцінка впливу сигналів синхронізації на навантаження мережі на ієрархічних рівнях доступу, розподілення та ядра мультисервісної макромережі. Розглянуто основні принципи реалізації мережі синхронізації в пакетних мережах IP/MPLS. Розглянуто трирівневу ієрархічну структуру мережі передачі даних. Запропоновано рекомендації щодо планування мережі синхронізації в пакетних мережах IP / MPLS. Проведено вимірювання параметрів стабільності сигналів синхронізації в пакетних мережах.

2.1. Реалізація мережі синхронізації в пакетних мережах IP/MPLS

2.1.1. Трирівнева ієрархічна структура мультисервісної макромережі

Мультисервісна макромережа створена для підключення великої кількості абонентів, які розосереджені по всій території України та надання всього спектру телекомунікаційних послуг із заданими параметрами якості (рис. 2.1):

- широкосмуговий доступ до мережі Інтернет: надання користувачам доступу до міжнародного сегменту мережі Інтернет;
- інтерактивне телебачення IPTV;
- IP-телефонія; виділені лінії зв'язку; віртуальні приватні мережі;
- віртуальні IP-АТС; проводове радіомовлення; та ін.

Основними технологіями побудови МПД є:

- на магістральному рівні – технологія IP/MPLS, що забезпечує можливість надання послуг із встановленим рівнем якості обслуговування (QoS та SLA);
- на місцевому рівні - технологія Carrier MetroEthernet (MetroEthernet операторського класу), що дозволяє створювати «локальні мережі» масштабів великого міста, або району/області операторського класу.

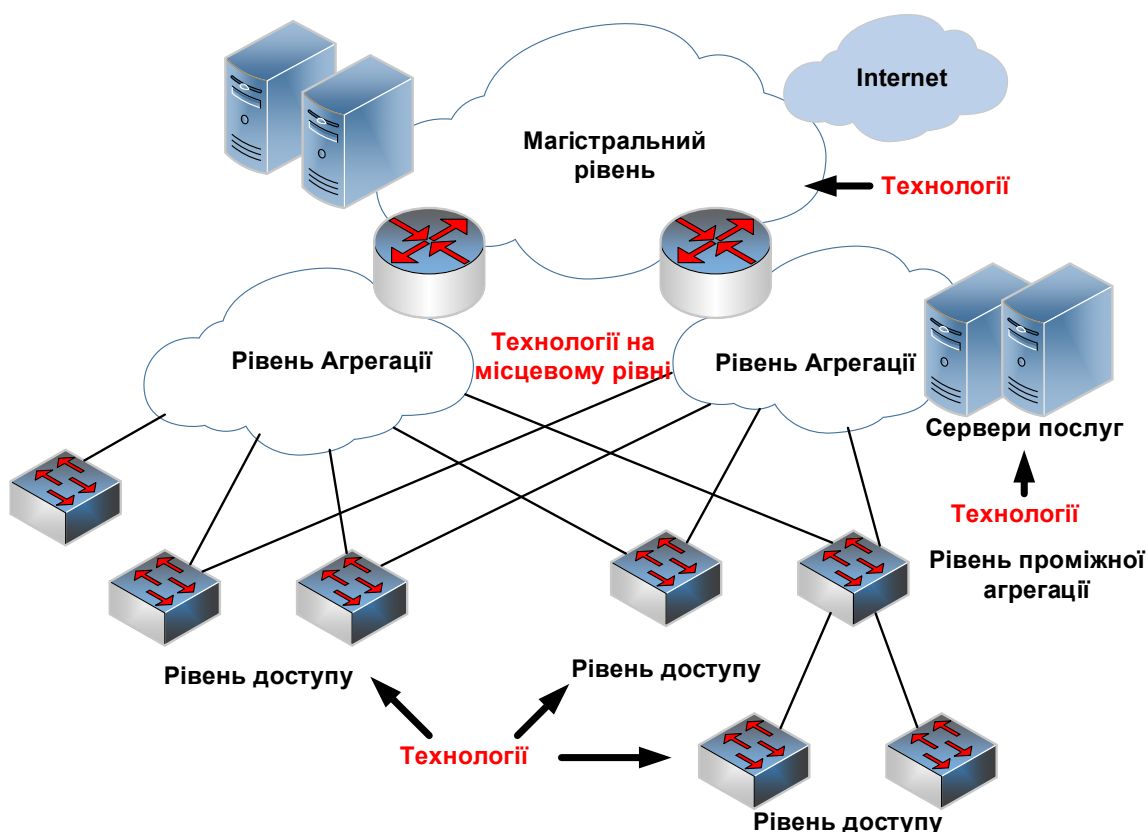


Рис.2.1. Мережа передачі даних.

Мережа передачі даних на рівнях Доступу, Агрегації та Дистрибуції є Carrier MetroEthernet мережею, тобто Ethernet мережа операторського класу. В мережі Carrier MetroEthernet Ethernet, кадри можуть передаватися через різні транспортні середовища (не обов'язково Ethernet), інкапсулюючись в «місцеві» транспортні пакети. Мережі Carrier MetroEthernet використовуються для надання комерційних послуг, і повинні бути конкурентні за якістю з тими ж послугами в альтернативних мережах.

За своєю структурою мережа передачі даних (МПД) є ієрархічною та складається з трьох основних рівнів (рис. 2.2):

- «Ядра» мережі;
- «Дистрибуції/Агрегації»;
- «Доступу».

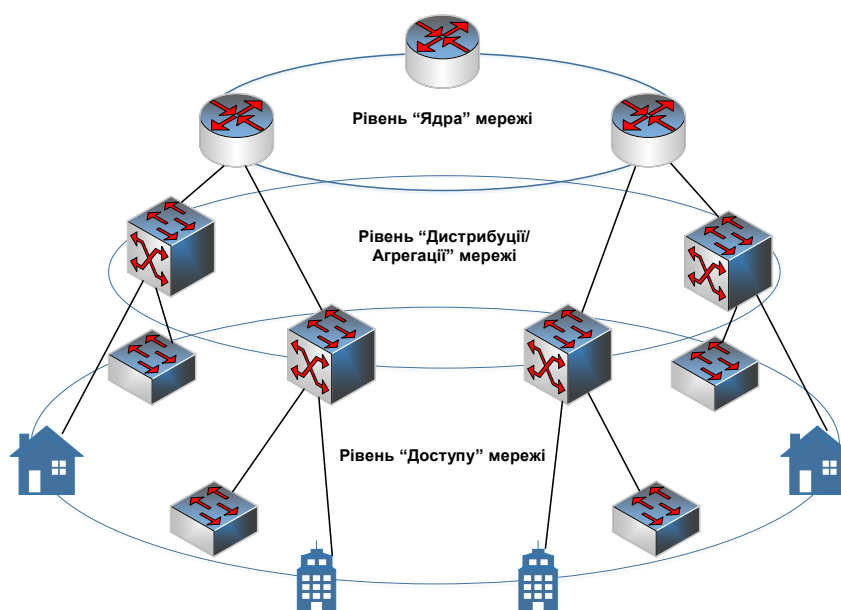


Рис.2.2. Ієрархічна структура МПД.

На рис. 2.3 наведено топологічну схему рівня Ядра мережі МПД.

Основним призначенням Ядра мережі є забезпечення підключення всіх обласних сегментів в єдину національну МПД, забезпечення наскрізного IP-транзиту як між користувачами та мережею Інтернет, так і віртуальних локальних мереж. Топологія рівня Ядра – “Кожний з кожним”.

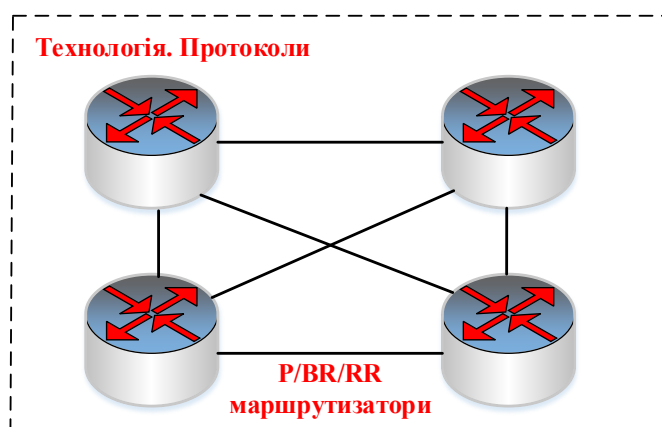


Рис.2.3. Топологічна схемі Ядра мережі.

Базовою технологією на мережевому та каналному рівнях є технологія IP/MPLS. Основними протоколами ядра мережі: IP, OSPF та BGP-4.

Основне функціональне обладнання ядра мережі можна розділити на:

- Р маршрутизатори: забезпечують транзит IP-трафіку між усіма регіональними (обласними) сегментами МПД;

- RR маршрутизатори: виконують функцію зберігання та розповсюдження маршрутної інформації між всіма зацікавленими маршрутизаторами МПД;
- BR маршрутизатори: забезпечують підключення МПД до зовнішніх IP-мереж та Світового сегменту мережі Інтернет.

На рис. 2.4 наведено топологічну схему рівню Дистрибуції мережі МПД.

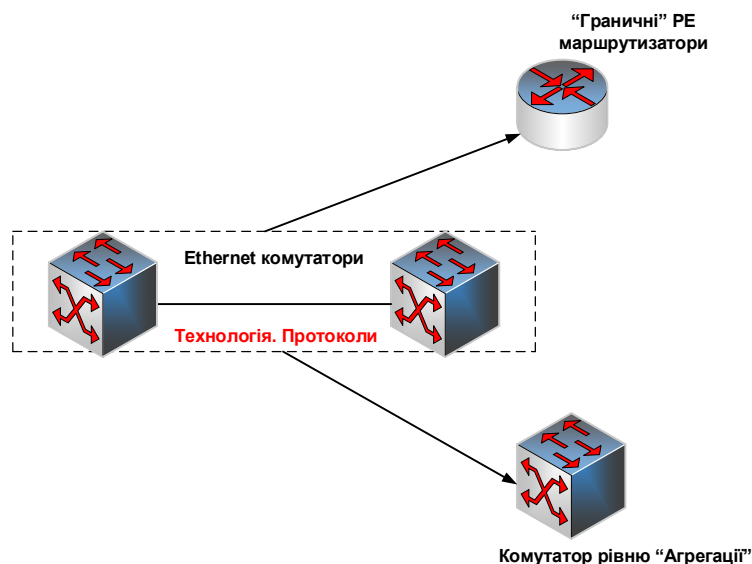


Рис.2.4. Топологічна схема рівня Дистрибуції.

На рівні Дистрибуції відбувається об'єднання всіх мереж та окремих комутаторів Агрегації, що розташовані на території відповідної області та організовує підключення Carrier MetroEthernet мереж області до "граничних" маршрутизаторів. Uplink підключається до PE маршрутизатора відповідної області, а Downlink підключається до комутаторів агрегації. Працює з використанням функції Q-in-Q. Топологія - ряд територіально рознесених вузлів (рівень обласних (регіональних) населених пунктів).

Основними технологіями є Ethernet та Q-in-Q. Рівень Дистрибуції використовує всі технології MetroEthernet, адже є центральним найвищим рівнем Carrier MetroEthernet мереж обласного рівня.

Таким чином на рівні передачі даних використовуються наступні технології та протоколи:

СЦІ – системи передачі синхронної цифрової ієрархії;

WDM – технології оптичної передачі з ущільненням по довжині хвилі;
 Ethernet (FE,GE, xGE) – оптичні та проводові технології передачі Ethernet;

VLAN – підтримка віртуальних локальних мереж; Q-in-Q – підтримка технологій VLAN у VLANi;

STP – протокол побудови зв'язуючого дерева, який дозволяє Ethernet мережам працювати в фізичній топології «кільце»; та інші.

На рис. 2.5 наведено топологічну схему рівню Агрегації МПД.

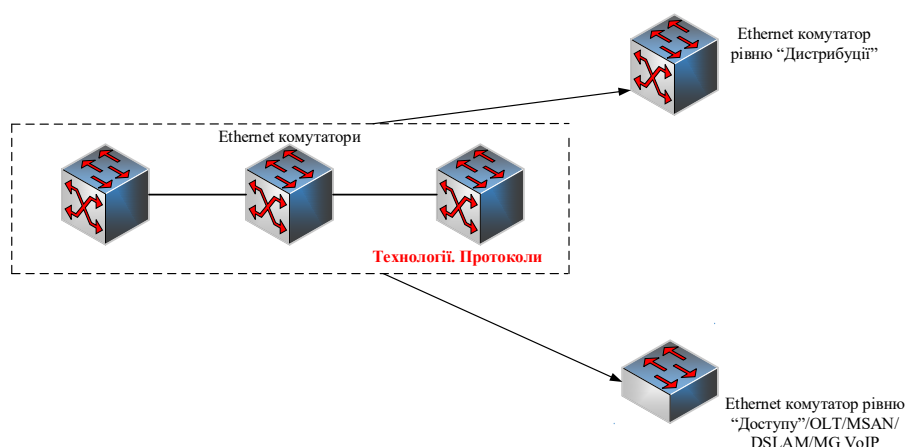


Рис.2.5. Топологічна схема рівню Агрегації.

Рівень Агрегації складається з Ethernet комутаторів, які «вгору» підключаються до комутаторів рівня Дистрибуції, а «знизу» до них підключаються пристрої рівня Доступу, такі як Ethernet комутатори Доступу, концентратори пасивних оптичних мереж (OLT), мультиплексори цифрових абонентських ліній (DSLAM); медіашлюзи IP-телефонії (VoIP-MGW), мультисервісні вузли доступу (MSAN). Типи топології рівня Агрегації різні: кільце, зірка, ланцюг та перевагу надається топології кільце.

Рівень Агрегації використовує технології MetroEthernet. На рівні передачі даних використовуються наступні технології та протоколи: WDM – технології оптичної передачі з ущільненням по довжині хвилі; Ethernet (FE,GE, xGE) – оптичні та проводові технології передачі Ethernet; VLAN – підтримка віртуальних локальних мереж; STP – протокол побудови зв'язуючого дерева, який дозволяє Ethernet мережам працювати в фізичній топології «кільце».

На рис. 2.6 наведено топологічну схему рівню Доступу, основною функцією якого є підключення абонентів до мережі.

Обладнання, в самому розповсюдженному випадку— комутатори Ethernet, в порти яких безпосередньо й підключаються абоненти.

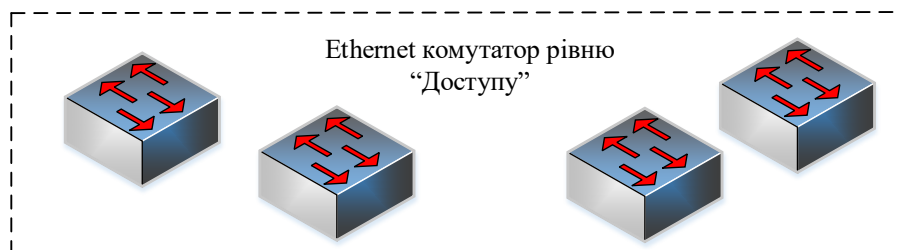


Рис.2.6. Топологічна схема рівню Доступу.

2.1.2. Рекомендації щодо планування мережі синхронізації в IP / MPLS

В даний час мережі операторів зв'язку в Україні стоять на порозі практичного впровадження мереж синхронізації, реалізованих на транспортній мережі IP / MPLS. За останні кілька років було проведено кілька тестувань і реалізовано кілька пілотних проектів. Були випробувані кілька протоколів і технологій.

На сьогоднішній день, на ринку телекомунікацій, досить нових ефективних методів для забезпечення синхронізації в мережах IP / MPLS: протоколи звірення часу NTP (Network Time Protocol) і PTP (Precision Time Protocol), а також технологія Sync-E (Synchronous Ethernet). Кожен з варіантів синхронізації пакетної мережі має як переваги, так і недоліки.

Тому доцільним в процесі планування такої мережі є розгляд комбінованого використання даних варіантів синхронізації мережі з комутацією пакетів на різних ієрархічних рівнях: основний мережі (ядра), агрегації і доступу. Також слід врахувати специфіку впровадження вузлів комутації наступного покоління з розподіленою архітектурою.

Порівняння різних методів синхронізації в мережах IP / MPLS. При виборі того чи іншого методу забезпечення синхронізації важливо розуміти їх можливості і обмеження. А саме:

- функціонуючий на фізичному рівні механізм Sync-E не залежить від завантаження мережі і дозволяє передавати сигнал синхронізації через транзитні

пристрою, але забезпечує тільки частотну синхронізацію. Крім того, перехід на технологію Sync-E передбачає повну заміну обладнання IP / MPLS-мережі або його суттєве оновлення (і слід також врахувати, що не завершений процес стандартизації даної технології);

- працюючий на рівні каналу передачі даних протокол RTP забезпечує як частотну, так і тимчасову синхронізацію, але стабільність розповсюджуваного сигналу залежить від рівня завантаження мережі, а також від відстані між вузлами мережі і кількості переприемов;

- працюючий на прикладному рівні протокол NTP широко використовується, як правило, для тимчасової синхронізації в пакетних мережах. Але в ряді рішень різних виробників обладнання, протокол NTP може бути використаний також і для частотної синхронізації. Наприклад, для синхронізації базових станцій мобільного зв'язку. Детально принципи синхронізації в пакетних мережах і відмінності в роботі протоколів звірення часу були представлені в публікаціях [32].

Звірення клієнта RTP з метою перевірки можливості використання цього протоколу для відновлення тактової частоти на перевалочному ділянці транспортної IP-мережі для синхронізації базових станцій дає кращі результати в порівнянні з сервером NTP, причому з істотним технологічним запасом [37, 39, 41 43]. Протокол NTP може бути альтернативою RTP для синхронізації, наприклад, базових станцій мобільного зв'язку, підключених по IP-мережі. Це може бути затребуване при наданні деяких послуг (наприклад, визначення місця положення абонента, що особливо актуально після введення в дію Національної версії 3.0 загальноканальної сигналізації №7).

Другою альтернативою, може бути тільки використання опорних частот від приймачів супутникових радіонавігаційних систем GPS або ГЛОНАСС (а також впроваджуваної системи Galileo в недалекому майбутньому) у кожній базовій станції мобільного зв'язку. На відміну від NTP, коли сервери часто працюють як клієнти, а клієнти можуть працювати як сервери в режимі рівноправного обміну, мережу RTP суворо ієрархічна [42, 49, 50].

На вершині ієрархії синхронізації розташовують гросмейстерські годинники (grandmaster clock). Зазвичай їх підключають до зовнішнього джерела UTC (Universal Time Coordinated), як правило, до приймача GPS (ГЛОНАСС). Також вже зазначене обмеження RTP по відстані між вузлами мережі і кількості переприємів також підлягає глибшому вивченню. В роботі [40] були представлені цікаві результати вимірювань параметрів стабільності при невеликій кількості переприймань, але на відстані кілька тисяч кілометрів.

Протокол NTP для мережі IP / MPLS та вузлів комутації з розподіленою архітектурою. Стандартними первинними компонентами мережі з розподіленою архітектурою є сервер, на рівні управління (MSC-S) і медіа-шлюз мобільного зв'язку (M-MGw), який знаходиться на рівні управління з'єднаннями. MSC-S обробляє сигналізацію мережі та інформацію для встановлення, відключення з'єднань і їх моніторингу. M-MGw займається обробкою і транспортом трафіку з'єднань, а також взаємодією із зовнішніми мережами, такими як телефонна мережа загального користування (PSTN), іншими мобільними мережами (PLMN) і міжнародними мережами. Як MSC-S (для трафіку сигналізації), так і M-MGw (для трафіку даних) здійснюють гнучкий контроль над транспортними технологіями мультимедійної передачі з ущільненням каналів (TDM), асинхронного режиму передачі (ATM) і IP / MPLS.

Необхідність забезпечення сигналами точного часу в цьому випадку вкрай важлива при взаємодії різних рівнів такої архітектури, а саме - для забезпечення технологічності функціонування рівня послуг ІТ при відповідній обробці повідомлень технічного обслуговування на рівнях управління викликами і з'єднань, а також для узгодженої передачі цих повідомлень по транспортній мережі IP / MPLS. Крім того, для узгодженої роботи білінгової системи з рівнем управління викликами також необхідно звірення шкал часу для коректного формування файлів CDR білінгу на вузлах мережі.

Мультисервісна мережа IP / MPLS може використовуватися для транспортної інфраструктури з набагато меншими витратами. Висока доступність мережі зв'язку забезпечується завдяки механізмам надмірності MGw, контролю та управління

навантаженням, і використання механізмів перенаправлення трафіку в разі перевантажень мережі або відмови в вузлах мережі.

Загальна транспортна мережа IP / MPLS спочатку є більш ефективною, оскільки вона конфігурується для сумарного трафіку, кількість якого має зростати, а не трафіку підмножини послуг, який менш передбачуваний. Наприклад, транспортна мережа легко змінюється відповідно до ситуації, в якій можливе різке зростання кількості трафіку VoIP при заміні голосових послуг з комутацією каналів або послуг SMS послугами Push to Talk. Однак, в цьому випадку необхідно суворе узгодження шкал часу в вузлах і серверах мережі з маршрутизаторами транспортної мережі IP / MPLS. Поставлені завдання можуть вирішуватися за допомогою протоколу мережевого часу NTP [36, 37] або протоколу, РТР [37, 39, 41, 43].

В даний час найбільш поширений протокол NTP, на ринку пропонується досить широкий спектр пристроїв з його реалізацією і також можливостей використання високоточної підстроювання від супутникових радіонавігаційних систем (в переважній більшості - від американської GPS). Проведений моніторинг дозволив встановити ряд особливостей використання повідомлень протоколу NTP на транспортної мережі IP / MPLS. Завдяки можливості порівнювати шкали часу декількох територіально рознесених серверів NTP щодо одного з них на основі програмного забезпечення, призначеного для моніторингу підмереж NTP, встановлений характер взаємних відхилень шкал часу в залежності від завантаженості мережі IP / MPLS в різний час доби. Результати одного з таких сеансів моніторингу відображені на рис. 2.7.

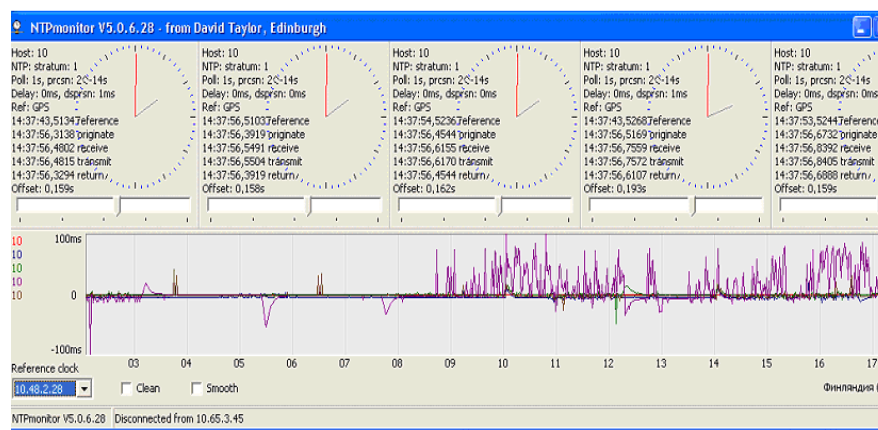


Рис.2.7. Моніторинг NTP-серверів.

Дані відхилення обумовлені використанням механізмів перенаправлення голосового і сигнального трафіку на вузлах M-MGw і MSC-S в разі перевантажень мережі або відмови в вузлах мережі з розподіленою архітектурою.

Даний моніторинг проводився на, ділянці мережі IP / MPLS під час тестування декількох вузлів мережі з розподіленою архітектурою. Наступною особливістю поширення сигналів NTP є постійне відхилення шкал часу різних NTP-серверів в разі навмисного відсутності тимчасової синхронізації на маршрутизаторах дослідної ділянки мережі IP / MPLS. Як і в першому випадку, відхилення становило близько 100 мс.

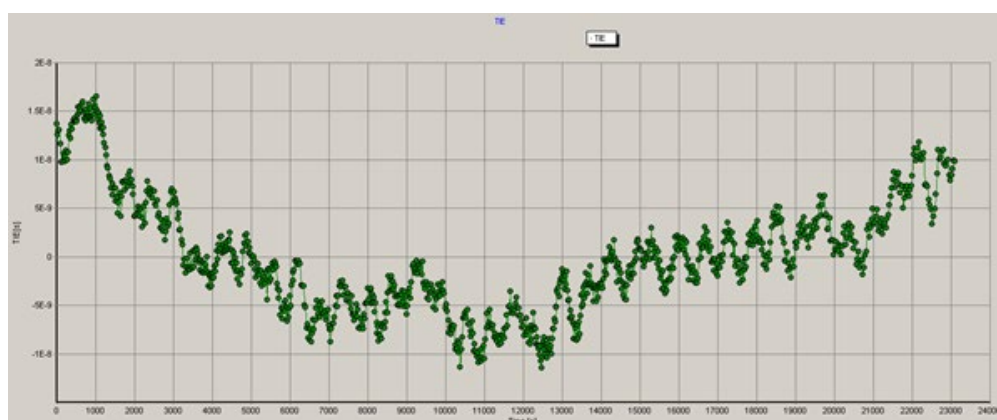
Отже, при проектуванні мережі тимчасової синхронізації на мережах з розподіленою архітектурою виникають завдання оптимізації кількості серверів сигналів точного часу з урахуванням їх швидкодії, схем їх резервування, територіального розміщення, а також створення єдиної і цілісної системи моніторингу зі звірення шкал часу.

Така система може бути створена, наприклад, на базі системи управління маршрутизаторами транспортної мережі IP / MPLS при наявності в ній відповідних програмно-апаратних засобів. При звірванні шкал часу, що власне і є основним завданням синхронізації в пакетній мережі, слід враховувати похибки, властиві повідомленнями NTP.

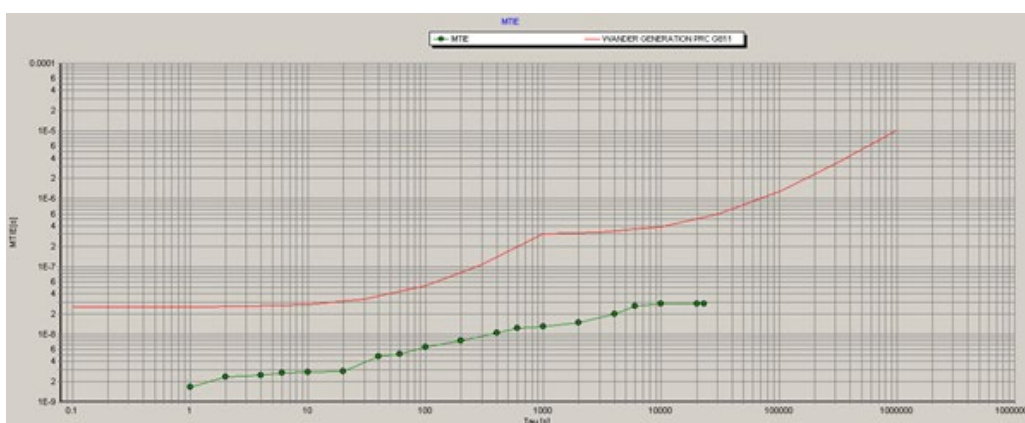
Синхронізація базових станцій підключених по IP-мережі. Результати вимірювань. Питання синхронізації базових станцій (БС) мобільного зв'язку є найбільш актуальним в даний момент в аспекті синхронізації пакетних мереж. Результати аналізу і випробувань з цього питання були досить широко представлені в публікаціях [47, 48].

Розглянемо можливість комбінованого застосування методів забезпечення синхронізацією БС по Sync-E, а також із залученням протоколів NTP і RTP на структурі мережі з комутацією пакетів: основної мережі (ядра), агрегації і доступу. На рівні основної мережі найбільш оптимальною є реалізація синхронізації на технології Sync-E. Це обумовлено порівняно невеликими витратами на заміну / оновлення обладнання тільки на магістральному рівні і забезпеченням гарантовано

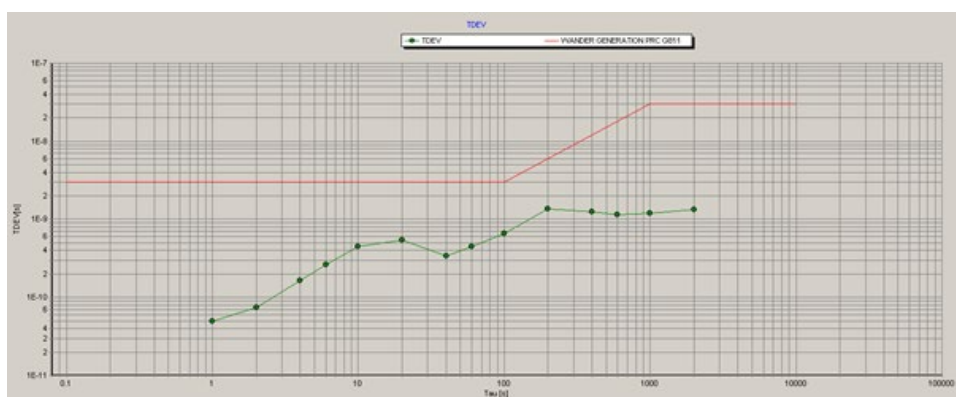
якісної передачі сигналу синхронізації на великі відстані. На рис. 2.8 показані результати лінійних випробувань PTP для рівня агрегації. В даному випадку в якості опорної частоти для мережі IP / MPLS (точніше для grandmaster clock PTP) використовувався сигнал мережі синхронізації, що транслюється по мережі СЦ. Джерелами сигналу синхронізації є розподілені по мережі цезієві генератори і GPS-приймачі. Вимірювання параметрів стабільності частоти зроблені на рівні PE маршрутизатора при наявності трьох переприймів. З рівня PE сигнал може розподілятися, як на нижні рівні, наприклад на рівень Р і відповідно може бути використаний для синхронізації БС. На рис. 2.8 показана маска G.811 (рівень первинного джерела мережі синхронізації) для параметрів MTIE і TDEV. Сигнал придатний для БС, так як його стабільність вище, ніж $5 \cdot 10^{-8}$ за добу. Отже, протокол PTP може бути використаний на рівні доступу для синхронізації БС.



а) помилка часового інтервалу (TIE)



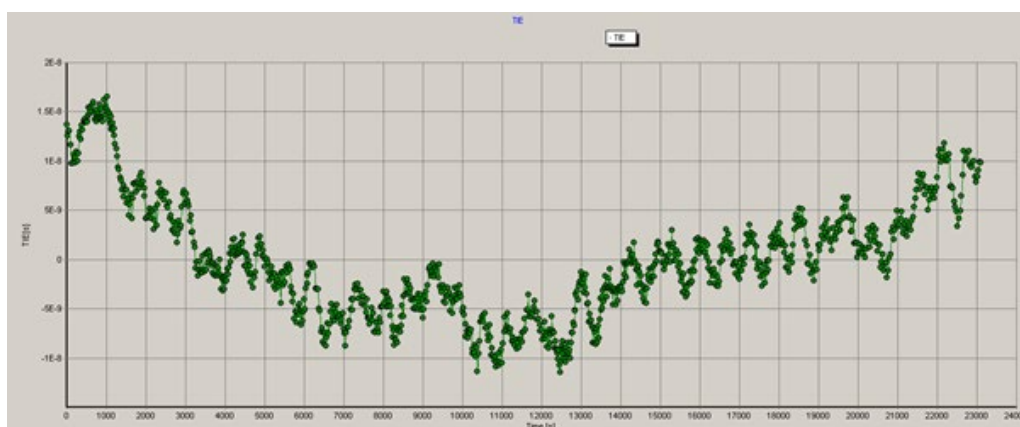
б) максимальна помилка часового інтервалу (MTIE)



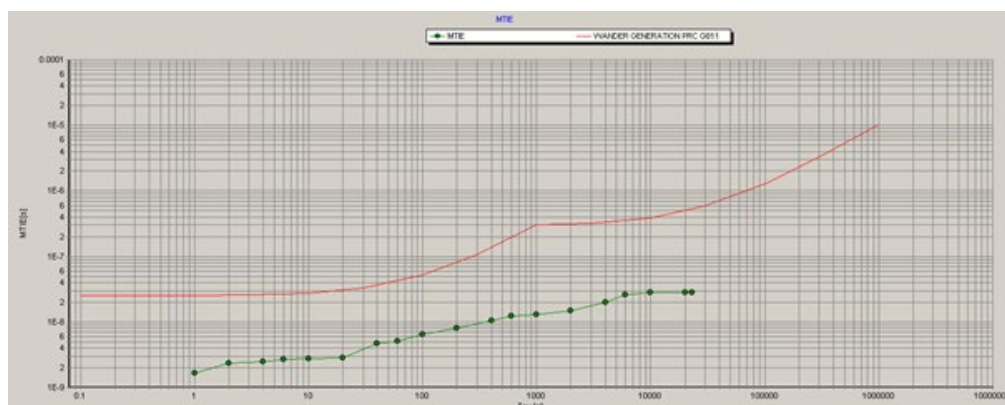
г) девіація часу (TDEV)

Рис.2.8. Вимірювання параметрів стабільності на ділянці РТР.

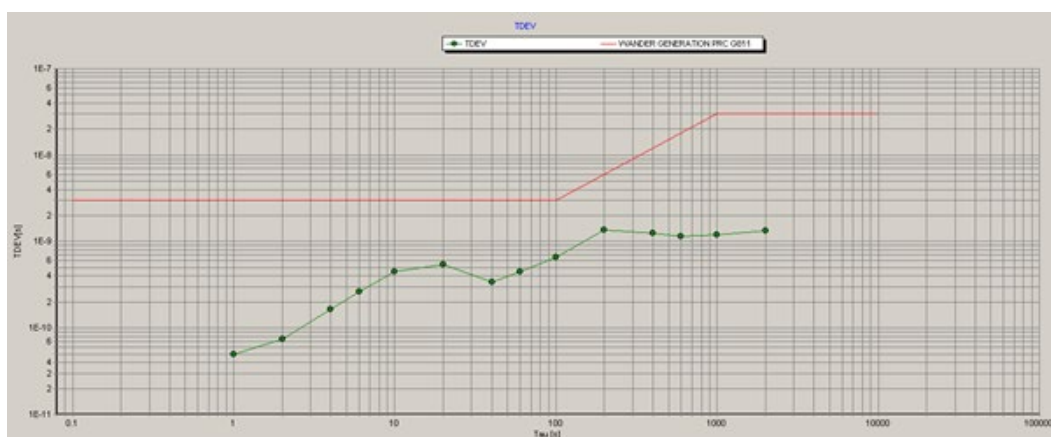
Результати лінійних випробувань на NTP для рівня доступу мережі (тобто на самому рівні БС) показано на рис. 2.9.



а) помилка часового інтервалу (TIE)



б) максимальна помилка часового інтервалу (MTIE)



г) девіація часу (TDEV)

Рис. 2.9. Вимірювання параметрів стабільності на ділянці NTP.

В цілому, вимога щодо синхронізації БС також виконується. Слід зазначити, що в Україні планується ряд проектів, які потребуватимуть вирішення питання синхронізації БС на пакетній мережі. Ця тематика буде активно досліджуватись в різних напрямках в найближчому майбутньому. Істотний вплив в цьому питанні надають конкретні рішення, пропоновані постачальниками обладнання.

2.2. Оцінка впливу сигналів синхронізації на навантаження мережі на всіх ієрархічних рівнях

2.2.1. Оцінка впливу сигналів синхронізації на навантаження мережі на рівнях доступу та агрегації

Питання синхронізації транспортних IP-мереж і підключених по ним базових станцій (БС) мобільного зв'язку стають необхідною умовою забезпечення покриття і якості послуг, що надаються. На сьогоднішній день на ринку телекомунікацій достатньо нових ефективних методів для забезпечення синхронізації в мережах IP / MPLS: протоколи звірення часу NTP (Network Time Protocol) [1] і PTP (Precision Time Protocol) [43], а також технологія Sync-E (Synchronous Ethernet) [38]. Кожен з варіантів синхронізації пакетної мережі має як переваги, так і недоліки. Тому доцільним є розгляд комбінованого використання даних варіантів синхронізації мережі з комутацією пакетів на різних ієрархічних рівнях: основний мережі (ядра), агрегації і доступу.

Методи синхронізації. При виборі того чи іншого методу забезпечення синхронізації важливо розуміти їх можливості і обмеження, а саме: - функціонуючий на фізичному рівні механізм Sync-E не залежить від завантаження мережі і дозволяє передавати сигнал синхронізації через транзитні пристрої, але забезпечує тільки частотну синхронізацію. Крім того, перехід на технологію Sync-E передбачає повну заміну обладнання IP / MPLS-мережі або його суттєве оновлення (зауважимо також, що незавершено процес стандартизації даної технології); - працює на рівні каналу передачі даних протокол RTP забезпечує як частотну, так і тимчасову синхронізацію, але стабільність розповсюджуваного сигналу залежить від завантаження мережі, а також від відстані між вузлами і кількості переприйомів; - працює на прикладному рівні протокол NTP широко використовується, як правило, для тимчасової синхронізації в пакетних мережах. Але в ряді рішень різних виробників обладнання, протокол NTP може бути використаний також і для частотної синхронізації. Наприклад, для синхронізації БС мобільного зв'язку. Детально принципи синхронізації в пакетних мережах і відмінності в роботі протоколів звірення часу були представлені в публікаціях [27, 28, 30]. Зараз ми порівнюємо найцікавіші аспекти розвитку протоколів NTP і RTP. Відповідно до локальної природою звірення часу, виміряти можна лише «власний час даного годинника» в безпосередній близькості від експериментатора.

Однак, постановка задачі дистанційного звірення часу годин, вбудованих в вузли комутації, які підключені по IP-мережі, пов'язана саме з погано контрольованими джерелами збурень - варіаціями затримки передачі і мережевим джиттером, чергами в маршрутизаторах, перевантаження трактів і непередбачуваного числа переприйомів. Для подолання труднощів, викликаних цими "витратами виробництва" IP-мережі створений набір "пом'якшуючих" алгоритмів NTP [25]. В результаті майже 30-річної еволюції вдалося досягти точності дистанційного звірення часу до 10 ... 100 мілісекунд в глобальній мережі і до 1 ... 20 мілісекунд в корпоративних мережах. Досить дорогою ціною можна досягти точності звірення часу по протоколу NTP до 1 ... 25 мікросекунд, але тільки в локальній мережі виробничого підприємства. З іншого боку для таких мереж

розроблений новий спосіб звірення часу з точністю 20 ... 100 нс під назвою «протокол прецизійного часу» - РТР. Він з'явився у вигляді стандарту IEEE 1588 на етапі впровадження техніки Ethernet в контрольно- вимірювальні системи з можливістю узагальнення і на інші мережі з багатоадресною (multicast) розсилкою повідомлень. NTP і РТР стають в якомусь сенсі конкурентними способами звірення часу в IP-мережах [24, 25]. У загальному вигляді це показано на рис. 2.10.

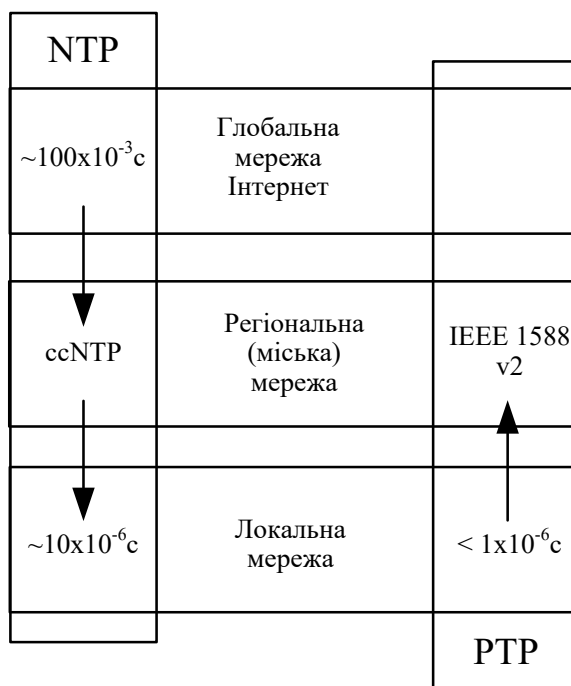


Рис.2.10. Еволюція протоколів синхронізації й параметри точності.

В IP-мережах згідно алгоритмів маршрутизації можуть бути обрані різноманітні тракти передачі. В результаті через значні варіації затримок передачі якість обслуговування синхронізації за традиційним, протоколу NTP не гарантувати, а "по можливості найкраще" ("best effort"). У традиційних мережах електрозв'язку на відміну від "best effort" прийнято забезпечувати "магістральний" якість обслуговування, при якому експлуатаційна готовність всіх основних складових частин інфраструктури оператора становить не менше 99,999%.

З іншого боку, висока якість звірення часу на основі РТР в локальних мережах суттєво погіршується при спробах застосування його, наприклад, в міській мережі загального користування (чого можна уникнути при використанні зовнішньої опорної частоти від супутникових радіонавігаційних систем - GPS / ГЛОНАСС). Це стало стимулом для розробки РТР у вигляді IEEE тисячу п'ятсот вісімдесят вісім v.2.

На основі зіставлення двох найбільш розвинених протоколів звірення часу - NTP і РТР - розглянемо проблеми звірення часу і підстроювання частоти в мережах з комутацією пакетів.

На відміну від NTP, коли сервери часто працюють як клієнти, а клієнти можуть працювати як сервери в режимі рівноправного обміну, мережу РТР суворо ієрархічна [24, 25]. На вершині ієрархії синхронізації розташовують гросмейстерські годинник (grandmaster clock). Зазвичай їх підключають до зовнішнього джерела UTC (Universal Time Coordinated), як правило, до приймача GPS (ГЛОНАСС).

РТР служить альтернативою NTP в існуючих мережах Ethernet як засіб досягнення підвищеної точності завдяки апаратним засобам проставлення міток часу, вбудованим в маршрутизатори і комутатори. Маршрутизатор (router) - це джерело флуктуацій затримки передачі між провідними і відомими годинами. Зрозуміло, що при таких флуктуації досягти точності звірення часу менш 10^{-6} с неможливо. Комутатор (switch) - це елемент мережі, який вносить флуктуації затримки передачі між провідними і відомими годинами порядку 10^{-6} с, що також не дозволяє подолати "бар'єр" точності звірення часу в 10^{-6} с.

Для того, щоб позбавити повідомлення РТР від затримок, властивих комутатора, передбачений прозорий перехід (transparency). Він не підпадає під визначення провідних або ведених годин і служить альтернативою граничним годинах в межах підмережі як функція комутатора, особливо в разі великого числа послідовно з'єднаних комутаторів. Граничні годинник (boundary clock) призначені для того, щоб виключити великі флуктуації затримок передачі, властиві маршрутизаторів, і працюють як "передавальний стандарт часу" на кордоні між підмережами. Конструктивно вони вбудовані в маршрутизатор як багатопортовий пристрій, причому один порт ведений гросмейстерський годинами, а всі інші - провідні для ординарних годин. Як свідчать результати експериментів, граничні годинники здатні забезпечити наскрізне звірення часу з точністю, еквівалентній точності, досяжною в межах підмережі.

Ординарний годинник, як правило, є веденим та має вбудовані прикладні функції, які представлені або датчиками, або виконавчими механізмами. В даний час мережі операторів зв'язку національного рівня знаходяться в стадії впровадження синхронізації на пакетних мережах. Особливо важливим моментом в цьому процесі є питання синхронізації базових станцій мобільного зв'язку [24, 25, 36].

На мережі оператора зв'язку ПрАТ «Київстар» були реалізовані пілотні проекти з застосування різних варіантів синхронізації БС від пакетної мережі. Розглянемо можливість комбінованого застосування методів забезпечення синхронізацією БС по Sync-E, а також із залученням протоколів NTP і RTP на структурі мережі з комутацією пакетів: основної мережі (ядра), агрегації і доступу.

На рівні основної мережі найбільш оптимальною є реалізація синхронізації на технології Sync-E. Це обумовлено порівняно невеликими витратами на заміну / оновлення обладнання тільки на магістральному рівні і забезпеченням гарантовано якісної передачі сигналу синхронізації на великі відстані. Результати лінійних випробувань фрагмента мережі синхронізації БС по Sync-E на основній мережі (на базі обладнання Cisco) представлені на рис. 2.11.

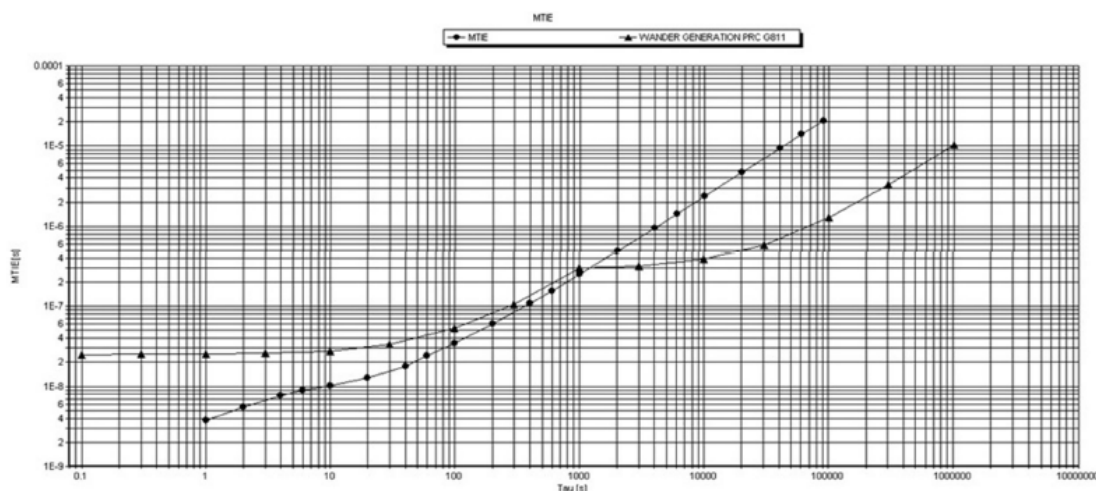


Рис.2.11. Вимірювання параметрів стабільності на ділянці Sync-E.

На рис. 2.11 показано маску G.811 (рівень первинного джерела мережі синхронізації) і результати вимірювань, які не цілком задовольняють верхній рівень ієрархії, але сигнал придатний для БС, так як його стабільність вище, ніж 5 E-8 за добу. В даному випадку в якості опорної частоти для мережі IP / MPLS

використовувався сигнал мережі синхронізації ПрАТ «Київстар», що транслюється по мережі SDH. Джерелами сигналу синхронізації є розподілені по мережі цезієві генератори і GPS-приймачі. Вимірювання параметрів стабільності частоти зроблені на рівні PE маршрутизатора з трьома переприйому. З рівня PE сигнал може розподілятися, як на нижні рівні, наприклад на рівень Р і відповідно може бути використаний для синхронізації БС.

На рис. 2.12 показані результати лінійних випробувань РТР для рівня агрегації. Результати вимірювань також не задовольняють самого верхнього рівня ієрархії, однак сигнал також придатний для БС, так як його стабільність вище, ніж $5 \cdot 10^{-8}$ за добу. Отже, протокол РТР також може бути використаний на рівні доступу для синхронізації БС. Результати лінійних випробувань на NTP для рівня доступу мережі (тобто на самому рівні БС) представлені на рис. 2.13. Це тільки рівень доступу в силу прикладної природи протоколу NTP. В цілому, вимога щодо синхронізації БС також виконується.

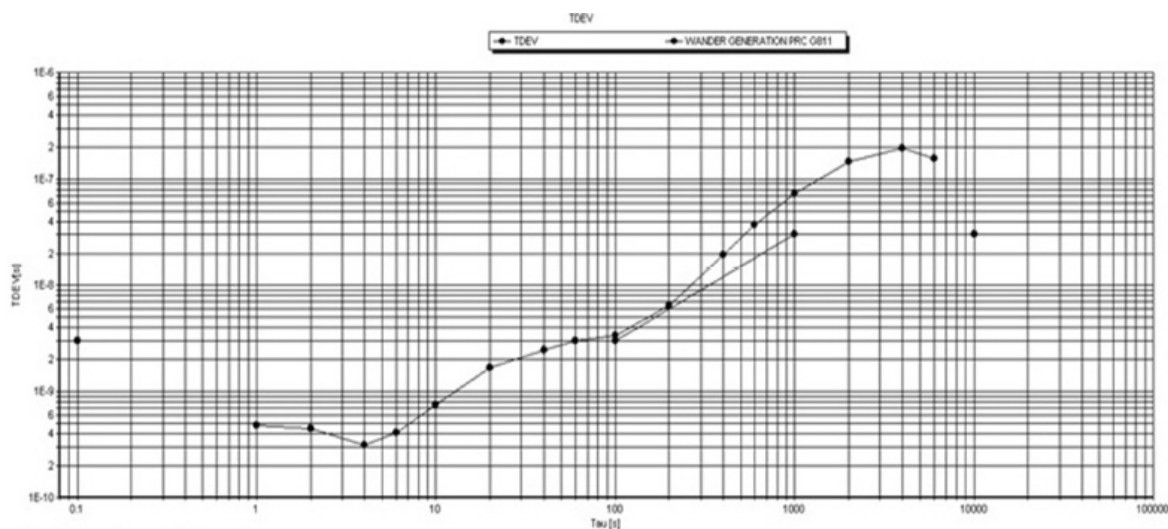


Рис.2.12. Вимірювання параметрів стабільності на відрізку РТР.

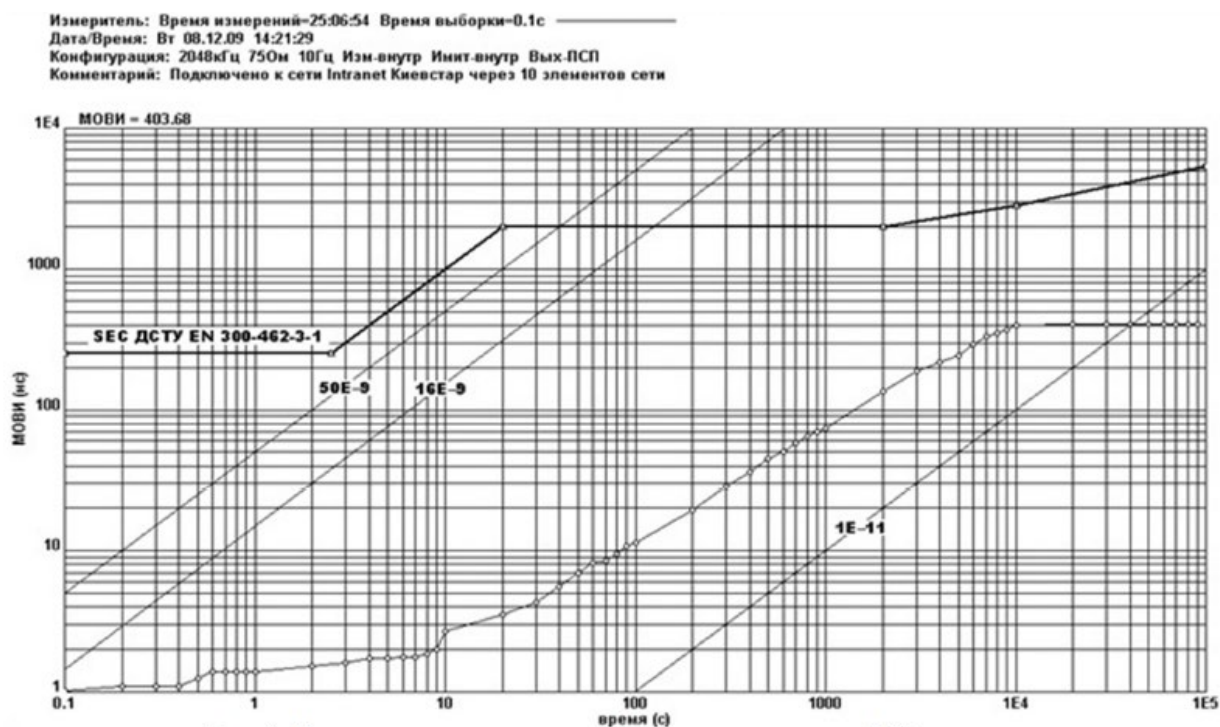


Рис.2.13. Вимірювання параметрів стабільності на ділянці NTP.

2.2.2. Оцінка впливу сигналів синхронізації на рівні ядра мультисервісної мережі

Впровадження підмереж синхронізації на транспортній мережі IP / MPLS в даний час є практичною необхідністю мобільного зв'язку в Україні. За останні роки було реалізовано кілька проектів на основі протоколів звірення часу NTP (Network Time Protocol) і PTP (Precision Time Protocol або стандарт IEEE 1588v2), а також технології синхронного Ethernet (Sync-E). Кожен із зазначених методів синхронізації має як переваги, так і недоліки [39]. Особливо актуальною проблемою є реалізація мережі синхронізації на базі протоколу PTP.

На даному етапі також ставати актуальним питання проведення вимірювань параметрів стабільності сигналів синхронізації в транспортному оточенні IP / MPLS. Також на передній план виходить і функція контролю цих показників в режимі реального часу.

Питання синхронізації життєво необхідні для сучасних транспортних мереж IP / MPLS [37]. Тому сучасною тенденцією в розвитку первинної мережі є підвищення ролі мережі синхронізації і ця тенденція збережеться в найближчому майбутньому

[32]. Більш того, проблеми синхронізації не обмежуються тільки первинною мережею, але мають важливе значення при побудові мереж доступу з урахуванням різних технологій і протоколів, реалізованих в конкретній IP / MPLS-мережі [35]. Однак, при збільшенні кількості пристроїв (наприклад, базових станцій мобільного зв'язку [43]), що підключаються по IP-мережі, проблеми синхронізації вже не можуть бути розглянуті окремо і повинні розглядатися системно.

З цим пов'язана певна локальна революція в підході: поява певної "критичної маси" споживачів сигналів синхронізації на IP / MPLS-мережі призводить до необхідності розглядати систему синхронізації як окрему складову частину системи електрозв'язку. З подальшим збільшенням кількості цифрових пристроїв починають змінюватися концепції побудови мережі синхронізації і принципи управління нею). Більш детально концепція синхронізації в транспортному оточенні IP / MPLS викладена в публікаціях [28].

Методи забезпечення синхронізації в транспортному оточенні IP / MPLS. При виборі того чи іншого методу забезпечення синхронізації важливо розуміти їх можливості і обмеження. А саме: • функціонуючий на фізичному рівні механізм Sync-E не залежить від завантаження мережі і дозволяє передавати сигнал синхронізації через транзитні пристрої, але забезпечує тільки частотну синхронізацію.

Крім того, перехід на технологію Sync-E передбачає повну заміну обладнання IP / MPLS-мережі або його суттєве оновлення [30, 38].

Протокол RTP працює на рівні каналу передачі даних та забезпечує як частотну, так і тимчасову синхронізацію, але стабільність розповсюджуваного сигналу залежить від рівня завантаження мережі, а також від відстані між вузлами мережі і кількості переприємів [39].

Протокол NTP працює на прикладному рівні та широко використовується, як правило, для тимчасової синхронізації в пакетних мережах. Але в ряді рішень різних виробників обладнання (наприклад, базові станції виробництва Ericsson), протокол NTP може бути використаний також і для частотної синхронізації [19].

Детально принципи синхронізації в пакетних мережах і відмінності в роботі

протоколів звірення часу були представлені в публікаціях [35, 40, 42]. На мережі АТ "Київстар" були реалізовані ряд пілотних проектів для синхронізації базових станцій з метою визначення оптимального методу синхронізації. Детально результати цих проектів викладені в публікаціях [46, 47, 48].

Звірення клієнта РТР з метою перевірки можливості використання цього протоколу для відновлення тактової частоти на проміжній ділянці транспортної ІР-мережі, коли мова йде про синхронізацію базової станції, дає кращі результати в порівнянні з сервером NTP, причому з істотним технологічним запасом. Протокол NTP може бути використаний замість РТР для синхронізації, наприклад базових станцій мобільного зв'язку, підключених по ІР-мережі [49].

На проміжній транспортної мережі у РТР технологічний запас за показниками стабільності (як показують виміри на мережі АТ "Київстар") більше ніж у NTP [49]. Це має важливе значення для надання деяких послуг, таких як визначення місця положення абонента, що особливо актуально після введення в дію Національної версії 3.0 загальноканальної сигналізації №7. Також на дослідній ділянці мережі АТ "Київстар" був розгорнутий сегмент з організацією синхронізації за технологією синхронного Ethernet (Sync-E) [48].

В цілому на рівні основної мережі (Core Network) найбільш оптимальною є саме реалізація синхронізації на технології Sync-E [48]. Це обумовлено порівняно невеликими витратами на заміну / оновлення обладнання тільки на магістральному рівні і забезпеченням гарантовано якісної передачі сигналу синхронізації на великі відстані. Розгортання мереж синхронізації на рівні магістрального синхронного Ethernet приносить користь операторам мереж тим, що розподіл тактовою частоти відбувається без впливу варіацій затримки пакетів. Завдяки характеристикам пристроїв синхронізації можна, загалом, керуватися існуючими правилами планування і системного проектування, що в значній мірі спрощує поєднання техніки синхронного Ethernet зі стандартною мережею синхронізації традиційного SONET / СЦІ. Однак в процесі розвитку мережі оператор матиме справу з неоднорідним обладнанням Ethernet, в якому можуть бути, а можуть і не бути кошти синхронного Ethernet (що передбачає значні капіталовкладення). Також буде

потрібно додатковий етап планування мережі просто для того, щоб переконатися, що в складі обраного ланцюжка синхронізації канали Ethernet побудовані на обладнанні, в якому є відповідні функції синхронного Ethernet. В цьому - відмінність від традиційних мереж СЦІ / SONET, в яких за визначенням будь-який вузол зобов'язаний бути елементом мережі синхронізації.

Таким чином, протокол РТР є на сьогоднішній день найбільш оптимальним методом синхронізації в транспортному оточенні IP / MPLS [49]. Протокол РТР забезпечує як частотну, так і тимчасову синхронізацію при високій якості параметрів стабільності. При цьому слід пам'ятати, як було зазначено вище, про те, що стабільність розповсюджуваного сигналу залежить від рівня завантаження мережі, а також від відстані між вузлами мережі і кількості переприйомів, - що слід враховувати на етапі планування такої мережі.

Реалізація мережі синхронізації на протоколі РТР. Протокол прецизійного часу (Precision Time Protocol - РТР) розроблений у вигляді стандарту IEEE 1588 для синхронізації робіт на автоскладальних підприємствах в локальних мережах з комутацією пакетів, але привернув увагу інженерів зв'язку, що зіткнулися з проблемою поширення сигналів синхронізації в транспортному оточенні IP / MPLS [39]. З іншого боку, висока якість звірення часу на основі РТР в локальних мережах суттєво погіршується при спробах застосування його, наприклад, в міській мережі загального користування. Це послужило стимулом для розробки РТР у вигляді IEEE тисячу п'ятсот вісімдесят вісім v.2, призначеного спеціально для мереж електрозв'язку.

На відміну від протоколу NTP, за яким обмін пронумерованими мітками часу відбувається одночасно з багатьма серверами і, як правило, в режимі рівноправного обміну (peer-to-peer), в протоколі РТР зустрічний метод порівняння шкал часу суттєво доопрацьовано, - передбачена жорстка ієрархія первинних і ведених годин [39, 58-60]. Перша особливість РТР полягає в тому, що для "доставки" веденим годинникам чотирьох міток часу використовують не два, а чотири повідомлення (рис. 2.14): повідомлення Sync (синхронізація) - багатоадресна розсилка від grosмейстерських годин через кожні 2 з за замовчуванням; повідомлення Follow Up

(нагадування) - багатоадресна розсилка мітки часу T_1 ; повідомлення Delay Req (запит затримки) - від відомих годин grosмейстерським; повідомлення Delay Resp (відгук затримки) - передача часу T_4 .

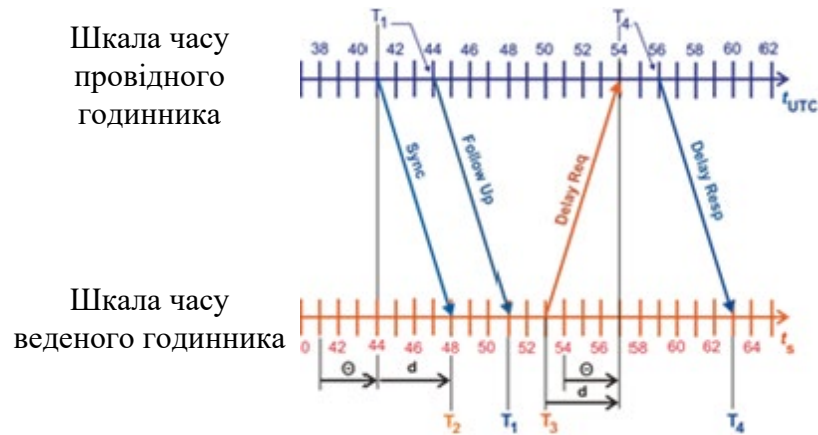


Рис.2.14. Діаграма використання повідомлень в RTP протоколі.

Як видно на рис. 2.14, де для наочності на шкалі часу t_{UTC} провідних і на шкалі часу t_s ведених годинників відзначені секундні мітки, в результаті обробки цих чотирьох повідомлень ведені годинники отримують чотири мітки часу: T_1 - час відправки повідомлення Sync від grosмейстерських годинників; T_2 - коли Ви отримуєте повідомлення Sync веденими годинниками; T_3 - час відправки повідомлення Delay Req від ведених годинників; T_4 - коли Ви отримуєте повідомлення Delay Req grosмейстерськими годинниками. Залишається обчислити однобічну затримку передачі d в припущенні, що затримки в обох напрямках оборотні:

$$d = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2} \quad (2.1)$$

при розходженні часу Θ :

$$\Theta = (T_2 - T_1) - d = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2} \quad (2.2)$$

Для прикладу, поза рис. 2.14, де відомі годинники випереджують ведені на 4 секунди, однобічна затримка складає:

$$d = \frac{(48 - 41) + (54 - 53)}{2} = \frac{7 + 1}{2} = 4 \text{ сек.}, \quad (2.3)$$

а розходження за часом рівне:

$$\Theta = (48 - 41) - 4 = 7 - 4 = 3 \text{ сек.} \quad (2.4)$$

Друга особливість РТР полягає в тому, що обмін повідомленнями Delay Resp і Delay Req відбувається нерегулярно - приблизно один раз за 4 - 60 с, в той час як багатоадресна розсилка пари повідомлень Sync і Follow Up відбувається періодично - за замовчуванням кожні 2 с.

Як показано на рис. 2.15, провідні годинники передають їх значно частіше, ніж обмінюються з відомими годинами повідомленнями Delay Resp і Delay Req. З рівняння (2) випливає, що більшу частину часу ведені годинники отримують регулярну поправку:

$$(\Theta + d)_i = (T_{2i} - T_{1i}), \quad i = 1, \dots, 30, \quad (2.5)$$

где i – номер слідуєчих однієї за одною пар повідомлень Sync і Follow Up.

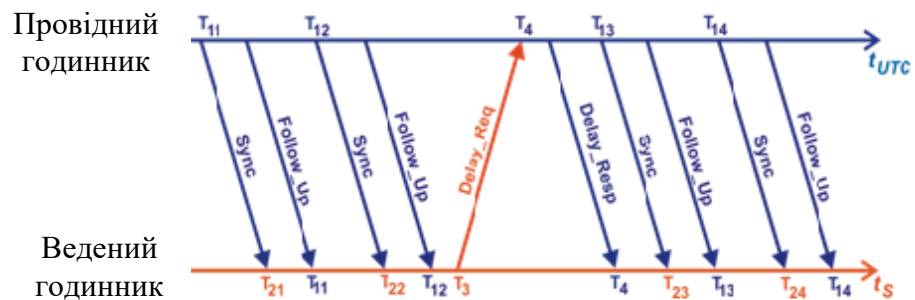


Рис.2.15. Обмін повідомленнями Delay Resp і Delay Req, Sync і Follow Up в РТР протоколі.

Вимірювання параметрів стабільності. Єдиною можливістю адекватно оцінити сигнал синхронізації є вимірювання параметрів стабільності [59, 60]. Безпосередньо вимірюється тільки функція помилки тимчасового інтервалу (Time Interval Error - TIE): різниця між виміряним значенням тимчасового інтервалу, виробленого задає генератором, і виміряним значенням того ж самого часового інтервалу, виробленого еталонним генератором, що задає. Потім, на основі отриманого масиву TIE можна зробити розрахунок максимальної помилки часового інтервалу - (Maximum Time Interval Error - MTIE): максимальне значення розмаху зміни затримки даного сигналу тактової синхронізації по відношенню до ідеального сигналу тактової синхронізації протягом часу спостереження для всіх значень часу спостереження, тривалість яких знаходиться в межах періоду виміру.

Крім того, проводиться розрахунок девіації тимчасового інтервалу (Time Deviation - TDEV): виміряне значення очікуваної зміни тимчасового інтервалу сигналу, як функція часу інтеграції. TDEV може також забезпечувати інформацією про спектральні складові фазового (або тимчасового) шуму сигналу.

MTIE - показник, який дозволяє виявляти скачки фази в сигналі синхронізації, так як за визначенням дорівнює розмаху змін фази протягом певного періоду часу. Однак через свою чутливість до стрибків фази він не адекватний для оцінки "фонового" шуму сигналу синхронізації.

TDEV - показник, який дозволяє оцінити середній квадрат потужності, тому при обчисленні TDEV скачки фази в сигналі синхронізації крадуться і фактично отримують оцінку "фонового" шуму сигналу синхронізації [59, 65-67]. Вимірювання можна проводити як на цифрових портах кінцевого обладнання (на трибутарних потоці E1), так і безпосередньо по Ethernet-порту. (Для цього останнім часом були розроблені спеціалізовані прилади: STA-61 (Spectracom), серія Paragon-M / X (Calnex)).

У процесі розгортання і експлуатації мережі синхронізації на транспортній мережі IP / MPLS виникає необхідність у створенні системи моніторингу сигналів синхронізації. Ця система не повинна залежати від кількості постачальників обладнання і кількості джерел сигналу синхронізації. Пропонується постійно проводити вимірювання значень TIE для сигналів від декількох первинних джерел відносно один одного і на основі поступово накопичених даних обчислювати значення MTIE і TDEV в заздалегідь відомі проміжки часу. Число порівнюваних сигналів повинно бути не менше трьох, що дасть можливість за мажоритарним правилом визначити аварійний сигнал.

Для цих цілей створюються апаратно-програмні вимірювальні комплекси, які є основою системи моніторингу. Вимірювачами в даному випадку можуть бути згадані вище вимірювальні прилади нового покоління, які встановлюються на мережі стаціонарно. На відміну від синхронізації цифрової класичної мережі, місця контрольних вимірювальних точок на IP / MPLS-мережі можуть варіюватися вільніше, що обумовлено гнучкістю конфігурації по IP. Таким чином, на основі

постійного моніторингу можна прийняти рішення про те, який із трьох сигналів вийшов за норми, які визначені масками [10, 62].

Для обчислень MTIE і TDEV необхідно накопичити масиви даних TIE і потім в певні інтервали часу проводиться видача результату. Слід також згадати ще один параметр, що оцінює якість синхронізації. Девіація затримки пакетів (Packet Delay Variation -PDV): характеризує рівень завантаження IP / MPLS-мережі в залежності від затримки пакетів.

У класичній цифровій мережі цей параметр відсутній в силу її природи. PDV не повинен перевищувати 50 мс, в іншому випадку параметри стабільності сигналів синхронізації вийдуть за норми, які визначені масками [10, 62]. Цей факт підтверджується вимірами MTIE і TDEV на пілотній ділянці мережі синхронізації на IP / MPLS-мережі [24, 25]. PDV також вимірюється згаданими вище вимірювальними приладами і може бути експлуатаційним параметром в проектованій системі моніторингу мережі синхронізації в транспортній IP / MPLS-мережі.

2.3. Вимірювання параметрів стабільності сигналів синхронізації в пакетних мережах

Для оцінки працездатності мережі синхронізації необхідно проведення вимірювань. Жодна система управління або моніторингу мережевим обладнанням не дає реальної картини за якістю опорних сигналів синхронізації, які споживаються кінцевими пристроями, - в даний час це, як правило, базові станції мобільного зв'язку [58]. Особливістю синхронізації в пакетних мережах є застосування нових технологічних протоколів [36, 40-43, 50].

Перш за все - це PTP (Precision Time Protocol або стандарт IEEE 1588v2), який був спеціально розроблений для вирішення завдань синхронізації в пакетних мережах. В силу наявності нового середовища передачі і нових технологічних протоколів були розроблені і нові вимірювані параметри стабільності сигналів синхронізації, що дозволяють оцінити якість стабільності в пакетній середовищі.

Вимірювання параметрів стабільності в пакетній мережі являють собою

відновлення тактової частоти по Рекомендації ITU-T [66, 67]. Даний документ не розглядає вимірювання сигналів синхронізації на фізичному рівні (класична мережу синхронізації [68]), а також не розглядає вимірювання в середовищі синхронний Ethernet, хоча такі можливості присутні в сучасній вимірювальній техніці [69]. В роботі будемо керуватися тільки протоколом PTP, так як саме з нього почалася тактова синхронізація пакетної мережі.

В даний час доступні два вимірювальних прилади - Time Analyzer 7500 (Microsemi, колишній Symmetricom) і Sentinel (Calnex). Ідеологія Time Analyzer 7500 полягає в тому, що сам вимірювальний прилад складається з компонентів мережі синхронізації - працює по протоколу PTP і обчислює всі дані, необхідні не тільки для оцінки точності звірення часу і оцінки стабільності частоти, але і для оцінки таких параметрів мережі як двостороння і одностороння затримки пакетів, а також девіації затримки пакетів PDV (Packet Delay Variation).

Простіше кажучи, маємо вбудований вимірювач (датчик даних вимірювань) безпосередньо в PTP сервер і / або PTP клієнт для того, щоб витягти поточні результати вимірювань і відповідні log-файли сервера (клієнта) для обчислень показників якості і зіставлення їх з нормованими межами. Апаратне проставлення міток часу забезпечує наносекундною точність. Характеристики мережі оцінюють за показниками TDEV і мінімальному відхиленню часу пакетів (packet MinTDEV), обчисленим на основі результатів вимірювання PDV по мітках часу повідомлень PTP щодо місцевого (опорного) часу.

Модуль PDV програмного забезпечення Time Monitor містить набір з шести шаблонів для пакетної синхронізації зі стандартів для електрозв'язку. Є чотири шаблони за показником packetTDEV і два- за показником packetZTIE, які відповідають вимогам до експлуатаційних характеристик стиків синхронізації, транспортних стиків. Ці шаблони дозволяють визначити, наскільки потік пакетів PTP, що проходить по мережі, відповідає критеріям якості синхронізації прикладних процесів, і заданих умовах просто і зрозуміло кваліфікувати результати за ознакою придатний / не придатний [65-67].

Ідеологія побудови приладу Sentinel істотно відрізняється від попередньої.

Цей пристрій не складається з мережевих пристроїв синхронізації і являє собою спеціалізований програмно-апаратний комплекс для проведення вимірювань параметрів стабільності. Ядром є його програмне забезпечення, яке дозволяє виконати весь спектр вимірювань PTP і обробити результати для всіх випадків оцінки працездатності мережевого обладнання. Вимірювання PDV також є відновленням тактової частоти по Рекомендації [67]. Також є можливість обчислень показників якості MTIE / TDEV / MAFE / FPP / FPC.

Апаратна частина містить вбудований рубідієвий генератор, вбудований блок GPS, вбудований комп'ютер для проведення вимірювань та обробки отриманих даних, а також плати пакетної комутації і входів-виходів. Суттєвою особливістю Sentinel є можливість проводити до шести вимірювань PDV одночасно. Також є можливість роботи з місцевим або дистанційним керуванням (через Web або Ethernet) в режимах моніторингу або веденого пристрою синхронізації з підключенням зовнішньої пам'яті через USB і наданням результатів вимірювань в форматі *.pdf. В даний час у операторів сервісів використовується вимірювальний прилад Calnex Sentinel. Тому в роботі представлено результати вимірювань тільки одного приладу і тільки в вимірювальному режимі "псевдо-клієнт". Згодом передбачається розширити можливості за рахунок закупівлі вимірювального пріора Time Analyzer 7500 і / або апробації вимірювального режиму "вимірювання в Моніторі - установка приладу в розрив". Вимірювання і моніторинг PTP серверів йдуть постійно.

Сама мережа синхронізації пакетної мережі почала будуватися паралельно з реалізацією проекту 3G.

В даний час сегмент мережі PTP заснований на гранд-майстрах TP5000 Microsemi (Symmetricom). Схема вимірювань представлена на рис. 2.16.

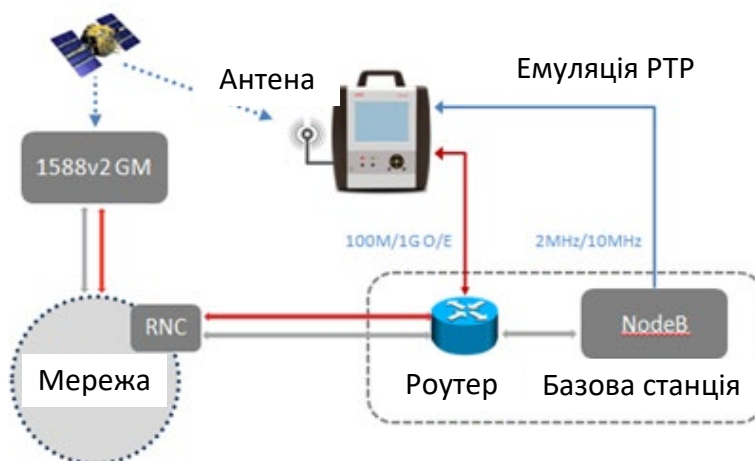


Рис.2.16. Схема вимірювань параметрів стабільності приладом Sentinel в режимі "псевдо-клієнта".

Як уже згадувалося, вимірювання проходять в режимі "псевдо-клієнт". Даний режим має переваги в оцінці віддалених RTP серверів TP5000 і дозволяє застосувати результати вимірювань для планування розвитку мережі - розміщення нових RTP серверів, топологія мережі базових станцій і т.п.

Вимірювання 1 - віддалене вимір з Києва (Sentinel) RTP сервера TP5000 в м Полтава (TP5000), вимірювання PDV тривали протягом 3-х діб (рис. 2.17). На вимірах чітко видно добові блукання, пов'язані з трафіковим навантаженням на мережу MPLS в залежності від часу доби. Проте, результати показують придатність використання цього сигналу для синхронізації базової станції.

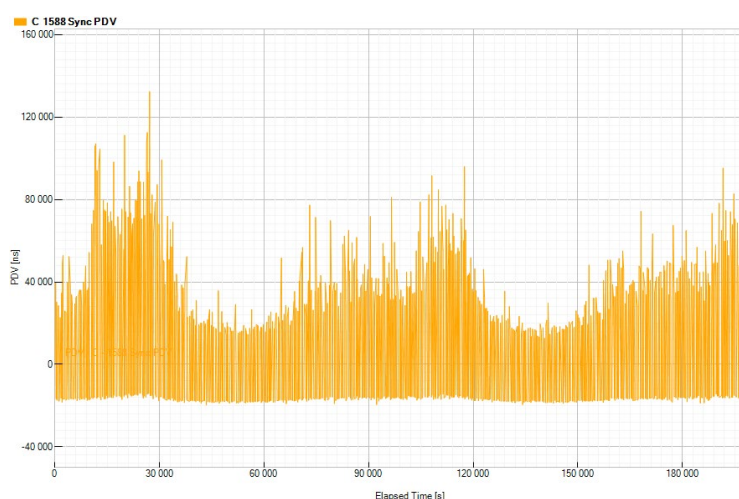


Рис.2.17. Вимірювання 1 - вимірювання PDV протягом трьох діб.

Наступні вимірювання, вимірювання 2 проводились також віддалено по ще більш довгій трасі (включаючи зонову ділянку, після виходу з магістралі) Київ

(Sentinel) - Кривий Pig (TP5000). Але головна примітність цих вимірів - це моделювання аварії на RTP сервері TP5000. Було висмикнуто патч-корд з активного блоку генератора TP5000, після чого сервер перейшов на резервний. Потім був проведений зворотний перехід на основний блок генератора. Всі операції проводилися протягом доби з набором статистичних даних і вимірюванням PDV.

Результати представлені на рис. 2.18. Флуктуації виміряного PDV, пов'язані з перемиканням на резерв і назад. Тут також маємо задовільну якість опорного сигналу і його придатність для синхронізації базової станції, незважаючи на віддаленість сервера і екстремальні умови. В обох вимірах вимірювальний прилад Sentinel виступає фактично в ролі базової станції, саме як споживач опорного сигналу RTP.

Спираючись на ці вимірювання можливо зробити висновки щодо якості проходження сигналу по мережі MPLS, про необхідність встановлювання додаткових RTP серверів TP5000. Слід також наголосити на важливості постійного такого моніторингу сигналів синхронізації, так як пакетним мережам властиві динамічні зміни протягом доби і / або в зв'язку з ростом трафіку.

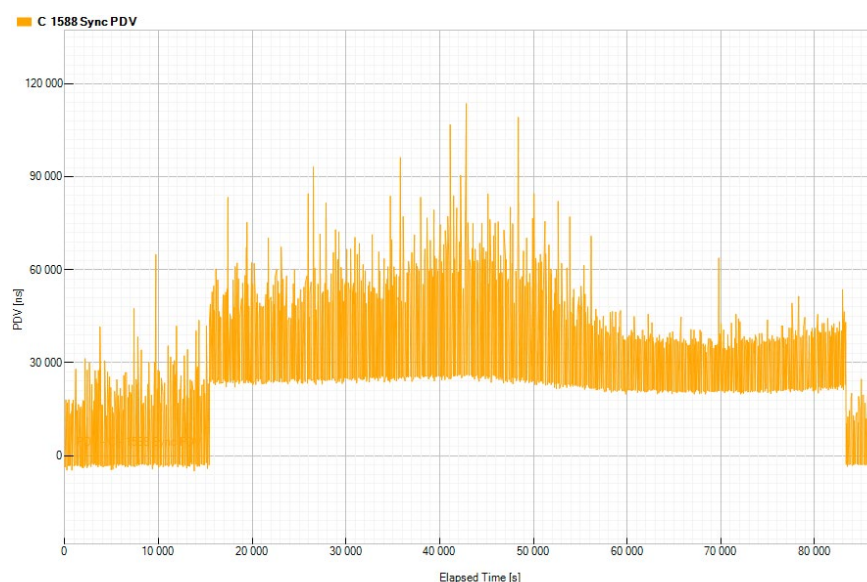
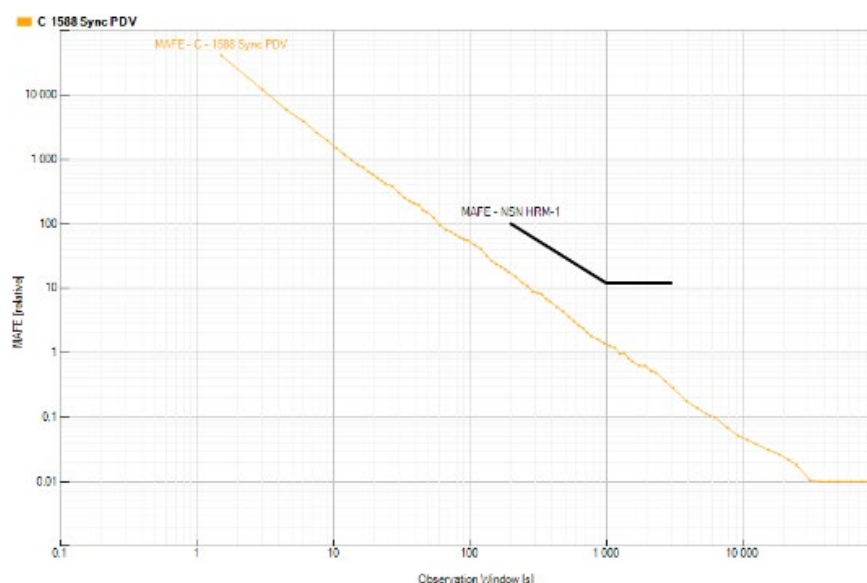


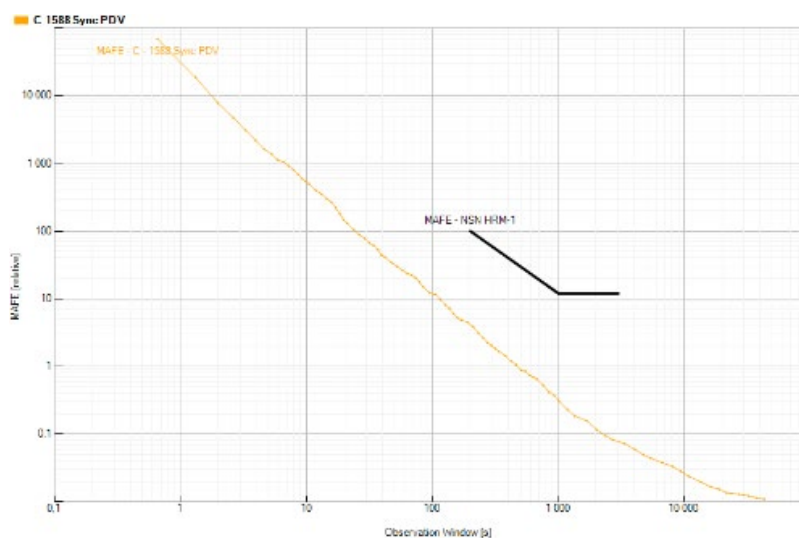
Рис.2.18. Вимірювання 2 - вимірювання PDV при моделюванні аварії на RTP сервері TP5000.

Результати вимірювань PDV не є достатніми для оцінки сигналу синхронізації. Необхідно з вимірянних даних отримати ряд додаткових параметрів. Як мінімум це

набір - MTIE / TDEV / MAFE / FPP / FPC. В даний час немає повного розуміння чіткого експлуатаційного переліку цих параметрів (на відміну від класичної мережі синхронізації - TIE / MTIE / TDEV) [42]. Однак, в даний час параметр MAFE можна вважати основним для визначення якості сигналу синхронізації в пакетній мережі. Нижче на рис. 2.19 наведені результати розрахунку параметра MAFE для наших вимірювань 1 і 2. Як бачимо, параметр вписується в маску з істотним технологічним запасом, що ще раз підтверджує придатність сигналів в вимірах 1 і 2 для синхронізації базових станцій.



а) вимірювання 1



б) вимірювання 2

Рис.2.19. Результати розрахунку MAFE для вимірювань 1 і 2.

2.4. Висновки

1. Проведено оцінку впливу сигналів синхронізації на навантаження мережі на рівнях доступу, агрегації та ядра мультисервісної макромережі. Проаналізовано методи забезпечення синхронізації базових станцій від різних ієрархічних рівнів мережі з комутацією пакетів.

Синхронізацію тактової частоти в мережах з комутацією пакетів для верхнього рівня ієрархії за допомогою NTP на практиці реалізувати не вдасться, так як навіть на інтервалі усереднення $\tau > 10$ діб неможливо отримати нестабільність частоти на рівні 1τ на 10^{-11} (по аналогії з цифровою транспортною мережею для тактової синхронізації комутаційних вузлів). У той же час РТР дозволяє зробити це на інтервалі усереднення $\tau < 1$ доби. Таке рішення з використанням опорного сигналу GPS (ГЛОНАСС) найбільш оптимально для тактової синхронізації в IP-мережах.

2. Проектування мережі синхронізації поточного часу в мережах з розподіленою архітектурою вимагає оптимального вибору параметрів серверів часу, їх продуманого територіального розподілу, організації системи моніторингу на основі відповідного метрологічного забезпечення.

3. Вимірювання параметрів стабільності сигналів синхронізації в пакетних мережах є необхідними для оцінки якості наданих послуг мобільного зв'язку [6].

Основними умовами для проведення вимірювань є: - вибір вимірювального приладу; - організація схеми вимірювань; - вибір експлуатаційних параметрів стабільності при розрахунку результатів вимірювання PDV; - обробка результатів вимірювань.

4. На базі проведених вимірювань на пілотній мережі синхронізації оператора зв'язку, комбінування різних протоколів звірення часу прийнятно для забезпечення синхронізації БС від пакетних мереж на всіх рівнях. Такий метод дозволяє ефективно використовувати переваги різних протоколів, що істотно спростить планування мережі на різних рівнях ієрархії.

5. В процесі розгортання і експлуатації мережі синхронізації на транспортної мережі IP / MPLS виникає необхідність у створенні системи моніторингу сигналів синхронізації. Ця система не повинна залежати від кількості постачальників обладнання і кількості джерел сигналу синхронізації.

РОЗДІЛ 3. ПІДВИЩЕННЯ СТАЛОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ В МУЛЬТИСЕРВІСНІЙ МАКРОМЕРЕЖІ

В умовах переходу до мультисервісних макромереж, одним з основних завдань є завдання побудови мережевої синхронізації, що за надійністю та сталістю не повинна поступатися мережі передачі даних.

Вирішення наукового завдання щодо підвищення сталості функціонування мережевої синхронізації потребує дослідження залежностей надійності функціонування мережі від обраної топології мережі, використовуваного алгоритму роботи мережного елементу, інтенсивностей потоків відмов і відновлень.

Для вирішення поставленого завдання розглянемо типові топологічні фрагменти мереж, на яких може функціонувати мережева синхронізація. Проаналізуємо ці топологічні структури із застосуванням математичного апарату теорії Марковських випадкових процесів з дискретними станами і безперервним часом.

Основними типами топологічних структур, які використовуються в мережах синхронізації є деревовидна та кільцева, які і будуть взяті за типові для дослідження. Як перспективна топологія, яка може бути використана, пропонується фрагмент з трикутною топологічною структурою.

Основними завданнями, які мають бути вирішені в даному розділі є:

- визначення сукупності параметрів, що впливають на сталість функціонування мережевої синхронізації;
- розробка рекомендацій щодо оптимальної побудови мережевої синхронізації на основі комбінацій топологічних структур, які складаються з досліджуваних фрагментів;
- дослідження залежності сталості функціонування фрагмента мережевої синхронізації від інтенсивності відмов, інтенсивності відновлень й обраної топології;
- вибір оптимальної топології, яка забезпечує максимальну сталість мережевої синхронізації при заданих інтенсивностях потоків відмов і відновлень.

- дослідження можливості використання типових фрагментів мережі синхронізації для побудови дерева синхронізації, що динамічно адаптується.

В якості критерію застосування типу топології приймемо працездатність даного фрагмента. Сформулюємо визначення працездатності фрагмента.

Фрагмент мережі синхронізації, який складається з мережних вузлів та ліній зв'язку вважається працездатним, якщо він здатний функціонувати із заздалегідь заданою якістю сигналу синхронізації протягом певного проміжку часу.

Тому зміна якості сигналу синхронізації у бік погіршення навіть через великий проміжок часу, після відмови розглядатиметься як втрата працездатності.

3.1. Метод визначення сталості функціонування мережевої синхронізації

Для зручності представлення досліджуваних графів і формальних процедур з ними, на рівнях викладання (прикладів розрахунку) і конструювання моделей на ПЕОМ, пронумеруємо елементи графа.

Поняття, визначення, умовні позначення і математичні символи використовуються відповідно до прийнятих позначень в теорії графів [10,13, 78].

Процедура нумерації наступна:

- вершини графа нумеруються від 1 до m_v в довільному порядку,

де m_v – потужність множини вершин графа;

- ребра графа нумеруємо, використовуючи наступний алгоритм: якщо заданий граф і вершини графа пронумеровані, то змінній v привласнюється значення m_v ; якщо вершина v_i є суміжною з v_j за ребром $l_{i,j}$, то при $i < j$ виконується операція $v = v + 1$ і встановлюється цьому ребру номер, значення якого дорівнює v .

3.1.1. Аналіз фрагмента мережі з трикутною топологічною структурою

Транспортна мережа мультисервісної макромережі може розглядатися як сукупність типових топологічних фрагментів. Це деревовидна, кільцева і трикутна топологічні структури. Для аналізу принципів побудови мережі синхронізації

розглянемо один з типових топологічних фрагментів транспортної мережі з трикутною топологічною структурою.

Трикутна топологічна структура є мінімальною повнозв'язною структурою, що передбачає наявність замкнутого контуру. Також, ця структура забезпечує три незалежні джерела синхронізації. Проведемо оцінку можливості підтримки заданої якості функціонування мережевої синхронізації, яка може бути представлена трикутною топологією (рис. 3.1). При оцінці якості функціонування мережевої синхронізації враховується дія на вибраний топологічний фрагмент потоків відмов і потоків відновлення, що мають розподіл за законом Пуассона.

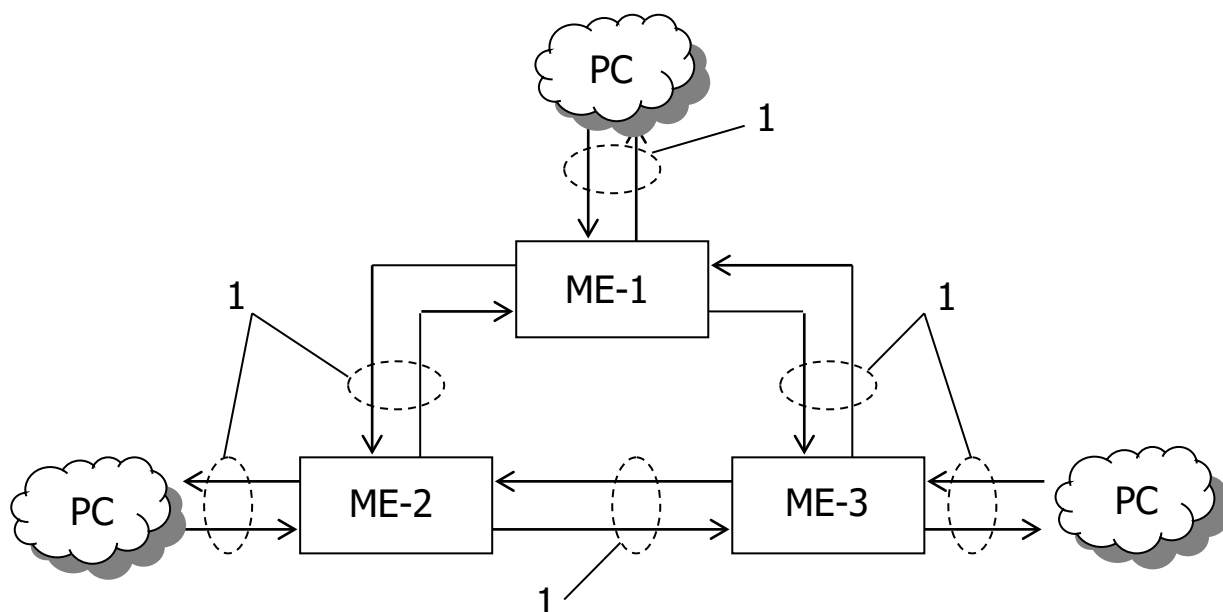


Рис.3.1. Схема фрагменту мережевої синхронізації.

ME-1, ME-2, ME-3 – мережний елемент мережі тактової синхронізації;

1 – траса синхронізації;

PC – регіон синхронізації.

Для формального опису фрагмента мережі синхронізації скористаємося теорією графів (рис. 3.2).

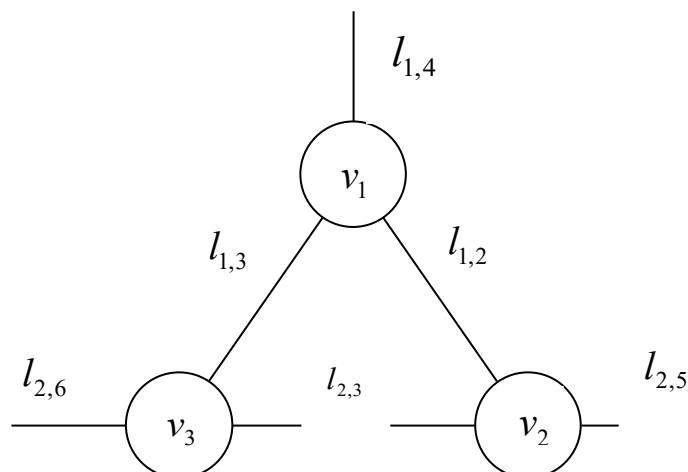


Рис.3.2. Представлення трикутної топологічної структури у вигляді графа.

v_1, v_2, v_3 - вершини графа представляючі вузли мережі тактової синхронізації;

$l_{1,2}, l_{2,3}, l_{1,3}$ - ребра графа синхронізації, що представляють трасу, між вузлами досліджуваного фрагмента;

$l_{1,4}, l_{2,5}, l_{3,6}$ - ребра графа синхронізації, що представляють маршрут між вузлами досліджуваного фрагмента і зовнішніми по відношенню до даного фрагмента вузлами.

Граф з пронумерованими елементами наведено на рис.2.3.

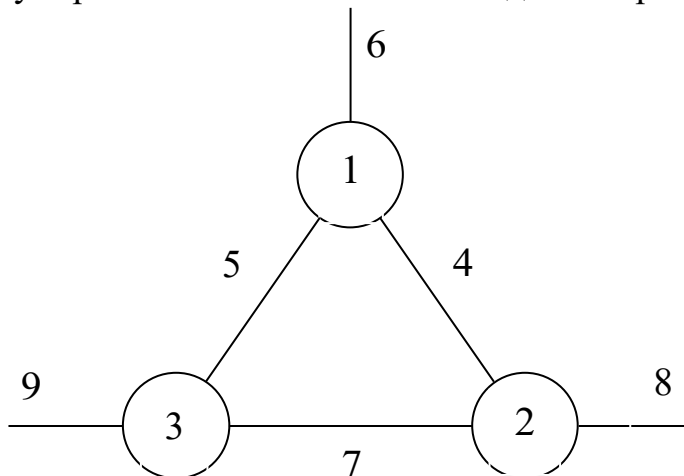


Рис.3.3. Представлення трикутної топологічної структури у вигляді графу з пронумерованими елементами.

Проаналізуємо працездатність структури наведеної на рис. 3.3.

Для вирішення даного завдання скористаємося методом аналізу Марковських процесів з дискретними станами і безперервним часом.

Фрагмент мережі має кінцеву кількість дискретних станів, в яких він може знаходитися, а відмови в даному фрагменті відбуваються у випадкові моменти часу.

Таким чином, функціонування мережевої синхронізації може бути представлено випадковим процесом з кінцевою кількістю дискретних станів, і безперервним часом, оскільки перехід в ці стани здійснюється у будь-який момент часу.

Враховуючи, що всі потоки, що переводять досліджуваний фрагмент з одного стану в інший є Пуассоновськими і незалежними, то випадковий процес переходів з одного стану досліджуваного фрагмента в інший під дією потоків відмов і відновлення, є Марковським процесом [21, 74, 75] з дискретними станами і безперервним часом.

Знайдемо імовірність станів, в яких може знаходитися фрагмент мережі при дії на нього потоку відмов і відновлень за наступних умов:

- кожен елемент фрагмента мережі, представленої на рис. 3.3, виходить з ладу незалежно від інших елементів фрагмента мережі;
- працездатність елементів 1, 2, 3 (вузли мережі на рис. 3.3) – подія достовірна;
- потоки відмов елементів фрагмента мережі – Пуассоновські, постійні, незалежні з інтенсивностями, що дорівнюють відповідно $\lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9$ (індекси відповідають номерам елементів в пронумерованому графі рис. 3.3);
- після відмови кожен елемент відновлюється;
- потоки відновлення – Пуассоновські, постійні і незалежні з інтенсивностями, що дорівнюють відповідно $\mu_4, \mu_5, \mu_6, \mu_7, \mu_8, \mu_9$ (індекси відповідають номерам елементів в пронумерованому графові рис. 3.3).

Розглянемо можливі стани (S), в яких може знаходитися фрагмент мережі, наведений на рис. 3.3.

Для цього позначимо подію, що полягає в тому, що елемент n знаходиться в робочому стані через M_n (де $n = 4, 5, \dots, 9$), а подія зворотна даній – через $\overline{M}_n$. Тоді, використовуючи ці позначення, можливі стани (S) будуть представлені таким чином:

$$S_1 - M_4 \cdot M_5 \cdot M_6 \cdot M_7 \cdot M_8 \cdot M_9 \text{ (всі елементи фрагмента в робочому стані);}$$

$$S_2 - \overline{M}_4 \cdot M_5 \cdot M_6 \cdot M_7 \cdot M_8 \cdot M_9;$$

$$\begin{aligned}
S_3 &= M_4 \cdot \bar{M}_5 \cdot M_6 \cdot M_7 \cdot M_8 \cdot M_9; \\
S_4 &= M_4 \cdot M_5 \cdot \bar{M}_6 \cdot M_7 \cdot M_8 \cdot M_9; \\
S_5 &= M_4 \cdot M_5 \cdot M_6 \cdot \bar{M}_7 \cdot M_8 \cdot M_9; \\
S_6 &= M_4 \cdot M_5 \cdot M_6 \cdot M_7 \cdot \bar{M}_8 \cdot M_9; \\
S_7 &= M_4 \cdot M_5 \cdot M_6 \cdot M_7 \cdot M_8 \cdot \bar{M}_9; \\
S_8 &= \bar{M}_4 \cdot \bar{M}_5 \cdot M_6 \cdot M_7 \cdot M_8 \cdot M_9; \\
&\dots\dots\dots; \\
S_{23} &= \bar{M}_4 \cdot \bar{M}_5 \cdot \bar{M}_6 \cdot M_7 \cdot M_8 \cdot M_9; \\
&\dots\dots\dots; \\
S_{43} &= \bar{M}_4 \cdot \bar{M}_5 \cdot \bar{M}_6 \cdot \bar{M}_7 \cdot M_8 \cdot M_9; \\
&\dots\dots\dots; \\
S_{58} &= \bar{M}_4 \cdot \bar{M}_5 \cdot \bar{M}_6 \cdot \bar{M}_7 \cdot \bar{M}_8 \cdot M_9; \\
&\dots\dots\dots; \\
S_{64} &= \bar{M}_4 \cdot \bar{M}_5 \cdot \bar{M}_6 \cdot \bar{M}_7 \cdot \bar{M}_8 \cdot \bar{M}_9 \text{ (всі елементи фрагмента вийшли з ладу)}.
\end{aligned}$$

Використовуючи групу несумісних подій, побудуємо розмічений граф станів фрагмента мережі. Розглянемо окремий випадок, коли інтенсивності $\lambda(t)$ і $\mu(t)$ не залежать від часу.

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const} \quad \mu(t) = \mu = \text{const}$$

У розміченому графі станів біля кожної стрілки, ведучій із стану s_i в стан s_j вказана інтенсивність пуассоновського потоку подій λ_{ij} , що переводить фрагмент мережі із стану s_i в стан s_j .

Відповідно до розміченого графа станів фрагмента, складаємо систему диференціальних рівнянь Колмогорова для імовірності станів.

$$\begin{aligned}
\dot{p}_1 &= -(\lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8 + \lambda_9) \cdot p_1 + \mu_4 \cdot p_2 + \mu_5 \cdot p_3 + \mu_6 \cdot p_4 + \mu_8 \cdot p_6 + \mu_9 \cdot p_7 + \mu_7 \cdot p_5; \\
\dot{p}_2 &= \lambda_4 \cdot p_1 - (\mu_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8 + \lambda_9) \cdot p_2 + \mu_5 \cdot p_8 + \mu_6 \cdot p_9 + \mu_7 \cdot p_{10} + \mu_8 \cdot p_{11} + \mu_9 \cdot p_{12}; \\
\dot{p}_3 &= \mu_6 \cdot p_{13} + \mu_7 \cdot p_{14} + \mu_8 \cdot p_{15} + \mu_9 \cdot p_{16} + \lambda_5 \cdot p_1 - (\mu_5 + \lambda_4 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8 + \lambda_9) \cdot p_3 + \mu_4 \cdot p_8; \\
\dot{p}_4 &= \mu_4 \cdot p_9 + \lambda_6 \cdot p_1 - (\mu_6 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_7 + \lambda_8 + \lambda_9) \cdot p_4 + \mu_8 \cdot p_{18} + \mu_5 \cdot p_{13} + \mu_7 \cdot p_{17} + \mu_9 \cdot p_{19};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{p}_5 &= \lambda_7 * p_1 + \mu_8 * p_{20} - (\mu_7 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8 + \lambda_9) * p_5 + \mu_4 * p_{10} + \mu_6 * p_{17} + \mu_5 * p_{14} + \mu_9 * p_{21}; \\
\dot{p}_6 &= \mu_9 * p_{22} + \mu_7 * p_{20} + \mu_6 * p_{18} + \mu_5 * p_{15} + \mu_4 * p_{11} - (\mu_8 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8 + \lambda_9) * p_6 + \lambda_8 * p_1; \\
\dot{p}_7 &= \mu_8 * p_{22} + \mu_7 * p_{21} + \mu_6 * p_{19} + \mu_5 * p_{16} + \mu_4 * p_{12} - (\mu_9 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + 2 * \lambda_7) * p_7 + \lambda_9 * p_1; \\
\dot{p}_8 &= \mu_9 * p_{26} + \mu_8 * p_{25} + \mu_7 * p_{24} - (\mu_4 + \mu_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8 + \lambda_9) * p_8 + \mu_6 * p_{23} + \lambda_4 * p_3 + \lambda_5 * p_2; \\
&\dots; \\
\dot{p}_{23} &= \mu_9 * p_{45} + \mu_8 * p_{44} + \mu_7 * p_{43} - (\mu_5 + \mu_6 + \mu_4 + \lambda_7 + \lambda_8 + \lambda_9) * p_{23} + \lambda_5 * p_9 + \lambda_4 * p_{13} + \lambda_6 * p_8; \\
&\dots; \\
\dot{p}_{43} &= \mu_9 * p_{59} + \mu_8 * p_{58} + \lambda_4 * p_{33} - (\mu_7 + \mu_6 + \mu_5 + \mu_4 + \lambda_8 + \lambda_9) * p_{43} + \lambda_5 * p_{27} + \lambda_7 * p_{23} + \lambda_6 * p_{24}; \\
&\dots; \\
\dot{p}_{58} &= \lambda_6 * p_{46} + \lambda_5 * p_{49} + \lambda_4 * p_{53} - (\mu_8 + \mu_7 + \mu_6 + \mu_5 + \mu_4 + \lambda_9) * p_{58} + \mu_9 * p_{64} + \lambda_7 * p_{44} + \lambda_8 * p_{43}; \\
&\dots; \\
\dot{p}_{64} &= \lambda_4 * p_{63} - (\mu_9 + \mu_8 + \mu_7 + \mu_6 + \mu_5 + \mu_4) * p_{64} + \lambda_5 * p_{62} + \lambda_6 * p_{61} + \lambda_8 * p_{59} + \lambda_9 * p_{58} + \lambda_7 * p_{60},
\end{aligned}$$

$$\text{де} \quad \dot{p}_i = \frac{dp_i}{dt} \quad (3.1)$$

Повністю система диференціальних рівнянь приведена в Додатку В

Вирішуючи дану систему лінійних диференціальних рівнянь за допомогою пакету символьних обчислень програми MATLAB, отримаємо в символьному вигляді значення імовірності перебування мережі в одному з можливих станів.

$$\lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = \lambda_7 = \lambda_8 = \lambda_9 = 2;$$

$$\mu_4 = \mu_5 = \mu_6 = \mu_7 = \mu_8 = \mu_9 = 1$$

Чисельні значення інтенсивностей потоків відмов і відновлень можуть бути отримані для кожної конкретної телекомунікаційної мережі емпіричним шляхом, використовуючи методики, приведені в міжнародній і вітчизняній нормативній документації. Таким чином, використовуючи запропоновану методику, можна отримати приватне рішення даної задачі для будь-якої конкретної телекомунікаційної мережі.

В результаті отримаємо чисельні значення імовірності перебування мережі в одному з можливих станів. Вирішення системи лінійних диференціальних рівнянь

отримане за допомогою засобів обчислювальної техніки, а саме застосування MATLAB.

Сформуємо групи подій за кількістю функціонуючих елементів (ребер) в топологічному фрагменті мережі. Основним принципом формування групи є ознака наявності заданого числа функціонуючих ребер.

Таким чином, 1-я група подій відповідає всім (шести) функціонуючим ребрам, 2-я група – п'яти функціонуючим ребрам (з врахуванням всіх можливих станів), 3-я група – чотирьом функціонуючим ребрам, 4-я група – трьом функціонуючим ребрам, 5-я група – двом функціонуючим ребрам, 6-я група – одному функціонуючому ребру і 7-я група відповідає відсутності функціонуючих ребер.

Кількість даних станів в групах описується формулою для кількості сполучень [22- 24], а саме:

- для першої групи подій (при функціонуванні всіх ребер), що відповідає наявності всіх зв'язків між вузлами і визначається як:

$$n_1 = C_6^0 = \frac{6!}{0! \cdot (6-0)!} = 1$$

- для другої групи подій (за відсутності одного ребра), що відповідає виключенню одного із зв'язків між вузлами за наявності останніх:

$$n_2 = C_6^1 = \frac{6!}{1! \cdot (6-1)!} = 6$$

- для третьої групи подій (за відсутності двох ребер), що відповідає виключенню двох зв'язків між вузлами за наявності останніх:

$$n_3 = C_6^2 = \frac{6!}{2! \cdot (6-2)!} = 15$$

- для четвертої групи подій (за відсутності трьох ребер), що відповідає виключенню трьох зв'язків між вузлами за наявності останніх:

$$n_4 = C_6^3 = \frac{6!}{3! \cdot (6-3)!} = 20$$

- для п'ятої групи подій (за відсутності чотирьох ребер), що відповідає виключенню чотирьох зв'язків між вузлами за наявності останніх:

$$n_5 = C_6^4 = \frac{6!}{4! \cdot (6-4)!} = 15$$

- для шостої групи подій (за відсутності п'яти ребер), що відповідає виключенню п'яти зв'язків між вузлами за наявності однієї:

$$n_6 = C_6^5 = \frac{6!}{5! \cdot (6-5)!} = 6$$

- для сьомої групи подій (за відсутності шести ребер), що відповідає виключенню всіх зв'язків між вузлами:

$$n_7 = C_6^6 = \frac{6!}{6! \cdot (6-6)!} = 1$$

Імовірність того, що стан системи належить конкретній групі подій визначається таким чином:

- для першої групи подій:

$$P_1 = p_1$$

- для другої групи подій:

$$P_2 = p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + p_7$$

- для третьої групи подій:

$$P_3 = p_8 + p_9 + p_{10} + p_{11} + p_{12} + p_{13} + p_{14} + p_{15} + p_{16} + p_{17} + p_{18} + p_{19} + p_{20} + p_{21} + p_{22}$$

- для четвертої групи подій:

$$P_4 = p_{23} + p_{24} + p_{25} + p_{26} + p_{27} + p_{28} + p_{29} + p_{30} + p_{31} + p_{32} + p_{33} + p_{34} + p_{35} + \\ + p_{36} + p_{37} + p_{38} + p_{39} + p_{40} + p_{41} + p_{42}$$

- для п'ятої групи подій:

$$P_5 = p_{43} + p_{44} + p_{45} + p_{46} + p_{47} + p_{48} + p_{49} + p_{50} + p_{51} + p_{52} + p_{53} + p_{54} + p_{55} + p_{56} + p_{57}$$

- для шостої групи подій:

$$P_6 = p_{58} + p_{59} + p_{60} + p_{61} + p_{62} + p_{63}$$

- для сьомої групи подій:

$$P_7 = p_{64}$$

Отримані результати представлені у вигляді графіків залежностей на рис. 3.4. На рисунку значення імовірності згруповані за кількістю функціонуючих елементів (ребер) в топологічному фрагменті мережі.

Проаналізуємо всі події, які мають вплив на функціонування фрагмента мережі тактової синхронізації і визначимо саме ті події, які можуть привести до втрати працездатності трикутного фрагмента.

Для цього знайдемо імовірність виходу з ладу фрагмента мережі тактової синхронізації, приведеної на Рис. 3.5, використовуючи метод аналізу структурної надійності [17, 54-56, 64, 78].

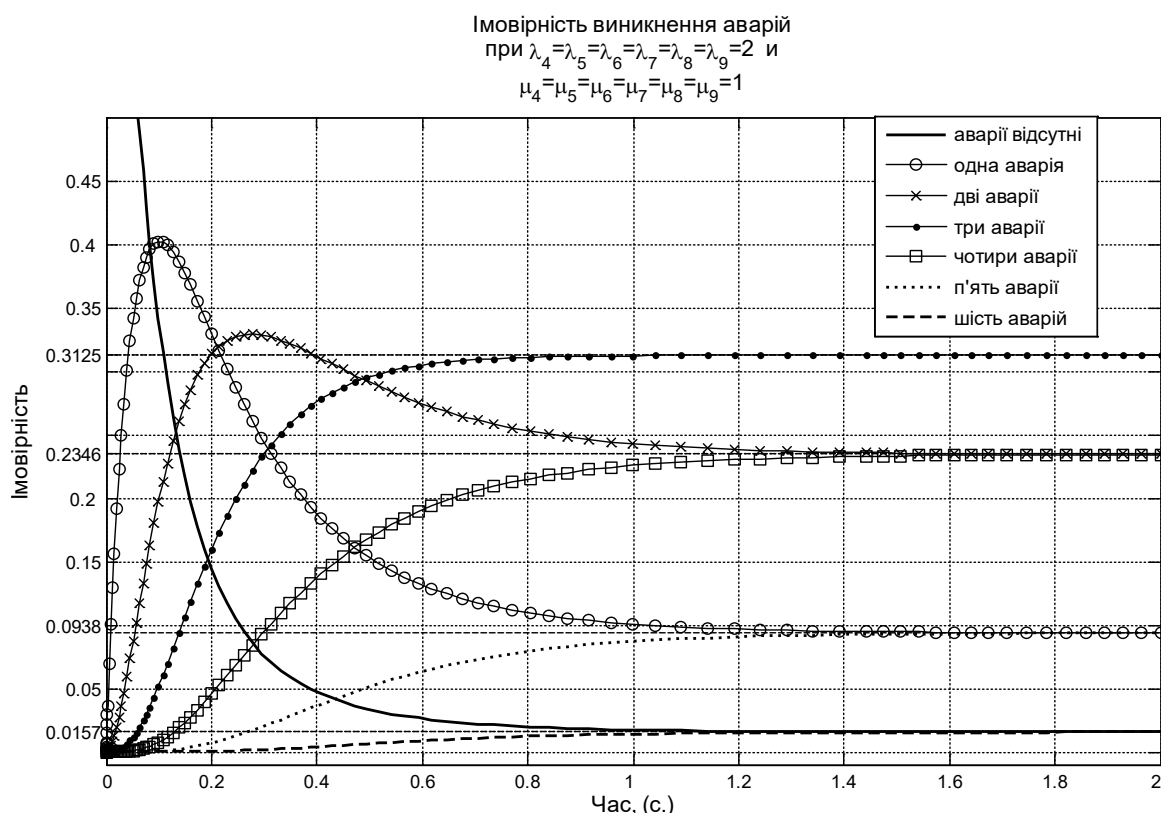


Рис.3.4. Функції залежності імовірності перебування трикутного фрагмента мережі в одному з можливих станів, який належить до конкретної групи подій.

Розіб'ємо всі несумісні події, які відбуваються, на дві групи. Перша група подій включає ті події, які не мають істотного впливу на якість функціонування мережі. Друга група подій включає ті події, кожна з яких призводить до втрати працездатності мережі. Належність тієї або іншої події до однієї з груп залежить від наступних параметрів, що характеризують мережу синхронізації, а саме:

- алгоритм функціонування вузла синхронізації;
- спосіб встановлення пріоритетів вхідним інтерфейсам (портам) синхронізації;
- встановлення рівнів якості (quality level) сигналів синхронізації;

- топологія фрагмента мережі.

Припустимо, що працездатність фрагмента мережі залежить тільки від топології, а реалізація алгоритму функціонування, способу присвоєння пріоритетів вхідним інтерфейсам, встановлення рівнів якості сигналів синхронізації є ідеальними, тобто вище перелічені параметри не впливають на якість функціонування мережі.

Рішення задачі за даної умови дає можливість отримання значення теоретичної межі для якості функціонування даного фрагмента. Отримане значення межі є максимальним з точки зору якості функціонування мережі. Ця межа далі називатимемо верхню і саме до неї наближується функціонал працездатності фрагмента мережі.

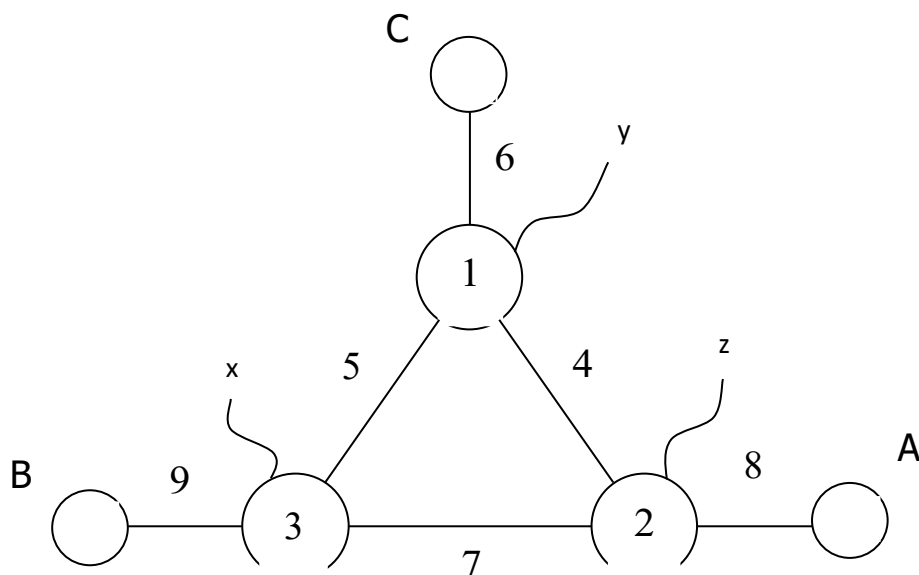


Рис.3.5. Трикутний фрагмент мережі при аналізі на працездатність.

Позначимо через $\bar{M}_{Tp}$ – подію, що призводить до втрати працездатності даного фрагмента. Здійснення події $\bar{M}_{Tp}$ представимо в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \bar{M}_{Tp} = & M_{Tp1} \bar{M}_{Tp2} \bar{M}_{Tp3} + \bar{M}_{Tp1} M_{Tp2} \bar{M}_{Tp3} + \bar{M}_{Tp1} \bar{M}_{Tp2} M_{Tp3} + M_{Tp1} M_{Tp2} \bar{M}_{Tp3} + M_{Tp1} \bar{M}_{Tp2} M_{Tp3} + \\ & + \bar{M}_{Tp1} M_{Tp2} M_{Tp3} + \bar{M}_{Tp1} \bar{M}_{Tp2} \bar{M}_{Tp3} \end{aligned} \quad (3.2)$$

де $\bar{M}_{Tp1}, \bar{M}_{Tp2}, \bar{M}_{Tp3}$ – події при яких сигнал синхронізації заданої якості буде відсутній на вихідному інтерфейсі (порту) мережного елементу, позначеного на рис. 3.5 цифрою 1, 2, 3 відповідно.

Для зручності викладання на мережних елементах 1, 2, 3 виберемо точки x, y, z (рис. 3.5). Точки x, y, z грають роль контрольних точок, фізичний сенс яких полягає в тому, що в них (цих точках) проводиться оцінка параметрів сигналу синхронізації, що надходить з вихідних інтерфейсів мережних вузлів, що знаходяться в аналізованому фрагменті.

Визначимо подію $\overline{M}_{Tp1}$ для даного фрагмента мережі. Для цього розглянемо умови, при яких в точці y відсутній сигнал синхронізації. Відсутність сигналу в точці y є можливою лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів трансльованих з вершин A, B, C не дійде до точки y .

Складемо можливі маршрути проходження сигналу від вершин A, B, C до точки y для фрагменту мережі, зображено на рис. 3.5. Можливі маршрути є простими ланцюгами. Під простими ланцюгами [8, 9, 52, 53, 62, 78] розуміється така послідовність ребер і вершин графа між двома зв'язними вершинами, в якій відсутні петлі і паралелі. Простий ланцюг є утворення вигляду:

$$\eta_i = \{l_{i,j} \cdot v_j \cdot l_{j,v} \cdot v_v \dots l_{\sigma,\xi} \cdot v_\xi \cdot l_{\xi,y}\},$$

де v – вершина графа;

l – ребро графа.

Символом « $\cdot$ » позначається послідовне з'єднання елементів.

Надійність простого ланцюга залежить від ймовірності безвідмовної роботи всіх елементів, які складають даний ланцюг і визначається як:

$$P = \prod_i P_i,$$

де P_i – ймовірність безвідмовної роботи кожного елементу простого ланцюга;

i – кількість елементів у цій мережі.

Тоді маршрути проходження сигналу між вершинами A, B, C і точкою y можна представити так:

$$A_{1y} \rightarrow y - \{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1\}$$

$$A_{2y} \rightarrow y - \{8 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1\};$$

$$B_{1y} \rightarrow y - \{9 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1\}$$

$$B_{2y} \rightarrow y - \{9 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1\};$$

$$C_{1y} \rightarrow y - \{6 \cdot 1\}.$$

Відсутність сигналу в точці y (подія $\bar{M}_{T_{p1}}$), станеться лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів, що виходить з вершин A, B, C , не досягне y . Тоді дану подію можна представити таким чином:

$$\bar{M}_{T_{p1}} = \bar{A}_y \cdot \bar{B}_y \cdot \bar{C}_y, \quad (3.3)$$

де $\bar{A}_y, \bar{B}_y, \bar{C}_y$ - події, що полягають в тому, що сигнали, відповідно з вершин A, B, C по відповідних маршрутах не досягнуть точки y .

Сигнал з вершини A не досягне точки y лише в тому випадку, якщо одночасно відмовлять два маршрути, за якими поширюється сигнал $A_{1y} \{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1\}$ і $A_{2y} \{8 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1\}$.

Тоді цю подію можна представити:

$$\bar{A}_y = \bar{A}_{1y} \cdot \bar{A}_{2y},$$

де $\bar{A}_y$ – подія, що полягає в тому, що сигнал з вершини A не досягне точки y ;

$\bar{A}_{1y}$ - подія, при якій маршрут $\{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1\}$ вийшов з ладу;

$\bar{A}_{2y}$ - подія, при якій маршрут $\{8 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1\}$ вийшов з ладу.

Подія $\bar{A}_{1y}$ станеться лише в тому випадку, якщо відмовить хоч би один з елементів 8, 2, 4 або 1 тому:

$$\begin{aligned} \bar{A}_{1y} = & \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + \\ & + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_1 + a_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_1 + \\ & + \bar{a}_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_1 + \bar{a}_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_1 + a_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_1 \end{aligned},$$

де a - подія, при якій елемент справний;

$\bar{a}$ - подія, при якій елемент не справний;

індекс при a - номер справного елементу.

Аналогічно можна описати подію $\bar{A}_{2y}$.

Аналогічно можна описати подію $\overline{B}_{2y}$.

$$\begin{aligned} \overline{B}_{2y} = & \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot a_9 + a_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot a_9 + a_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot a_9 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_7 \cdot a_9 + \\ & + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot a_9 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot \overline{a}_9 + \overline{a}_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot a_9 + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot a_9 + \\ & + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_7 \cdot a_9 + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot a_9 + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot \overline{a}_9 + a_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot a_9 + \\ & + a_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_7 \cdot a_9 + a_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot a_9 + a_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot \overline{a}_9 + a_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_7 \cdot a_9 + \\ & + a_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot a_9 + a_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot \overline{a}_9 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot a_9 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_7 \cdot \overline{a}_9 + \\ & + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot \overline{a}_9 + \overline{a}_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot a_9 + \overline{a}_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_7 \cdot a_9 + \overline{a}_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot a_9 + \\ & + \overline{a}_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot \overline{a}_9 + a_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_7 \cdot a_9 + a_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot a_9 + a_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot \overline{a}_9 + \\ & + a_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot a_9 + a_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_7 \cdot \overline{a}_9 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot \overline{a}_9 + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_7 \cdot a_9 + \\ & + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot a_9 + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot \overline{a}_9 + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot a_9 + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_7 \cdot \overline{a}_9 + \\ & + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot \overline{a}_9 + a_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot a_9 + a_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_7 \cdot \overline{a}_9 + a_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot \overline{a}_9 + \\ & + a_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot \overline{a}_9 + \overline{a}_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_7 \cdot a_9 + \overline{a}_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot a_9 + \overline{a}_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot \overline{a}_9 + \\ & + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_7 \cdot \overline{a}_9 + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot \overline{a}_9 + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot \overline{a}_9 + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot \overline{a}_9 + \\ & + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_7 \cdot \overline{a}_9 + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_7 \cdot \overline{a}_9 + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot \overline{a}_9 + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_7 \cdot a_9 \end{aligned}$$

Використовуючи метод поглинання, запишемо подію $\overline{B}_y$:

$$\overline{B}_y = \overline{a}_9 + a_5 \cdot \overline{a}_9 \cdot \overline{a_4 \cdot a_7} \quad (3.5)$$

Сигнал з вершини C не досягне точки y лише в тому випадку, якщо відмовить маршрут, за яким поширюється сигнал $\{6 \cdot 1\}$, а це станеться, якщо відмовить хоч би один з елементів 6 або 1, тому:

$$\overline{C}_y = \overline{a}_6 \cdot a_1 + a_6 \cdot \overline{a}_1 + \overline{a}_6 \cdot \overline{a}_1 \quad (3.6)$$

Запишемо подію $\overline{M}_{Tp1}$ з врахуванням формул (3.2) - (3.6), провівши низку нескладних перетворень, і використовуючи метод поглинання:

$$\overline{M}_{Tp1} = \overline{a}_6 \cdot [\overline{a}_8 + \overline{a}_4 \cdot a_8 \cdot \overline{a_5 \cdot a_7}] \cdot [\overline{a}_9 + \overline{a}_5 \cdot a_9 \cdot \overline{a_4 \cdot a_7}], \quad (3.7) \quad \text{Тоді,}$$

подія M_{Tp1} , при якій сигнал синхронізації заданої якості буде присутній на вихідному інтерфейсі (порту) мережного елементу, визначається як:

$$M_{Tp1} = 1 - \overline{M}_{Tp1} = \overline{a_6 \cdot [\overline{a}_8 + \overline{a}_4 \cdot a_8 \cdot \overline{a_5 \cdot a_7}] \cdot [\overline{a}_9 + \overline{a}_5 \cdot a_9 \cdot \overline{a_4 \cdot a_7}]} \quad (3.8)$$

Використовуючи аналогічні міркування, запишемо умову появи подій $\overline{M}_{Tp2}$ і $\overline{M}_{Tp3}$.

Подія $\overline{M}_{tp2}$ - відсутність сигналу в точці z .

Складемо можливі маршрути проходження сигналу від вершин A, B, C до точки z для фрагмента мережі представленого на Рис. 3.5.

$$A_{1z} \rightarrow z - \{8 \cdot 2\};$$

$$B_{1z} \rightarrow z - \{9 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 2\}$$

$$B_{2z} \rightarrow z - \{9 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\};$$

$$C_{1z} \rightarrow z - \{6 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\}$$

$$C_{2z} \rightarrow z - \{6 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 2\}.$$

Подія, $\overline{M}_{tp2}$ станеться лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів що виходить з вершин A, B, C не досягне z . Тоді дану подію можна представити таким чином:

$$\overline{M}_{tp2} = \overline{A}_z \cdot \overline{B}_z \cdot \overline{C}_z, \quad (3.9)$$

де $\overline{A}_z$, $\overline{B}_z$, $\overline{C}_z$ – події, що полягають в тому, що точки z не досягнуть сигнали з вершин A, B, C відповідно.

Сигнал з вершини A не досягне точки z лише в тому випадку, якщо відмовить маршрут, за яким поширюється сигнал $\{8 \cdot 2\}$, а це станеться, якщо відмовить хоч би один з елементів 8 або 2, тому:

$$\overline{A}_z = \overline{a}_8 \cdot a_2 + a_8 \cdot \overline{a}_2 + \overline{a}_8 \cdot \overline{a}_2, \quad (3.10)$$

Сигнал з вершини B не досягне точки z лише в тому випадку, якщо одночасно відмовлять два маршрути, за якими поширюється сигнал $\{9 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 2\}$ і $\{9 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\}$.

Тоді цю подію можна представити:

$$\overline{B}_z = \overline{B}_{1z} \cdot \overline{B}_{2z}, \quad (3.11)$$

де $\overline{B}_{1z}$ - подія, при якій маршрут $\{9 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 2\}$ вийшов з ладу;

$\overline{B}_{2z}$ - подія, при якій маршрут $\{9 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\}$ вийшов з ладу.

Подія $\overline{B}_{1z}$ станеться лише в тому випадку, якщо відмовить хоч би один з елементів 9, 3, 7 або 2, тому, використовуючи зворотну подію, отримаємо:

$A \rightarrow x - \{8 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 3\}$ або $\{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3\}$;

$B \rightarrow x - \{9 \cdot 3\}$;

$C \rightarrow x - \{6 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3\}$ або $\{6 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 3\}$.

Подія, $\bar{M}_{tp3}$ станеться лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів, що виходить з вершин A, B, C , не досягне x . Тоді дану подію можна представити таким чином:

$$\bar{M}_{tp3} = \bar{A}_x \cdot \bar{B}_x \cdot \bar{C}_x, \quad (3.19)$$

де $\bar{A}_x, \bar{B}_x, \bar{C}_x$ - подія, що полягає в тому, що точки x не досягне сигнал з вершин A, B, C відповідно.

Сигнал з вершини A не досягне точки x лише в тому випадку, якщо одночасно відмовлять два маршрути, за якими поширюється сигнал $\{8 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 3\}$ і $\{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3\}$.

Тоді цю подію можна представити:

$$\bar{A}_x = \bar{A}_{1x} \cdot \bar{A}_{2x}, \quad (3.20)$$

де $\bar{A}_{1x}$ - подія, при якій маршрут $\{8 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 3\}$ вийшов з ладу;

$\bar{A}_{2x}$ - подія, при якій маршрут $\{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3\}$ вийшов з ладу.

Подія $\bar{A}_{1x}$ станеться лише в тому випадку, якщо відмовить хоч би один з елементів 8, 2, 7 або 3, тому:

$$\begin{aligned} \bar{A}_{1x} = & \bar{a}_2 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot a_8 + a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_7 \cdot a_8 + a_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_8 + a_2 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_8 + \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_7 \cdot a_8 + \\ & + \bar{a}_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_8 + \bar{a}_2 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_8 + a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_8 + a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_8 + a_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_7 \cdot \bar{a}_8 + \\ & + \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_8 + \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_8 + a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_7 \cdot \bar{a}_8 + \bar{a}_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_7 \cdot \bar{a}_8 + \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_7 \cdot \bar{a}_8 \end{aligned} \quad (3.21)$$

Аналогічно можна описати подію $\bar{A}_{2x}$.

$$\begin{aligned}
\overline{M}_{Tp} &= 1 - M_{Tp} = 1 - M_{Tp1} \cdot M_{Tp2} \cdot M_{Tp3} = 1 - \overline{a_6} \cdot [\overline{a_8 + a_4 \cdot a_8 \cdot a_5 \cdot a_7}] \cdot [\overline{a_9 + a_5 \cdot a_9 \cdot a_4 \cdot a_7}] \times \\
&\quad \overline{a_8} \cdot [\overline{a_9 + a_7 \cdot a_9 \cdot a_4 \cdot a_5}] \cdot [\overline{a_6 + a_4 \cdot a_6 \cdot a_5 \cdot a_7}] \times \\
&\quad \times [\overline{a_9 \cdot a_3 + a_9 \cdot a_3 + a_9 \cdot a_3}] \cdot [\overline{a_8 + a_7 \cdot a_8 \cdot a_4 \cdot a_5}] \cdot [\overline{a_6 + a_5 \cdot a_6 \cdot a_4 \cdot a_7}] = \\
&= \overline{a_6} \cdot [\overline{a_8 + a_4 \cdot a_8 \cdot a_5 \cdot a_7}] \cdot [\overline{a_9 + a_5 \cdot a_9 \cdot a_4 \cdot a_7}] \cdot \overline{a_8} \cdot [\overline{a_9 + a_7 \cdot a_9 \cdot a_4 \cdot a_5}] \times [\overline{a_6 + a_4 \cdot a_6 \cdot a_5 \cdot a_7}] \times \\
&\quad \times [\overline{a_9 \cdot a_3 + a_9 \cdot a_3 + a_9 \cdot a_3}] \cdot [\overline{a_8 + a_7 \cdot a_8 \cdot a_4 \cdot a_5}] \cdot [\overline{a_6 + a_5 \cdot a_6 \cdot a_4 \cdot a_7}]
\end{aligned} \tag{3.31}$$

Передбачимо, що вузли 1,2,3 завжди знаходяться в працездатному стані, тобто події a_1, a_2, a_3 є достовірними. Це припущення не порушує загальності рішення даної задачі, тоді вираз (3.31) набере вигляду:

$$\begin{aligned}
\overline{M}_{Tp} &= \overline{a_6} \cdot [\overline{a_8 + a_4 \cdot a_8 \cdot a_5 \cdot a_7}] \cdot [\overline{a_9 + a_5 \cdot a_9 \cdot a_4 \cdot a_7}] \cdot \overline{a_8} \cdot [\overline{a_9 + a_7 \cdot a_9 \cdot a_4 \cdot a_5}] \cdot [\overline{a_6 + a_4 \cdot a_6 \cdot a_5 \cdot a_7}] \times \\
&\quad \times \overline{a_9} \cdot [\overline{a_8 + a_7 \cdot a_8 \cdot a_4 \cdot a_5}] \cdot [\overline{a_6 + a_5 \cdot a_6 \cdot a_4 \cdot a_7}]
\end{aligned} \tag{3.32}$$

Розглянемо граф розмічених станів (Додаток Б). Даний граф визначає сукупність станів, в яких може перебувати фрагмент мережі. Сукупність цих станів відповідає повній групі незалежних подій. Розіб'ємо цю сукупність на дві групи. Перша група включає ті стани, що не призводять до втрати працездатності досліджуваного фрагмента мережі тактової синхронізації. Друга група включає ті стани, які призводять до втрати працездатності досліджуваного фрагмента мережі тактової синхронізації. Вираження (2.32) є умовою розмежування повної групи станів мережі на дані дві групи. При цьому приймаємо, що, якщо в результаті обчислень $M_{Tp} = 1$, то стан відноситься до першої групи, тобто фрагмент ідентифікується як працездатний. Якщо ж, $M_{Tp} = 0$ то стан відноситься до другої групи, тобто фрагмент ідентифікується як непрацездатний. Обчислення проводяться таким чином:

- якщо n -й елемент фрагмента мережі знаходиться в працездатному стані, то $M_n = a_n$ приймає значення "істина" або логічна одиниця;

- якщо n -й елемент фрагмента мережі знаходиться в непрацездатному стані, то $M_n = a_n$ приймає значення "неправда" або логічний нуль;

Так наприклад, стан S_5 визначається як:

$$S_5 = M_4 \cdot M_5 \cdot M_6 \cdot \overline{M_7} \cdot M_8 \cdot M_9 = a_4 \cdot a_5 \cdot a_6 \cdot \overline{a_7} \cdot a_8 \cdot a_9 = 111011$$

Підставляючи значення для a_i в (2.32) отримуємо

$$\overline{M_{Tp}} = \overline{1 \cdot [0 + 0 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0] \cdot [0 + 0 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0] \cdot 0 \cdot [0 + 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1] \cdot [0 + 0 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0]} \times \\ \times 0 \cdot [0 + 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1] \cdot [0 + 0 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0] = \overline{1 \cdot 1 \cdot 1} = 0$$

Отже $M_{Tp} = 1$, тобто, фрагмент мережі не втратив працездатності, а S_5 відноситься до першої групи станів.

Проаналізувавши таким чином всі можливі стани $S_n(64)$, отримаємо повне уявлення про розподіл станів за групами.

Тоді імовірність виходу з ладу фрагмента мережі тактової синхронізації, виражена через інтенсивність відмов і відновлень, використовуючи вирішення диференціального рівняння (3.1) буде:

$$P(M_{Tp}) = \sum_{i=1}^{22} p_i + \sum_{i=24}^{29} p_i + \sum_{i=31}^{36} p_i + \sum_{i=38}^{40} p_i + p_{42} \quad (3.33)$$

Чисельне рішення при $\lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9=2$, $\mu_4, \mu_5, \mu_6, \mu_7, \mu_8, \mu_9=1$ для імовірності знаходження досліджуваного фрагмента в працездатному стані наведено на рис.2.6.

Відзначимо, що графіки залежностей, приведених на рис. 3.6, при $t \rightarrow \infty$ відображають настання у фрагменті стаціонарного режиму, для якого імовірність функціонування ($1 - P(M_{Tp})$) або відмови ($P(M_{Tp})$) не залежить від часу і дорівнюють відповідно:

$$1 - P(M_{Tp}) = 0,406 \quad \text{і} \quad P(M_{Tp}) = 0,594$$

У стаціонарному режимі фрагмент мережі тактової синхронізації змінює свій стан, переходячи з однієї групи в іншу і назад, але імовірність цих переходів вже не залежить від часу. Тому, їх можна тлумачити, як середній відносний час перебування фрагмента мережі тактової синхронізації у відповідних групах станів.

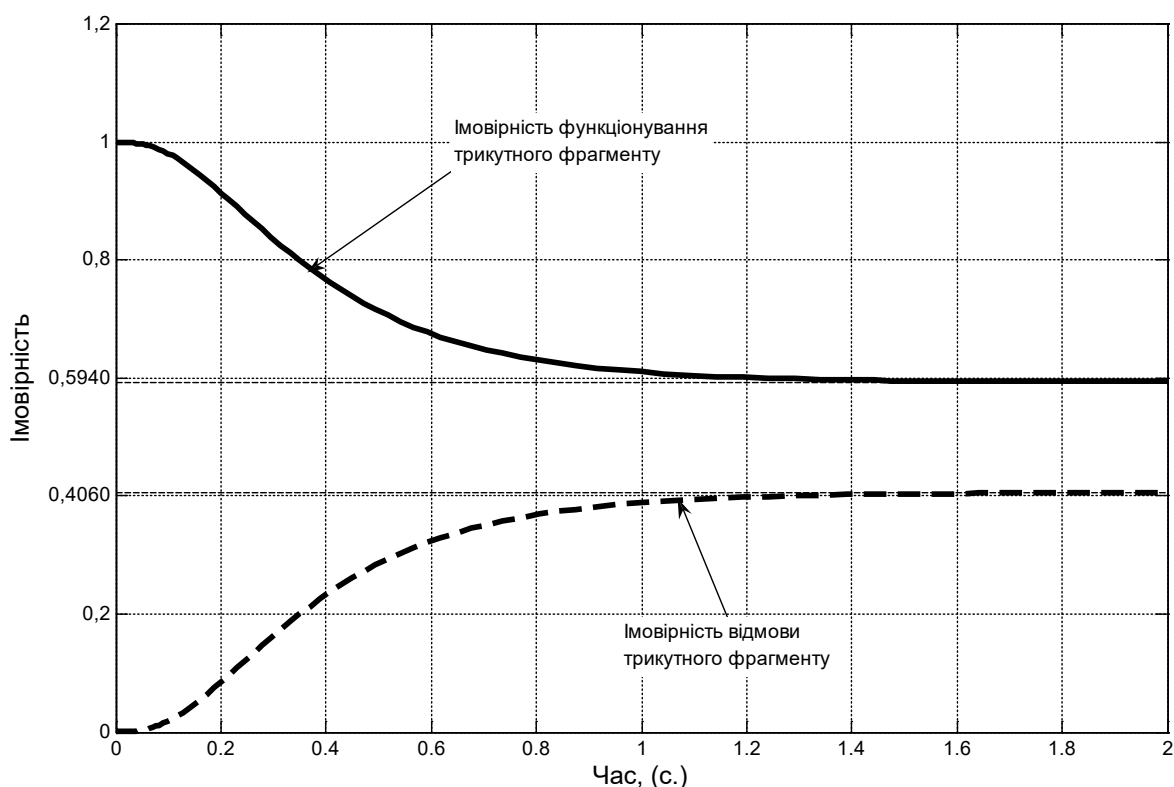


Рис.3.6. Функціональна залежність імовірності функціонування трикутного фрагмента мережі синхронізації

Враховуючи, що надійність системи тактової синхронізації – це імовірність того, що задана система буде протягом встановленого часу працювати без відмов [75], то отримане вираження (3.33) є теоретичною межею, що визначає максимальну якість функціонування даного фрагмента тактової мережі синхронізації за заданих початкових умов: інтенсивність відмов, інтенсивність відновлення і початкові умови, в яких знаходилася система (імовірність того, що система знаходилася в стані S_1 в початковий момент часу $p(S_1)=1$). Якість функціонування реальної мережі тактової синхронізації може прагнути до цього значення, але ніколи не перевищить його. Таким чином, на основі даної методики можна оцінювати з точки зору оптимальності алгоритми функціонування вузлів мереж тактової синхронізації за умови їх функціонування в трикутному фрагменті. Само значення $P(M_{Tp})$ як критерій оптимальності може використовуватися при розробці нових алгоритмів і оцінці якості існуючих алгоритмів функціонування вузлів мережі синхронізації. Все вищевикладене дозволяє проводити комплексну

оцінку якості планування і реального функціонування мережевої синхронізації, які можна представити у вигляді трикутного фрагмента.

3.1.2. Аналіз фрагмента мережі з деревовидною топологічною структурою

Деревовидна топологія є однією з розповсюджених топологічних структур, вживаних в мережах синхронізації. Більш того, в [101] встановлено, що лише дана топологія має бути використана в мережах синхронізації. Пов'язано це в першу чергу з механізмом відновлення працездатності мережевої синхронізації. Розглядаючи низку патентів, результати яких згодом були прийняті міжнародним союзом електрозв'язку за основу формування механізмом відновлення працездатності мережевої синхронізації, яка діють на сьогоднішній день, можна зробити виводи.

Основними завданнями, які вимагали вирішення, були:

- можливість створення «розвороту» напряму дерева синхронізації забезпечуючи, таким чином, функціонування мережі при виникненні аварійної ситуації;
- забезпечення вибору джерела опорного сигналу синхронізації, заснованого на якості сигналу трансльованого джерелом.

Дані завдання були успішно вирішені, свідомством чого є створення сьогоднішнього механізму відновлення працездатності мережевої синхронізації.

Таким чином, основою для створення механізму відновлення працездатності мережевої синхронізації була саме деревовидна топологія.

Тому доцільно розглядати характеристики надійності для даної топології і прийняти їх як базові. Розглянемо ділянку мережі з деревовидною топологією (рис. 3.7а). Проведемо перенумерацію елементів даного фрагменту (рис. 3.7б). Розглянувши структуру представлену на Рис. 3.7б не важко відмітити що вона тотожна трикутної за винятком ребра 7. В такому разі з розміченого графа системи зникають події пов'язані з елементом номер 7. Тому розв'язання задачі, пов'язаної з визначенням імовірності знаходження вибраного фрагмента мережі синхронізації в одному з можливих станів знаходиться шляхом розв'язання задачі аналогічної для

трикутного фрагмента, шляхом виключення ребра 7. Це досягається привласненням λ_7, μ_7 і p_7 значення нуль. Визначаємо імовірність знаходження мережі в одному з можливих станів.

$$\begin{aligned}
 \dot{p}_1 &= -(\lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8 + \lambda_9) * p_1 + \mu_4 * p_2 + \mu_5 * p_3 + \mu_6 * p_4 + \mu_8 * p_6; \\
 \dot{p}_2 &= \lambda_4 * p_1 - (\mu_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8 + \lambda_9) * p_2 + \mu_5 * p_8 + \mu_6 * p_9 + \mu_8 * p_{11} + \mu_9 * p_{12}; \\
 \dot{p}_3 &= \mu_6 * p_{13} + \mu_8 * p_{15} + \mu_9 * p_{16} + \lambda_5 * p_1 - (\mu_5 + \lambda_4 + \lambda_6 + \lambda_8 + \lambda_9) * p_3 + \mu_4 * p_8; \\
 \dot{p}_4 &= \mu_4 * p_9 + \lambda_6 * p_1 - (\mu_6 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_8 + \lambda_9) * p_4 + \mu_8 * p_{18} + \mu_5 * p_{13} + \mu_9 * p_{19}; \\
 \dot{p}_5 &= \mu_8 * p_{20} - (\lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8 + \lambda_9) * p_5 + \mu_4 * p_{10} + \mu_6 * p_{17} + \mu_5 * p_{14} + \mu_9 * p_{21}; \\
 \dot{p}_6 &= \mu_9 * p_{22} + \mu_6 * p_{18} + \mu_5 * p_{15} + \mu_4 * p_{11} - (\mu_8 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8 + \lambda_9) * p_6 + \lambda_8 * p_1; \\
 \dot{p}_7 &= \mu_8 * p_{22} + \mu_6 * p_{19} + \mu_5 * p_{16} + \mu_4 * p_{12} + \lambda_9 * p_1; \\
 \dot{p}_8 &= \mu_9 * p_{26} + \mu_8 * p_{25} - (\mu_4 + \mu_5 + \lambda_6 + \lambda_8 + \lambda_9) * p_8 + \mu_6 * p_{23} + \lambda_4 * p_3 + \lambda_5 * p_2; \\
 &\dots\dots\dots; \\
 \dot{p}_{23} &= \mu_9 * p_{45} + \mu_8 * p_{44} - (\mu_5 + \mu_6 + \mu_4 + \lambda_8 + \lambda_9) * p_{23} + \lambda_5 * p_9 + \lambda_4 * p_{13} + \lambda_6 * p_8; \\
 &\dots\dots\dots; \\
 \dot{p}_{43} &= \mu_9 * p_{59} + \mu_8 * p_{58} + \lambda_4 * p_{33} - (\mu_6 + \mu_5 + \mu_4 + \lambda_8 + \lambda_9) * p_{43} + \lambda_5 * p_{27} + \lambda_6 * p_{24}; \\
 &\dots\dots\dots; \\
 \dot{p}_{58} &= \lambda_6 * p_{46} + \lambda_5 * p_{49} + \lambda_4 * p_{53} - (\mu_8 + \mu_6 + \mu_5 + \mu_4 + \lambda_9) * p_{58} + \mu_9 * p_{64} + \lambda_8 * p_{43}; \\
 &\dots\dots\dots; \\
 \dot{p}_{64} &= \lambda_4 * p_{63} - (\mu_9 + \mu_8 + \mu_6 + \mu_5 + \mu_4) * p_{64} + \lambda_5 * p_{62} + \lambda_6 * p_{61} + \lambda_8 * p_{59} + \lambda_9 * p_{58},
 \end{aligned}$$

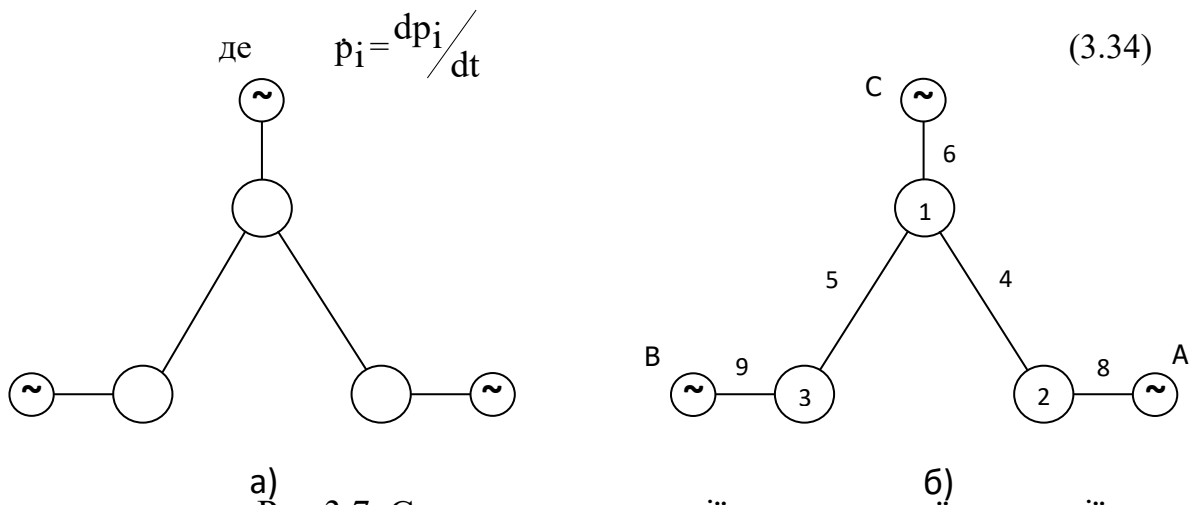


Рис.3.7. Схема перенумерації деревовидної топології:

а) – деревовидна топологія; б) – граф для аналізу деревовидної топології.

Вирішуючи дану систему лінійних диференціальних рівнянь за допомогою пакету символьних обчислень програми MATLAB, отримаємо в символьному вигляді значення імовірності перебування мережі в одному з можливих станів.

$$\lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = \lambda_8 = \lambda_9 = 2; \lambda_7 = 0$$

$$\mu_4 = \mu_5 = \mu_6 = \mu_8 = \mu_9 = 1; \mu_7 = 0; p_7 = 0$$

Чисельні значення інтенсивностей потоків відмов і відновлень можуть бути отримані тими ж методами і методиками, що і при аналізі трикутного фрагмента.

В результаті отримаємо чисельні значення імовірності перебування мережі в одному з можливих станів.

Сформуємо групи подій за кількістю функціонуючих елементів (ребер) в топологічному фрагменті мережі. Основним принципом формування групи є ознака наявності заданого числа функціонуючих ребер.

Таким чином, 1-я група подій відповідає всім (п'яти) функціонуючим ребрам, 2-я група – чотирьом функціонуючим ребрам, 3-я група – трьом функціонуючим ребрам, 4-я група – двом функціонуючим ребрам, 5-я група – одному функціонуючому ребру і 6-я група відповідає відсутності функціонуючих ребер.

Кількість даних станів в групах описується аналогічно трикутному фрагменту, а саме:

- для першої групи подій (при функціонуванні всіх ребер), що відповідає наявності всіх зв'язків між вузлами і визначається як:

$$n_1 = C_5^0 = \frac{5!}{0! * (5 - 0)!} = 1$$

- для другої групи подій (за відсутності одного ребра), що відповідає виключенню одного із зв'язків між вузлами за наявності останніх:

$$n_2 = C_5^1 = \frac{5!}{1! * (5 - 1)!} = 5$$

- для третьої групи подій (за відсутності двох ребер), що відповідає виключенню двох зв'язків між вузлами за наявності останніх:

$$n_3 = C_5^2 = \frac{5!}{2! * (5 - 2)!} = 10$$

- для четвертої групи подій (за відсутності трьох ребер), що відповідає виключенню трьох зв'язків між вузлами за наявності останніх:

$$n_4 = C_5^3 = \frac{5!}{3! \cdot (5-3)!} = 10$$

- для п'ятої групи подій (за відсутності чотирьох ребер), що відповідає виключенню чотирьох зв'язків між вузлами за наявності останніх:

$$n_5 = C_5^4 = \frac{5!}{4! \cdot (5-4)!} = 5$$

- для шостої групи подій (за відсутності п'яти ребер), що відповідає виключенню п'яти зв'язків між вузлами за наявності однієї:

$$n_6 = C_5^5 = \frac{5!}{5! \cdot (5-5)!} = 1$$

Імовірність того, що стан системи належить конкретній групі подій визначається таким чином:

- для першої групи подій:

$$P_1 = p_1$$

- для другої групи подій:

$$P_2 = p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6$$

- для третьої групи подій:

$$P_3 = p_7 + p_8 + p_9 + p_{10} + p_{11} + p_{12} + p_{13} + p_{14} + p_{15} + p_{16}$$

- для четвертої групи подій:

$$P_4 = p_{17} + p_{18} + p_{19} + p_{20} + p_{21} + p_{22} + p_{23} + p_{24} + p_{25} + p_{26}$$

- для п'ятої групи подій:

$$P_5 = p_{27} + p_{28} + p_{29} + p_{30} + p_{31}$$

- для шостої групи подій:

$$P_6 = p_{32}$$

Отримані результати представлені у вигляді графіків залежностей на рис. 3.8. На цьому рисунку значення імовірності згруповані по числу функціонуючих елементів (ребер) в топологічному фрагменті мережі.

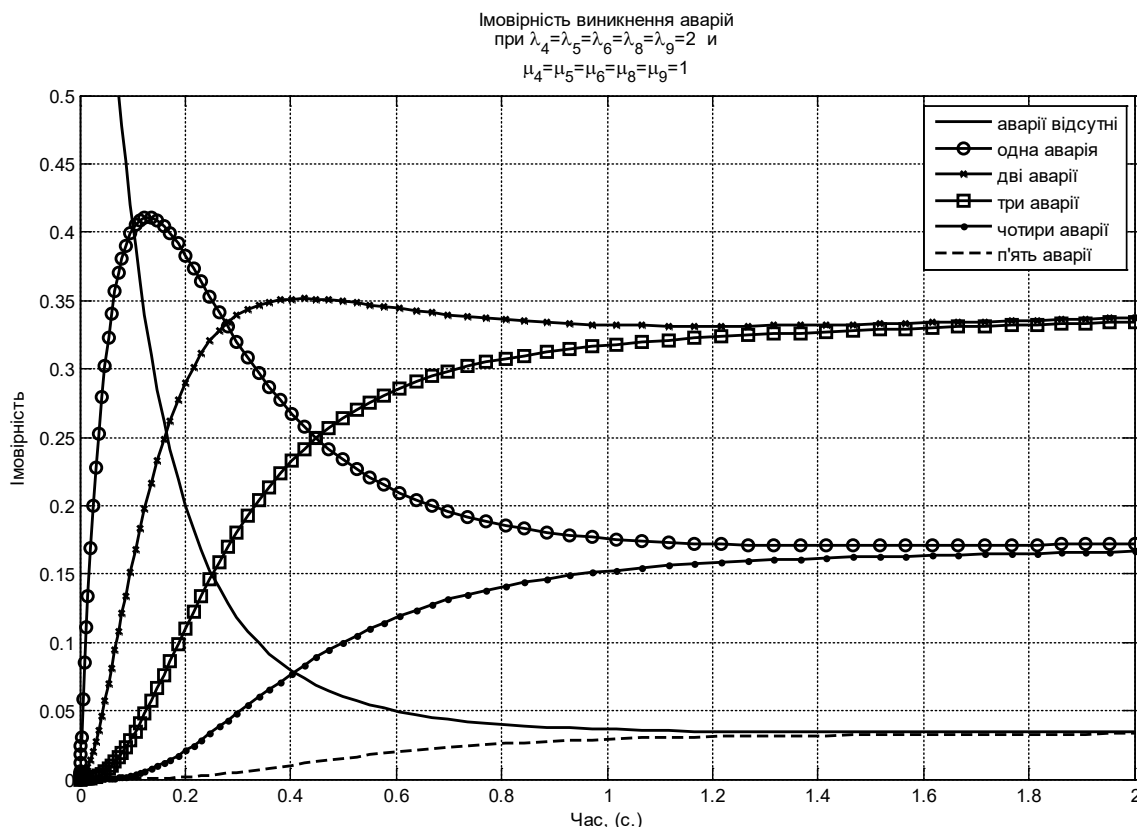


Рис.3.8. Функції залежності імовірності перебування деревовидного фрагмента мережі в одному з можливих станів, який належить конкретній групі подій.

Проаналізуємо всі події, які можуть мати вплив на функціонування фрагмента мережі синхронізації і визначимо саме ті події, які можуть привести до втрати працездатності деревовидного фрагмента.

Для цього знайдемо імовірність виходу з ладу фрагмента мережі синхронізації, приведені на Рис. 3.8, використовуючи метод аналізу структурної надійності [78].

Розіб'ємо всі несумісні події, які відбуваються, на дві групи. Перша група подій включає ті події, які не здійснюють істотного впливу на якість функціонування мережі. Друга група подій включає ті події, кожна з яких наводить до втрати працездатності мережі. Належність тієї або іншої події до однієї з груп залежить від алгоритму функціонування вузла синхронізації, способу встановлення пріоритетів вхідним інтерфейсам (портам) синхронізації, встановлення рівнів якості (quality level) сигналів синхронізації, топології фрагмента мережі.

Припустимо, що працездатність фрагмента мережі залежить лише від топології, а реалізація алгоритму функціонування, способу встановлення пріоритетів вхідним інтерфейсам, встановлення рівнів якості сигналів синхронізації є ідеальними, тобто вищеперелічені параметри не впливають на якість функціонування мережі.

Рішення задачі за даної умови дає можливість отримання значення теоретичної межі для якості функціонування даного фрагмента.

Позначимо через $\overline{M}_{др}$ подію втрати працездатності даним фрагментом. Подія протилежна даної - $M_{др}$ може здійснитися у разі, коли всі вузли мають на своїх виходах сигнали синхронізації заданої якості.

Таким чином,

$$\overline{M}_{др} = \overline{M}_{др1} + \overline{M}_{др2} + \overline{M}_{др3} ,$$

де $\overline{M}_{др1}, \overline{M}_{др2}, \overline{M}_{др3}$ – події відсутності сигналу синхронізації на виході вузлів 1, 2, 3 відповідно.

Знайдемо за яких умов можлива поява подій $\overline{M}_{др1}, \overline{M}_{др2}$ і $\overline{M}_{др3}$. (Рис. 3.9).

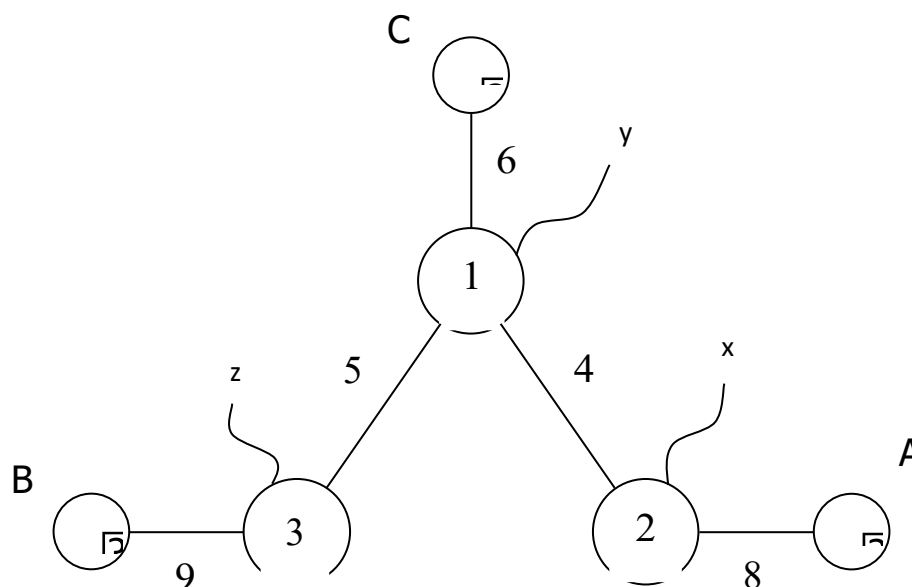


Рис.3.9. Деревовидний фрагмент мережі при аналізі на працездатність.

Визначимо подію $\overline{M}_{др1}$ для даного фрагмента мережі. Для цього розглянемо умови, при яких в точці y відсутній сигнал синхронізації. Відсутність сигналу в точці y уможливлено лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів трансльованих з вершин A, B, C не дійде до точки y .

Тоді маршрути проходження сигналу між вершинами A, B, C і точкою y можна представити так:

$$A \rightarrow y - \{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1\};$$

$$B \rightarrow y - \{9 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1\};$$

$$C \rightarrow y - \{6 \cdot 1\}.$$

Відсутність сигналу в точці y (подія $\overline{M}_{др1}$), станеться лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів що виходить з вершин A, B, C не досягне y . Тоді дану подію можна представити таким чином:

$$\overline{M}_{др1} = \overline{A}_y \cdot \overline{B}_y \cdot \overline{C}_y,$$

де $\overline{A}_y, \overline{B}_y, \overline{C}_y$ – події, що полягають в тому, що сигнали, відповідно з вершин A, B, C по відповідних маршрутах не досягнуть точки y .

Подія $\overline{A}_y$ станеться, якщо відмовить маршрут, за яким поширюється сигнал $\{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1\}$, тобто якщо відмовить хоч би один з елементів 8, 2, 4 або 1 тому:

$$\begin{aligned} \overline{A}_y = & \overline{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_1 + \overline{a}_8 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + \\ & + \overline{a}_8 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_1 + \overline{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_1 + a_8 \cdot \overline{a}_2 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_4 \cdot \overline{a}_1 + \\ & + \overline{a}_8 \cdot \overline{a}_2 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_1 + \overline{a}_8 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_1 + a_8 \cdot \overline{a}_2 \cdot \overline{a}_4 \cdot \overline{a}_1 + \overline{a}_8 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_4 \cdot \overline{a}_1 + \overline{a}_8 \cdot \overline{a}_2 \cdot \overline{a}_4 \cdot \overline{a}_1 \end{aligned}$$

(3.36)

де a – подія, при якій елемент справний;

$\overline{a}$ – подія, при якій елемент не справний

індекс при a – номер справного елементу;

Подія $\overline{B}_y$ станеться, якщо відмовить маршрут, за яким поширюється сигнал $\{9 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1\}$, тобто якщо відмовить хоч би один з елементів 9, 3, 5 або 1, тому:

$$\begin{aligned}\bar{B}_y = & \bar{a}_1 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_9 + a_1 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot a_9 + a_1 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_9 + a_1 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_9 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot a_9 + \\ & + \bar{a}_1 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_9 + \bar{a}_1 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_9 + a_1 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_9 + a_1 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_9 + a_1 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_9 + \\ & + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_9 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_9 + a_1 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_9 + \bar{a}_1 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_9 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_9\end{aligned}$$

(3.37)

Подія $\bar{C}_y$ станеться, якщо відмовить маршрут, за яким поширюється сигнал $\{6 \cdot 1\}$, тобто якщо відмовить хоч би один з елементів 6 або 1, тому:

$$\bar{C}_y = \bar{a}_6 \cdot a_1 + a_6 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_6 \cdot \bar{a}_1 \quad (3.38)$$

Запишемо подію $\bar{M}_{др1}$ з врахуванням формул (3.36) (3.37) (3.38).

$$\begin{aligned}\bar{M}_{др1} = & (\bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + \\ & + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_1 + a_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_1 + \\ & + \bar{a}_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_1 + a_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_1) \cdot (\bar{a}_1 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_9 + a_1 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot a_9 + \\ & + a_1 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_9 + a_1 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_9 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot a_9 + \bar{a}_1 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_9 + \bar{a}_1 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_9 + a_1 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_9 + \\ & + a_1 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_9 + a_1 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_9 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_9 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_9 + a_1 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_9 + \\ & + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_9) \cdot (\bar{a}_6 \cdot a_1 + a_6 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_6 \cdot \bar{a}_1)\end{aligned}$$

Використовуючи аналогічні міркування, запишемо умову появи подій $\bar{M}_{др2}$ і $\bar{M}_{др3}$.

Визначення події $\bar{M}_{др2}$ - відсутність сигналу в точці z .

Складемо можливі маршрути проходження сигналу від вершин A, B, C до точки z для фрагмента мережі представленого на рис. 3.9.

$$A \rightarrow z - \{8 \cdot 2\};$$

$$B \rightarrow z - \{9 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\};$$

$$C \rightarrow z - \{6 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\}.$$

Подія $\bar{M}_{др2}$ станеться лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів що виходить з вершин A, B, C не досягне z . Тоді дану подію можна представити таким чином:

$$\bar{M}_{др2} = \bar{A}_z \cdot \bar{B}_z \cdot \bar{C}_z,$$

де $\bar{A}_z \cdot \bar{B}_z \cdot \bar{C}_z$ - подія, що полягає в тому, що точки z не досягне сигнал з вершин A, B, C відповідно.

Тоді імовірність виходу з ладу фрагмента мережі тактової синхронізації, яка виражена через інтенсивність відмов і відновлень, використовуючи вирішення диференціального рівняння (3.34) буде:

$$P(M_{Tp}) = \sum_{i=1}^{22} p_i + \sum_{i=24}^{29} p_i + \sum_{i=31}^{36} p_i + \sum_{i=38}^{40} p_i + p_{42} \quad (3.44)$$

Чисельне розв'язання при $\lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9=2$, $\mu_4, \mu_5, \mu_6, \mu_7, \mu_8, \mu_9=1$ для імовірності знаходження досліджуваного фрагмента в працездатному стані наведено на Рис. 3.6.

Відзначимо, що графіки залежностей, приведені на рис. 3.10, при $t \rightarrow \infty$ відображають настання у фрагменті стаціонарного режиму, для якого імовірність функціонування ($1 - P(M_{др})$) або відмови ($P(M_{др})$) не залежить від часу і рівні відповідно:

$$1 - P(M_{др}) = 0,4 \quad \text{і} \quad P(M_{др}) = 0,6$$

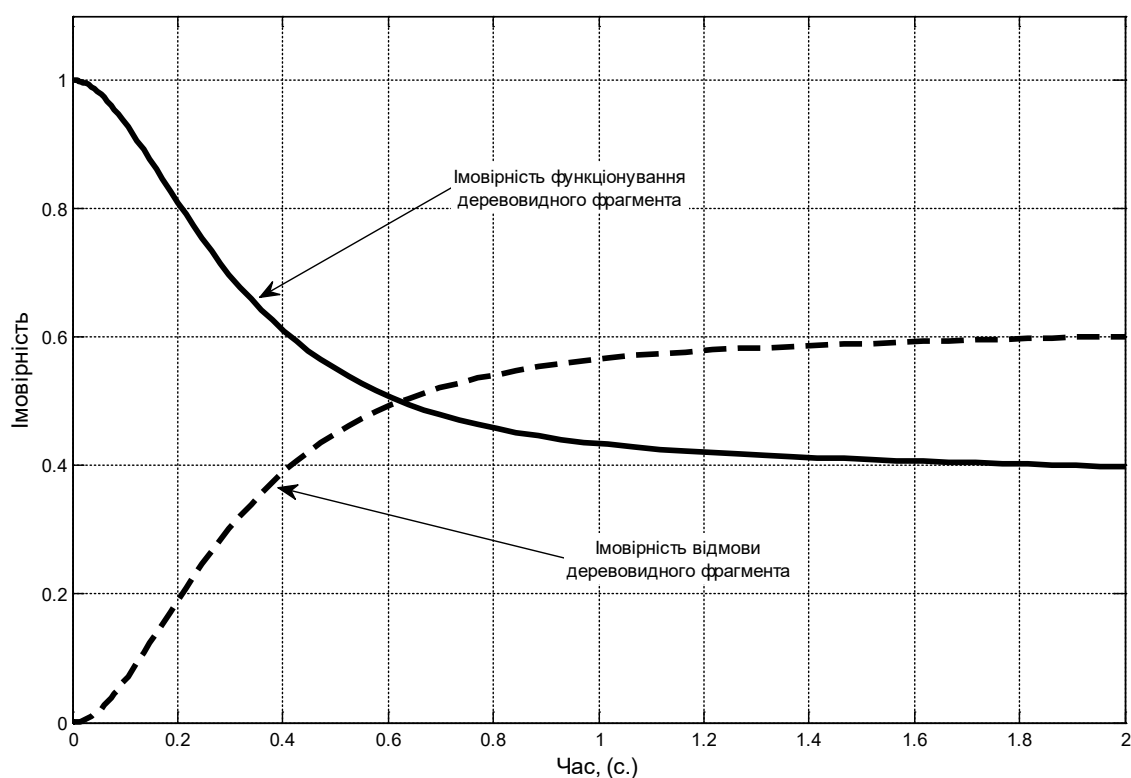


Рис.3.10. Функціональна залежність імовірності функціонування деревовидного фрагмента мережі синхронізації.

Вираз (3.44) є теоретичною межею, що визначає максимальну якість функціонування даного фрагмента мережі синхронізації за заданих початкових

умов: інтенсивність відмов, інтенсивність відновлення і початкові умови, в яких знаходилася система (імовірність того, що система знаходилася в стані $S1$ в початковий момент часу $p(S1)=1$).

3.1 3. Аналіз фрагмента мережі з кільцевою топологічною структурою

Розглянемо ділянку мережі з кільцевою топологічною структурою та проведемо перенумерацію елементів даного фрагмента (рис. 3.11).

Імовірність виходу з ладу даного фрагмента здійснимо користуючись тією ж схемою дослідження, яка була застосована при аналізі трикутної структури.

Розглянувши структуру представлену на рис. 3.11 неважко відмітити, що вона тотожна трикутній за винятком ребра 9. В такому разі з розміченого графа системи зникають події пов'язані з елементом номер 9.

Тому розв'язання задачі, пов'язаної з визначенням імовірності знаходження вибраного фрагмента мережі синхронізації в одному з можливих станів знаходиться шляхом розв'язання задачі аналогічної для трикутного фрагмента, шляхом виключення ребра 9. Це досягається привласненням λ_9, μ_9 і P_9 значення нуль. Визначаємо імовірність знаходження мережі в одному з можливих станів.

де $\overline{M}_{K1}, \overline{M}_{K2}, \overline{M}_{K3}$ - подія при якому сигнал синхронізації буде відсутній на вихідному порту мережного елементу позначеного на рис. 3.11 цифрою 1, 2, 3, відповідно.

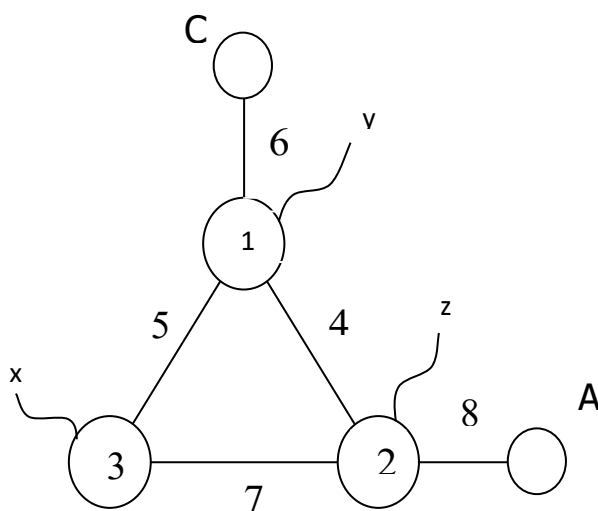


Рис.3.11. Кільцевий фрагмент мережі при аналізі на працездатність.

Для цього, позначимо через $\overline{M}_K$ - подія втрати працездатності даним фрагментом. Здійснення події $\overline{M}_K$ представимо в наступному вигляді:

$$\overline{M}_K = \overline{M}_{K1} \cdot \overline{M}_{K2} \cdot \overline{M}_{K3},$$

Для зручності викладання на мережних елементах 1, 2, 3, виберемо точки x, y, z (Рис. 3.11). Точки x, y, z є допоміжними. Фізичний сенс цих точок полягає в тому, що вони характеризують обладнання, яке отримує сигнал синхронізації від тих вузлів, що знаходяться в аналізованому фрагменті.

Визначимо подію $\overline{M}_{K1}$ для даного фрагмента мережі. Для цього розглянемо умови, при яких в точці y відсутній сигнал синхронізації. Відсутність сигналу в точці y можливо лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів трансльованих з вершин A, C не дійде до точки y .

Складемо можливі маршрути проходження сигналу від вершин A, C до точки y для фрагмента мережі представленого на Рис. 3.11.

$$A \rightarrow y - \{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1\} \text{ і } \{8 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1\};$$

$$C \rightarrow y - \{6 \cdot 1\}.$$

Відсутність сигналу в точці y (подія $\overline{M}_{K1}$), станеться лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів що виходить з вершин A, C не досягне y . Тоді дану подію можна представити таким чином:

$$\overline{M}_{K1} = \overline{A}_y \cdot \overline{C}_y,$$

де $\overline{A}_y, \overline{C}_y$ - подія, що полягає в тому, що сигнал, відповідно з вершин A, C не досягне точки y .

Сигнал з вершини A не досягне точки y лише в тому випадку, якщо одночасно відмовлять два маршрути, за якими поширюється сигнал: $\{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1\}$ і $\{8 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1\}$.

Тоді цю подію можна представити:

$$\overline{A}_y = \overline{A}_{1y} \cdot \overline{A}_{2y},$$

$$\begin{aligned}
\bar{A}_y = & (\bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + \\
& + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_1 + a_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_1 + \\
& + \bar{a}_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_1 + \bar{a}_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_1 + a_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_1) \cdot \\
& \cdot (\bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1 + a_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_7 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot a_1 + \\
& + a_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_7 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1 + \\
& + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot a_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_1 + a_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1 + \\
& + a_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot a_1 + a_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_7 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_1 + a_8 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_7 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot a_1 + \\
& + a_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_1 + \\
& + a_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot a_1 + \\
& + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_1 + \\
& + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_1 + \\
& + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_1 + \\
& + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_1)
\end{aligned}$$

Використовуючи метод поглинання, запишемо подію $\bar{A}_y$:

$$\bar{A}_y = \bar{a}_8 + \bar{a}_4 \cdot a_8 \cdot \overline{a_5 \cdot a_7}, \quad (3.45)$$

Сигнал з вершини C не досягне точки y лише в тому випадку, якщо відмовить маршрут, за яким поширюється сигнал $\{6 \cdot 1\}$, а це станеться, якщо відмовить хоч би один з елементів 6 або 1.

$$\bar{C}_y = \bar{a}_6 \cdot a_1 + a_6 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_6 \cdot \bar{a}_1, \quad (3.46)$$

Запишемо подію $\bar{M}_{K1}$ з врахуванням формул (2.42) (2.43).

$$\bar{M}_{K1} = (\bar{a}_8 + \bar{a}_4 \cdot a_8 \cdot \overline{a_5 \cdot a_7}) \cdot (\bar{a}_6 \cdot a_1 + a_6 \cdot \bar{a}_1 + \bar{a}_6 \cdot \bar{a}_1) \quad (3.47)$$

Використовуючи аналогічні міркування, запишемо умову появи подій $\bar{M}_{K2}$ і $\bar{M}_{K3}$.

Визначення події $\bar{M}_{K2}$ — відсутність сигналу в точці z .

Складемо можливі маршрути проходження сигналу від вершин A, C до точки z для фрагмента мережі представленого на рис. 3.11.

$$A \rightarrow z - \{8 \cdot 2\};$$

$C \rightarrow z$ - $\{6 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\}$ або $\{6 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 2\}$.

Подія, $\overline{M}_{K2}$ станеться лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів що виходить з вершин A, C не досягне z . Тоді дану подію можна представити таким чином:

$$\overline{M}_{K2} = \overline{A}_z \cdot \overline{C}_z,$$

де $\overline{A}_z \cdot \overline{C}_z$ – події, що полягають в тому, що точки не досягне сигнал з вершин A, C відповідно.

Сигнал з вершини A не досягне точки z лише в тому випадку, якщо відмовить маршрут, за яким поширюється сигнал $\{8 \cdot 2\}$, а це станеться, якщо відмовить хоч би один з елементів 8 або 2.

$$\overline{A}_z = \overline{a}_8 \cdot a_2 + a_8 \cdot \overline{a}_2 + \overline{a}_8 \cdot \overline{a}_2, \quad (3.48)$$

Сигнал з вершини C не досягне точки z лише в тому випадку, якщо одночасно відмовлять два маршрути, за якими поширюється сигнал $\{6 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\}$ і $\{6 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 2\}$.

Тоді цю подію можна представити:

$$\overline{C}_z = \overline{C}_{1z} \cdot \overline{C}_{2z},$$

де $\overline{C}_{1z}$ - подія, при якій маршрут $\{6 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\}$ вийшов з ладу;

$\overline{C}_{2z}$ - подія, при якій маршрут $\{6 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 2\}$ вийшов з ладу.

Подія $\overline{C}_{z1}$ станеться лише в тому випадку, якщо відмовить хоч би один з елементів 6, 1, 4 або 2, тому:

$$\begin{aligned} \overline{C}_{1z} = & \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_6 + a_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_4 \cdot a_6 + a_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_6 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_6 + \overline{a}_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_4 \cdot a_6 + \\ & + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_6 + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_6 + a_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_6 + a_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_6 + a_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_4 \cdot \overline{a}_6 + \\ & + \overline{a}_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot \overline{a}_4 \cdot a_6 + \overline{a}_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot a_4 \cdot \overline{a}_6 + a_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot \overline{a}_4 \cdot \overline{a}_6 + \overline{a}_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a}_4 \cdot \overline{a}_6 + \overline{a}_1 \cdot \overline{a}_2 \cdot \overline{a}_4 \cdot \overline{a}_6 \end{aligned}$$

Аналогічно можна описати подію $\overline{C}_{2z}$.

Сигнал з вершини A не досягне точки x лише в тому випадку, якщо одночасно відмовлять два маршрути, по яких поширюється сигнал $\{8 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 3\}$ і $\{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3\}$.

Тоді цю подію можна представити:

$$\bar{A}_x = \bar{A}_{1x} \cdot \bar{A}_{2x},$$

де $\bar{A}_{1x}$ - подія, при якій маршрут $\{8 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 3\}$ вийшов з ладу;

$\bar{A}_{2x}$ - подія, при якій маршрут $\{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3\}$ вийшов з ладу.

Подія $\bar{A}_{1x}$ станеться лише в тому випадку, якщо відмовить хоч би один з елементів 8, 2, 7 або 3, тому:

$$\begin{aligned} \bar{A}_{1x} = & \bar{a}_2 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot a_8 + a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_7 \cdot a_8 + a_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_8 + a_2 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_8 + \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_7 \cdot a_8 + \\ & + \bar{a}_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_8 + \bar{a}_2 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_8 + a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_8 + a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_8 + a_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_7 \cdot \bar{a}_8 + \\ & + \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_7 \cdot a_8 + \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_7 \cdot \bar{a}_8 + a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_7 \cdot \bar{a}_8 + \bar{a}_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_7 \cdot \bar{a}_8 + \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_7 \cdot \bar{a}_8 \end{aligned}$$

Аналогічно можна описати подію $\bar{A}_{2x}$.

$$\begin{aligned} \bar{A}_{2x} = & \bar{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot a_8 + a_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot a_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot a_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot a_8 + \\ & + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot a_8 + \bar{a}_1 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot a_8 + \\ & + \bar{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot a_8 + \bar{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_8 + \bar{a}_1 \cdot a_2 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot a_8 + \\ & + a_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot a_8 + a_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_8 + a_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot a_8 + \\ & + a_1 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + \\ & + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_8 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot a_8 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot a_8 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_8 + \\ & + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot a_8 + a_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_8 + a_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + \\ & + a_1 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + \\ & + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_8 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot a_8 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_8 + \bar{a}_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + \\ & + \bar{a}_1 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot a_8 + \bar{a}_1 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_8 + \bar{a}_1 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_8 + \\ & + a_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_8 + \\ & + a_1 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_8 + \\ & + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot a_8 + a_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_8 + \\ & + a_1 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot \bar{a}_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot a_8 + \\ & + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \bar{a}_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \bar{a}_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot \bar{a}_8 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot a_8 \end{aligned}$$

Тоді подія $\bar{A}_x$ після проведення низки нескладних перетворень, використовуючи метод поглинання, запишеться таким чином:

$$\bar{A}_x = \bar{a}_8 + \bar{a}_7 \cdot a_8 \cdot \overline{a_4 \cdot a_5} \quad (3.51)$$

Запишемо подію $\overline{M}_{K3}$ з врахуванням формул (2.48), (2.49), провівши низку нескладних перетворень, і використовуючи метод поглинання:

$$\overline{M}_{K3} = (\overline{a}_8 + \overline{a}_7 \cdot a_8 \cdot \overline{a_4 \cdot a_5}) \cdot (\overline{a}_6 + \overline{a}_5 \cdot a_6 \cdot \overline{a_4 \cdot a_7}) \quad (3.53)$$

Таким чином, подія $\overline{M}_K$ - втрата працездатності фрагмента мережі має вигляд:

$$\begin{aligned} \overline{M}_K = & [(\overline{a}_8 + \overline{a}_4 \cdot a_8 \cdot \overline{a_5 \cdot a_7}) \cdot (\overline{a}_6 \cdot a_1 + a_6 \cdot \overline{a_1} + \overline{a_6} \cdot \overline{a_1})] \cdot [(\overline{a}_8 \cdot a_2 + a_8 \cdot \overline{a_2} + \overline{a_8} \cdot \overline{a_2}) \times \\ & \times (\overline{a}_6 + \overline{a_4} \cdot a_6 \cdot \overline{a_5 \cdot a_7})] \cdot [(\overline{a}_8 + \overline{a_7} \cdot a_8 \cdot \overline{a_4 \cdot a_5}) \cdot (\overline{a_6} + \overline{a_5} \cdot a_6 \cdot \overline{a_4 \cdot a_7})] \end{aligned} \quad (3.54)$$

Дослідивши аналогічно всі можливі стани S_n (32), отримаємо повне уявлення про розподіл станів за групами.

Тоді імовірність виходу з ладу фрагмента мережі тактової синхронізації, виражена через інтенсивність відмов і відновлень, використовуючи вирішення диференціального рівняння (3.34) буде:

$$P(M_{Tp}) = \sum_{i=1}^{22} p_i + \sum_{i=24}^{29} p_i + \sum_{i=31}^{36} p_i + \sum_{i=38}^{40} p_i + p_{42} \quad (3.55)$$

Чисельне рішення при $\lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9=2$, $\mu_4, \mu_5, \mu_6, \mu_7, \mu_8, \mu_9=1$ для імовірності знаходження досліджуваного фрагмента в працездатному стані наведено на рис. 3.12.

Відзначимо, що графіки залежностей, приведені на рис. 3.12, при $t \rightarrow \infty$ відображають настання у фрагменті стаціонарного режиму, для якого імовірність функціонування $(1 - P(M_K))$ або відмови $(P(M_K))$ не залежить від часу і рівні відповідно:

$$1 - P(M_K) = 0,4876 \quad \text{и} \quad P(M_K) = 0,5124$$

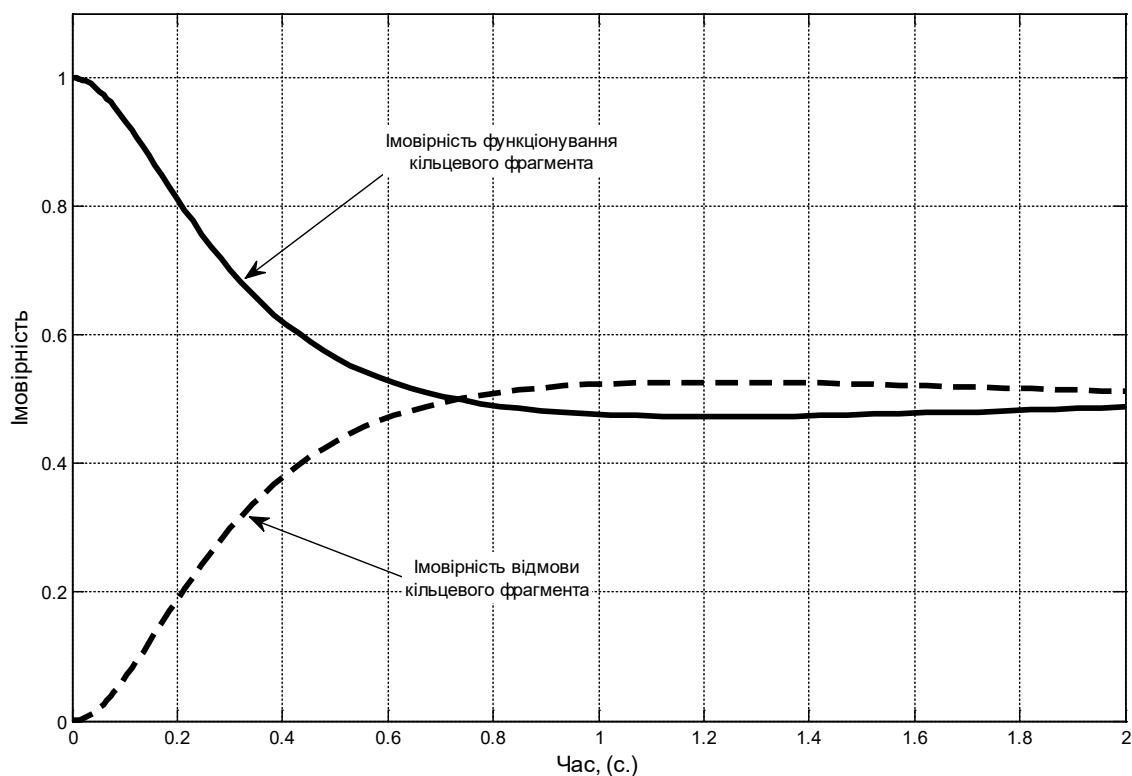


Рис.3.12. Функціональна залежність імовірності функціонування кільцевого фрагмента мережі синхронізації.

Вираз (3.55) є теоретичною межею, яка визначає максимальну якість функціонування даного фрагмента тактової мережі синхронізації за заданих початкових умов: інтенсивність відмов, інтенсивність відновлення і початкові умови, в яких знаходилася система (імовірність того, що система знаходилася в стані S_1 в початковий момент часу $p(S_1)=1$).

3.2. Удосконалення методу аналізу працездатності фрагмента мережі синхронізації довільної топології

Метою розробки удосконаленого методу є необхідність можливості оцінки працездатності фрагмента мережі синхронізації довільної топології шляхом узагальнення алгоритмів для конкретних конфігурацій.

Нехай фрагмент мережі має кінцеву кількість дискретних станів, а відмови і відновлення в даному фрагменті відбуваються у випадкові моменти часу. Таким чином, функціонування довільного фрагменту мережі тактової синхронізації може

бути представлене випадковим процесом з кінцевим числом дискретних станів, і безперервним часом.

Передбачимо, що всі потоки, що переводять досліджуваний фрагмент з одного стану в інше – Пуассоновські і незалежні, внаслідок чого випадковий процес переходів з одного стану в інший під дією потоків відмов і відновлень, є марковським процесом з дискретними станами і безперервним часом.

З врахуванням цих припущень можна представити узагальнений алгоритм у вигляді послідовності етапів.

Етап 1. Представимо досліджуваний фрагмент у вигляді графу, в якому вершини графа відповідають мережним елементам, а ребра графа є з'єднаннями між мережними елементами. Проведемо процедуру нумерації графу.

Етап 2. Визначимо повну групу несумісних подій, що визначають всі можливі стани довільного фрагмента мережі.

Етап 3. Визначимо функції інтенсивностей потоків відмов і потоків відновлень виду $\lambda_{ij}(t)$ і $\mu_{ji}(t)$, які переводять досліджуваний фрагмент з одного можливого стану в інший (наприклад, із стану S_i в S_j).

Етап 4. Використовуючи групу несумісних подій, побудуємо розмічений граф станів фрагмента мережі.

Етап 5. На основі розміченого графа складемо систему диференціальних рівнянь, використовуючи таке мнемонічне правило: похідна імовірності будь-якого стану дорівнює сумі всіх потоків імовірностей, що переводять систему в цей стан, мінус сума всіх потоків імовірностей, що виводять систему з цього стану, а саме:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^n p_j(t) \cdot \mu_{ji}(t) - p_i \cdot \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}(t) \\ (i = 1, 2, \dots, n).$$

Етап 6. Визначення значення імовірності перебування мережі в одному з можливих станів шляхом розв'язання системи диференціальних рівнянь (3.1).

Етап 7. Визначення умови, що призводить до втрати працездатності фрагмента мережі тактової синхронізації з врахуванням таких параметрів і критеріїв, що визначають поняття "працездатність":

- алгоритм функціонування вузла синхронізації;
- спосіб встановлення пріоритетів вхідним інтерфейсам (портам) синхронізації;
- встановлення рівнів якості (quality level) сигналів синхронізації;
- топологія фрагмента мережі.

Наприклад, для трикутного фрагмента ця умова виражається формулою (3.2).

Етап 8. Розбиття всіх несумісних подій на дві групи. Перша група подій включає ті події, які не здійснюють істотного впливу на якість функціонування мережі. Друга група подій включає ті події, кожна з яких призводить до втрати працездатності мережі.

Етап 9. Визначення імовірності знаходження фрагмента мережі тактової синхронізації в працездатному або непрацездатному стані з врахуванням розподілу станів за групами.

$$P(M_{Tp}) = \sum_k p_k + \sum_m p_m \quad ,$$

де k – індекс для станів, що знаходяться в групі, відповідній працездатності фрагмента;

m – індекс для станів, що знаходяться в групі, відповідній непрацездатності фрагмента;

$n = k+m$ – кількість незалежних станів розміченого графа системи.

3.3. Удосконалення методу динамічної адаптації дерева синхронізації в мережах синхронної цифрової ієрархії

Крок 1. Ініціалізація значень пріоритетів для всіх вхідних портів мережевого елемента (формування первинного стану вузла). Перехід до Кроку 2.

Крок 2. Аналіз стану вхідного інтерфейсу, від якого здійснюється синхронізація мережевого елемента. Якщо стан вхідного інтерфейсу відповідає забороні на синхронізацію мережевого елемента від даного інтерфейсу ("dis"), то змінній, відповідній номеру інтерфейсу, привласнюється значення "0", і слідує перехід до Кроку 5. Якщо дана умова не виконана, то перехід до Кроку 3.

Крок 3. Аналіз стану вхідного інтерфейсу, від якого здійснюється синхронізація мережевого елементу. Якщо стан вхідного інтерфейсу відповідає виходу з режиму синхронізму ("LO" приймає значення "ON"), то змінній, відповідній номеру інтерфейсу привласнюється значення "0", і слідує перехід до Кроку 5. Якщо дана умова не виконана, то перехід до Кроку 4.

Крок 4. Аналіз стану вхідного інтерфейсу, від якого здійснювалася синхронізація. Якщо значення байту про статус синхронізації (SSM) вхідного інтерфейсу нижче (за абсолютною величиною), ніж значення "Не використовувати для синхронізації" (DNU), що відповідає низькій якості сигналу синхронізації або його відсутності, то слідує перехід до Кроку 5. Якщо дана умова не виконана, то перехід до Кроку 6.

Крок 5. Ініціалізація змінної номера інтерфейсу ("N") шляхом привласнення їй значення "1".

Крок 6. Аналіз стану вхідного інтерфейсу під номером "N". Якщо стан вхідного інтерфейсу відповідає забороні на синхронізацію мережевого елементу від даного інтерфейсу ("dis"), то слідує перехід до Кроку 13. Якщо дана умова не виконана, то перехід до Кроку 7.

Крок 7. Аналіз стану вхідного інтерфейсу під номером "N". Якщо стан вхідного інтерфейсу відповідає виходу з режиму синхронізму ("LO" приймає значення "ON"), то слідує перехід до Кроку 13. Якщо дана умова не виконана, то перехід до Кроку 8.

Крок 8. Аналіз стану вхідного інтерфейсу, від якого здійснювалася синхронізація. Якщо значення байту про статус синхронізації (SSM) вхідного інтерфейсу нижче (за абсолютною величиною), ніж значення "Не використовувати для синхронізації" (DNU), що відповідає низькій якості сигналу синхронізації або його відсутності, то слідує перехід до Кроку 13. Якщо дана умова не виконана, то перехід до Кроку 9.

Крок 9. Порівняння значень байту SSM, привласненого сигналу синхронізації, що поступає на вхідний інтерфейс під номером "N" із значенням байту SSM, привласненого сигналу синхронізації, що поступає на вхідний інтерфейс, від якого

здійснюється синхронізація мережевого елементу. Якщо значення байту SSM, привласненого сигналу синхронізації, що поступає на вхідний інтерфейс під номером “N” нижче, ніж значення байту SSM, привласненого сигналу синхронізації, що поступає на вхідний інтерфейс, від якого здійснюється синхронізація мережного елементу, то слідує перехід до Кроку 13. Якщо дана умова не виконана, то перехід до Кроку 10.

Крок 10. Порівняння значень байту SSM, привласненого сигналу синхронізації, що поступає на вхідний інтерфейс під номером “N” із значенням байту SSM, привласненого сигналу синхронізації, що поступає на вхідний інтерфейс, від якого здійснюється синхронізація мережевого елементу. Якщо значення байту SSM, привласненого сигналу синхронізації, що поступає на вхідний інтерфейс під номером “N” вище, ніж значення байту SSM, привласненого сигналу синхронізації, що поступає на вхідний інтерфейс, від якого здійснюється синхронізація мережевого елементу, то слідує перехід до Кроку 12. Якщо дана умова не виконана, то перехід до Кроку 11.

Крок 11. Порівняння значення первинного пріоритету вхідного інтерфейсу під номером “N” з первинним пріоритетом вхідного інтерфейсу, від якого здійснюється синхронізація мережевого елементу. Якщо пріоритет вхідного інтерфейсу під номером “N” нижчий, ніж пріоритет інтерфейсу, від якого здійснюється синхронізація мережевого елементу, то слідує перехід до Кроку 13. Якщо дана умова не виконана, то перехід до Кроку 12.

Крок 12. Операція перерозподілу пріоритетів, тобто інтерфейсом, від якого здійснюється синхронізація, стає інтерфейс під номером “N”.

Крок 13. Аналіз умови "перевірені всі вхідні інтерфейси". Якщо умова не виконана, то присвоюється значення змінної “N”, і слідує перехід до Кроку 6. Якщо умова виконана, то слідує перехід до Кроку 14.

Крок 14. Процедура сортування пріоритетів вхідних інтерфейсів мережевого елементу: вхідному порту, вибраному для синхронізації привласнюється найвище значення пріоритету (“1”). Другий і третій пріоритет призначаються з врахуванням

якості сигналу синхронізації і аналізу попереднього стану пріоритетів на вхідних інтерфейсах мережевих елементів.

3.4. Удосконалення методу переконфігурування мережевої синхронізації в мережах IP/MPLS

Визначивши функціонування основних елементів мережі IP/MPLS створено наступну структуру граничного мережевого вузла (PE маршрутизатор), яка зображена на рис. 3.1. Кожному клієнту надається VPN для побудови корпоративної мережі та доступу до Інтернету. Граничний маршрутизатор мережі провайдера класифікує трафік, агрегує трафік по класам, розділяє трафік кожного класу на два маршрути, створює тунельні маршрути LSP з резервуванням мережевих ресурсів (згідно TE). Розрахунок маршрутів відбувається на базі модифікованого алгоритму Дейкстри динамічного переконфігурування мережі:

Крок 1. На вхідний інтерфейс маршрутизатора PE від маршрутизатора клієнта CE подається трафік.

Крок 2. Вхідний трафік класифікується по типу (голос, відео, дані HTTP та інше) на 8 класів.

Крок 3. Кожен клієнт підключається до власної VPN мережі і для нього на граничному маршрутизаторі є таблиця маршрутизації VRF для направлення трафіку всередині VPN (Virtual Routing and Forwarding).

Крок 4. Агрегатор об'єднує трафік від всіх користувачів в окремі потоки розділяючи по класам.

Крок 5. Маршрутизатор на основі службової інформації протоколів маршрутизації OSPF/IS-IS будує базу LSD найкоротших шляхів для розповсюдження міток по мережі.

Крок 6. Також на основі даної інформації з використанням розширеного алгоритму знаходження найкоротшого шляху Дейкстри (з урахуванням 5 мерик) формується база LSP тунелів.

Крок 7. Система балансування потоками (Load Balancing) розділяє кожен клас трафіку на два потоки, які будуть направлені по двом різним маршрутам. Два

незалежних маршрути між двома точками формуються на основі модифікації алгоритму Дейкстри.

Крок 8. Розширений протокол резервування TE-RSVP резервує ресурси мережі, для кожного, із двох потоків, кожного класу трафіку, на основі інформації баз LSD і TED і назначає трафіку мітки, на основі яких трафік буде зкомутований по зарезервованому каналу.

На рис. 3.2 наведено блок-схему дії модифікованого алгоритму Дейкстри динамічного переконфігурування мережі.

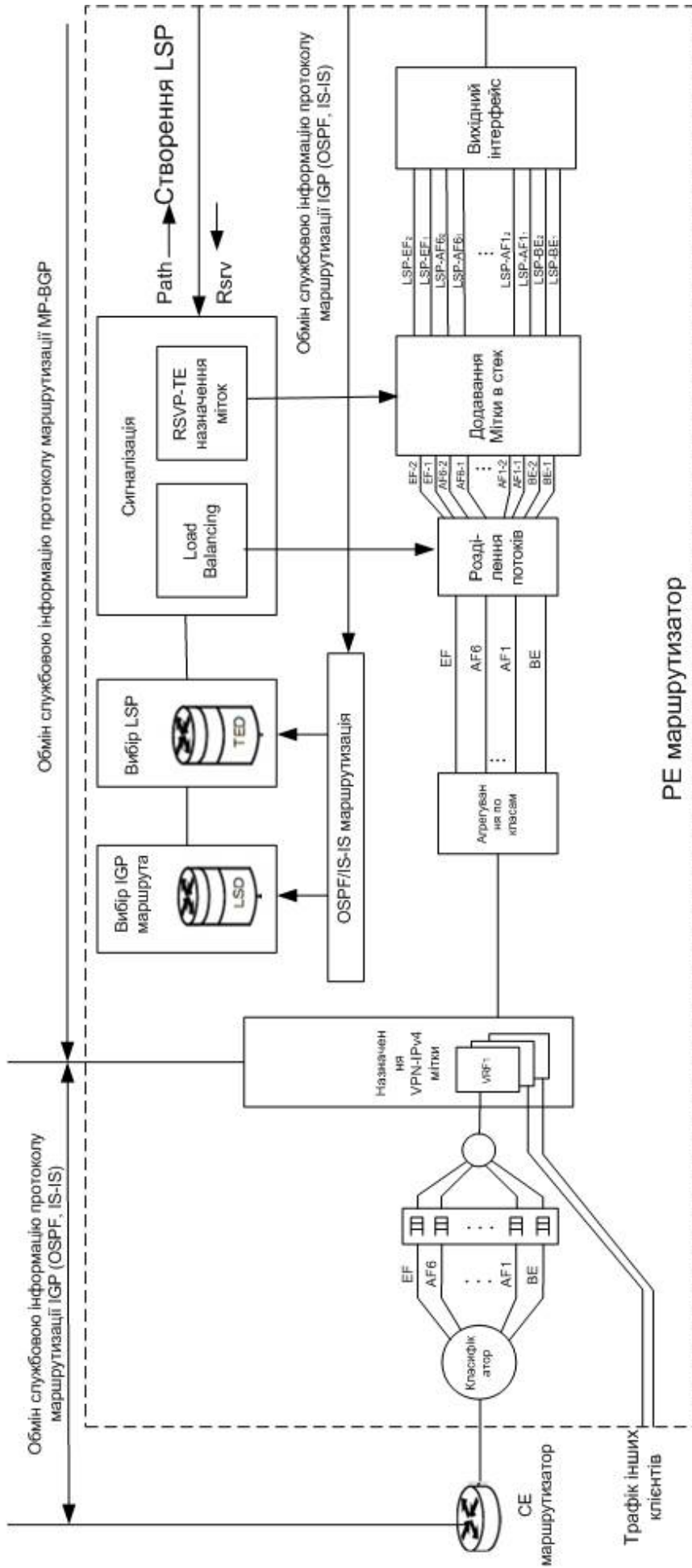


Рис.3.1. Структурна схема граничного вузла мережі IP/MPLS.



Рис.3.2. Блок-схема модифікованого алгоритму Дейкстри динамічного переконфігурування мережі.

Для більш ефективного вибору маршруту для прокладання тунелю LSP, алгоритм Дейкстри SPF модифікується, в нього додаються нові метрики (максимальна пропускна здатність ланки, а також максимальна пропускна здатність ланки, що доступна для резервування, поточне використання пропускної здатності, «колір»). Це дозволяє кожному класу трафіку надавати свій маршрут, завдяки чому трафік передається зі заданою якістю не перевантажуючи вузли мережі, а також підвищити «логічний» критерій працездатності з врахуванням надійності та живучості данної мережі в цілому. Модифікований Алгоритм Дейкстри на початку роботи накладає обмеження й позначає найкоротший шлях. Даний обмежений напрямок знаходиться онлайн вхідним маршрутизатором. Модифікований алгоритм Дейкстри обчислює оптимальний явний маршрут (ER), що заснований на певних

обмеженнях. Згідно Traffic Engineering Database (TED) алгоритм Дейкстри CSPF виконує необхідні обчислення для знаходження необхідного маршруту. На рис. 3.3. наведено зображення роботи динамічного переконфігурування мережі згідно модифікованого алгоритму Дейкстри.

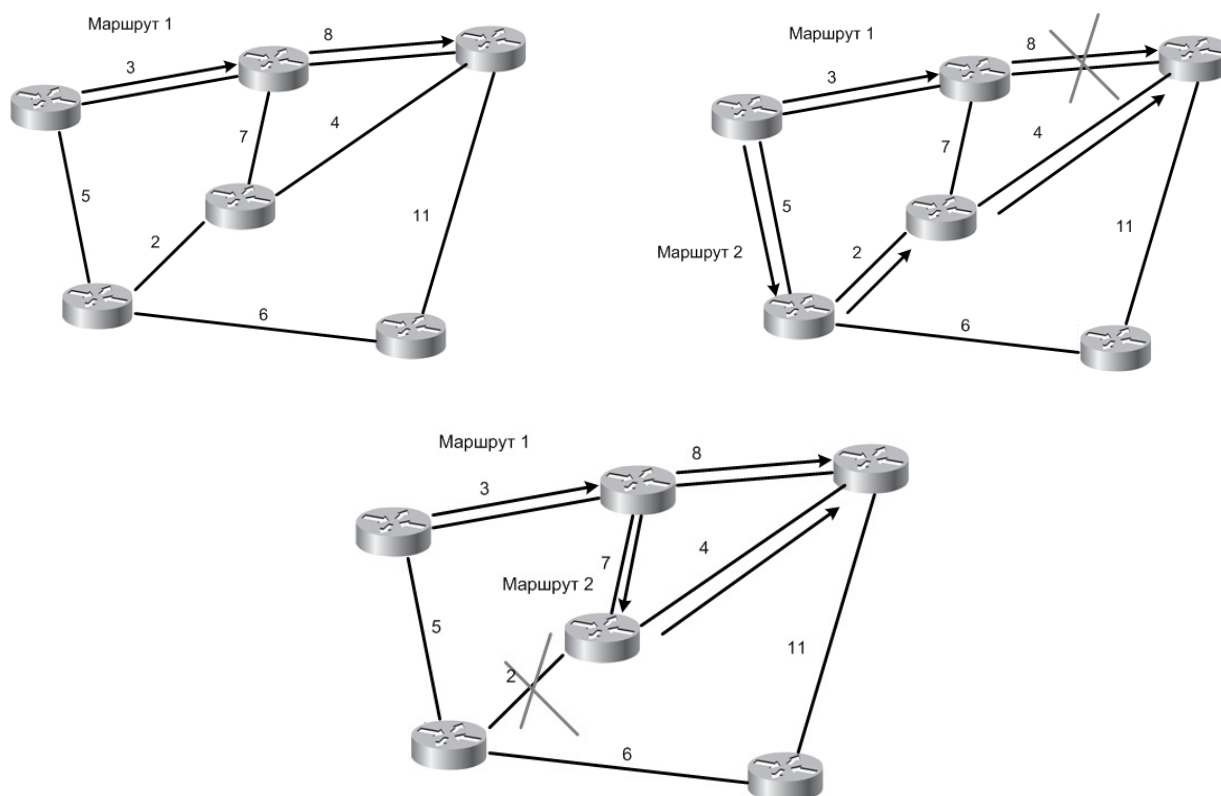


Рис.3.3. Зображення роботи динамічного переконфігурування мережі згідно модифікованого алгоритму Дейкстри.

Впровадження даного алгоритму в моделювання мережі засноване на понятті "викликаного графа", введеного в RFC 2702. "Викликаний" граф походить на дійсну топологію та є накладеним в моделі мережі, тобто це логічне нанесення на карту та на фізичну мережу за допомогою вибору LSPs для транспортних каналів. Модифікований алгоритм Дейкстри подібний нормальному SPF алгоритму, крім процесу аналізу каналів зв'язку в мережі, він відхиляє канали без достатніх ресурсів, які не відповідають обмеженням або формованій політиці. В запропонованому модифікованому алгоритмі Дейкстри -динамічного переконфігурування мережі, є три фази:

- всі зв'язки, які не задовольняють обмеженням смуги пропускання, виключені з мережевої топології, а також в цій фазі досліджується й близькість зв'язків;

- виконується алгоритм Дейкстра.

- віднімається ребро з найбільшою вагою, і заново виконується алгоритм Дейкстра для знаходження маршруту.

В результаті маємо два альтернативні маршрути для балансування трафіку й виконання умови сталості та живучості мережі синхронізації.

Модифікований алгоритм Дейкстри:

Dijkstra(G, w, s):

Initialize-single-source(G, s);

$S = \text{empty set}$;

$Q = V[G]$;

Path 1: While Q is not empty {

$u = \text{Extract-Min}(Q)$;

$S = S \cup \{u\}$;

 for each vertex v in $\text{Adj}[u]$ {

 relax(u, v, w);

 }

Delete $P(u_{\max})$;

Path 2: While Q is not empty {

$u = \text{Extract-Min}(Q)$;

$S = S \cup \{u\}$;

 for each vertex v in $\text{Adj}[u]$ {

 relax(u, v, w);

 }

}

У якому:

- G : граф мережі;
- W - відстань (вага) для кожного краю (u, v);
- S - (маленький s): стартова вершина (джерело);
- S - (великий S): ряд вершин, що заключають в себе найкоротші шляхи;
- Q - набір вершин, що залишилися, Q союз $S = V$;

- Р – ребро графу.

Модифікація алгоритму заключається у врахуванні сталості та живучості мережі синхронізації. Динамічне переконфігурування мережі засноване на виключенні ребра з найбільшою вагою. Алгоритм заново розраховує другий маршрут. Якщо маршрут не знайдений, то виключається наступне ребро з максимальною вагою.

Розглянемо принципи планування мережевої синхронізації з точки зору розподілу пріоритетів на прикладі типових фрагментів побудови мережевої синхронізації, мережного елементу який використовує алгоритм динамічної зміни дерева синхронізації.

Планування мережевої синхронізації є побудова деревовидної структури, що динамічно змінюється. Зміна дерева синхронізації ініціюється ситуаціями, що приводять до зміни якості сигналу синхронізації, наприклад, аварія на мережевому елементі або при зміні значень пріоритетів. Для планування мережевої синхронізації на основі функціонування алгоритму динамічної зміни дерева синхронізації, використовуються принципи, викладені в п. 4.1.1.

3.5. Порівняльний аналіз функціонування фрагментів мережі синхронізації

Проведемо порівняльний аналіз досліджуваних фрагментів мережі синхронізації (трикутного, деревовидного, кільцевого), на базі отриманих вище співвідношень (3.33), (3.45), (3.56) для імовірності знаходження кожного фрагментів в працездатному стані.

На першому етапі визначимо надійність кожного фрагмента за умови рівності інтенсивностей відмов і інтенсивностей відновлень даних фрагментів мережі синхронізації, тобто:

$$\lambda_{Tp} = \lambda_{Dr} = \lambda_K$$

$$\mu_{Tp} = \mu_{Dr} = \mu_K$$

Введемо визначення структурної надійності мережі тактової синхронізації. Під структурною надійністю мережі тактової синхронізації розуміється об'єктивна властивість мережі забезпечувати зв'язність між вузлами мережі з якістю сигналу синхронізації не гірше заданого. Стосовно досліджуваних фрагментів мережі тактової синхронізації структурна надійність визначається як імовірність знаходження фрагмента мережі тактової синхронізації в працездатному стані за формулами (3.31), (3.43), (3.55).

Структурна надійність мережі синхронізації в загальному вигляді є функціоналом, залежним від інтенсивності потоку відмов, інтенсивності потоку відновлень, від топології і від алгоритму функціонування вузла мережі тактової синхронізації. Таким чином, структурна надійність може бути представлена в наступному вигляді:

$$P = f[\lambda_i(t), \mu_i(t), R_j(t), F_k],$$

де $\lambda_i(t)$ – функція інтенсивності потоку відмов, що впливає на i -й елемент фрагмента мережі;

$\mu_i(t)$ – інтенсивність потоку відмов, що впливає на i -й елемент фрагмента мережі;

$R_j(t)$ – топологія досліджуваного фрагмента ($j=1 \div 3$, де $j=1$ відповідає трикутному фрагменту, $j=2$ – деревовидному фрагменту, $j=3$ – кільцевому фрагменту)

F_k – тип використовуваного алгоритму, де $k=1 \div 3$, причому $k=1$ відповідає алгоритму функціонування вузлів синхронізації на основі таблиць пріоритетів, $k=2$ відповідає алгоритму функціонування вузлів синхронізації на основі повідомлень про статус синхронізації, $k=3$ відповідає алгоритму функціонування вузлів тактової синхронізації з можливістю формування динамічної зміни дерева синхронізації і внесенням програмованої затримки.

Розглянемо залежність зміни структурній надійності фрагментів мережі синхронізації від інтенсивності потоку відмов і топології фрагмента при дотриманні наступних умов:

1) інтенсивність потоку відновлень є величина постійна і рівна 1;

2) вузли тактової синхронізації функціонують за ідеальним алгоритмом, тобто відсутній вплив алгоритму на структурну надійність.

Встановимо початкове значення інтенсивностей потоку відмов рівним 0,8 з кроком зміни рівним 0,02. Використовуючи узагальнений алгоритм, визначимо структурна сталість якого з аналізованих фрагментів є вищою.

Результати розрахунків залежності структурної сталості фрагменту мережі синхронізації від інтенсивності потоку відмов і топології фрагмента приведені на рис. 3.13.

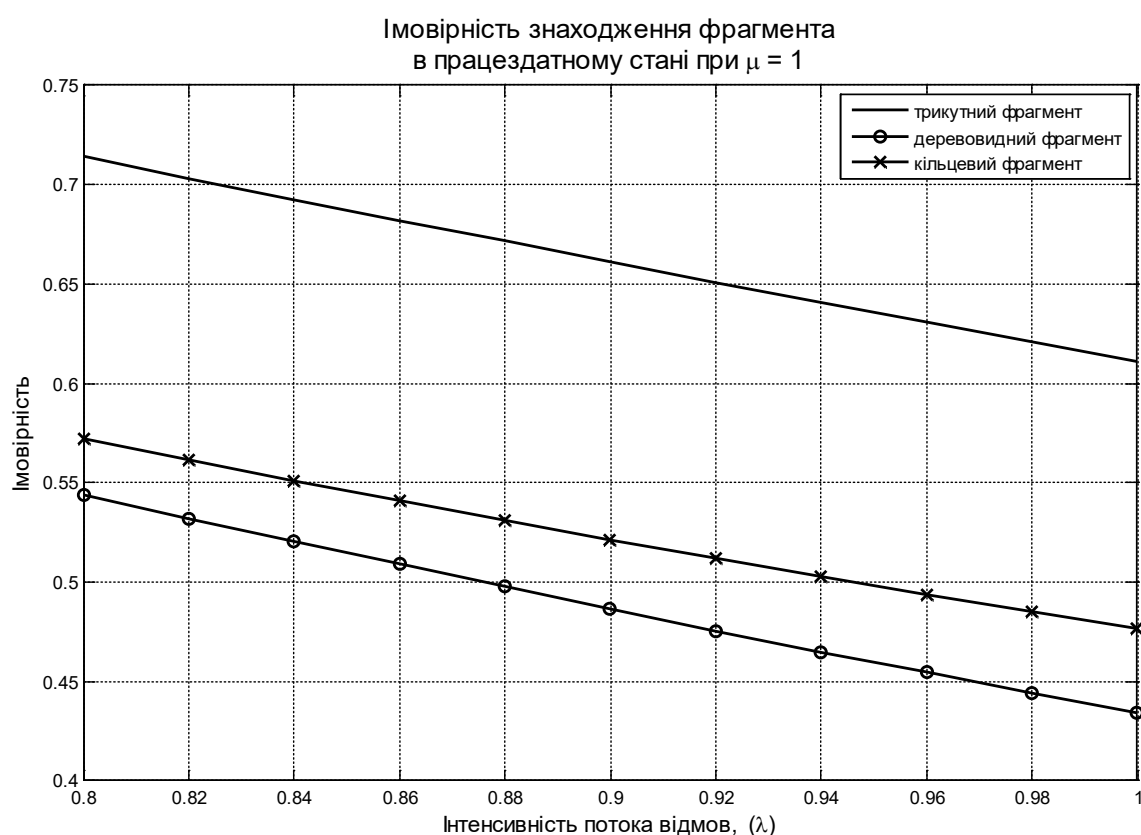


Рис.3.13. Залежності структурної сталості фрагменту мережі синхронізації від інтенсивності потоку відмов і топології фрагменту.

Розглянемо приклад використання узагальнюючого алгоритму для вибору оптимальної топології фрагмента мережі синхронізації в деяких реальних ситуаціях, відповідних типовим умовам функціонування мережевої синхронізації.

Випадок 1. Одне з ребер тих, що йдуть від джерела має підвищену відмовостійкість. Підвищена відмовостійкість забезпечується за рахунок

внутрішньостанційного розташування ребра між вузлом і задаючим джерелом. Дана ситуація зустрічається в багатьох випадках в мережах синхронізації. Для вибору оптимальної топології використовуємо запропоновану методику. Виберемо як ребро з підвищеною відмовостійкістю елемент під номером 6 (рис. 3.5, 3.9, 3.11 – для трикутного, деревовидного і кільцевого фрагмента відповідно). Нехай інтенсивність потоку відмов, що доводиться на даний елемент $\lambda_6 = 0,8$, а інтенсивність потоку відновлень $\mu_6 = 1,0$. Для всіх останніх ребер встановимо початкове значення інтенсивностей потоку відмов рівним 0,8 з кроком зміни рівним 0,02, а інтенсивність потоку відновлень постійна і дорівнює 1,0. Використовуючи запропонований узагальнюючий алгоритм, визначимо наскільки вигідним є використання тієї або іншої топології.

Результати розрахунку наведено у вигляді залежності структурної сталості від інтенсивності потоку відмов на рис. 3.14.

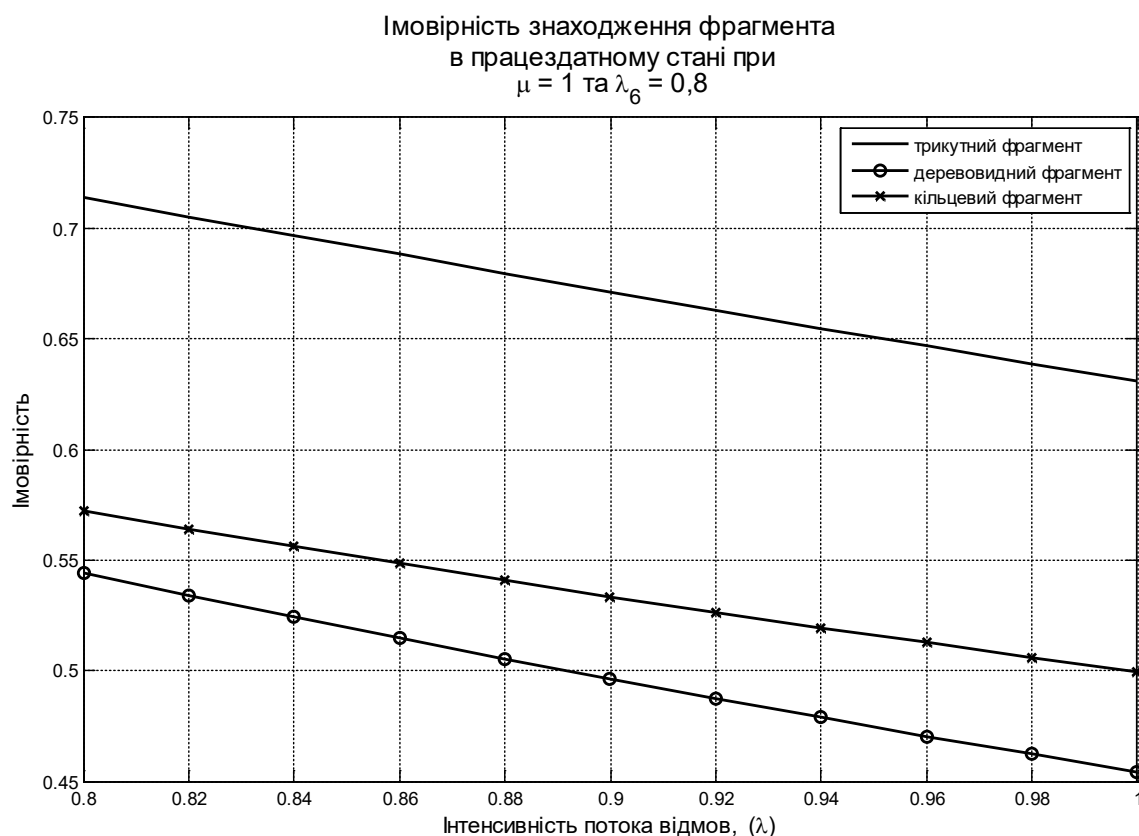


Рис.3.14. Залежність структурної сталості від інтенсивності потоку відмов, якщо одне з ребер має підвищену відмовостійкість.

Випадок 2. Два ребра від джерел сигналу мають підвищену відмовостійкість. Дана ситуація зустрічається в мережах синхронізації при використанні двох територіально рознесених джерел сигналу синхронізації. Підвищена відмовостійкість забезпечується за рахунок внутрішньостанційного розташування ребра між вузлом і задаючим джерелом. Оберемо, як ребра з підвищеною відмовостійкістю, елементи з номерами 6 і 8 (рис. 3.5, 3.9, 3.11 – для трикутного, деревовидного і кільцевого фрагмента відповідно). Нехай інтенсивність потоку відмов, що доводиться на дані елементи складає, $\lambda_6 = 0,8$, $\lambda_8 = 0,8$, а інтенсивність потоку відновлень $\mu_6 = \mu_9 = 1,0$. Для всіх останніх ребер встановимо початкове значення інтенсивностей потоку відмов рівним 0,8 з кроком зміни рівним 0,02, а інтенсивність потоку відновлень постійна і дорівнює 1,0. Використовуючи запропонований узагальнюючий алгоритм, визначимо, наскільки вигідним є використання тієї або іншої топології.

Результати розрахунку приведені у вигляді залежності структурної сталості від інтенсивності потоку відмов на рис. 3.15.

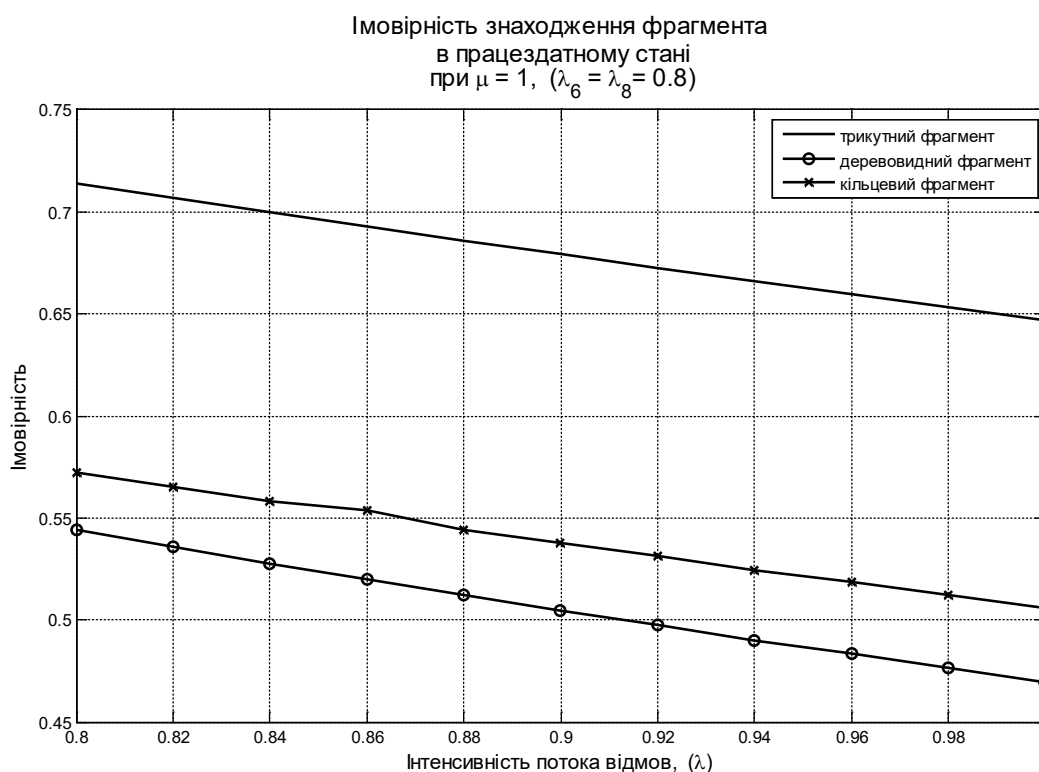


Рис.3.15. Залежність структурної сталості від інтенсивності потоку відмов, якщо два ребра мають підвищену відмовостійкість.

Випадок 3. Всі ребра від джерел мають незначне перевищення у відмовостійкості. Дана ситуація зустрічається, наприклад, при побудові багатокільцевих схем, або при відносному віддаленні деревовидного фрагмента від джерела, або коли існує необхідність синхронізувати мережу від приймачів сигналу GPS в умовах, коли не існує гарантії високої надійності каналу зв'язку із-за спотворень сигналу, передаваного з супутника. Виберемо тоді для елементів $\lambda_6, \lambda_8, \lambda_9 = 1,1$, а для $\mu_6, \mu_8, \mu_9 = 1,0$. Для всіх останніх ребер встановимо початкове значення інтенсивностей потоку відмов рівним 1,001 з кроком зміни рівним 0,2, а інтенсивність потоку відновлень постійна і дорівнює 1,0. Використовуючи запропонований узагальнюючий алгоритм, визначимо, наскільки вигідним є використання тієї або іншої топології.

Результати розрахунку приведені у вигляді залежності структурної сталості від інтенсивності потоку відмов на рис. 3.16.

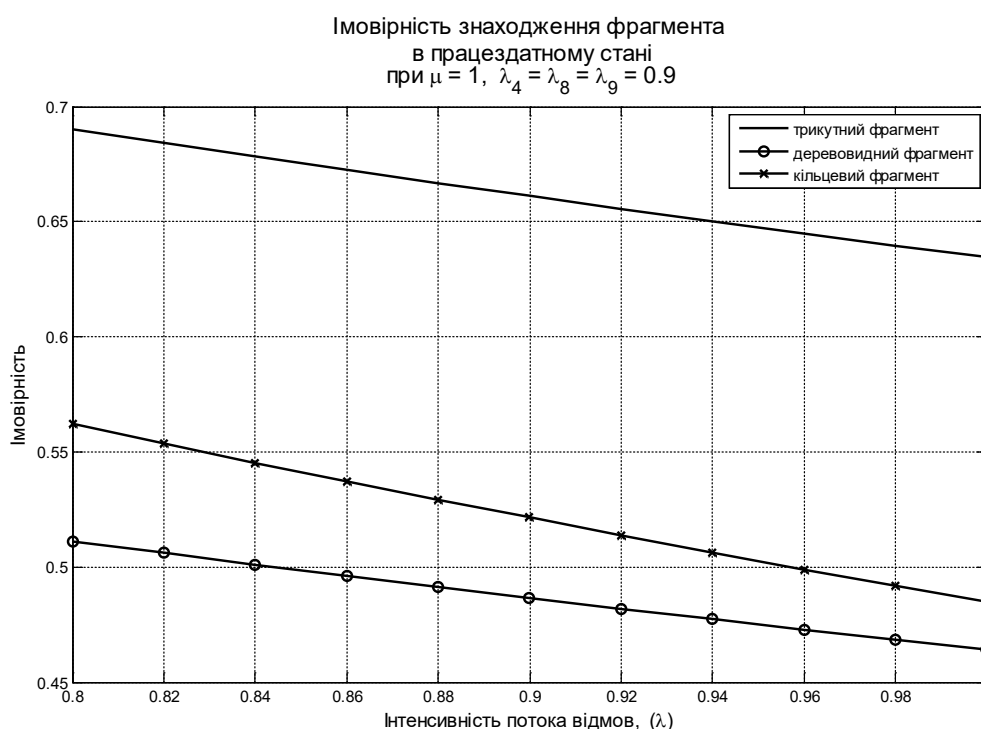


Рис.3.16. Залежність структурної сталості від інтенсивності потоку відмов, якщо всі ребра від джерел мають незначне перевищення у відмовостійкості.

У всіх випадках фрагмент з трикутною структурою має вищу відмовостійкість, також і в випадку 2 використання трикутного фрагмента

недоцільне у зв'язку з тим, що виграш за відмовостійкістю незначніший, ніж програш за вартістю.

3.6. Висновки

1. Розроблено метод визначення сталості функціонування мережевої синхронізації для кожного з фрагментів мережі синхронізації за заданих початкових умов: інтенсивність відмов, інтенсивність відновлення і початкові умови, в яких знаходилася система і з врахуванням таких параметрів: - алгоритм функціонування вузла синхронізації; - спосіб встановлення пріоритетів вхідним інтерфейсам (портам) синхронізації; - встановлення рівнів якості (quality level) сигналів синхронізації; - топологія фрагмента мережі.

2. Визначено умови втрати працездатності фрагмента мережі синхронізації з врахуванням параметрів і критеріїв, що визначають поняття "працездатність" і що дозволяє віднести всі можливі стани фрагментів мережі до однієї з двох груп: "фрагмент працездатний" або "фрагмент непрацездатний" за наявності обмеження у вигляді незалежності функціонування фрагмента від алгоритму функціонування вузла синхронізації.

Визначення цих умов дає можливість отримання значення теоретичної межі сталості функціонування фрагмента мережі синхронізації. Отримане значення межі є максимальним з точки зору якості функціонування мережі і називається верхньою межею. Саме до верхньої межі наближується функціонал працездатності фрагмента мережі.

3. Удосконалено метод аналізу працездатності фрагмента мережі синхронізації довільної топології, що дозволяє: - визначити можливість використання даних фрагментів як основних для побудови дерева синхронізації, що динамічно адаптується; - визначити значення параметрів, на основі яких можливо здійснити вибір оптимальної топології; - визначити варіанти використання перспективних топологічних структур.

4. Удосконалено метод динамічної адаптації дерева синхронізації в мережах синхронної цифрової ієрархії, реалізація якого, на відміну від існуючих, можлива на

основі механізму динамічного переконфігурування пріоритетів, що привласнюються вхідним інтерфейсам мережевих елементів синхронізації. Цей механізм передбачає набір правил, за якими здійснюється переконфігурування дерева синхронізації при виникненні аварійних ситуацій або ситуацій, що призводять до зміни значень якості сигналу синхронізації.

5. Удосконалено метод переконфігурування мережевої синхронізації в мережах IP/MPLS, який на відміну від відомих заключається у врахуванні сталості та живучості мережі синхронізації, він відхиляє канали без достатніх ресурсів, які не відповідають обмеженням або сформованій політиці.

6. Проведено порівняльний аналіз трикутного, деревовидного і кільцевого фрагментів мережі синхронізації з точки зору структурної сталості мережевої синхронізації за відсутності впливу алгоритму функціонування вузла мережі синхронізації на структурну сталість.

Результати дослідження показали, що у всіх випадках фрагмент з трикутною структурою може бути використаний в мережах синхронізації, оскільки має вищу відмовостійкість, проте в окремих випадках використання трикутного фрагмента недоцільне у зв'язку з тим, що виграш за відмовостійкістю незначніший, ніж програш за вартістю.

7. Отримано узагальнений функціонал сталості мережі синхронізації, що визначає залежність надійності мережі синхронізації від функціональних залежностей між інтенсивностями потоків відмов і відновлень, топології мережі, ефективності планування, алгоритмів функціонування мережних елементів.

РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МЕТОДИКИ ПІДВИЩЕННЯ СТАЛОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ В МУЛЬТИСЕРВІСНІЙ МАКРОМЕРЕЖІ

Метою даного розділу є оцінка ефективності запропонованих методів підвищення сталості функціонування мережевої синхронізації в мультисервісній макромережі. Запропоновано алгоритм динамічного переконфігурування мережі синхронізації для забезпечення необхідного рівню сталості та живучості мультисервісної макромережі.

Шляхом математичного моделювання була проведена оцінка введення механізму динамічної адаптації дерева синхронізації при плануванні мережевої синхронізації в мультисервісній макромережі.

Визначено алгоритм функціонування мережевого елементу синхронізації, що дозволяє створювати адаптивне дерево синхронізації шляхом перерозподілу пріоритетів вхідним інтерфейсам мережевих елементів, топологія яких включає вузли, ранг яких більше двох.

Для вирішення завдання щодо створення середовища автоматизованого планування мережевої синхронізації розроблено модель мережевого елементу з алгоритмом динамічної зміни дерева синхронізації [18, 41, 47, 49]. Основною метою створення даного середовища планування є автоматизація процесу проектування складних мереж синхронізації з врахуванням різних типів обладнання, яке використовується на мультисервісній макромережі [2, 4, 5].

4.1. Розробка механізму підвищення сталості функціонування мережевої синхронізації шляхом введення алгоритму динамічної адаптації дерева синхронізації

Надійність мережевої синхронізації в загальному вигляді є функцією, залежною від інтенсивності потоку відмов, інтенсивності потоку відновлень, від топології і від алгоритму функціонування вузла мережевої синхронізації.

Вирішення завдання щодо підвищення якості функціонування мережевої синхронізації потребує дослідження залежностей надійності функціонування мережі від обраної топології мережі, використовуваного алгоритму функціонування мережевого елементу, інтенсивностей потоків відмов і відновлень.

На даний час для створення мережевої синхронізації розроблено низку міжнародних нормативних документів. Відповідно до них, схема розподілу сигналів синхронізації в режимі функціонування повинна мати деревоподібну структуру, що здійснюється завдяки використанню протоколів обміну повідомлень про статус синхронізації та алгоритмів з використанням таблиць пріоритетів.

Існуючі алгоритми підвищення сталості мережевої синхронізації передбачають підвищення надійності мереж за рахунок формування додаткових маршрутів передачі сигналу синхронізації. До недоліків цих алгоритмів можна віднести зменшення надійності за рахунок можливості виникнення часових затримок, що викликані реакцією мережевих вузлів на зміну значення якості сигналу синхронізації.

Провівши аналіз функціонування фрагментів мережевої синхронізації різних топологій: кільце, деревовидна та трикутна й алгоритмів функціонування вузлів мережі синхронізації, можна прийти до висновку про те, що надійність фрагменту мережі визначається потенційно можливою кількістю незалежних логічних дерев синхронізації, що формуються для заданої фізичної топології. Приймається, що дерево синхронізації існує тоді, коли воно забезпечує функціонування фрагмента мережі в режимі, що не наводить до виникнення часових затримок. Виникнення часових затримок залежить, головним чином, від алгоритму функціонування вузлів синхронізації. Таким чином, кількість можливих дерев синхронізації залежить від використовуваного алгоритму. Тому при плануванні мережевої синхронізації вимога підвищення до сталості приводить до необхідності збільшення незалежних дерев синхронізації.

Це завдання може бути вирішене шляхом формування динамічно змінного (адаптивного) дерева синхронізації, реалізація якого можлива на основі механізму динамічного переконфігурування пріоритетів, що привласнюються вхідним

інтерфейсам мережових елементів синхронізації. Цей механізм передбачає набір правил, за якими здійснюється переконфігурування дерева синхронізації при виникненні аварійних ситуацій або ситуацій, що призводять до зміни значень якості сигналу синхронізації.

4.2. Дослідження впливу алгоритму динамічної адаптації дерева синхронізації

4.2.1. Дослідження впливу алгоритму динамічної адаптації дерева синхронізації на сталість кільцевого фрагменту мережевої синхронізації

Розглянемо основні принципи планування кільцевого фрагменту мережевої синхронізації (рис. 4.4).

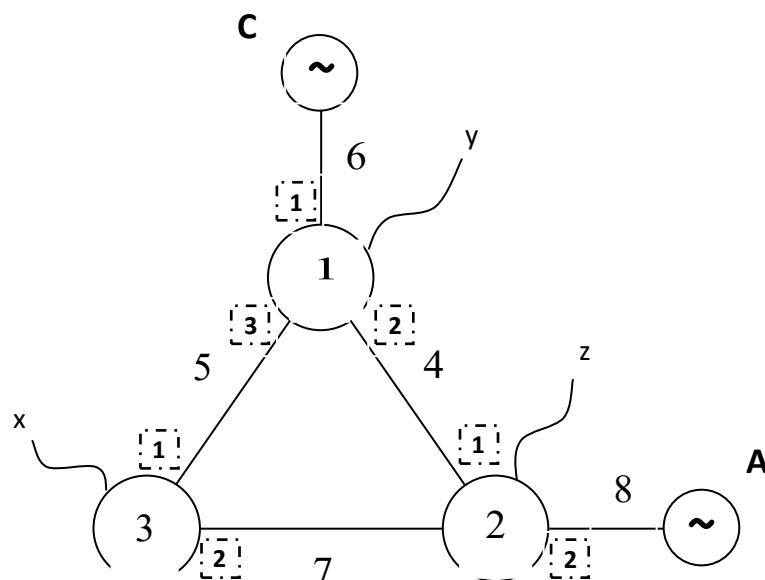


Рис.4.4. Кільцевий фрагмент мережі

Примітка. $\leftarrow$ – дане позначення означає заборону на прийом сигналу по вказаному напрямку шляхом установки вхідного інтерфейсу в стан "dis". $[1]$ $[2]$ – позначення пріоритетів.

Нехай сигнал синхронізації від джерела C є сигналом з найвищою якістю, а якість сигналу синхронізації від джерела A – нижче.

Тоді: для вузла №1 – найвищий пріоритет рівний одиниці привласнюється вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації від джерела C , як це показано на рис. 4.4, вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації, що пройшов маршрут: джерело $A \rightarrow$ вузол №2, привласнюється пріоритет рівний двом; вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації, що пройшов

маршрут: джерело $A \rightarrow \text{вузол } \text{№}2 \rightarrow \text{вузол } \text{№}3$, привласнюється пріоритет рівний трьом.

Для вузла $\text{№}2$ – найвищий пріоритет рівний одиниці привласнюється вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації, що пройшов маршрут: джерело $C \rightarrow \text{вузол } \text{№}1$; вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації, що пройшов маршрут: від джерела A , привласнюється пріоритет рівний двом, вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації, що пройшов маршрут: джерело $C \rightarrow \text{вузол } \text{№}1 \rightarrow \text{вузол } \text{№}3$, привласнюється пріоритет рівний трьом.

Для вузла $\text{№}3$ – найвищий пріоритет рівний одиниці привласнюється вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації, що пройшов маршрут: джерело $C \rightarrow \text{вузол } \text{№}1$; вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації, що пройшов маршрут: джерело $A \rightarrow \text{вузол } \text{№}2$, привласнюється пріоритет рівний двом.

Прийmemo, що часові затримки, викликані перемиканням вузлів і поширенням сигналу синхронізації, підібрані таким чином, що при виникненні аварійної ситуації на шостому елементі фрагменту мережі синхронізації (рис.4.4) часова затримка не виникає.

Визначимо імовірність перебування досліджуваного фрагменту мережевої синхронізації в працездатному стані, якщо планування фрагмента проведене відповідно до рис. 4.4. Для розрахунку скористаємося узагальненим алгоритмом.

Для цього, позначимо через $\overline{M}_K$ - подія втрати працездатності даним фрагментом. Здійснення події $\overline{M}_K$ представимо в наступному вигляді:

$$\overline{M}_K = \overline{M}_{K1} \cdot \overline{M}_{K2} \cdot \overline{M}_{K3}, \quad (4.1)$$

де M_{K1}, M_{K2}, M_{K3} - подія при якому сигнал синхронізації буде присутній на вихідному порту мережного елементу позначеного на рис. 4.4 цифрою 1, 2, 3, , відповідно.

Точки x, y, z характеризують обладнання, яке отримує сигнал синхронізації від вузлів тих, що знаходяться в аналізованому фрагменті.

Визначимо подію $\overline{M}_{K1}$ для даного фрагмента мережі. Для цього розглянемо умови, за якими в точці y відсутній сигнал синхронізації. Відсутність сигналу в

точці y можливо лише в тому випадку, якщо сигнали синхронізації, що транслуються від джерел A, C не дійде до точки y .

Складемо можливі маршрути проходження сигналу від вершин A, C до точки y для фрагмента мережі представленого на рис. 4.4.

$$C_{1y} \rightarrow y - \{6 \cdot 1\}$$

$$A_{1y} \rightarrow y - \{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1\};$$

$$A_{2y} \rightarrow y - \{8 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1\}$$

Подія $\overline{M}_{K1}$ станеться лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів що виходить з вершин A, C не досягне y . Тоді дану подію можна представити таким чином:

$$\overline{M}_{K1} = \overline{C}_{1y} \cdot \overline{A}_{1y} \cdot \overline{A}_{2y}, \quad (4.2)$$

де $\overline{C}_{1y}$ - подія, при якій маршрут $\{6 \cdot 1\}$ вийшов з ладу;

$\overline{A}_{1y}$ - подія, при якій маршрут $\{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1\}$ вийшов з ладу;

$\overline{A}_{2y}$ - подія, при якій маршрут $\{8 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1\}$ вийшов з ладу;

Тоді подія $\overline{M}_{K1}$ запишеться таким чином:

$$\overline{M}_{K1} = \overline{a_6 \cdot a_1} \cdot \overline{a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1} \cdot \overline{a_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1} \quad (4.3)$$

А подія M_{K1} , що означає наявність сигналу в точці y визначається як:

$$M_{K1} = a_6 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1 \quad (4.4)$$

Використовуючи аналогічні міркування, запишемо умову появи подій M_{K2} и M_{K3} .

Визначення події M_{K2} - відсутність сигналу в точці z .

Складемо можливі маршрути проходження сигналу від вершин A, C до точки z для фрагмента мережі представленого на рис. 4.4.

$$A_{1z} \rightarrow z - \{8 \cdot 2\};$$

$$C_{1z} \rightarrow z - \{6 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\}$$

$$C_{2z} \rightarrow z - \{6 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 2\}$$

Відсутність сигналу в точці z (подія $\overline{M}_{K2}$), станеться лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів що виходить з A, C не досягне z . Тоді дану подію можна представити таким чином:

$$\overline{M}_{K2} = \overline{C}_{1z} \cdot \overline{C}_{2z} \cdot \overline{A}_{1z}, \quad (4.5)$$

де $\overline{C}_{1z}$ - подія, при якій маршрут $\{6 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\}$ вийшов з ладу;

$\overline{C}_{2z}$ - подія, при якій маршрут $\{6 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 2\}$ вийшов з ладу;

$\overline{A}_{1z}$ - подія, при якій маршрут $\{8 \cdot 2\}$ вийшов з ладу.

Подія M_{K2} , що означає наявність сигналу в точці визначається як:

$$M_{K2} = a_8 \cdot a_2 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot a_2 \quad (4.6)$$

Тоді подія $\overline{M}_{K2}$ запишеться таким чином:

$$\overline{M}_{K2} = \overline{a_8 \cdot a_2} \cdot \overline{a_6 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2} \cdot \overline{a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot a_2} \quad (4.7)$$

Складемо можливі маршрути проходження сигналу від вершин A, C до точки x для фрагмента мережі представленого на рис. 4.4.

$$A_{1x} \rightarrow x - \{8 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 3\};$$

$$A_{2x} \rightarrow x - \{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3\};$$

$$C_{1x} \rightarrow x - \{6 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3\};$$

$$C_{2x} \rightarrow x - \{6 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 3\}.$$

Подія $\overline{M}_{K3}$, станеться лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів що виходить з вершин A, C не досягне x . Тоді дану подію можна представити таким чином:

$$\overline{M}_{K3} = \overline{A}_{1x} \cdot \overline{A}_{2x} \cdot \overline{C}_{1x} \cdot \overline{C}_{2x}, \quad (4.8)$$

де $\overline{C}_{1x}$ - подія, при якій маршрут $\{6 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3\}$ вийшов з ладу;

$\overline{C}_{2x}$ - подія, при якій маршрут $\{6 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 3\}$ вийшов з ладу;

$\overline{A}_{1x}$ - подія, при якій маршрут $\{8 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 3\}$ вийшов з ладу;

$\overline{A}_{2x}$ - подія, при якій маршрут $\{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3\}$ вийшов з ладу.

Подія M_{K3} , що означає наявність сигналу в точці y визначається як:

$$M_{K3} = a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot a_3 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot a_3 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 \quad (4.9)$$

Тоді подія $\overline{M}_{K3}$ запишеться таким чином:

$$\overline{M}_{K3} = \frac{a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 \cdot a_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot a_3 \cdot a_6 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot a_3}{a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3} \quad (4.10)$$

Запишемо подію $\overline{M}_K$ з врахуванням формул (4.1), (4.3), (4.7), (4.10), провівши ряд нескладних перетворень, і використовуючи метод поглинання:

$$\overline{M}_K = \frac{[a_6 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1] \cdot [a_8 \cdot a_2 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot a_2]}{[a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot a_3 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot a_3 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3]} \quad (4.11)$$

Тоді, подія M_K , при якій сигнал синхронізації заданої якості буде присутній на вихідному інтерфейсі (порт) мережного елементу, визначається як:

$$M_K = [a_6 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1] \cdot [a_8 \cdot a_2 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot a_2] \times [a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot a_3 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2 \cdot a_7 \cdot a_3 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3] \quad (4.12)$$

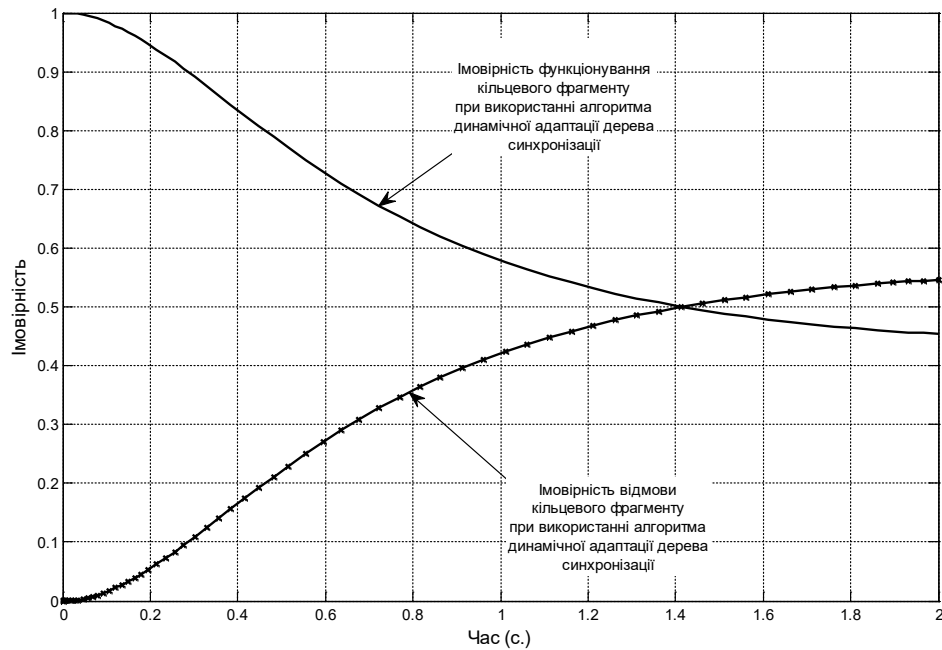


Рис.4.5. Функціональна залежність імовірності функціонування і відмов кільцевого фрагменту мережової синхронізації.

Якість функціонування фрагменту мережі синхронізації, в якому мережеві елементи функціонують за алгоритмом з динамічною адаптацією дерева

синхронізації може досягати якості функціонування фрагменту з ідеальним алгоритмом, тобто може бути досягнута теоретична межа якості функціонування.

Таким чином, використання алгоритму з динамічною адаптацією дерева синхронізації на даній топології доцільніше ніж використання існуючих алгоритмів.

4.2.2. Дослідження впливу алгоритму динамічної зміни дерева синхронізації на сталість деревовидного фрагменту мережевої синхронізації

Розглянемо основні принципи планування деревовидного фрагмента мережі тактової синхронізації (рис. 4.6).

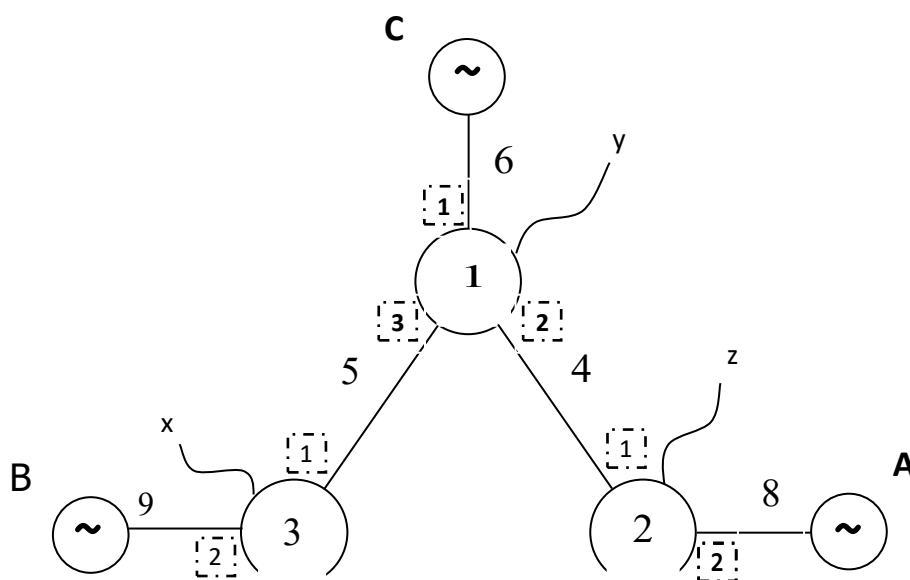


Рис.4.6. Деревовидний фрагмент мережі.

Примітка. $\leftarrow$ – дане позначення означає заборону на прийом сигналу по вказаному напрямку шляхом установки вхідного інтерфейсу в стан "dis". $\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}$ – позначення пріоритетів.

Нехай сигнал синхронізації від джерела C є сигналом з найвищою якістю, а якість сигналу синхронізації від джерел A, B – нижче.

Тоді: для вузла №1 – найвищий пріоритет рівний одиниці привласнюється вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації від джерела C , як це показано на рис. 4.6, вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації, що пройшов маршрут: джерело $A \rightarrow$ вузол №2 привласнюється пріоритет рівний

двом, вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації, що пройшов маршрут: джерело $B \rightarrow$ вузол №3 привласнюється пріоритет рівний трьом.

Для вузла №2 – найвищий пріоритет рівний одиниці привласнюється вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації, що пройшов маршрут: джерело $C \rightarrow$ вузол №1, як це показано на рис. 4.6;. вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації від джерела A , привласнюється пріоритет рівний двом.

Для вузла №3 – найвищий пріоритет рівний одиниці привласнюється вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації, що пройшов маршрут: джерело $C \rightarrow$ вузол №1, як це показано на рис. 4.6;. вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації від джерела B , привласнюється пріоритет рівний двом.

Визначимо імовірність перебування досліджуваного фрагмента мережевої синхронізації в працездатному стані, якщо планування фрагмента проведене відповідно до рис. 4.6.

Для цього, позначимо через $\overline{M}_{др}$ - подія втрати працездатності даним фрагментом. Здійснення події $\overline{M}_{др}$ представимо в наступному вигляді:

$$\overline{M}_{др} = \overline{M}_{др1} \cdot M_{др2} \cdot M_{др3}, \quad (4.13)$$

де $M_{др1}, M_{др2}, M_{др3}$ - подія при якому сигнал синхронізації буде присутній на вихідному порту мережного елементу позначеного на рис. 4.6 цифрою 1, 2, 3, відповідно.

Точки x, y, z характеризують обладнання, яке отримує сигнал синхронізації від вузлів тих, що знаходяться в аналізованому фрагменті.

Визначимо подію $\overline{M}_{др1}$ для даного фрагмента мережі. Для цього розглянемо умови, при яких в точці y відсутній сигнал синхронізації. Відсутність сигналу в точці y можливо лише в тому випадку, якщо сигнал синхронізації, що транслюється від опорного генератора джерела C не дійде до точки y і сам мережний елемент №1 (джерело в замкнутому контурі) втратить працездатність.

Складемо можливі маршрути проходження сигналу від вершини C до точки для фрагмента мережі представленого на рис. 4.6.

$$C_{1y} \rightarrow y - \{6 \cdot 1\};$$

$$A_{1y} \rightarrow y - \{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1\};$$

$$B_{1y} \rightarrow y - \{9 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1\}.$$

Подія $\overline{M}_{dp1}$, станеться лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів що виходить з вершин A, B, C не досягне y . Тоді дану подію можна представити таким чином:

$$\overline{M}_{dp1} = \overline{C}_{1y} \cdot \overline{A}_{1y} \cdot \overline{B}_{1y}, \quad (4.14)$$

де $\overline{C}_{1y}$ - подія, при якій маршрут $\{6 \cdot 1\}$ вийшов з ладу;

$\overline{A}_{1y}$ - подія, при якій маршрут $\{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1\}$ вийшов з ладу;

$\overline{B}_{1y}$ - подія, при якій маршрут $\{9 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1\}$ вийшов з ладу.

Тоді подія $\overline{M}_{dp1}$ запишеться таким чином:

$$\overline{M}_{dp1} = \overline{a_6 \cdot a_1 \cdot a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 \cdot a_9 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1} \quad (4.15)$$

А подія M_{dp1} , що означає наявність сигналу в точці визначається як:

$$M_{dp1} = a_6 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + a_9 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1 \quad (4.16)$$

Використовуючи аналогічні міркування, запишемо умову появи подій M_{dp2} и M_{dp3} ..

Визначення події M_{dp2} - відсутність сигналу в точці z .

Складемо можливі маршрути проходження сигналу від вершин A, B, C до точки z для фрагмента мережі представленого на рис. 4.6.

$$A_{1z} \rightarrow z - \{8 \cdot 2\}$$

$$B_{1z} \rightarrow z - \{9 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\};$$

$$C_{1z} \rightarrow z - \{6 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\}$$

Відсутність сигналу в точці z (подія $\overline{M}_{dp2}$), станеться лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів що виходить з A, B, C не досягне z . Тоді дану подію можна представити таким чином:

$$\overline{M}_{dp2} = \overline{A}_{1z} \cdot \overline{C}_{1z} \cdot \overline{B}_{1z}, \quad (4.17)$$

де $\bar{A}_{1z}$ - подія, при якій маршрут $\{8 \cdot 2\}$ вийшов з ладу;

$\bar{B}_{1z}$ - подія, при якій маршрут $\{9 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\}$ вийшов з ладу;

$\bar{C}_{1z}$ - подія, при якій маршрут $\{6 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\}$ вийшов з ладу.

Подія M_{dp2} , що означає наявність сигналу в точці визначається як:

$$M_{dp2} = a_8 \cdot a_2 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2 + a_9 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2 \quad (4.18)$$

Тоді подія $\bar{M}_{dp2}$ запишеться таким чином:

$$\bar{M}_{dp2} = \overline{a_9 \cdot a_3} \cdot \overline{a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3} \cdot \overline{a_9 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2} \quad (4.19)$$

Складемо можливі маршрути проходження сигналу від вершин A, B, C до точки x для фрагмента мережі представленого на рис. 4.6

$$A_{1x} \rightarrow x - \{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3\};$$

$$B_{1x} \rightarrow x - \{9 \cdot 2\};$$

$$C_{1x} \rightarrow x - \{6 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3\};$$

Подія $\bar{M}_{dp3}$, станеться лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів що виходить з вершин A, B, C не досягне x . Тоді дану подію можна представити таким чином:

$$\bar{M}_{dp3} = \bar{A}_{1x} \cdot \bar{B}_{1x} \cdot \bar{C}_{1x}, \quad (4.20)$$

де $\bar{C}_{1x}$ - подія, при якій маршрут $\{6 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3\}$ вийшов з ладу;

$\bar{B}_{1x}$ - подія, при якій маршрут $\{9 \cdot 2\}$ вийшов з ладу;

$\bar{A}_{1x}$ - подія, при якій маршрут $\{8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3\}$ вийшов з ладу;

Подія M_{dp3} , що означає наявність сигналу в точці x визначається як:

$$M_{dp3} = a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 + a_9 \cdot a_2 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 \quad (4.21)$$

Тоді подія $\bar{M}_{dp3}$ запишеться таким чином:

$$\bar{M}_{dp3} = \overline{a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3} \cdot \overline{a_9 \cdot a_2} \cdot \overline{a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3} \quad (4.22)$$

Запишемо подію $\bar{M}_{dp}$ з врахуванням формул (4.13), (4.15), (4.19), (4.21), провівши ряд нескладних перетворень, і використовуючи метод поглинання:

$$\overline{M}_{Др} = \frac{[a_6 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + a_9 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1] \cdot [a_8 \cdot a_2 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2 + a_9 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1 a_4 \cdot a_2] \times}{\times [a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 + a_9 \cdot a_2 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3]} \quad (4.23)$$

Тоді, подія $M_{Др}$, при якій сигнал синхронізації заданої якості буде присутній на вихідному інтерфейсі (порт) мережного елементу, визначається як:

$$M_{Др} = [a_6 \cdot a_1 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 + a_9 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1] \cdot [a_8 \cdot a_2 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2 + a_9 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1 a_4 \cdot a_2] \times [a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 + a_9 \cdot a_2 + a_8 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3] \quad (4.24)$$

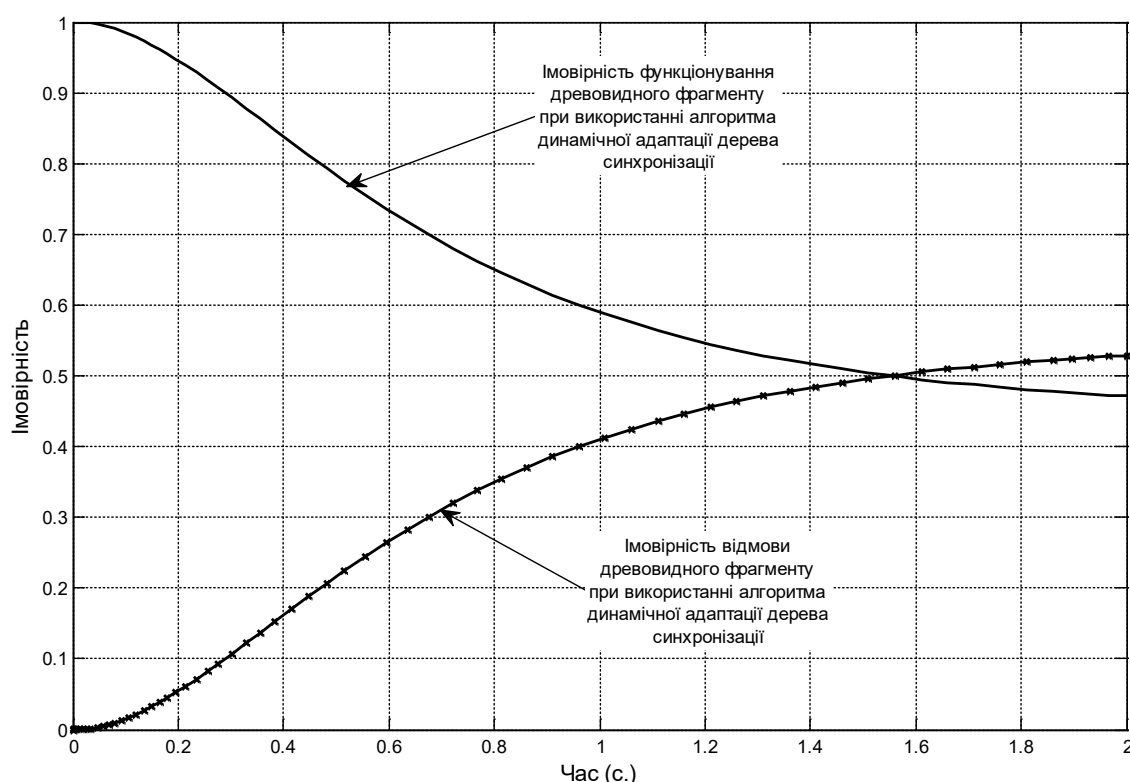


Рис.4.7. Функціональна залежність імовірності функціонування і відмов деревовидного фрагменту мережевої синхронізації.

Якість функціонування фрагмента мережі синхронізації, в якому мережеві елементи функціонують за алгоритму з динамічною адаптацією дерева синхронізації може досягати якості функціонування фрагменту з ідеальним алгоритмом, тобто може бути досягнута теоретична межа якості функціонування.

Таким чином, алгоритм з динамічною адаптацією дерева синхронізації на даній топології за ефективністю використання такий самий як інші існуючі алгоритми.

4.2.3. Дослідження впливу алгоритму динамічної зміни дерева синхронізації на надійність трикутного фрагменту мережевої синхронізації

Розглянемо основні принципи планування трикутного фрагменту мережевої синхронізації (рис. 4.8).

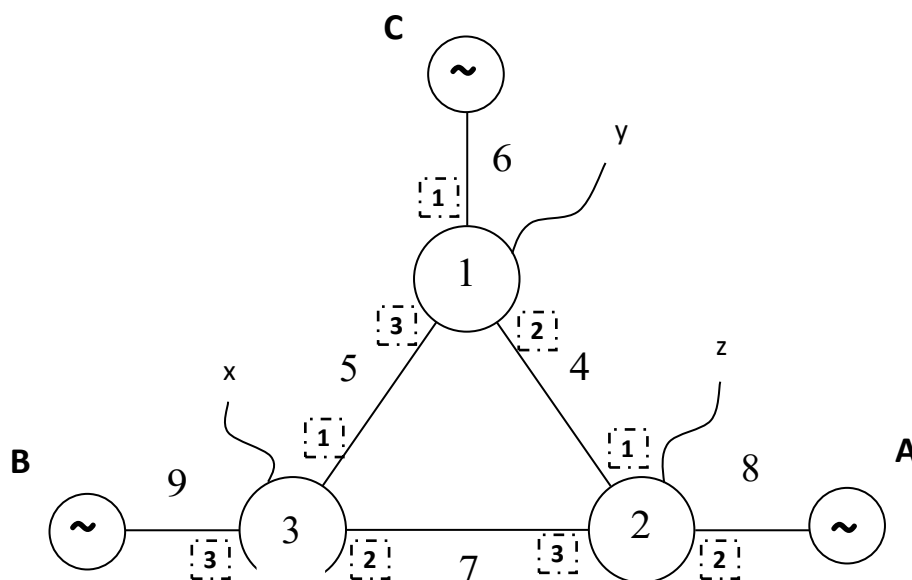


Рис.4.8. Трикутний фрагмент мережі зі встановленими пріоритетами.

Примітка. $\leftarrow$ – дане позначення означає заборону на прийом сигналу по вказаному напрямку шляхом установки вхідного інтерфейсу в стан "dis"; $\boxed{1}$ $\boxed{2}$ – позначення пріоритетів.

Нехай сигнал синхронізації від джерела C є сигналом з найвищою якістю, а якість сигналу синхронізації від джерел B і C – нижче.

Тоді: для вузла №1 – найвищий пріоритет рівний одиниці привласнюється вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації від джерела C , як це показано на рис. 4.8, вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації, що пройшов маршрут: джерело $B \rightarrow$ вузол №3, привласнюється пріоритет рівний двом; вхідному інтерфейсу, що залишився, привласнюється значення "dis".

Для вузла №2 – найвищий пріоритет рівний одиниці привласнюється вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації, що пройшов маршрут: джерело $C \rightarrow$ вузол №1, як це показано на рис. 4.8; вхідному інтерфейсу, на який поступає

сигнал синхронізації, що пройшов маршрут: від джерела A , привласнюється пріоритет рівний двом, вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації, що пройшов маршрут: від джерело $B \rightarrow \text{вузол } \text{№}3$, привласнюється пріоритет 3.

Для вузла $\text{№}3$ – найвищий пріоритет рівний одиниці привласнюється вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації, що пройшов маршрут: джерело $C \rightarrow \text{вузол } \text{№}1$, як це показано на рис. 4.8; вхідному інтерфейсу, на який поступає сигнал синхронізації, що пройшов маршрут: джерело $B \rightarrow \text{вузол } \text{№}2$, привласнюється пріоритет рівний двом; вхідному інтерфейсу, що залишився, привласнюється значення "dis".

Визначимо імовірність перебування досліджуваного фрагменту мережевої синхронізації в працездатному стані, якщо планування фрагмента проведене відповідно до рис. 4.8.

Для цього, позначимо через $\overline{M}_{Tp}$ - подія втрати працездатності даним фрагментом. Здійснення події $\overline{M}_{Tp}$ представимо в наступному вигляді:

$$\overline{M}_{Tp} = \overline{M_{Tp1} \cdot M_{Tp2} \cdot M_{Tp3}}, \quad (4.25)$$

де $M_{Tp1}, M_{Tp2}, M_{Tp3}$ - подія при якому сигнал синхронізації буде присутній на вихідному порту мережного елементу позначеного на рис. 4.8 цифрою 1, 2, 3, відповідно.

Точки x, y, z характеризують обладнання, яке отримує сигнал синхронізації від вузлів тих, що знаходяться в аналізованому фрагменті.

Визначимо подію $\overline{M}_{Tp1}$ для даного фрагмента мережі. Для цього розглянемо умови, при яких в точці y відсутній сигнал синхронізації. Відсутність сигналу в точці y можливо лише в тому випадку, якщо сигнал синхронізації, що транслюється від опорних генераторів A, B, C не дійде до точки y і сам мережний елемент $\text{№}1$ (джерело в замкнутому контурі) втратить працездатність.

Складемо можливі маршрути проходження сигналу від вершин A, B, C до точки y для фрагмента мережі представленого на рис. 4.8.

$$C_{1y} \rightarrow y - \{6 \cdot 1\};$$

$$B_{1y} \rightarrow y - \{9 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1\};$$

Подія $\overline{M}_{Tp1}$, станеться лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів що виходить з вершин A, B, C не досягне y . Тоді дану подію можна представити таким чином:

$$\overline{M}_{Tp1} = \overline{C}_{1y} \cdot \overline{B}_{1y}, \quad (4.26)$$

де $\overline{C}_{1y}$ - подія, при якій маршрут $\{6 \cdot 1\}$ вийшов з ладу;

$\overline{B}_{1y}$ - подія, при якій маршрут $\{9 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1\}$ вийшов з ладу.

Тоді подія $\overline{M}_{Tp1}$ запишеться таким чином:

$$\overline{M}_{Tp1} = \overline{a_6 \cdot a_1} \cdot \overline{a_9 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1} \quad (4.27)$$

А подія, M_{Tp1} що означає наявність сигналу в точці визначається як:

$$M_{Tp1} = a_6 \cdot a_1 + a_9 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1 \quad (4.28)$$

Використовуючи аналогічні міркування, запишемо умову появи подій M_{Tp2} и $M_{Tp3} \dots$

Визначення події M_{Tp2} - відсутність сигналу в точці z .

Складемо можливі маршрути проходження сигналу від вершин A, B, C до точки z для фрагмента мережі представленого на рис. 4.8.

$$A_{1z} \rightarrow z - \{8 \cdot 2\};$$

$$C_{1z} \rightarrow z - \{6 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\};$$

$$C_{2z} \rightarrow z - \{6 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 2\};$$

$$B_{1z} \rightarrow z - \{9 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 2\};$$

$$B_{2z} \rightarrow z - \{9 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\};$$

Відсутність сигналу в точці z (подія $\overline{M}_{Tp2}$), станеться лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів що виходить з A, B, C не досягне z . Тоді дану подію можна представити таким чином:

$$\overline{M}_{Tp2} = \overline{A}_{1z} \cdot \overline{C}_{1z} \cdot \overline{C}_{2z} \cdot \overline{B}_{1z} \cdot \overline{B}_{2z} \cdot, \quad (4.29)$$

де $\overline{A}_{1z}$ – подія, при якій маршрут $\{8 \cdot 2\}$ вийшов з ладу;

$\bar{C}_{1z}$ - подія, при якій маршрут $\{6 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\}$ вийшов з ладу;

$\bar{C}_{2z}$ - подія, при якій маршрут $\{6 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 2\}$ вийшов з ладу;

$\bar{B}_{1z}$ - подія, при якій маршрут $\{9 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 2\}$ вийшов з ладу;

$\bar{B}_{2z}$ - подія, при якій маршрут $\{9 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 2\}$ вийшов з ладу.

Подія M_{Tp2} , що означає наявність сигналу в точці визначається як:

$$M_{Tp2} = a_8 \cdot a_2 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot a_2 + a_9 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot a_2 + a_9 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2 \quad (4.30)$$

Тоді подія $\bar{M}_{Tp2}$ запишеться таким чином:

$$\bar{M}_{Tp2} = \overline{a_8 \cdot a_2} \cdot \overline{a_6 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2} \cdot \overline{a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot a_2} \cdot \overline{a_9 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot a_2} \times \overline{a_9 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2} \quad (4.31)$$

Складемо можливі маршрути проходження сигналу від вершин A, B, C до точки x для фрагмента мережі представленого на рис. 4.8.

$C_{1x} \rightarrow x - \{6 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3\}$;

$B_{1x} \rightarrow x - \{9 \cdot 3\}$;

Подія, $\bar{M}_{Tp3}$ станеться лише в тому випадку, якщо жоден з сигналів що виходить з вершин A, B, C не досягне x . Тоді дану подію можна представити таким чином:

$$\bar{M}_{Tp3} = \bar{C}_{1x} \cdot \bar{B}_{1x}, \quad (4.32)$$

де $\bar{C}_{1x}$ - подія, при якій маршрут $\{6 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3\}$ вийшов з ладу;

$\bar{B}_{1x}$ - подія, при якій маршрут $\{9 \cdot 3\}$ вийшов з ладу.

Подія M_{Tp3} , що означає наявність сигналу в точці визначається як:

$$M_{Tp3} = a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 + a_9 \cdot a_3 \quad (4.33)$$

Тоді подія $\bar{M}_{Tp3}$ запишеться таким чином:

$$\bar{M}_{Tp3} = \overline{a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3} \cdot \overline{a_9 \cdot a_3} \quad (4.34)$$

Запишемо подію $\bar{M}_{Tp}$ з врахуванням формул (4.24), (4.26), (4.30), (4.33), провівши ряд нескладних перетворень, і використовуючи метод поглинання:

$$\overline{M}_{Tp} = \frac{[a_6 \cdot a_1 + a_9 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1] \cdot [a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 + a_9 \cdot a_3] \cdot [a_8 \cdot a_2 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2]}{\times [a_8 \cdot a_2 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot a_2 + a_9 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot a_2 + a_9 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2]} \quad (4.35)$$

Тоді, подія M_{Tp} , при якій сигнал синхронізації заданої якості буде присутній на вихідному інтерфейсі (порт) мережного елементу, визначається як:

$$M_{Tp} = [a_6 \cdot a_1 + a_9 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1] \cdot [a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 + a_9 \cdot a_3] \cdot [a_8 \cdot a_2 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2] + [a_8 \cdot a_2 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2 + a_6 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot a_2 + a_9 \cdot a_3 \cdot a_7 \cdot a_2 + a_9 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot a_2] \quad (4.36)$$

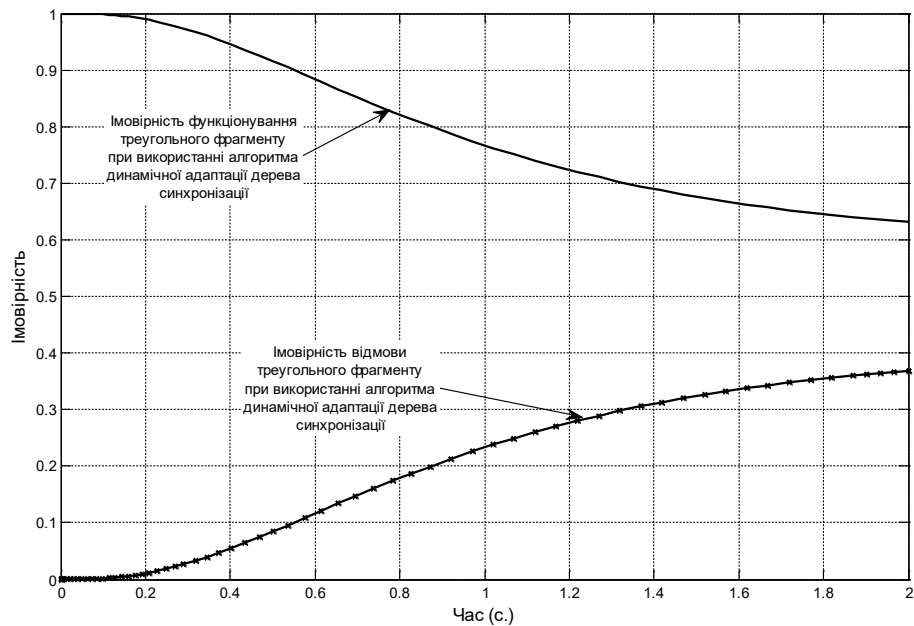


Рис.4.9. Функціональна залежність імовірності функціонування і відмов трикутного фрагменту мережевої синхронізації.

Якість функціонування фрагмента мережі синхронізації, в якому мережні елементи функціонують за алгоритмом з динамічною адаптацією дерева синхронізації може досягати якості функціонування фрагмента з ідеальним алгоритмом, тобто може бути досягнутий теоретична межа якості функціонування.

Таким чином, використання алгоритму з динамічною адаптацією дерева синхронізації на даній топології доцільніше ніж використання існуючих алгоритмів.

4.3. Розробка моделі мережевого пристрою для дослідження схем синхронізації

В процесі проектування схеми розподілу сигналів синхронізації в мережі необхідно враховувати низку чинників, а саме:

- працездатність ліній зв'язку між вузлами, які характеризуються показниками сталості й виражені через значення інтенсивностей потоку відмов і потоку відновлення зв'язків;
- відмінність алгоритмів функціонування мережевих елементів синхронізації;
- відмінність функціональних характеристик мережевих елементів обладнання різних виробників і різних поколінь.

З причини складності проектування мереж синхронізації з врахуванням даних чинників, був розроблений програмний пакет, що дозволяє автоматизувати процес планування. Даний пакет створений в середовищі Simulink оболонки MATLAB. Такий підхід до вибору середовища проектування обумовлений:

- простотою використання;
- можливістю використовувати вбудовані алгоритми і пристрої відображення інформації;
- можливістю використання власних готових алгоритмів реалізованих на мовах C і C++;
- можливістю масштабування проекту, що дозволяє, в компактному вигляді представляти мережу з великою кількістю вузлів синхронізації і здійснювати аналіз як функціонування мережі синхронізації в цілому, так і окремого її фрагменту.

Основою даного програмного пакету служить модель мережевого елементу, яка побудована відповідно до [18, 44, 47, 49]. Дана модель (рис. 4.10) складається з "логічної" і "фізичної" функціональних частин.

Логічна частина здійснює взаємодію з фізичною частиною моделі за допомогою сигналів управління, які формуються і трансльються блоком управління. Блок управління реалізує наступні функції:

- вибір опорного сигналу синхронізації по повідомленню про статус синхронізації (SSM) і пріоритетах, привласненим вхідним портам;
- формування сигналів управління, з врахуванням встановлених порогів, які застосовуються для здобуття гарантованої якості сигналів синхронізації;
- трансляція сигналів управління, з врахуванням затримок які властиві даному типові обладнання.

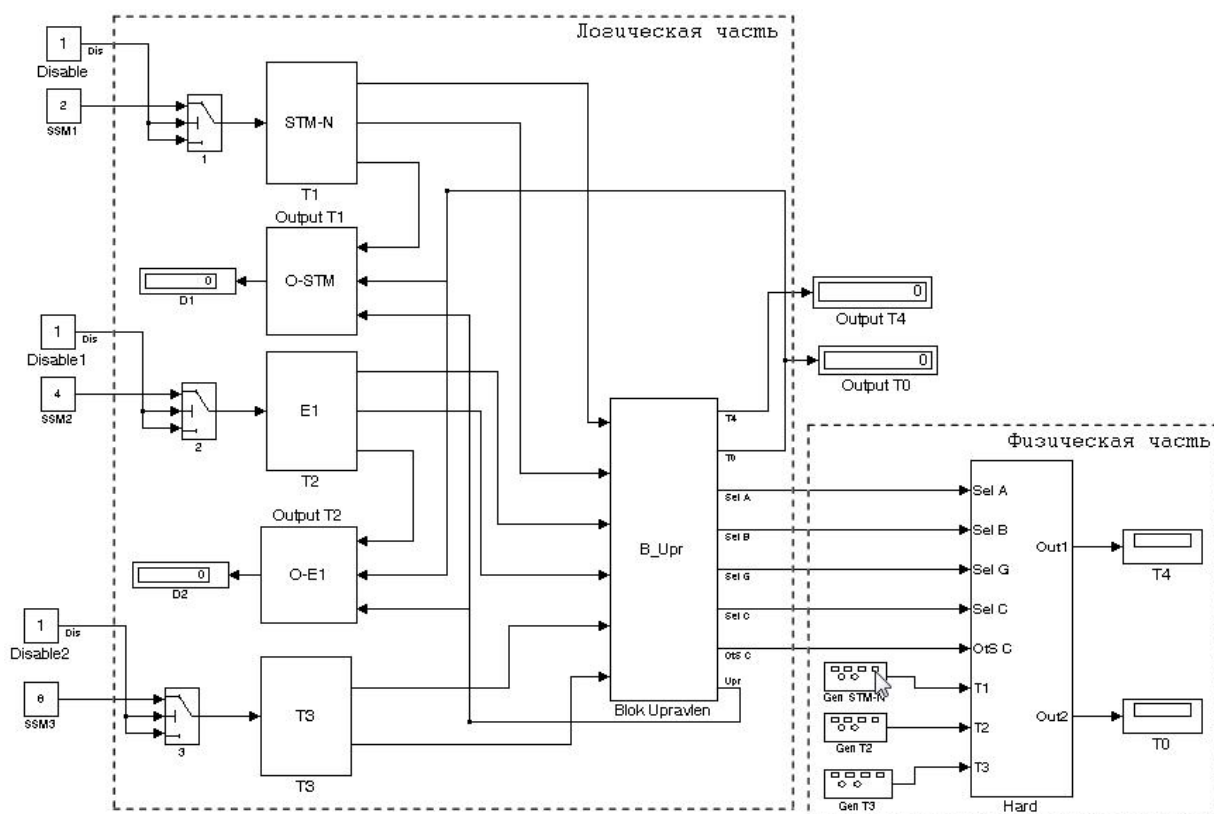
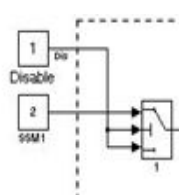


Рис.4.10. Модель мережевого элемента синхронізації.

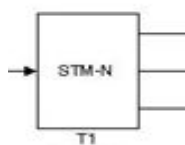
Фізична частина реалізована у вигляді фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) і керованих комутаторів (селекторів). Управління комутаторами здійснює логічна частина. Існує можливість в широких межах варіювати параметри ФАПЧ з метою здобуття необхідних характеристик обладнання синхронізації.

Розглянемо призначення кожного блоку логічної частини моделі мережевого елемента синхронізації, представленого на рис. 4.10:

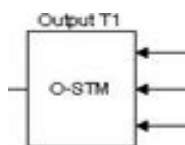


- блок, що здійснює вибір алгоритму функціонування мережевого елемента (на базі пріоритетів або на основі повідомлення про статус синхронізації), а так само трансляцію значення байту SSM

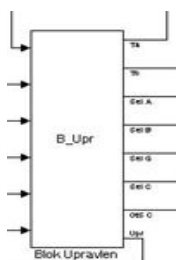
на вхідний інтерфейс мережевого елементу;



– блок попередньої селекції, який задає число вхідних інтерфейсів і пріоритети для кожного з них; а також здійснює попередній вибір найкращого сигналу синхронізації на основі пріоритетів або на основі значення байту SSM, переданого в заголовок інформаційного повідомлення потоку STM-N. Блоки E1 і T3 виконують аналогічні функції для компонентного сигналу (2,048 Мбіт/с) і сигналу синхронізації (2,048 МГц - 2,048 Мбіт/с) [96, 98];



– блок вихідних інтерфейсів, який здійснює трансляцію значення байта SSM для зовнішніх мережевих елементів;

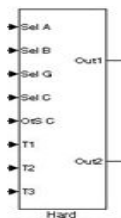


– блок управління, який здійснює остаточний вибір сигналу синхронізації, що використовується в якості опорного для мережевого елементу. Також даний блок управляє блоками вихідних інтерфейсів, а також здійснює управління всіма блоками, реалізованими у фізичній частині моделі мережевого елементу.

Розглянемо призначення кожного блоку фізичної частини моделі мережевого елементу синхронізації, представленого на рис. 4.10:



– блок, що моделює фізичний сигнал синхронізації, який виділяється з потоку STM-N, компонентного сигналу 2,048 Мбіт/с і сигналу синхронізації 2,048 МГц - 2,048 Мбіт/с;



– блок формування вихідного сигналу синхронізації, який за допомогою селекторів А, В і С і фазового автопідстроювання частоти формує вихідний сигнал синхронізації.

Проведемо імітаційне моделювання з використанням розроблених віртуальних пристроїв. Як середовище для імітаційного моделювання використовується середовище Simulink оболонки MATLAB.

4.4. Імітаційне моделювання фрагментів мережі синхронізації типових топологічних структур в мережах синхронної цифрової ієрархії

4.4.1. Імітаційне моделювання кільцевого фрагменту мережі синхронізації

Методика проведення імітаційного моделювання полягає в наступному:

- 1) за досліджуваній фрагмент береться фрагмент мережевої синхронізації кільцевої топології з пріоритетами, розставленими за планом. Схему моделі фрагмента наведено на рис. 4.11 і відповідає топології кільцевого фрагменту;
- 2) проводиться перевірка алгоритму функціонування моделі мережевого елемента на базі таблиці пріоритетів;
- 3) проводиться перевірка алгоритму функціонування моделі мережевого елемента на основі повідомлень про статус синхронізації (SSM);
- 4) проводиться перевірка алгоритму функціонування моделі мережевого елемента на основі механізму динамічної адаптації дерева синхронізації;
- 5) порівняння отриманих результатів.

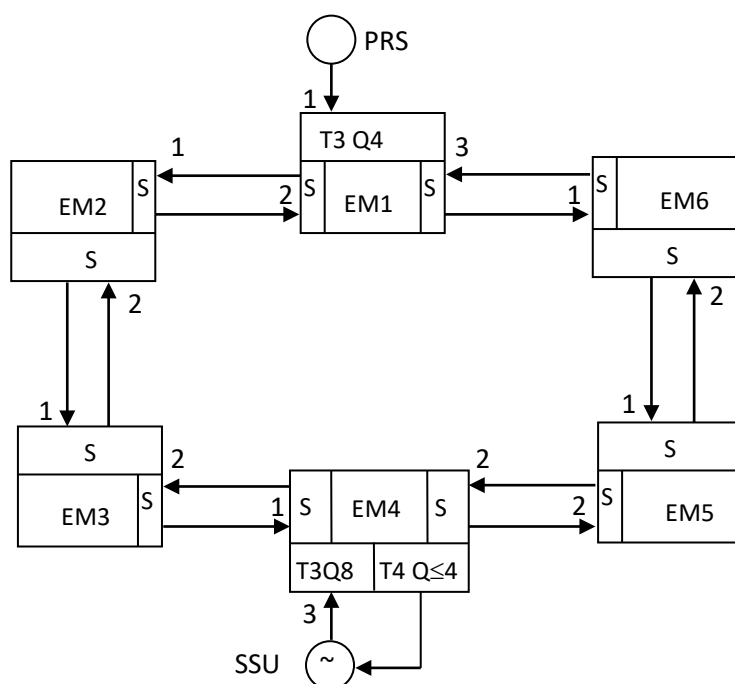


Рис.4.10. Схема моделі фрагменту мережевої синхронізації кільцевої топології

Сформуємо досліджувану схему в середовищі Simulink, з використанням моделей мережевого елемента. Встановимо вхідним портам мережевих елементів відповідні пріоритети. При дослідженні передбачається, що в даній топології

можливе послідовне виникнення аварійної ситуації. На зв'язках між мережевими елементами EM1 – EM2, EM5 - EM6, EM5 - EM6, EM3 – EM4, PRS - EM1, SSU - EM4, розмістимо пристрої, що генерують можливі аварійні ситуації. Ці аварії виникатимуть послідовно.

Аналіз топології проводиться в наступному порядку (рис. 4.11).

Після запуску моделювання мережа перейде в режим номінального функціонування, в якому проводиться аналіз на наявність в мережі петлі синхронізації. Якщо петля відсутня, то генерується аварійна ситуація, після виникнення, якої знову відбувається аналіз топології на наявність петлі [19, 20, 42, 43]. В разі знаходження петлі, в результуючій таблиці формується запис, що містить номер ділянки, аварія на якому призводить до виникнення петлі. Після цього зв'язок відновлюється і генерується нова аварія. Таким чином перевіряються одиночні аварії, після чого слідує перевірка подвійних аварійних ситуацій, потрійних аварійних ситуацій тощо.

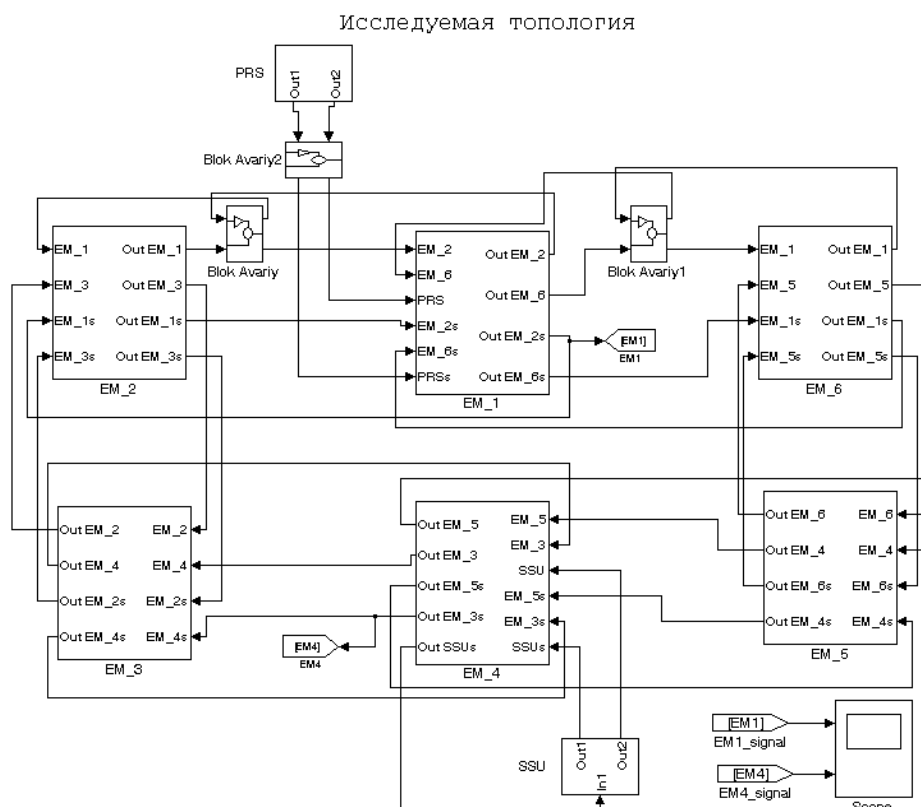


Рис.4.11. Досліджувана топологія в пакеті Simulink.

Після завершення процесу моделювання, відображується результуюча таблиця. Для наочності може бути показана ситуація виникнення петлі синхронізації

в динаміці. Для цього у фізичній частині моделі мережних елементів відключають ФАПЧ, а сигнали від обладнання PRS, SSU і SEC вибираються таким чином, щоб можна було візуально визначити, від якого джерела синхронізована мережа. У нашому випадку сигнал від PRS має вигляд синусоїди, від SSU - меандра, а від SEC - трикутний.

Результати моделювання досліджуваної топології для всіх алгоритмів представлені на рис. 4.11, 4.12 та таблиці 4.1.

З результатів моделювання видно, що при аварії на зв'язку між PRS - EM1 виникає петля синхронізації, як це відображено на графіку рис. 4.12.

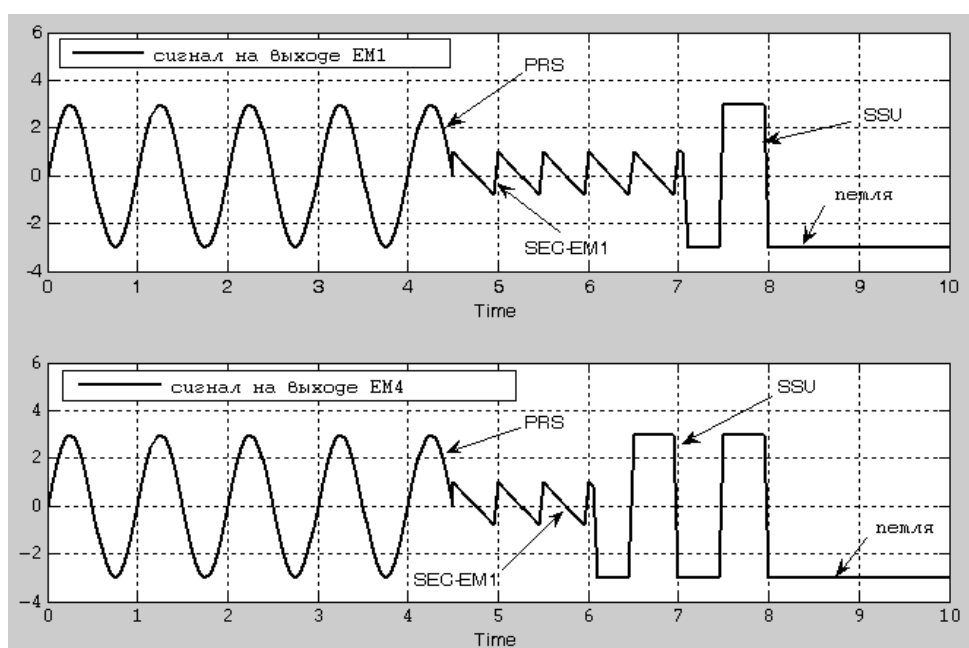


Рис.4.12. Результати моделювання.

При виникненні такої аварійної ситуації, джерелом сигналу від якого має бути синхронізована мережа, є SSU, і отже, сигнал повинен мати вигляд меандра. Проте, після виникнення аварії, і перебудови мережі сигнал від SSU з'являється в мережі не надовго (≈ 2 с.). Після чого з'являється сигнал з постійним рівнем. Поява сигналу з постійним рівнем в процесі моделювання свідчить про наявність в досліджуваній топології петлі синхронізації.

Таблиця 4.1

Результати моделювання залежності виникнення петель на фрагменті з кільцевою топологією від алгоритму функціонування мережного елементу

Тип вживаного алгоритму	Кількість аварійних ситуацій		
	1	2	3
Алгоритм з використанням таблиці пріоритетів	існує	існує	існує
Алгоритм з використанням повідомлення про статус синхронізації	існує (час)	існує (топ олог)	відсутня
Механізм динамічної адаптації дерева синхронізації	відсутня	відсутня	Відсутня

Отримані результати моделювання, що наведені в таблиці 4.1 дозволяють зробити висновок про безумовну перевагу використання механізму динамічної адаптації дерева синхронізації при функціонуванні мережевого елементу на обраній топології.

4.4.2 Імітаційне моделювання деревовидного фрагменту мережі синхронізації

За досліджуваній фрагмент береться фрагмент мережі синхронізації деревовидної топології з пріоритетами, розставленими згідно плану. Схему моделі фрагменту мережі наведено на рис. 4.13 та відповідає топології кільцевого фрагменту.

Сформуємо досліджувану схему в середовищі Simulink, з використанням моделей мережевого елементу. Привласнимо вхідним портам мережевих елементів відповідні пріоритети. При дослідженні передбачається, що в даній топології можливе послідовне виникнення аварійної ситуації. На зв'язках між мережевими елементами EM1 – EM2, EM5 - EM6, EM5 - EM6, EM3 – EM4, PRS - EM1, SSU - EM4, розмістимо, пристрої, що генерують можливі аварійні ситуації. Ці аварії

виникатимуть послідовно.

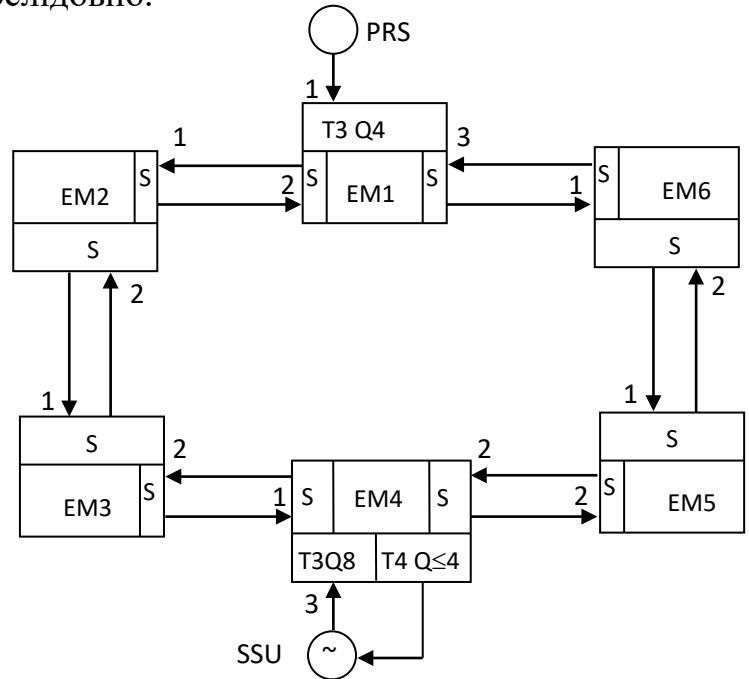


Рис.4.13. Схема моделі фрагмента деревовидної топології.

Результати моделювання досліджуваної топології для всіх алгоритмів представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Результати моделювання залежності виникнення петель на фрагменті з деревовидною топологією від алгоритму функціонування мережного елемента.

Тип вживаного алгоритму	Кількість аварійних ситуацій		
	1	2	3
Алгоритм з використанням таблиці пріоритетів	існує	існує	існує
Алгоритм з використанням повідомлення про статус синхронізації	відсутня	відсутня	відсутня
Механізм динамічної адаптації дерева синхронізації	відсутня	відсутня	відсутня

Отримані результати моделювання згідно таблиці 4.2 дозволяють зробити висновок, що ефективність використання механізму динамічної адаптації дерева синхронізації при функціонуванні мережевого елемента на обраній топології така

сама, як і при використанні алгоритму з повідомленнями про статус синхронізації.

4.4.3. Імітаційне моделювання трикутного фрагменту мережі синхронізації

За досліджуваній фрагмент береться фрагмент мережі тактової синхронізації деревовидної топології з пріоритетами, розставленими за планом. Схему моделі фрагмента мережі наведено на рис. 4.14 та відповідає топології трикутного фрагменту мережі.

Сформуємо досліджувану схему в середовищі Simulink, з використанням моделей мережевого елементу. Привласнимо вхідним портам мережевих елементів відповідні пріоритети. При дослідженні передбачається, що в даній топології можливе послідовне виникнення аварійної ситуації. На зв'язках між мережними елементами EM1 – EM2, EM5 - EM6, EM5 - EM6, EM3 – EM4, PRS - EM1, SSU - EM4, розмістимо, пристрої, що генерують можливі аварійні ситуації. Ці аварії виникатимуть послідовно.

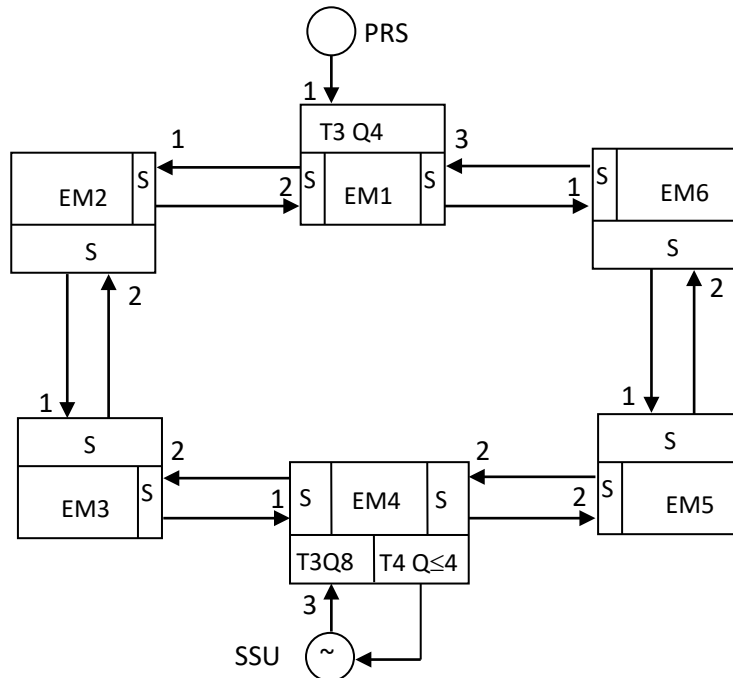


Рис.4.13. Схема моделі фрагмента трикутної топології.

Аналіз топології проводиться в порядку, викладеному в п. 4.3.

Результати моделювання досліджуваної топології для всіх алгоритмів представлені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Результати моделювання залежності виникнення петель на фрагменті з трикутною топологією від алгоритму функціонування мережного елементу.

Тип вживаного алгоритму	Кількість аварійних ситуацій		
	1	2	3
Алгоритм з використанням таблиці пріоритетів	існує	існує	існує
Алгоритм з використанням повідомлення про статус синхронізації	існує (час)	існує (топ олог)	існує
Механізм динамічної адаптації дерева синхронізації	відсутня	відсутня	відсутня

Отримані результати моделювання згідно таблиці 4.3 дозволяють зробити висновок про безумовну перевагу використання механізму динамічної адаптації дерева синхронізації при функціонуванні мережного елементу на обраній топології.

4.5. Експериментальне дослідження умов виникнення петель синхронізації в мережах синхронної цифрової ієрархії

Експериментальне дослідження має на меті підтвердити правильність теоретичних положень відносно умов появи петель синхронізації. Вимірювання якості сигналу синхронізації проводяться з урахуванням положень, що викладені в [6, 10, 12, 27].

У експерименті досліджується поведінка фрагмента мережі, який складається з трьох мультиплексорів з'єднаних між собою як показано на рис. 4.14. У експеримент входить також спеціалізоване обладнання, за допомогою якого проводяться безпосередні виміри:

- вимірювальний прилад ІВО-1М, що є генератором опорного сигналу для модельованого фрагмента мережі, а також що безпосередньо оцінює якість сигналу синхронізації відносно опорного сигналу;

- приймач GPS OSA4531, який формує опорний сигнал синхронізації для приладу ІВО-1М.

- мережний аналізатор ANT-20SE, який створює корисне навантаження для модельованого фрагмента, а також аналіз аномалій і дефектів, до яких наводить виникнення петлі синхронізації.

Схема підключення вимірювального обладнання до досліджуваного фрагмента мережі приведена на рис. 4.14.

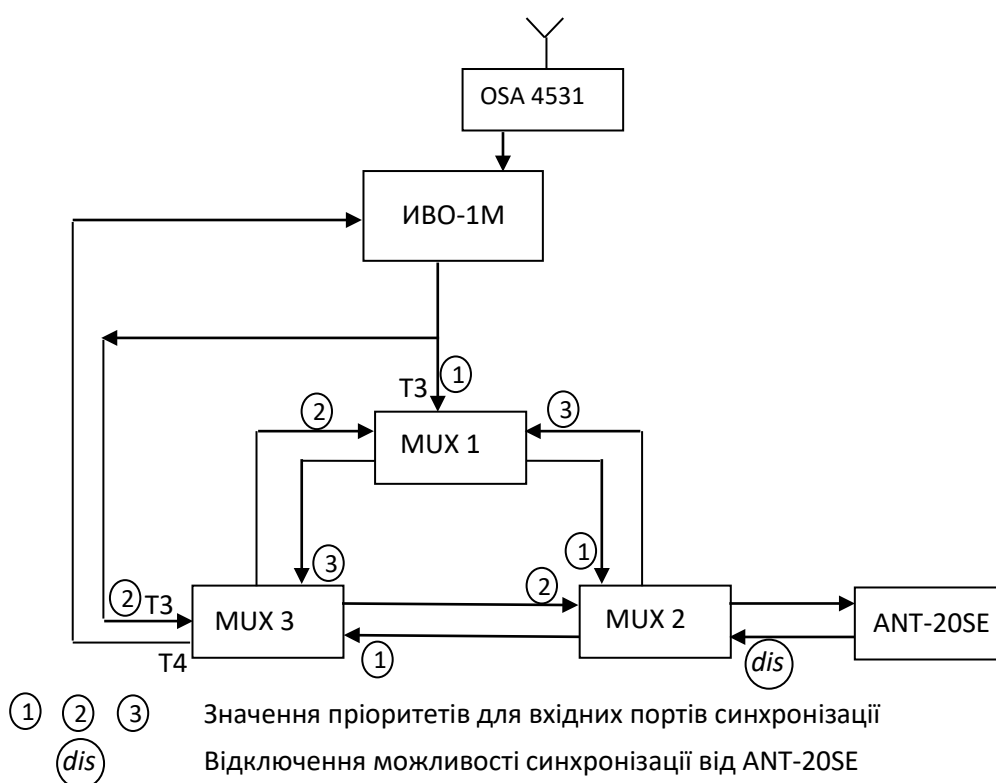


Рис.4.14. Схема експерименту.

В ході експерименту планується створення аварійних ситуацій на зв'язках, що з'єднують мультиплексори з приладом ІВО-1М. Виникнення даних аварійних ситуацій може призводити до появи петель синхронізації.

Експеримент 1. Відсутність петлі синхронізації при виникненні аварійної ситуації

За допомогою системи управління сконфігуруємо мультиплексори так, як показано на рис. 4.15. Для цього вхідним портам, від яких можлива синхронізація, привласнюються певні пріоритети. Після чого створюється аварійна ситуація на зв'язку між MUX 1 і IBO-1M. Сигнал синхронізації аналізується за допомогою IBO-1M.

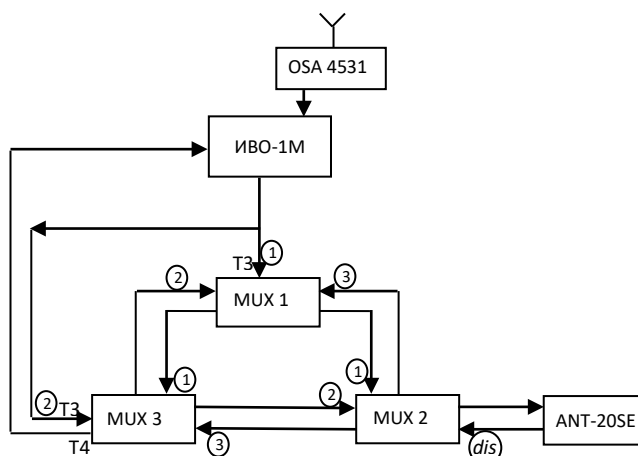


Рис.4.15. Конфігурація фрагмента мережі для експерименту 1.

На рис. 4.16, 4.17 показана залежність помилки часового інтервалу (ОВІ) від часу, сигналу який використовується для синхронізації мультиплексорів до і після аварійної ситуації.

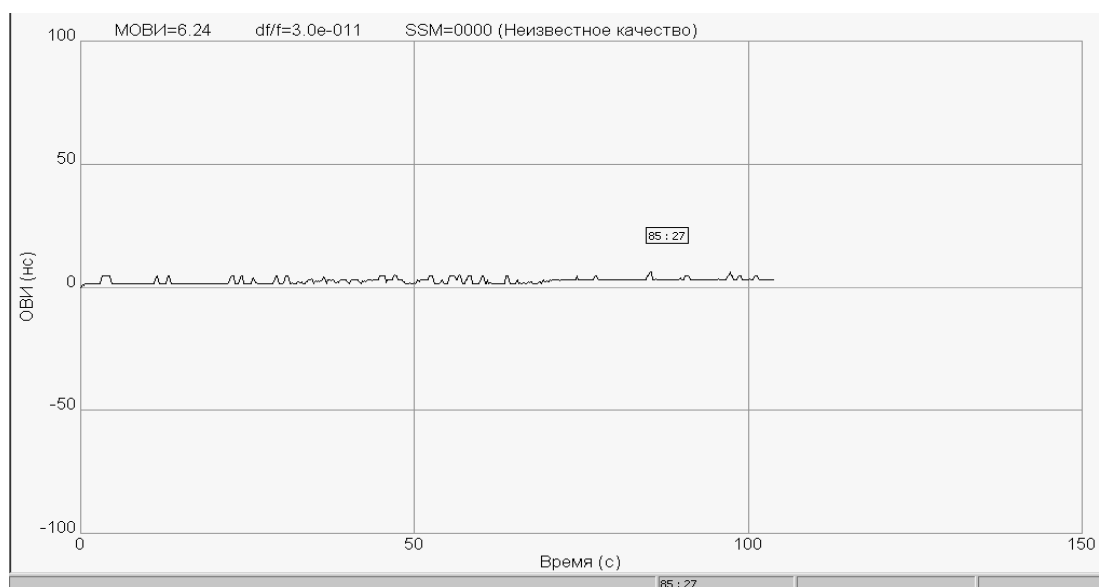


Рис.4.16. Помилка часового інтервалу сигналу синхронізації до виникнення аварійної ситуації.

З аналізу графіка приведенного на рис. 4.17 витікає, що після виникнення аварійної ситуації фрагмент мережі знаходиться в перехідному режимі приблизно 550 с.

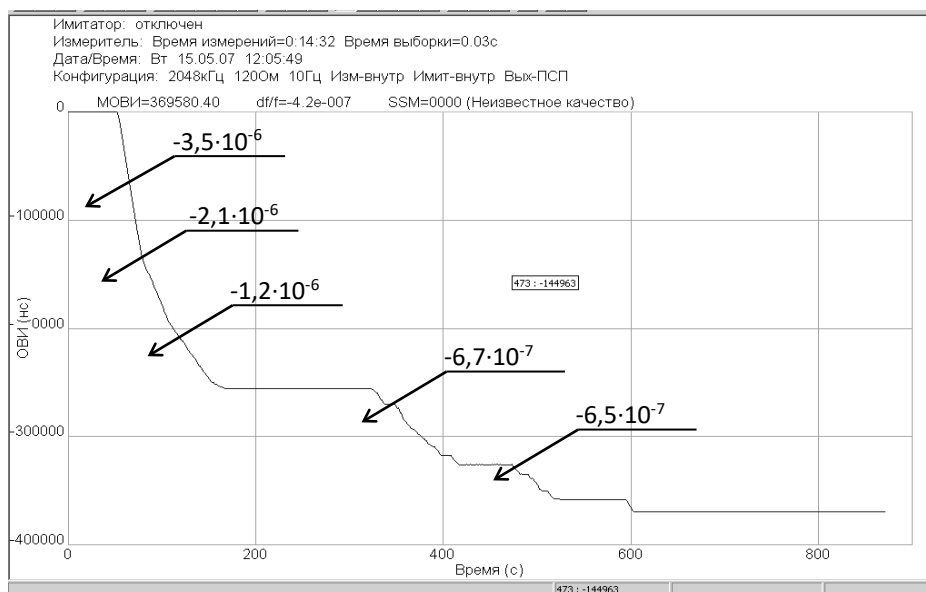


Рис.4.17. Помилка часового інтервалу сигналу синхронізації після виникнення аварійної ситуації.

За цей час сигнал синхронізації залишається придатним для використання в транспортній телекомунікаційній мережі. Оскільки відносна стабільність частоти сигналу, приведена на рис. 4.17 для кожної ділянки, в перехідному режимі знаходиться в межах $(4,6 \cdot 10^{-6})$ [93]. Таким чином, розподіл пріоритетів, представлений на рис. 4.15, не призводить до виникнення петлі синхронізації і дозволяє правильно функціонувати фрагменту мережі.

Експеримент 2. Виникнення топологічної петлі синхронізації

За допомогою системи управління сконфігуруємо мультиплексори так, як показано на рис. 4.18. Після чого створюється аварійна ситуація на зв'язку між MUX 1 і IBO-1M. Сигнал синхронізації аналізується за допомогою IBO-1M.

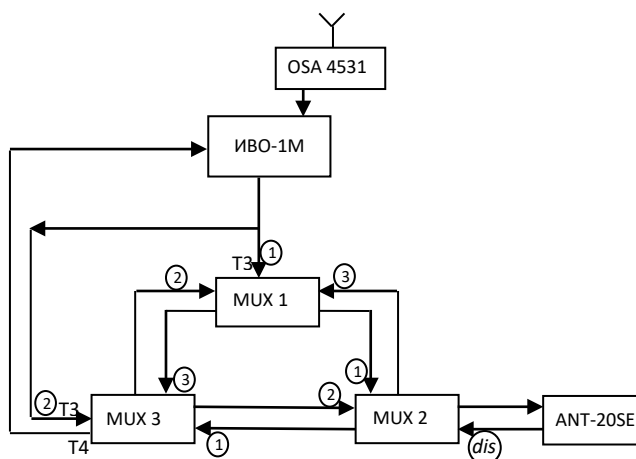


Рис.4.18. Конфігурація фрагмента мережі для експерименту 2.

На рис. 4.19 показано залежність помилки часового інтервалу (ПЧІ) від часу. На рис. 4.20 а, б, відображено стан системи управління MUX-1 і MUX-3 після виникнення аварійної ситуації.

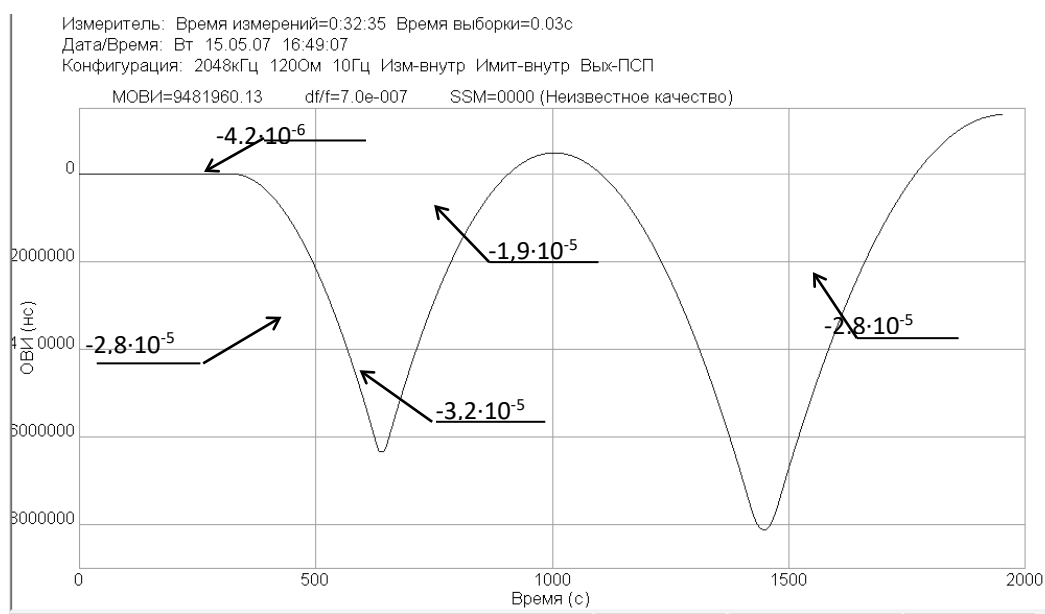


Рис.4.19. Помилка часового інтервалу сигналу синхронізації після виникнення аварійної ситуації.

З графіка приведенного на рис. 4.20 видно, що після виникнення аварійної ситуації, помилка часового інтервалу є незгасаючими коливаннями із зростаючою амплітудою. Дана ситуація є результатом виникнення топологічної петлі синхронізації.

Name	T2 Source	Status	Failure	SSm	Quality Provided	Quality Effective	T0 Priority	LOS Severity
OSC		OK	None	UNK	SEC	SEC	P4	
T3_1		SF	Los	UNK	PRC	DNU	P8	Non-Alarmd
T3_2		SF	Los	UNK	PRC	DNU	P1	Non-Alarmd
T2_M 1		SF	Los	UNK	SEC	DNU	P8	Non-Alarmd
T1_B		OK	None	true	PRC	PRC	P2	Non-Alarmd
T1_D		OK	None	true	PRC	DNU	P3	Non-Alarmd

Apply

Значение байтаS1

Active Source	Command	Revert	Wtr (0-1800 sec)
T1_B	Clear	T1_B	true

Name	Active Source	Minimum Quality	Sase
T4	None	PRC	true

Рис.4.20 а) Система управління MUX-1.

Name	T2 Source	Status	Failure	SSm	Quality Provided	Quality Effective	T0 Priority	LOS Severity
OSC		OK	None	UNK	SEC	SEC	P4	
T3_1		OK	None	UNK	PRC	PRC	P2	Minor
T3_2		SF	Los	UNK	PRC	DNU	P8	Minor
T2_M 1		SF	Los	UNK	SEC	DNU	P8	Non-Alarmd
T1_A		OK	None	true	PRC	PRC	P1	Non-Alarmd
T1_C		OK	None	true	PRC	DNU	P3	Non-Alarmd

Apply

Значение байтаS1

Active Source	Command	Revert	Wtr (0-1800 sec)
T1_A	Clear	T1_A	true

Name	Active Source	Minimum Quality	Sase
T4	None	PRC	true

Рис.4.20 б) Система управління MUX-3.

Відносна стабільність частоти сигналу синхронізації використовуваного фрагментом мережі приведена на рис. 4.21. Видно, що на початку існує невелика ділянка приблизно 40 секунд, протягом якої ще можна використовувати сигнал для синхронізації, проте фаза на цій ділянці змінюється нелінійно, у зв'язку з чим ФАПЧ, яка використовується в даному мультиплексорі, незабаром виходить з синхронізму. Система управління мультиплексорів в цьому випадку ніяк не реагує на погіршення параметрів сигналу (рис. 4.22 а, б). Байт S1, який використовується для передачі повідомлення про статус синхронізації, як і раніше має значення 0010 (PRS). Це представляє значну небезпеку, оскільки оператор телекомунікаційної мережі не може своєчасно виявити причину із-за якої погіршуються параметри мережі, і що найбільш важливе, не може без додаткового обладнання визначити ділянку, на якій виникає петля синхронізації. Таким чином, розподіл пріоритетів наведений на рис. 4.18, призводить до виникнення топологічної петлі, що підтверджує правильність теоретичних положень умов виникнення петель синхронізації.

Експеримент 3. Виникнення часової петлі синхронізації

За допомогою системи управління сконфігуруємо мультиплексори так, як показано на рис. 4.23.

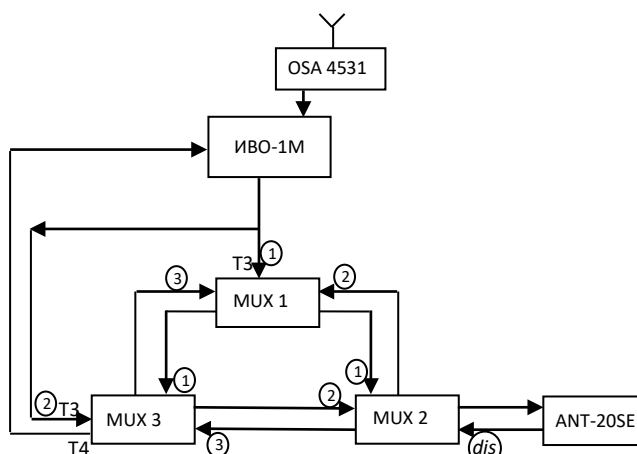


Рис.4.23. Конфігурація фрагмента мережі для експерименту 3.

Після чого створюється аварійна ситуація на зв'язку між MUX 1 і ИВО-1М. Сигнал синхронізації аналізується за допомогою ИВО-1М. На рис. 4.24 показана залежність помилки часового інтервалу (ОВІ) від часу, сигналу який використовується для синхронізації мультиплексорів після виникнення аварійної ситуації. На малюнках 4.25 а, б, відображує стан системи управління MUX-1 і MUX-3 після виникнення аварійної ситуації.

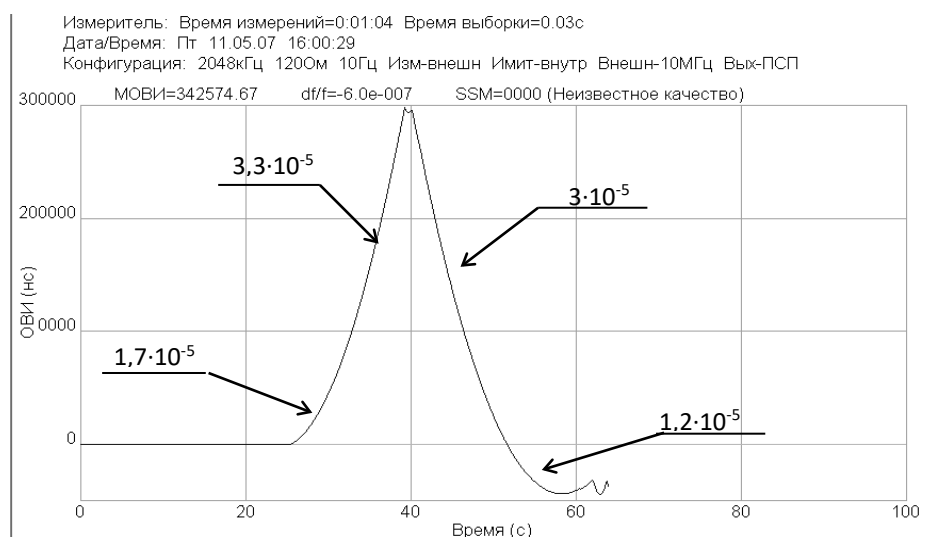


Рис.4.24. Помилка часового інтервалу сигналу синхронізації після виникнення аварійної ситуації.

Всі висновки, що стосуються експерименту 2, можливо розповсюдити на даний випадок, проте, існує одна принципова відмінність. Суть її полягає в тому що, виникнення петлі синхронізації можливо лише у тому випадку, коли виконується умова: час, необхідний для розвороту сигналу синхронізації від MUX-1 до MUX-2 менше, ніж час, необхідний для розвороту сигналу синхронізації від MUX-1 до MUX-3. Таким чином, виникнення петлі синхронізації залежить від часових співвідношень між вузлами.

4.6. Висновки

1. Проведено порівняння отриманої сталості фрагментів мережі з досліджуваними топологічними структурами (кільцевою, деревовидною і трикутною) з теоретичною границею надійності функціонування фрагменту мережі синхронізації. Показано, що вибір алгоритму робить істотний вплив на сталість мережевої синхронізації.

2. Розроблено методику оптимального планування мережевої синхронізації з введенням програмованої затримки в алгоритм функціонування мережевого елементу синхронізації.

3. Розроблено алгоритм функціонування мережевого елементу синхронізації, що дозволяє створювати адаптивне, що динамічно змінюється дерево, шляхом перерозподілу пріоритетів вхідним інтерфейсам мережевих елементів для фрагментів мережі синхронізації, топологія яких включає вузли, ранг яких більше двох. На основі розробленого алгоритму можна створювати мережі синхронізації, що мають підвищену сталість, що має велике значення у разі, коли на деяких ділянках телекомунікаційної мережі (фізичний рівень) підвищена імовірність виникнення аварійних ситуацій.

4. Результати імітаційного моделювання і експериментального дослідження підтвердили правильність теоретичних положень, що стосуються умов виникнення петель синхронізації в мережах синхронної цифрової ієрархії. Показано, що сигнал, який утворюється в результаті петлі

не може бути використаний як сигнал синхронізації в транспортній телекомунікаційній мережі. Утворення петлі синхронізації для системи управління ніяким чином не відрізняється від нормального режиму функціонування, що є серйозною небезпекою. Таким чином, побудова мережі синхронізації вимагає ретельного планування з врахуванням топології і часових співвідношень між елементами мережі.

5. Проведена перевірка умов виникнення петель синхронізації на фрагментах мережі синхронізації з кільцевою та трикутною топологією, а також мережевими елементами, що функціонують за відповідними алгоритмами: з використанням таблиці пріоритетів; з використанням повідомлень про статус синхронізації; з використанням механізму динамічної адаптації дерева синхронізації.

6. Результати імітаційного моделювання показали, що запропонований в розділі алгоритм динамічної перебудови дерева синхронізації дозволяє підвищити сталість мережевої синхронізації в порівнянні з впровадженими на даний момент алгоритмами функціонування мережевих елементів та доводить доцільність його використання в існуючих мультисервісних макромережах.

ВИСНОВКИ

Сукупність наукових положень, сформульованих і обґрунтованих у дисертаційній роботі, вирішує актуальну наукову задачу, яка має національну значимість і направлена на визначення методики підвищення сталості мережевої синхронізації в сучасній мультисервісній макромережі. В ході дослідження одержано наступні теоретичні та науково-практичні результати.

1. Досліджено основні принципи функціонування мережевої синхронізації. Розглянуто різні варіанти розвитку мережевої синхронізації. Запропоновано основні підходи до вирішення задачі адаптації мережевої синхронізації до структури базової транспортної мультисервісної макромережі мережі.

2. Проведено аналіз і класифікацію мережних елементів мережевої синхронізації. Досліджено алгоритми функціонування мережних елементів.

Для формування сигналів синхронізації в мережі тактової синхронізації використовують первинні джерела та пристрої сигналів синхронізації. У якості джерел сигналів синхронізації використовують цезієві або водневі генератори, а також обладнання на базі приймачів навігаційних систем ГЛОНАСС та GPS (Global Positioning System). Комплекс, утворений складанням декількох первинних джерел, являє собою первинний пристрій синхронізації.

Для підтримки функціонування мережі або відновлення спотворених сигналів синхронізації застосовуються пристрої відновлення та підтримки синхронізації. За якістю сигналів синхронізації, що формуються в пристроях та функціям, які виконуються на розподільчих мережах синхронізації розрізняють такі мережеві пристрої синхронізації (МПС):

- первинний пристрій синхронізації (ППС);
- пристрій синхронізації транзитного вузла (ПС-Т);
- пристрій синхронізації місцевого вузла (ПС-М);
- пристрій синхронізації обладнання СЦІ (ПС-СЦІ);

– пристрій синхронізації кінцевого обладнання.

Встановлено характеристики сигналів синхронізації, при яких мережева синхронізація функціонує із заданою якістю.

3. В розділі 1 уточнена і сформульована наукова задача підвищення сталості мережевої синхронізації в мультисервісній макромережі за рахунок створення механізму динамічної адаптації дерева синхронізації до різних станів макромережі.

4. Проведено оцінку впливу сигналів синхронізації на навантаження мережі на рівнях доступу, агрегації та ядра мультисервісної макромережі. Проаналізовано методи забезпечення синхронізації базових станцій від різних ієрархічних рівнів мережі з комутацією пакетів.

Синхронізацію тактової частоти в мережах з комутацією пакетів для верхнього рівня ієрархії за допомогою NTP на практиці реалізувати не вдасться, так як навіть на інтервалі усереднення $\tau > 10$ діб неможливо отримати нестабільність частоти на рівні 1τ на 10^{-11} (по аналогії з цифровою транспортною мережею для тактової синхронізації комутаційних вузлів). У той же час РТР дозволяє зробити це на інтервалі усереднення $\tau < 1$ доби. Таке рішення з використанням опорного сигналу GPS (ГЛОНАСС) найбільш оптимально для тактової синхронізації в IP-мережах.

5. Проектування мережі синхронізації поточного часу в мережах з розподіленою архітектурою вимагає оптимального вибору параметрів серверів часу, їх продуманого територіального розподілу, організації системи моніторингу на основі відповідного метрологічного забезпечення.

6. Вимірювання параметрів стабільності сигналів синхронізації в пакетних мережах є необхідними для оцінки якості наданих послуг мобільного зв'язку [6].

Основними умовами для проведення вимірювань є: - вибір вимірювального приладу; - організація схеми вимірювань; - вибір експлуатаційних параметрів стабільності при розрахунку результатів вимірювання PDV; - обробка результатів вимірювань.

7. На базі проведених вимірювань на пілотній мережі синхронізації оператора зв'язку, комбінування різних протоколів звірення часу прийнятно для забезпечення синхронізації БС від пакетних мереж на всіх рівнях. Такий метод дозволяє ефективно використовувати переваги різних протоколів, що істотно спростить планування мережі на різних рівнях ієрархії.

8. В процесі розгортання і експлуатації мережі синхронізації на транспортної мережі IP / MPLS виникає необхідність у створенні системи моніторингу сигналів синхронізації. Ця система не повинна залежати від кількості постачальників обладнання і кількості джерел сигналу синхронізації.

9. Розроблено метод визначення сталості функціонування мережевої синхронізації для кожного з фрагментів мережі синхронізації за заданих початкових умов: інтенсивність відмов, інтенсивність відновлення і початкові умови, в яких знаходилася система і з врахуванням таких параметрів: - алгоритм функціонування вузла синхронізації; - спосіб встановлення пріоритетів вхідним інтерфейсам (портам) синхронізації; - встановлення рівнів якості (quality level) сигналів синхронізації; - топологія фрагмента мережі.

10. Визначено умови втрати працездатності фрагмента мережі синхронізації з врахуванням параметрів і критеріїв, що визначають поняття "працездатність" і що дозволяє віднести всі можливі стани фрагментів мережі до однієї з двох груп: "фрагмент працездатний" або "фрагмент непрацездатний" за наявності обмеження у вигляді незалежності функціонування фрагмента від алгоритму функціонування вузла синхронізації.

Визначення цих умов дає можливість отримання значення теоретичної межі сталості функціонування фрагмента мережі синхронізації. Отримане значення межі є максимальним з точки зору якості функціонування мережі і називається верхньою межею. Саме до верхньої межі наближується функціонал працездатності фрагмента мережі.

11. Удосконалено метод аналізу працездатності для фрагмента мережі синхронізації будь-якої топології, що дозволяє: - визначити можливість використання даних фрагментів як основних для побудови дерева синхронізації, що динамічно адаптується; - визначити значення параметрів, на основі яких можливо здійснити вибір оптимальної топології; - визначити варіанти використання перспективних топологічних структур.

12. Проведено порівняльний аналіз трикутного, деревовидного і кільцевого фрагментів мережі синхронізації з точки зору структурної сталості мережевої синхронізації за відсутності впливу алгоритму функціонування вузла мережі синхронізації на структурну сталість.

Результати дослідження показали, що у всіх випадках фрагмент з трикутною структурою може бути використаний в мережах синхронізації, оскільки має вищу відмовостійкість, проте в окремих випадках використання трикутного фрагмента недоцільне у зв'язку з тим, що виграш за відмовостійкістю незначніший, ніж програш за вартістю.

13. Отримано узагальнений функціонал сталості мережі синхронізації, що визначає залежність надійності мережі синхронізації від функціональних залежностей між інтенсивностями потоків відмов і відновлень, топології мережі, ефективності планування, алгоритмів функціонування мережних елементів.

14. Проведено порівняння отриманої сталості фрагментів мережі з досліджуваними топологічними структурами (кільцевою, деревовидною і трикутною) з теоретичною границею надійності функціонування фрагменту мережі синхронізації. Показано, що вибір алгоритму робить істотний вплив на сталість мережевої синхронізації.

15. Розроблено методику оптимального планування мережевої синхронізації з введенням програмованої затримки в алгоритм функціонування мережевого елементу синхронізації.

16. Розроблено алгоритм функціонування мережевого елементу синхронізації, що дозволяє створювати адаптивне, що динамічно змінюється

дерево, шляхом перерозподілу пріоритетів вхідним інтерфейсам мережевих елементів для фрагментів мережі синхронізації, топологія яких включає вузли, ранг яких більше двох. На основі розробленого алгоритму можна створювати мережі синхронізації, що мають підвищену сталість, що має велике значення у разі, коли на деяких ділянках телекомунікаційної мережі (фізичний рівень) підвищена імовірність виникнення аварійних ситуацій.

17. Результати імітаційного моделювання і експериментального дослідження підтвердили правильність теоретичних положень, що стосуються умов виникнення петель синхронізації в мережах синхронної цифрової ієрархії. Показано, що сигнал, який утворюється в результаті петлі не може бути використаний як сигнал синхронізації в транспортній телекомунікаційній мережі. Утворення петлі синхронізації для системи управління ніяким чином не відрізняється від нормального режиму функціонування, що є серйозною небезпекою. Таким чином, побудова мережі синхронізації вимагає ретельного планування з врахуванням топології і часових співвідношень між елементами мережі.

18. Проведена перевірка умов виникнення петель синхронізації на фрагментах мережі синхронізації з кільцевою та трикутною топологією, а також мережевими елементами, що функціонують за відповідними алгоритмами: з використанням таблиці пріоритетів; з використанням повідомлень про статус синхронізації; з використанням механізму динамічної адаптації дерева синхронізації.

19. Результати імітаційного моделювання показали, що запропонований в розділі алгоритм динамічної перебудови дерева синхронізації дозволяє підвищити сталість мережевої синхронізації в порівнянні з впровадженими на даний момент алгоритмами функціонування мережевих елементів та доводить доцільність його використання в існуючих мультисервісних макромережах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алексеев Ю.А. и др. Перспективы создания и развития системы тактовой сетевой синхронизации в России // Электросвязь. 1995. №12. - С. 5–9.
2. Бакланов И.Г. Технология современных систем синхронизации. Глава 1. Технология измерения первичной сети. Часть 2. Системы синхронизации, B-Isdn, Atm. – М.: Эко-Трендз, 2000, 150 с.
3. Берж К. Теория графов и ее применение / Пер. с франц. М.: Изд-во иностр. Лит., 1962, 319 с.
4. Бирюков Н.Л., Стеклов В.К. Транспортные Сети и Системы Электросвязи. Системы Мультиплексирования: Учебник для студентов вузов по специальности “Телекоммуникации” / под ред. В.К. Стеклова. – К., 2003. – 352 с. ил.
5. Бірюков М.Л., Тан К.В., Тріска Н.Р. Мережі синхронізації зі взаємодією чарунок // Зв'язок, 2005, № 4, С. 22-27.
6. Бірюков М.Л., Тан К.В., Тріска Н.Р. Синхронізація стиків асинхронних мереж // Зв'язок, 2005, № 3, С. 13-17.
7. Богапов Герман Прыжки через G: 3G – 4G – 5G // Газета “Зеркало недели. Украина”. - 2016. - № 15.
8. Борщ В.И., Гайдар В.П., Коваль В.В., Лесовой И.П. Тактовая синхронизация в интегральных цифровых сетях электросвязи. – К.: Наукова Думка, 1998. – 202 с.: ил.
9. Ванчиков А.С. Решение проблем синхронизации в IP-сети / А. С. Ванчиков, А. К. Канаев, В. В. Кренев // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 3. – С. 20–22.
10. Внедрение MNP в Украине / [Электронный ресурс] // (<http://internetua.com/vnedrenie-MNP-v-ukraine-okazalos-v-slojnom-polojenii>).
11. Вплив топології зв'язків і продуктивності комунікаційних пристроїв на пропускну здатність мережі / [Електроний ресурс] // <http://wiki.kspu.kr.ua/index.php/>.

12. Давыдкин П.Н., Колтунов М.Н., Рыжков А.В. Тактовая сетевая синхронизация / под. ред. М.Н. Колтунова. – М.: Эко-Тренд, 2004. – 205 с.: ил.
13. Давыдов Г.Б., Рогинский В.Н., Толчан А.Я. Сети электросвязи: М., «Связь», 1977. – 360 с.: ил.
14. ДСТУ ІТУ-Т G.811:2008 Мережі електрозв'язку цифрові. Мережі синхронізації. Пристрої синхронізації первинні. Основні технічні характеристики (ІТУ-Т G.811:1997, IDТ).
15. ДСТУ ІТУ-Т G.812:2008 Мережі електрозв'язку цифрові. Мережі синхронізації. Пристрої синхронізації ведені. Основні технічні характеристики (ІТУ-Т G.812:2004, IDТ).
16. ДСТУ ІТУ-Т G.813:2008 Мережі електрозв'язку цифрові. Мережі синхронізації. Пристрої синхронізації обладнання синхронної цифрової ієрархії. Основні технічні характеристики (ІТУ-Т G.813:2003, IDТ).
17. Жилкина Н. Управление эксплуатацией сетей операторов связи / [электронный ресурс] // <http://osp.ru>.
18. Збереження мобільного номера при зміні мобільного оператора. / [Електронний ресурс] // <http://watcher.com.ua/2016/01/27/ukrayintsi-v-chervni-zmozhut-zberihaty-nomer-mobilnoho-telefona-pry-zmini-operatora/>.
19. Когда Украине ждать 4G и 5G связи? / [Электронный ресурс]: Сергей Терещук // <https://delo.ua/tech/kogda-ukraine-zdat-4g-i-5g-svjazi-325879>.
20. Леготин Н., Старостин Ю. Аппаратура распределения синхросигналов // “Технологии и Бизнес Телеком” – 2004, № 10. - С. 8-12.
21. Мошак Н.Н. Анализ логической структуры транспортной сети АТМ // Электросвязь, 2001, № 9. - С. 40-44.
22. Нетес В.А. Обеспечение надежности системы тактовой сетевой синхронизации // “Вестник Связи” – 2001, № 4. - С. 12 -15.
23. Нетес В.А. Новые Возможности Аппаратуры Sdh // Вестник Связи, 1999, № 9. - С. 47-51.
24. Отличия 3G, 4G и 5G / [Электронный ресурс] // <https://buyon.ru/pages/3G-vs-4G-5G-1375/#>.

25. Описание сети интернет, ее структура и оборудование / [Электронный ресурс] // <http://skynet.com.ua/reglament>.
26. Прыжки через G: 3G – 4G – 5G / [Электронный ресурс]: Герман Богапов // Газета “Зеркало недели. Украина” № 15, 2016.
27. Правила пользования услугой связи / [Электронный ресурс] // <http://www.info-lan.ru/pravila.php>.
28. Підвищення якості передачі потокового трафіку в мультисервісних мережах / [Електронний ресурс] // <http://www.lp.edu.ua/sites/default/files/dissertation/2017/4398/dis1.pdf>.
29. Рыжков А.В. Частота и время в инфокоммуникациях XXI века. – М.: МАС, 2006.- 320 с.
30. Рыжков А.В. Синхронизация цифровых сетей связи МПС России: состояние, перспективы // Электросвязь. 2003. №4. С. 12.
31. Рыжков А.В., Савчук А.В.. Способы синхронизации сетей электросвязи в условиях перезагрузки нормативной базы // Сети связи. – 2012. - №9. – С. 37 -41.
32. Савчук А.В., Шапошников В.Н., Черняк И.П. Синхронизация текущего времени: Протокол сетевого времени // Зв’язок №6. – 2007. - С. 10 – 15.
33. Синхронизация базовых станций мобильной связи в транспортном окружении сети IP/MPLS В. И. Вакась, И. П. Черняк // 20-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (крымико’2010): материалы конф. (Севастополь, 13 -17 сент. 2010 г.). – Севастополь: Вебер, 2010. - С.335 -336.
34. Синхронизация базовых станций при внедрении технологий IP-сетей / В. И. Вакась, И. П. Черняк // 21-я Междунар. Крым. Конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (крымико’2011): материалы конф. (Севастополь, 12 -16 сент. 2011 г.). – Севастополь: Вебер, 2011. - С.374 -375.
35. Синхронизация сети SDH / [Электронный ресурс] // <http://s1921687209.narod.ru/7sem/course156/lec9.htm>.

36. Синхронный Ethernet / [Электронный Ресурс] // [Http://Ru.Knowledgr.Com/07759725/%D0%A1%D0%B8%D0%Bd%D1%85%D1%80%D0%Be%D0%Bd%D0%Bd%D1%8b%D0%B9ethernet\).](http://Ru.Knowledgr.Com/07759725/%D0%A1%D0%B8%D0%Bd%D1%85%D1%80%D0%Be%D0%Bd%D0%Bd%D1%8b%D0%B9ethernet).)
37. Сличение времени в компьютерных сетях: протокол сетевого времени на Земле и в космосе. / Миллс, Д. [пер. С англ. Под ред. А.В. Савчука,] – К.: WIRCOM. – 2011. – 464 с.
38. Терещук Сергей Когда Украине ждать 4G и 5G связи / [Электронный ресурс] // <https://delo.ua/tech/kogda-ukraine-zdat-4g-i-5g-svjazi-325879#>.
39. Тихвинский В. О., Терентьев С. В., Юрчук А. Б. Сети мобильной связи LTE: технология и архитектура. – М.: Эко-Трендз, 2010.
40. Технологии мобильной связи пятого поколения (5G). White Paper. – Ericsson, Сентябрь 2013 / [Электронный ресурс] // http://ericsson.com/kz/news/130919_wp_5g_254740124.
41. Утроение IP-трафика к 2020 г. / [Электронный ресурс] // http://www.cisco.com/c/ru_ua/about/press/2016/0608.html.
42. Услуга переноса мобильных номеров в Украине / [Электронный ресурс] // <https://ain.ua/2016/01/29/usluga-perenosa-mobilnyx-nomerov-mozhet-zarabotat-v-ukraine>
43. Федорова Н.В. Миграция сетей от 2G/3G к сетям LTE. Модернизация транспортной сети Mobile Backhaul // НЗ “УНДІЗ” №4 – 2016 р., стр. 68 – 72.
44. Федорова Н.В. Общемировые показатели внедрения и использования мобильных технологий / Н.В. Федорова, Н.В. Пирогова // ТІТ – 2017 р. - №1– С. 48-52.
45. Федорова Н.В. Сети нового поколения NGN (Next Generation Network): Проблемы перехода от существующего оборудования к новому / Н.В. Федорова, Д.О. Гололобов, Э.П. Андреева // Матеріали IV міжнародної-науково технічної конференції «Проблеми інформатизації». – 9-10 квітня, 2015 р. – С. 23.

46. Федорова Н.В. Макросеть как объединение технологий 2G, 3G, 4G и 5G / Н.В. Федорова, Н.В. Пирогова// Региональный семинар МСЭ для стран СНГ и Грузии “Тенденции развития конвергентных сетей: потс-NGN, 4G и 5G”: материалы конф. (17-18 ноября 2016). – Киев, 2016. – С.137-138.
47. Федорова Н.В. Принципы планирования сети синхронизации // "Вісник" УБЕНТЗ. – 2005, № 1. – С.111-117.
48. Федорова Н.В. Возможные способы анализа сетей синхронизации на угрозы образования петель // "Вісник" УБЕНТЗ – 2006, № 1 – С. 102-106.
49. Федорова Н.В. Использование модели сетевого устройства для анализа схем синхронизации / Н.В. Федорова, И.О., Лисковский // «Вісник» ДУІКТ. – 2008, С. 333-338.
50. Федорова Н.В. Анализ схем измерения качества предоставляемых услуг пользователям пакетных сетей передачи данных / Н.В. Федорова, И.О., Лисковский // «Вісник» ДУІКТ. – 2010, № 2. - С. 88-93.
51. Федорова Н.В. Методы обеспечения синхронизацией базовых станций от разных иерархических уровней сети с коммутацией пакетов / Н.В. Федорова, В.И. Вакась // Вісник ДУІКТ. – 2012 р. – Т.10, №4. – С.91-96.
52. Федорова Н.В. Практическая реализация синхронизации на сетях IP/MPLS / Н.В. Федорова, В.И. Вакась // Зв'язок. – 2013 р., №1. - С.81-86.
53. Федорова Н.В. Синхронный Ethernet, как среда передачи синхронизации в сетях с коммутацией пакетов // Вісник ДУІКТ. – 2013 р. – №2. – С.45-49.
54. Федорова Н.В. Распространение опорных сигналов синхронизации в IP-сетях. Реализация по протоколу RTP / Н.В. Федорова, В.И. Вакась // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава. - 2014 р. - №1 – С.91-96.
55. Федорова Н.В. Измерение параметров сигналов синхронизации в сетях с коммутацией пакетов // Телекомунікаційні та інформаційні технології. - 2014 р. - №1 – С.70-76.

56. Федорова Н.В. Сеть синхронизации и протокол прецизионного времени // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава. - 2014 р. - № 4. - С.38-45.

57. Федорова Н.В., Измерения параметров стабильности сигналов синхронизации в пакетных сетях / Н.В. Федорова, В.И. Вакась, Д.А. Демин // Зв'язок. – 2016. №1. – С.40-43.

58. Федорова Н.В. Принцип передачи синхронизации в сетях нового поколения с использованием протокола РТР (IEEE1588v2) / Н.В. Федорова, Д.А. Демин // Телекомунікаційні та інформаційні технології №2 – 2016 р. - С. 51 -56.

59. Федорова Н.В. Комбинирование методов обеспечения синхронизацией базовых станций от разных иерархических уровней сети с коммутацией пакетов / В. И. Вакась, Н.В. Федорова // 22-я Международная конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". – Сентябрь 2012. – С. 89 – 90.

60. Федорова Н.В. Применение комбинированных методов для обеспечения синхронизацией базовых станций. Пакетная сеть // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» / COMINFO'2012. - Жовтень 2012 р. – С. 34 – 35.

61. Федорова Н.В. Анализ схем измерения качества предоставляемых услуг пользователям. Пакетная сеть // Матеріали ІХ наукової конференції «Сучасні тенденції розвитку технологій в інфокомунікаціях та освіті». – 2012 р. – С. 34 – 35.

62. Федорова Н.В. Контроль и измерения параметров сигналов синхронизации в IP/MPLS-сети / Н.В. Федорова, В.И. Вакась // 23-я Международная конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". – Сентябрь 2013. – С. 273 – 274.

63. Федорова Н.В. Измерения параметров стабильности опорных сигналов синхронизации по протоколу РТР / Н.В. Федорова, В. И. Вакась //

Міжнародна науково-технічна конференція “Сучасні інформаційно-комунікаційні технології” Київ, Україна, 2015 р. – С. 45-46.

64. Федорова Н.В. Результаты внедрения сети синхронизации РТР для обеспечения мобильной связи уровня 3G и перспективы развития на 4G / Н.В. Федорова, В.И. Вакась, А.А. Кулинский, С.А. Вакась // Региональный семинар МСЭ для стран СНГ и Грузии “Тенденции развития конвергентных сетей: пост-NGN, 4G и 5G”: материалы конф. (17-18 ноября 2016). – Киев, 2016. – С.13-14.

65. Федорова Н.В. Параметры стабильности сигналов синхронизации в транспортном окружении IP/MPLS / Н.В. Федорова, Б.М. Бышовец // Региональный семинар МСЭ для стран СНГ и Грузии “Тенденции развития конвергентных сетей: пост-NGN, 4G и 5G”: материалы конф. (17-18 ноября 2016). – Киев, 2016. – С.135-136.

66. Шкляревский И.Спутниковые системы и сети синхронизации. Часть 1. Приемники GPS // Сети и телекоммуникации, 2004, № 9. - С. 54-58.

67. Шкляревский И. Сети синхронизации: выделенное оборудование // Сети и Телекоммуникации, 2002, № 2. - С. 6-12.

68. Шкляревский И. Сети синхронизации: выделенное оборудование (Часть 2) // Сети и Телекоммуникации, 2002, № 3. - С. 10-16.

69. Эллисави Камал Кхалифа А Сетевая синхронизации в мультисервисных макросетях // X Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми інформатизації". – 12-13 квітня 2018 р. - С.106-108.

70. Эллисави Камал Кхалифа А Контроль использования трафика в мультисервисной макросети / Эллисави Камал Кхалифа А, Н.В.Федорова // X Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми інформатизації". – 12-13 квітня 2018 р. -С.108 -110.

71. Эллисави Камал Кхалифа А Разработка показателей стабильности сигналов синхронизации для сетей мобильной связи поколения 4G // Региональный семинар Международного союза электросвязи для стран

Европы и СНГ «Цифровое будущее на основе 4G/5G». – 14-16 травня 2018, С. 41-43.

72. Эллисави Камал Кхалифа А Мониторинг качества опорных сигналов синхронизации при переходе на пакетные сети / Эллисави Камал Кхалифа А, Н.В. Федорова, В.И.Вакась // Региональный семинар Международного союза электросвязи для стран Европы и СНГ «Цифровое будущее на основе 4G/5G». – 14-16 травня 2018 р.- С. 88-90.

73. Эллисави Камал Кхалифа А Синхронизации частоты и времени в мультисервисных макросетях / Эллисави Камал Кхалифа А, Н.В. Федорова // VI Міжнародна науково-технічна конференція студентства та молоді «Світ телекомунікації та інформатизації». - 17 травня 2018 р. - С.34-35.

74. Эллисави Камал Кхалифа А Эволюция развития первичных источников синхронизации // VI Міжнародна науково-технічна конференція студентства та молоді «Світ телекомунікації та інформатизації». - 17 травня 2018р. - С.36-37.

75. Эллисави Камал Кхалифа А Первичные источники синхронизации в современных мультисервисных макросетях мобильной связи // Сучасний захист інформації. – 2017 р., №4(32). – С.50 – 54.

76. Эллисави Камал Кхалифа А Контроль использования трафика в мультисервисной макросети / Эллисави Камал Кхалифа А, Н.В. Федорова // НЗ УНДІЗ. – 2017 р., №4(48). – С.43-48.

77. Эллисави Камал Кхалифа А Способы синхронизации частоты и времени в мультисервисных макросетях / Эллисави Камал Кхалифа А, Н.В. Федорова // «Телекомунікаційні та інформаційні технології». – 2018, № 1(58), С. 60-65.

78. Эллисави Камал Кхалифа А Принципы сетевой синхронизации в мультисервисных макросетях // Зв'язок. – 2018, № 1. - С. 88-93.

79. Эллисави Камал Кхалифа А Разработка показателей стабильности сигналов синхронизации для сетей мобильной связи поколения 4G // Сучасний захист інформації. – 2018 р., №2(34). – С.31 – 35.

80. Эллисави Камал Кхалифа А Модификация параметров стабильности сигналов синхронизации при переходе на пакетные сети / Эллисави Камал Кхалифа А, Н.В. Федорова, В.И. Вакась, А.А.Манько // Веснік Сувязі. – 2018. –№2 (148). – С. 56 -59.

81. Як розвивається послуга збереження номера абонента при зміні оператора / [Електроний ресурс] // <http://it-ua.info/news/2016/07/14/yak-rozvivatsya-posluga-zberezhennya-nomera-abonenta-pri-zmn-operatora.html>.

82. Audoin C., Guinot B. The Measurement of Time. Time, Frequency and the Atomic Clock. Cambridge University Press, 1998.

83. Bregni S. Synchronization of digital telecommunication networks – John Wiley & Sons, ltd., 2002.– 395 pp.

84. D.L. Mills. Computer network time synchronization: the network time protocol. CRC Press, 2006.60. MNP / [Электронный ресурс] // <http://itc.ua/tag/mnp/>.

85. ETSI EG 201 793 V1.1.1(10/2000) Transmission And Multiplexing (Tm); ETSI Synchronization Networks Engineering.

86. ETSI EN 300 462-7-1 V1.1.1 (2000-05) Transmission And Multiplexing (TM); Generic Requirements for Synchronization Networks; Part 7-1: Timing Characteristics of Slave Clocks Suitable For Synchronization Supply To Equipment In Local Node Applications.

87. EN 300 462-4-1(2) V1.1.1 (1999-12) Transmission and Multiplexing (TM); Generic Requirements for Synchronization Networks; Part 4: Timing Characteristics of Slave Clocks Suitable for Synchronization Supply to Synchronous Digital Hierarchy (SDH) and Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH) Equipment.

88. ITU-T Recommendation G.8272/Y.1367 (01/2015) Timing characteristics of primary reference time clocks. 22. M2M или iot / [Электронный ресурс] // <http://celnet.ru/m2m.php>.

89. ITU-T Recommendation G.8272.1/Y.1367.1 (11/2016) Timing characteristics of enhanced primary reference time clocks.

90. ITU-T Recommendation G. 781 (10/98) Synchronization Layer Functions.
91. ITU-T Recommendation G. 811 (09/97) Timing Characteristics of Primary Reference Clocks.
92. ITU-T Recommendation G. 812 (05/96) Timing Requirements of Slave Clocks Suitable for Use as Node Clocks in Synchronization Networks.
93. ITU-T Recommendation G. 813 (08/96) Timing Characteristics of SDH Equipment Slave Clocks (SEC).
94. ITU-T Recommendation G.8260 «Definitions and terminology for synchronization in packet networks».
95. ITU-T Recommendation G.8261«Timing and synchronization aspects in packet networks».
96. ITU-T Recommendation G.8261.1«Packet delay variation network limits applicable to packet-based methods (Frequency synchronization)».
97. Fedorova N. The implementation of structural-parametric synthesis of dynamic monitoring system in crisis situations / N. Fedorova, L.komarova // Зв'язок– 2016. №2. - С.6-11.
98. Fedorova N. Parameters of Synchronization Signal in IP/MPLS Networks / N. Fedorova, D. Dyomin // НЗ “УНДІЗ” №1 – 2016, С. 44-51.
99. Fedorova N. Synchronization Signals in Packet Switched Networks: Parameter Monitoring and Measurement // Інформатика та математичні методи моделювання. – 2013. – Том 3 №3. – С. 283 -287.
100. SDH [Электронный ресурс] <http://www.univers-spb.ru/technologys/sdh.php?Print=Y>.
101. Telcordia GR-1244-CORE-004 (10/2009) Clocks for the Synchronized Network: Common Generic Criteria.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. ПРИНЦИП СИНХРОНІЗАЦІЇ В СЦІ ТА ETHERNET ТЕХНОЛОГІЯХ

Технологія СЦІ (SDH - Synchronous Digital Hierarchy) — принцип побудови цифрових систем передачі, що використовують мультиплексування цифрових потоків, але зі значно більшою базовою швидкістю передачі і синхронізацією усього каналоутворюючого і передавального устаткування від загального генератора, у порівнянні з ПЦІ. За базовий рівень передачі прийнята швидкість 155,52 Мбіт/с чи синхронний транспортний модуль STM-1, що відповідає четвертій сходинки ієрархії ПЦІ — ІКМ-1920. Уся корисна і службова інформація упаковується і передається в транспортному модулі STM. Усі сигнали в складі STM-модуля синхронізовані головною тактовою частотою. Сигнал STM-1 може переносити декілька нижчих за швидкостями корисних сигналів, що дозволяє застосовувати потоки ПЦІ у транспортних модулях STM.

Згідно визначення міжнародної організації швидкості передачі рівні:

- 155,520 Мбіт/с - STM-1
- 622,080 Мбіт/с - STM-4
- 2,488 Гбіт/с - STM-16
- 9,953 Гбіт/с - STM-64.

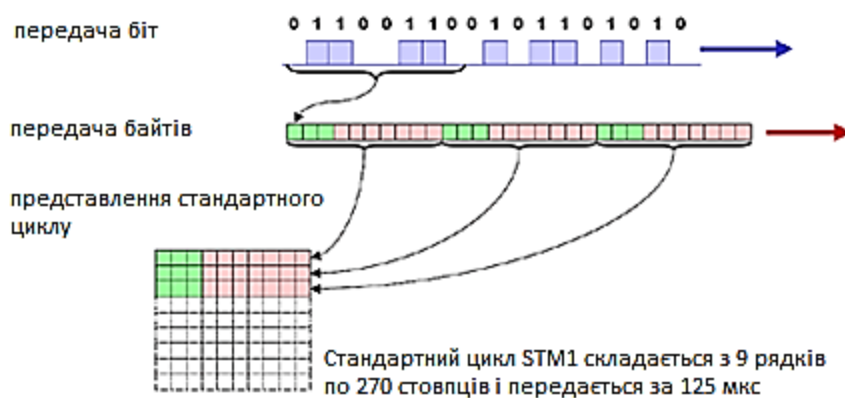


Рис. Г1 Представлення стандартного циклу

У всьому світі уявлення стандартного циклу СЦІ: МАТРИЦЯ з 9 рядків (рис. Г2).

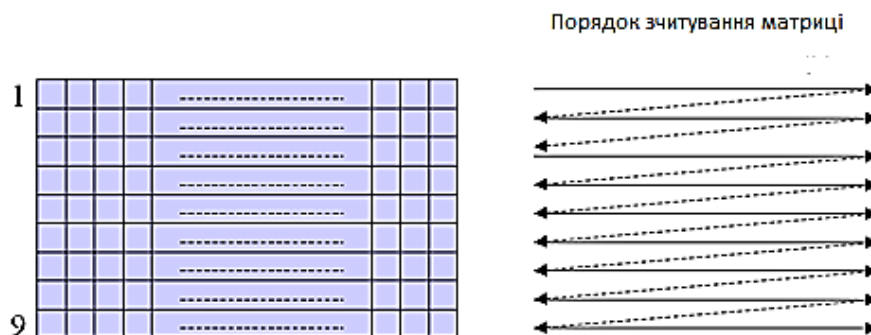


Рис. Г2 Матриця СЦІ

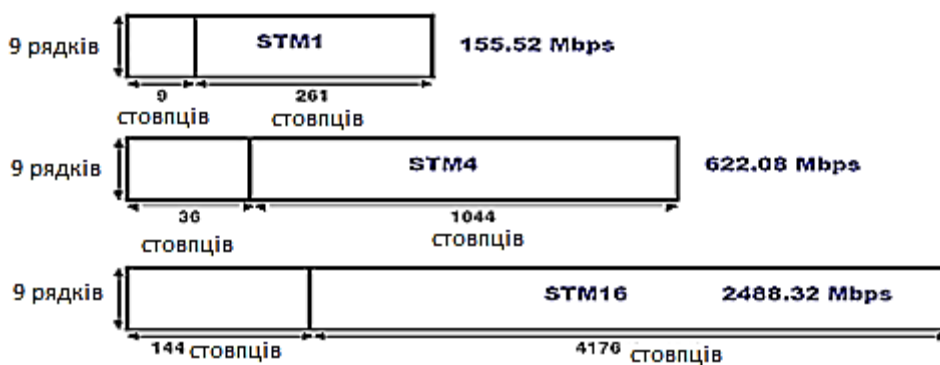


Рис. Г3 Структура циклу СЦІ

Кожен цикл передається за 125 мкс.

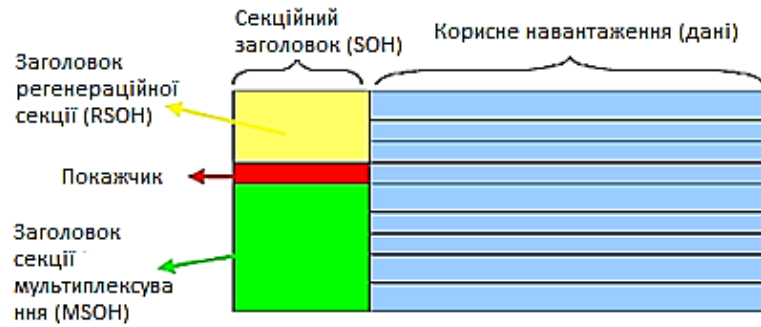


Рис. Г4 Структура циклу СЦІ

Всі цикли СЦІ мають однакову структуру:



Рис. Г5 Транспортный заголовок SON

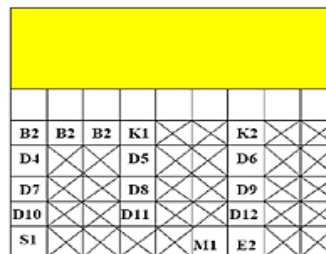


Рис. Г6 Транспортный заголовок RSON

- A1 і A2: слово циклової синхронізації
- B1: Контроль помилок регенераторної секції
- J0: ідентифікатор STM1 (слово з 16 байтів)
- E1: службовий канал (канал передачі 64 кбіт/с)
- F1: канал користувача. Може використовуватися для експлуатації мережі
- D1-D3: канал передачі даних зі швидкістю 192 кбіт/с

малих відхиленнях від цього значення — два основних параметри, що забезпечують необхідну якість сигналу. Мала затримка передачі сигналу досягається тільки за умови мінімальної буферизації даних в кожному вузлі. Це означає, що всі вузли в TDM-мережі повинні бути жорстко синхронізовані з задаючим генератором, щоб запобігти втраті даних. Якщо у якогось вузла дещо інша частота навіть протягом невеликого часу, його буфер або переповниться, або спустошиться, і вибірки даних загубляться чи повторяться для підтримки постійної швидкості передачі. Синхронізація мережі в системах зв'язку базується на ієрархії, в якій сама верхня позиція відведена опорного генератору з найвищою точністю (рис. Г9).



Рис. Г9 Синхронна цифрова ієрархія мережі SDH/SONET

Ієрархічну верхівку займає первинний пристрій синхронізації (ППС) з точністю 10^{-11} , означає, що на кожні 1011 імпульсів синхросигналу припадає на один імпульс більше або менше в порівнянні з ідеальним синхросигналом. Наступний рівень ієрархії відведено блоку синхронізації вторинний пристрій синхронізації (ВПС). ВПС має функцію перемикавання генератора в режим утримання, яка дозволяє цьому блоку генерувати синхросигнал з більш високою точністю, ніж його власна точність в автономному режимі протягом короткого часу після втрати синхронізації з генератором ППС. Блок ВПС зазвичай реалізується спільно з цифровою системою фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), керованої за допомогою рубідієвих годин. Третій рівень ієрархії займає блок внутрішніх годин - пристрій синхронізації обладнання СЦІ (ПС-СЦІ). ПС-СЦІ також забезпечений

функцією перемикання генератора в режим утримання, але її параметри і характеристики автономного режиму гірші необхідних для ВПС. ПС-СЦІ, як правило, має цифрову систему ФАПЧ, яка управляється термостатованим кварцевим генератором.

У всіх рівнів ієрархії, починаючи з другого і нижче точність синхронізації дорівнює точності блоку ППС, до тих пір поки зв'язок з ним не перерветься. З міркувань надійності навряд чи можна очікувати, що глобальні мережі зв'язку будуть синхронізуватися тільки з блоком ППС. На практиці вони використовують структуру поділу каналів за часом поряд з незалежно працюючими блоками ППС. У кожного постачальника послуг зв'язку є власний блок ППС, і це означає, що глобальна мережа зв'язку складається з синхронізованих ділянок, з'єднаних за допомогою плезіохронних (майже синхронних) ланок. Якщо блоки ППС і ВПС зазвичай реалізуються як автономні елементи, призначені тільки для синхронізації (не для передачі даних), то SEC/SMC є виключно частиною мережі, як наприклад мультиплексор вводу/виводу.

Технологія Ethernet — найпопулярніший протокол кабельних комп'ютерних мереж, що працює на фізичному та каналному рівні мережевої моделі OSI. Станом на 2016 рік близько 85 % усіх комп'ютерів у світі були підключені до комп'ютерних мереж по протоколу Ethernet. За строго технічним визначенням Ethernet — сімейство протоколів стандарту IEEE 802.3. Ethernet тісно пов'язаний з моделлю TCP/IP, оскільки у переважній більшості випадків служить для передачі IP-пакетів. Ethernet було спроектовано згідно з технологією CSMA/CD (множинний доступ з контролем несучої та виявленням колізій). Хоча з широким застосуванням мережевих комутаторів та засобу передачі повний дуплекс проблема виникнення колізій в мережах Ethernet майже не зустрічається. Ethernet-мережі працюють на швидкостях 10Мбіт/с, Fast Ethernet — на швидкостях 100Мбіт/с, Gigabit Ethernet — на швидкостях 1000Мбіт/с, 10 Gigabit Ethernet — на швидкостях 10Гбіт/с. В кінці листопада 2006 року було

прийняте рішення про початок розробок наступної версії стандарту з досягненням швидкості 100Гбіт/с (100 Gigabit Ethernet).

Формат кадру

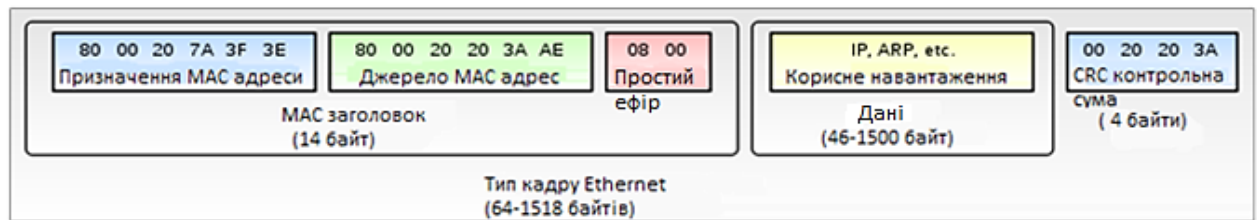


Рис. Г10 Найпоширеніший формат кадру Ethernet II

Існує декілька форматів Ethernet-кадру:

1. Первинний Version I (більше не застосовується).
2. Ethernet Version 2 або Ethernet-кадр II, ще званий DIX (аббревіатура перших букв фірм-розробників DEC, Intel, Xerox) — найпоширена і використовується до сьогодні. Часто використовується безпосередньо протоколом інтернет.
3. Novell — внутрішня модифікація IEEE 802.3 без LLC (Logical link control).
4. Кадр IEEE 802.2 LLC.
5. IEEE 802.2 LLC/SNAP.

Деякі мережеві карти Ethernet, що випускались компанією Hewlett-Packard, використовували при роботі кадр формату IEEE 802.12, відповідно стандарту 100VG-AnyLAN.

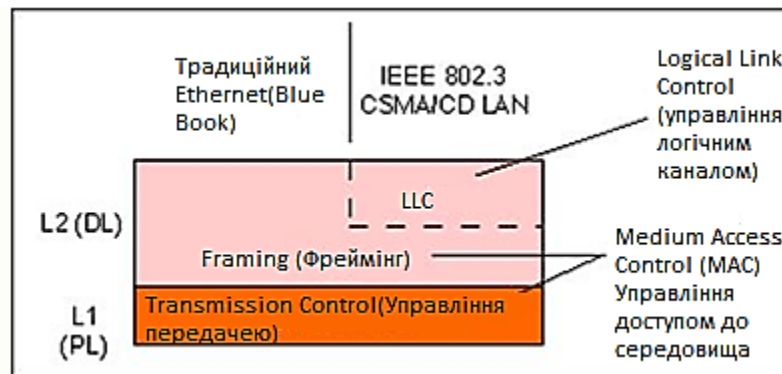
Як доповнення Ethernet-кадр може містити тег IEEE 802.1Q для ідентифікації VLAN, до якої він адресований, і IEEE 802.1p для вказання пріоритету.

Різні типи кадру мають різний формат і значення MTU.

Кадр починається з преамбули яка має розмір 8 байт (64 біт) і складається з послідовності «10», повтореної 31 раз, та «11» у кінці. Далі йде адреса отримувача і адреса відправника які займають по 6 байт кожна. Якщо адреса отримувача починається з 1, то це групова передача (multicast) (всі в

групі). Якщо адреса отримувача складається з самих одиниць (FF:FF:FF:FF:FF:FF) — це широкомовна передача (broadcast).

Для групової передачі треба налаштовувати групи, тому вона використовується рідко. Детальніше — в статті MAC-адреса. Наступне поле — тип, або довжина, залежно від того, до якого стандарту належить кадр. З історичних причин, якщо значення в полі менше за $0x600 = 1536$, то це довжина, а якщо більше — тип, який визначає, якому протоколу мережевого рівня передати кадр, якщо з Ethernet працює кілька мережевих протоколів. $0x800$ — IPv4. Якщо тип не вказано, то що робити з кадром визначає протокол Logical link control, це ще 8 байт заголовків. Далі йде поле даних, менше за 1500 байт, але більше за 46 байт. Якщо даних менше за 46 байт, після них додається наповнювач (pad) потрібного розміру. Це потрібно щоб кадр можна було відрізнити від сміття в каналі, яке з'являється коли передача припиняється при виявленні колізії, і щоб кадр був достатньо довгим аби не передатись повністю до того як колізія виявиться. Останнє поле — контрольна сума. Це 32-х бітний CRC. При виявленні помилки кадр видаляється (рис. Г11).



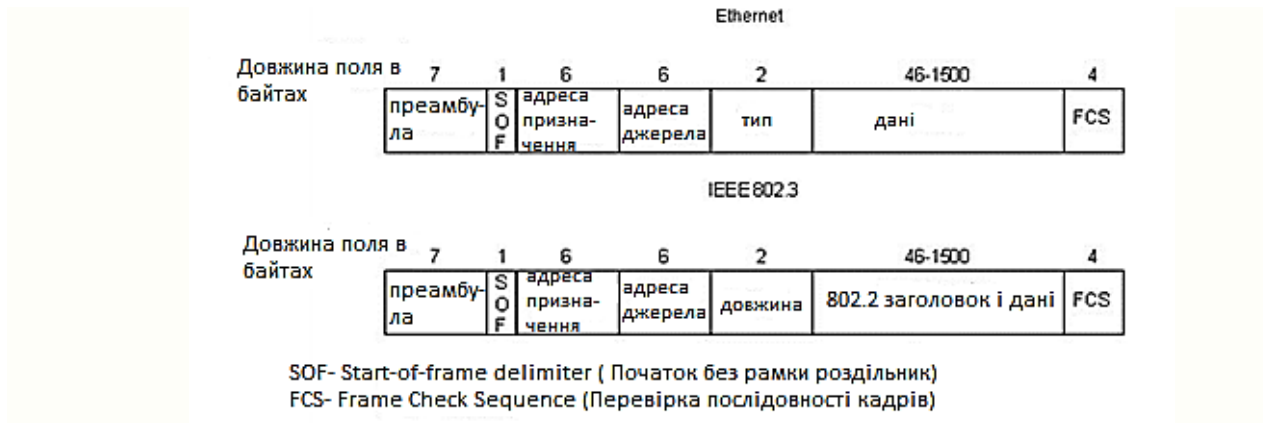


Рис. Г11Відмінність Ethernet II та IEEE 802.3

Приклад IEEE802.3/IEEE802.2 в Ethereal

```

Ξ IEEE 802.3 Ethernet
  Destination: 01:80:c2:00:00:00 (Spanning-tree-(for-bridges)_00)
  Source: 00:14:1c:2e:32:23 (00:14:1c:2e:32:23)
  Length: 106
Ξ Logical-Link Control
  DSAP: Spanning Tree BPDU (0x42)
  IG Bit: Individual
  SSAP: Spanning Tree BPDU (0x42)
  CR Bit: Command

```

Приклад кадру Ethernet v.2 в Ethereal:

```

Ξ Ethernet II, Src: 00:02:b3:21:35:1a, Dst: 00:04:de:4b:a0:00
  Destination: 00:04:de:4b:a0:00 (Cisco_4b:a0:00)
  Source: 00:02:b3:21:35:1a (Intel_21:35:1a)
  Type: IP (0x0800)

```

Традиційна Ethernet-мережа спочатку призначалась для передачі асинхронного трафіку даних, тобто вимоги до проходження сигналу синхронізації від джерела до приймача не висувалися. Насправді, стара 10-Мбіт/с (10Base-T), Ethernet-мережа була не в змозі передавати цей сигнал по інтерфейсу фізичного рівня, т. к. використовувався в ній передавач 10Base-T припиняв передачу сигналу в інтервалах незайнятості. Передавач 10Base-T кожні 16 мс відправляв одиничний імпульс, увідомлявших приймальну сторону про свою присутність. Зрозуміло, таких рідкісних імпульсів недостатньо для встановлення синхронізації після збою на приймачі. Інтервали незайнятості в більш швидких різновиди Ethernet-мереж (100 Мбіт/с, 1 і 10 Гбіт/с) постійно реєструються при появі фронту імпульсу, що дозволяє безперервно і з високою якістю відновлювати тактову

синхронізацію на приймачі. Ці різновиди є хорошими кандидатами для реалізації синхронізованою Ethernet-мережі.

В Gigabit Ethernet з мідним проводом використовується лінійне кодування поряд з передачею по всім чотирьом парам кабелю CAT-5 для компенсації обмеженою ширини смуги витой пари цього кабелю. Передача здійснюється одночасно в обидва кінця, як це відбувається в мережах ISDN, xDSL, де для придушення застосовуються алгоритми цифрової обробки сигналу. Придушення значно спрощується в тому випадку, якщо частота, з якою передаються дані, однакова в обох напрямках. Це досягається в концепції ведучий/ведений мережі Gigabit Ethernet. Ведучий блок відправляє синхросигнал від незалежного кварцового генератора, а ведений блок відновлює опорний тактовий сигнал з отриманих даних і використовує його для передачі власних даних. Ведучий і ведений блоки визначаються автопереговорному процесі. Ведучому блоку, як правило, призначається рідко використовується випадкове значення, але воно встановлюється і вручну.

З рис. Г12 видно, що синхронізація дійсно здійснюється в Ethernet на кожному мережевому сегменті між двома сусідніми вузлами, але вона не поширюється від сегмента до сегмента. Таким чином, вузол приймає тактовий сигнал, відновлює його, а потім пересилає передає всім вузлам (рис. Г13).

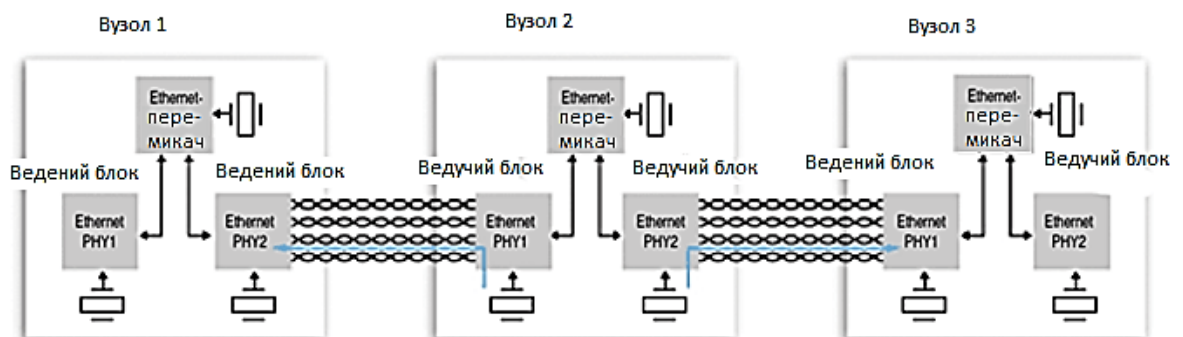


Рис. Г12 Синхронізація на фізичному рівні в традиційній Ethernet-мережі

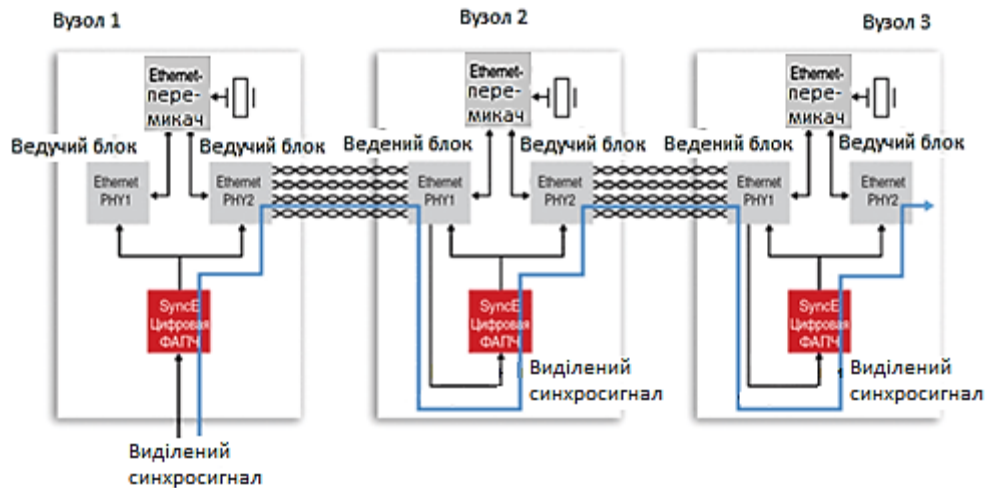


Рис. Г13 Синхронізація на фізичному рівні в Ethernet

Відновлений сигнал потребує очищення з допомогою ФАПЧ, що дозволяє усунути джиттер з ланцюга відновлення тактового сигналу до того, як він надійде на передавальний пристрій. Крім того, необхідно вручну налаштувати порти в тракті передачі сигналу синхронізації, що робиться для чергування функцій ведучого і веденого блоків (тільки для мережі 1000Base-T). У разі оптоволоконної мережі Gigabit Ethernet (1000Base-X) або 10 Gigabit Ethernet (10GBASE) така необхідність відсутня, оскільки один волоконний тракт використовується для передачі, інша — для прийому (по одному оптоволокну сигнал передається лише в одному напрямку) і, отже, функції провідного і веденого вузлів не потрібні. Будь-пристрій фізичного рівня мереж Gigabit Ethernet або 10 Gigabit Ethernet має підтримувати синхронізовану Ethernet-мережу, забезпечуючи відновлений синхросигнал на одному із своїх виходів. Відновлений синхросигнал очищається за допомогою системи ФАПЧ і передається на вхід 25-МГц кварцового генератора фізичного пристрою. Кілька нових фізичних пристроїв Ethernet-мережі забезпечують спеціальний висновок для вхідного тактового сигналу. Перевагою цього методу є те, що частота вхідного сигналу може бути вище 25 МГц — чим вище частота синхронізації, тим, як правило, менше джиттер. Крім того, даний метод дозволяє уникнути будь-яких потенційних проблем, пов'язаних з циклом синхронізації фізичного пристрою.

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ "Світ ІТ"

І.Г. КОВАЛЬОВ
« 11 » грудня 2019 р.

Акт № 1211-19
про впровадження результатів дисертаційної роботи
Єліссаві Камала Кхаліфа А

Комісія у складі: голови комісії – заступника комерційного директора ТОВ "Світ ІТ" Балаби О.В. та членів комісії: Роздайбіди О.Г., Бакалова Л.Д., встановила, що в ТОВ "Світ ІТ" реалізовані результати наукових досліджень, які розроблені особисто Єліссаві Камалем Кхаліфа А, а саме:

- встановлено, що використання методу формування динамічної адаптації дерева синхронізації на основі замкнутої топології є доцільнішим ніж використання існуючих алгоритмів на даній топології та дозволить на 25% збільшити надійність та сталість мережі при виникненні аварійних ситуацій під час надання послуг.

- досконалий метод функціонування мережевого елементу на базі зміни пріоритетів і введення механізму програмованої затримки в алгоритм формування повідомлень про статус синхронізації дозволяє запобігти появі часових петель в замкнутих топологічних структурах мультисервісної мережі.

Запропоновані методи було використано під час впровадження апаратних засобів, що дозволяє забезпечити працездатність мережевої синхронізації при збільшенні зв'язності мережі і значному збільшенні кількості аварійних ситуацій в мультисервісній мережі.

Голова комісії:
Члени комісії:



О.В. Балаба

О.Г. Роздайбіда
Л.Д. Бакалов

ДОДАТОК В

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Державного підприємства
«Науковий центр точного машинобудування»
Д.Т.Н., С.Н.С.28 грудня 2019 р.

О.В. ССЛЮКОВ

Акт № 3

про впровадження результатів дисертаційної роботи
ЕЛІССАВІ КАМАЛ КХАЛІФА А

Комісія у складі: голови комісії – заступника директора ДП «НЦТМ» з наукової роботи Якимов В.В та членів комісії: Іванілова А.О, Яценка Н.Г., встановила, що в Державному підприємстві «Науковий центр точного машинобудування» Державного космічного агентства України реалізовані результати наукових досліджень, які розроблені особисто Еліссаві Камалем Кхаліфа А, а саме механізм підвищення сталості функціонування мережевої синхронізації шляхом введення алгоритму динамічної адаптації дерева синхронізації.

Цей механізм передбачає набір правил, за якими здійснюється переконфігурування дерева синхронізації при виникненні аварійних ситуацій або ситуацій, що призводять до зміни значень якості сигналу синхронізації.

Запропонований автором алгоритм динамічної перебудови дерева синхронізації дозволяє підвищити сталість мережевої синхронізації в порівнянні з впровадженими на даний момент алгоритмами функціонування мережеских елементів та доводить доцільність його використання в існуючих мультисервісних макромережах та є підставою для теоретичної проробки та обґрунтування вимог до перспективних систем оцінки якості функціонування телекомунікаційних систем та мереж зв'язку.

Голова комісії:

Члени комісії:

В.В. Якимов

А.О. Іванілов

Н.Г. Яценко

ДОДАТОК Г



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ
 Повітрофлотський пр. 31, м. Київ-37, 03037, тел. (044)241-55-80, факс (044) 248-32-65
 E-mail: knuba_admin@ukr.net, Web: http:// www.knuba.edu.ua, код ЄДРПОУ 02070909
 11.02.2021 № 14 На № _____ Від _____

Довідка

щодо впровадження результатів дисертаційного дослідження здобувача
 кафедри кібербезпеки та комп'ютерної інженерії
 Єлісаві Камала Кхаліфа А
 за темою “Методи підвищення сталості мережевої синхронізації в сучасній
 мультисервісній макромережі”

Результати дисертаційного дослідження здобувача кафедри кібербезпеки та комп'ютерної інженерії Єлісаві Камала Кхаліфа А за темою “Методи підвищення сталості мережевої синхронізації в сучасній мультисервісній макромережі” на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі впроваджені в діяльність Київського національного університету будівництва і архітектури.

Пропозиції розроблені дисертантом використано у навчальному процесі Київського національного університету будівництва і архітектури, зокрема на кафедрі кібербезпеки та комп'ютерної інженерії при налаштуванні апаратно-програмних засобів та у навчальному процесі при викладанні дисципліни “Комп'ютерні системи та мережі”.

Також актуальною є рекомендація щодо застосування в мережах передачі даних механізму захисту трафіку від можливих аварій, тобто мережа синхронізації має бути спроектована з врахуванням можливих змін в маршрутах передачі даних.

Проректор з наукової роботи Київського
 національного університету будівництва і архітектури:



В.О. ПЛОСКИЙ