МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

В. М. ПАХОМОВА

МОЖЛИВОСТІ РОЗВИТКУ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ У АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

МОНОГРАФІЯ

Дніпропетровськ
2015

УДК 004.732:656.2(075.8)
ББК 32.97:39.2я73

Рецензенти:
д-р техн. наук, проф. *М. М. Бабаєв*
(Українська державна академія залізничного транспорту);
д-р техн. наук, проф. *В. В. Ткачов*
(ДВНЗ «Національний гірничий університет»)

Рекомендовано до друку вченою радою
Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
(*протокол № 2 від 30.09.13*)

УДК 004.732:656.2(075.8)
Можливості розвитку комп'ютерних мереж у автоматизованих системах залізничного транспорту [Текст]: монографія / В. М. Пахомова; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Дніпропетровськ, 2015. – 203 с.
ISBN 978-966-8471-56-8

У монографії розглянуто можливості подальшого розвитку комп'ютерних мереж в інформаційних та інформаційно-керуючих автоматизованих системах на трьох рівнях залізничного транспорту: рівні лінійних підприємств (зокрема, сортувальних станцій), рівні залізниці, рівні УЗ. Описано для рівня лінійних підприємств використання базових технологій локальних мереж, для рівня залізниці - варіанти побудови об'єднаних комп'ютерних мереж, рівня УЗ - організацію відмовостійких комп'ютерних мереж. Обгрунтовано доцільність впровадження на залізничному транспорті гетерогенних комп'ютерних мереж, важливим аспектом яких є маршрутизація.

Для наукових співробітників, аспірантів, магістрів та студентів, яким необхідні знання про фундаментальні принципи побудови складених комп'ютерних мереж залізничного транспорту на основі мережних технологій.

Іл. 121. Табл. 11. Бібліогр. назв. 70.

ISBN 978-966-8471-56-8

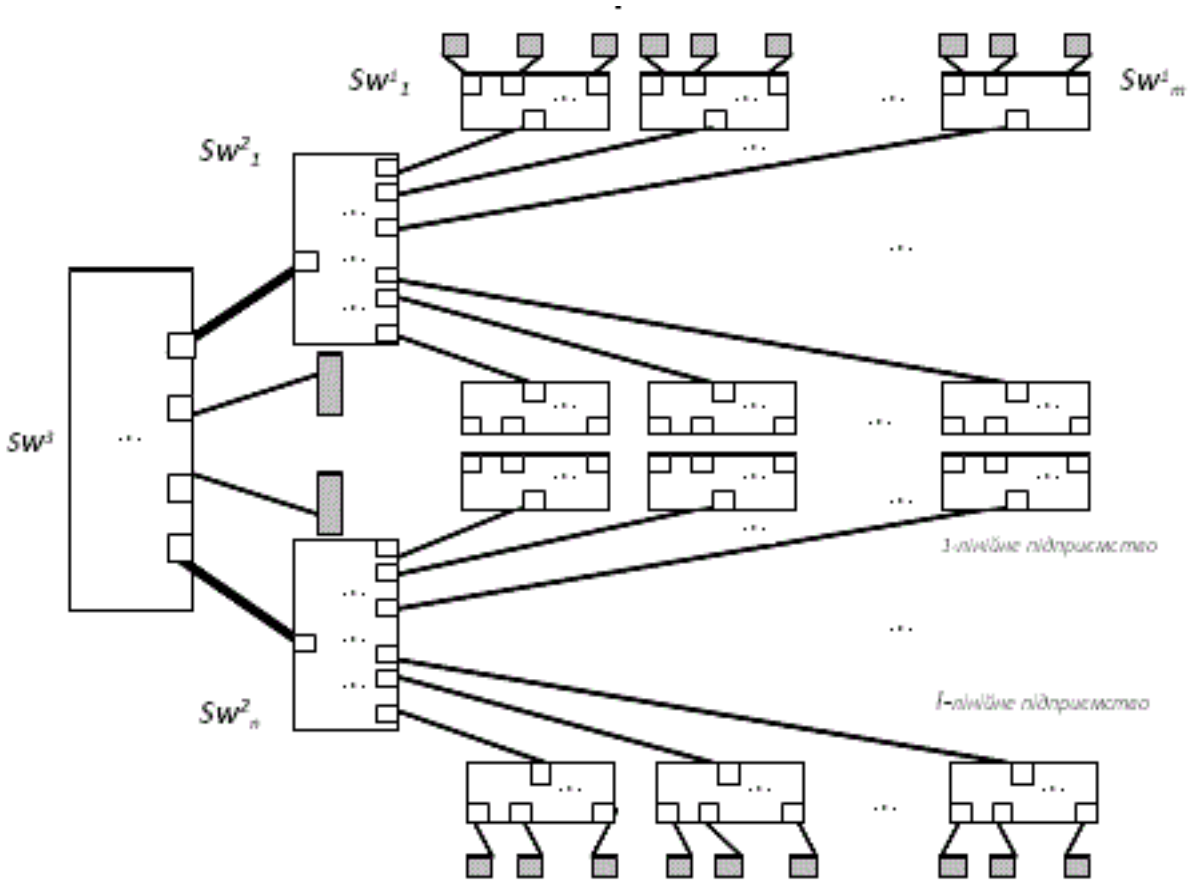

Рис. 2.1. Структура гіпотетичної мережі Ethernet / Fast Ethernet / Gigabit Ethernet

Комутатор підвищує продуктивність і безпеку мережі, рятуючи інші сегменти мережі від необхідності обробляти дані, які їм не призначалися. Проте застосування комутаторів завжди породжує небезпеку втрати кадрів при передачі, тому одним з основних питань є питання керування потоком кадрів.

2.1.2. Діаграми станів порту комутатора

У мережах залізничного транспорту використовуються технології сімейства Ethernet, в основі яких метод доступу до середовища передачі даних, званий методом колективного доступу з розпізнаванням несучої і виявленням колізій (Carrier Sense Multiply Access with Collision Detection, CSMA/CD) [14].

Метод CSMA/CD визначає основні тимчасові та логічні співвідношення, що гарантують коректну роботу всіх станцій у мережі. Формальна модель станції мережі при CSMA/CD розроблена та наведена в [37]. Крім того, раніше розроблена відповідна імітаційна модель мережі Ethernet (без використання комутаторів) [38-39]. Технологія Fast Ethernet зберегла в

недоторканості метод доступу CSMA/CD, залишивши в ньому той же алгоритм і ті ж тимчасові параметри в бітових інтервалах (сам бітовий інтервал зменшився в 10 разів).

Втрати навіть невеликої частки кадрів, звичайно набагато знижують корисну продуктивність мережі. Тому за умови перевантаження комутатора раціонально було б сповільнити інтенсивність надходження кадрів від кінцевих вузлів у приймачі комутатора, щоб дати можливість передавачам розвантажити свої буфери з більш високою швидкістю. Для реалізації такого алгоритму в розпорядженні комутатора повинні бути прийоми зниження інтенсивності трафіка підключених до його портів вузлів [25, 31]. Ці прийоми засновані на тому, що кінцеві вузли строго дотримуються всіх параметрів алгоритму доступу до середовища, а порти комутатора - ні. Розроблені формальні моделі роботи комутатора з використанням таких прийомів та відповідна імітаційна модель Fast Ethernet (із комутатором) в [46], за допомогою якої виконується аналіз характеристик мережі в повнодуплексному та напівдуплексному режимах.

Спосіб «гальмування» кінцевого вузла заснований на так званій агресивній поведінці порту комутатора під час захоплення середовища після закінчення передачі чергового кадру або після колізії в напівдуплексному режимі роботи мережі. На підставі цього розроблена відповідна формальна модель роботи комутатора (рис. 2.2). Діаграма, що наведена на рис. 2.2, є модифікацією діаграми із [37], в яку додані додаткові стани. Так наприклад, відбувається перехід у стан «Аналіз перевантаження» для перевірки перевантаження мережі. Якщо воно є, то відбувається перехід у стан «Прискорена пауза», в якому встановлюється тривалість паузи комутатора у 9,1 мкс (проти 9,6 мкс технологічної паузи станції) у технології Ethernet, а також у 0,91 мкс (проти 0,96 мкс технологічної паузи станції) у технології Fast Ethernet [31]. Крім того, введений стан «Аналіз учасників колізії», якщо в конфлікт втягнений комутатор, MAC-підрівень переходить у стан «Зміна інтервалу відстрочки», в якому для комутатора установлюється інтервал відстрочки 50 мкс (проти інтервалу відстрочки станції 51,2 мкс) в технології Ethernet, а також в 5 мкс (проти інтервалу відстрочки станції в 5,12 мкс) в технології Fast Ethernet [31]; тим самим станції не вдається передати свого кадру.

Метод зворотного тиску (backpressure) використовується не для того, щоб розвантажити буфер процесора порту, безпосередньо пов'язаного з придушеним вузлом, а розвантажити або загальний буфер комутатора (якщо використовується архітектура з роздільною загальною пам'яттю), або розвантажити буфер процесора іншого порту, в який передає свої кадри даний порт. Крім того, метод зворотного тиску може застосовуватися в тих випадках, коли процесор порту не розрахований на підтримку максимально можливого для протоколу трафіка. Розроблена формальна модель комутатора

в напівдуплексному режимі за його зворотного тиску, яка показана на рис. 2.3.

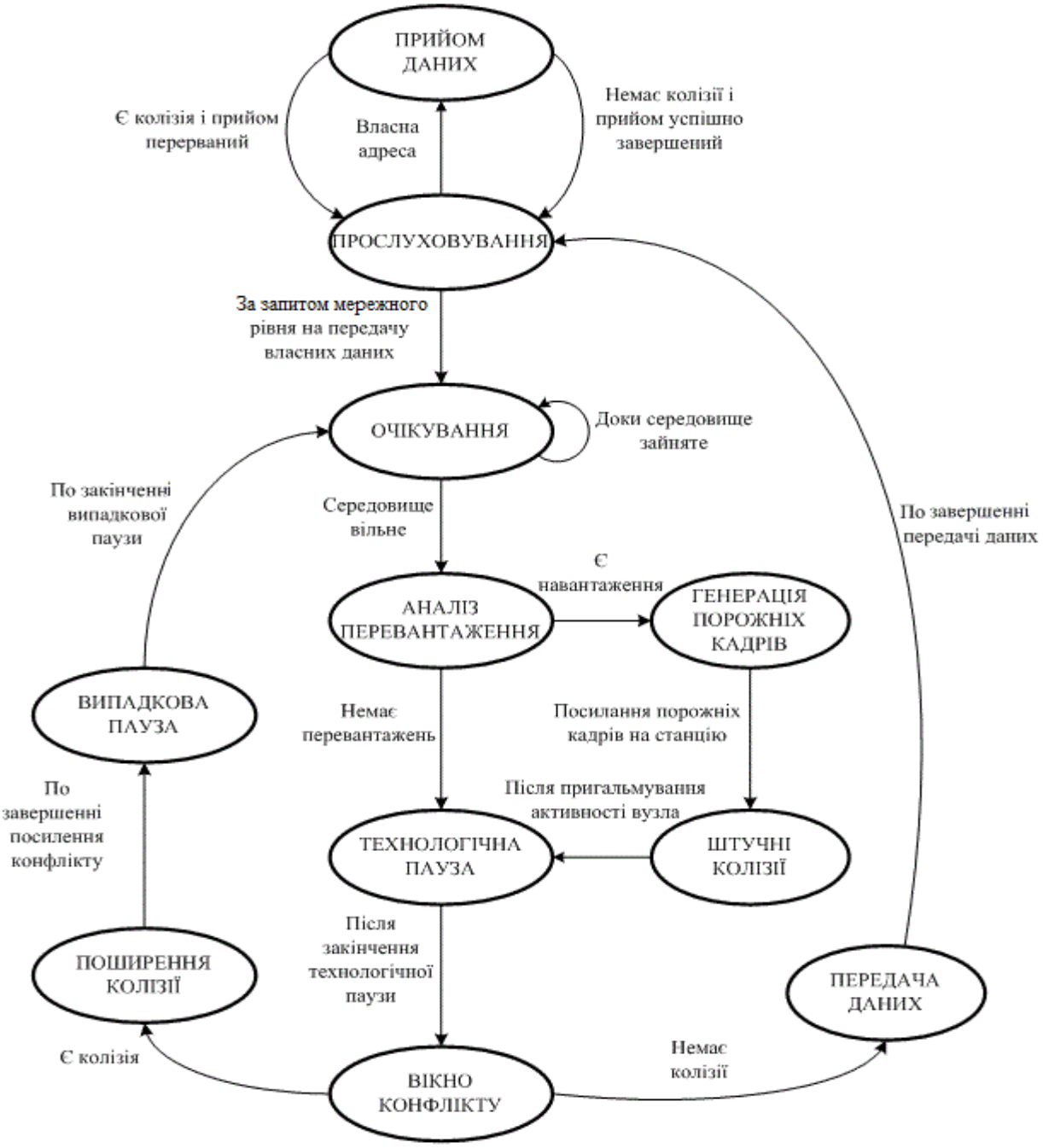

Рис. 2.2. Діаграма станів порту комутатора під час агресивного захоплення середовища

Ця діаграма є модифікацією діаграми із [37], в яку додані додаткові стани. Так наприклад, відбувається перехід у стан «Аналіз перевантаження» для перевірки перевантаження комутатора і в залежності від цього вибираються такі дії: якщо нема перевантаження, то перехід у стан «Технологічна пауза», а якщо є – до стану «Генерація порожніх кадрів». У

цьому стані комутатор посилає порожні кадри в сегмент, від якого приходить дуже великий потік кадрів, навмисно створюючи штучні колізії, що гальмують його роботу (стан «Штучні колізії»).

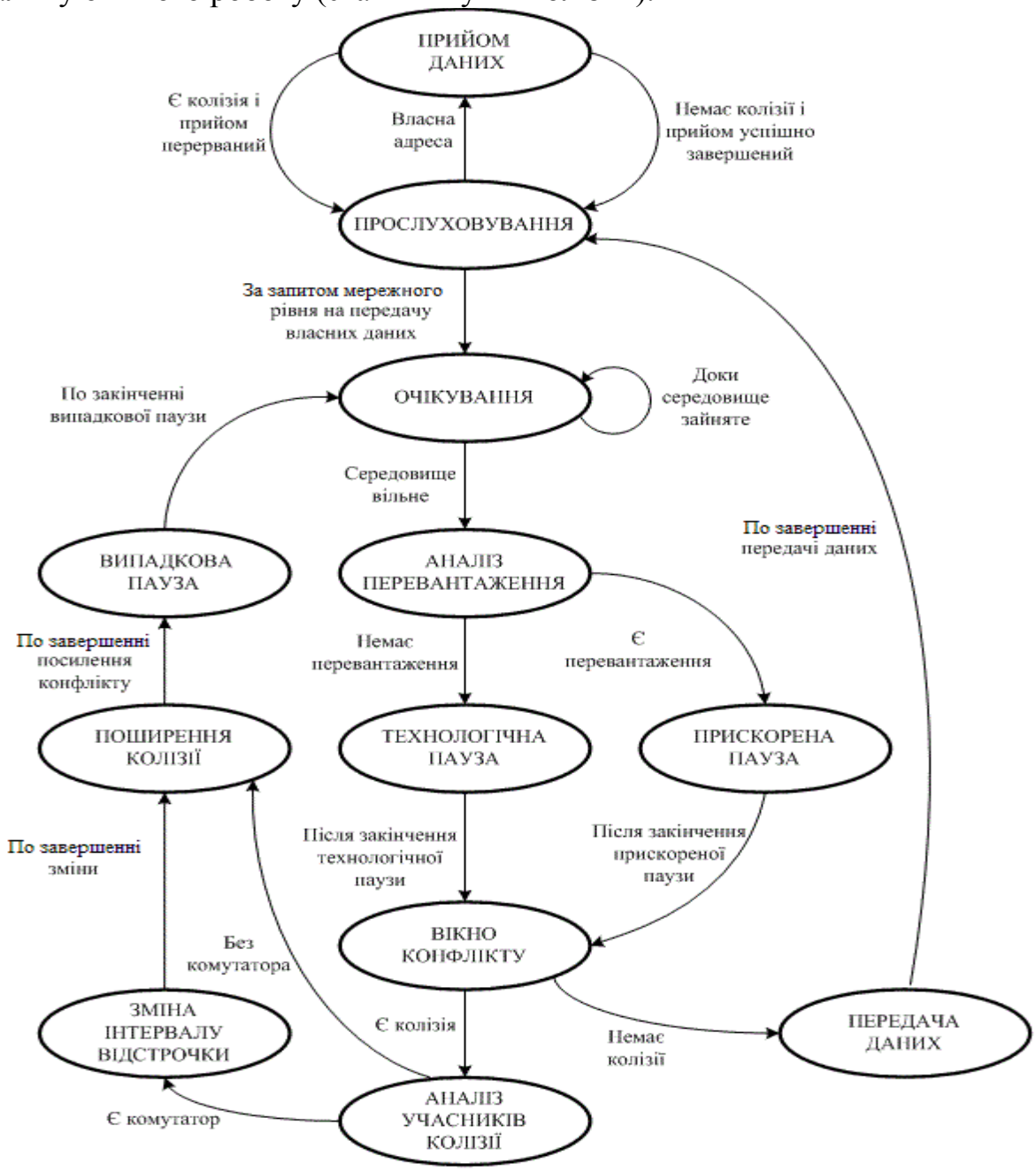

Рис. 2.3. Діаграма станів порту комутатора за зворотним тиском на станцію

Після пригальмування активності вузла - повернення в стан «Технологічна пауза», щоб вичекати потрібний час для наступної передачі. У роботі в повнодуплексному режимі MAC-вузол не використовує метод доступу до середовища CSMA/CD. Відмова від алгоритму доступу до розподіленого середовища веде до підвищення вірогідності втрат кадрів комутаторами. Для контролю за потоками кадрів, що направляються кінцевими вузлами в повнодуплексних версіях протоколів,

використовуються дві команди: «Припинити передачу» і «Відновити передачу». Порт комутатора, що отримав команду «Припинити передачу», повинний припинити передавати кадри до отримання команди «Відновити передачу».

2.3. Можливості використання технології VLAN

2.3.2. Способи організації VLAN

Взагалі утворення VLAN на канальному рівні можливо за допомогою таких механізмів [36]: групування портів комутатора, групування MAC-адрес, використання стандарту IEEE 802.1Q, використання стандарту LANE в мережах, побудованих на комутаторах ATM. Для утворення VLAN на канальному рівні в інформаційних системах на залізничному транспорті можливо використання механізмів: групування портів комутатора, групування MAC-адрес, використання стандарту IEEE 802.1Q.

Групування портів комутатора. Кожен порт комутатора приписується до тієї або іншої віртуальної мережі, тобто порти групуються у віртуальні мережі. Рішення щодо просування мережного пакета в цій мережі спирається на MAC-адресу одержувача асоційованого з ним порту. За використання технології групування портів один і той же порт може бути одночасно приписаний до декількох віртуальних мереж, що дозволяє реалізовувати ресурси, що розподіляються, між користувачами різних віртуальних мереж.

Групування MAC-адрес. За методом групування портів для з'єднання комутаторів потрібно стільки портів, скільки віртуальних мереж вони підтримують, в результаті порти і кабелі використовуються з марними витратами. Крім того, для організації взаємодії віртуальних мереж через маршрутизатор кожній мережі потрібний окремий кабель і окремий порт маршрутизатора, що також веде до великих накладних витрат. Групування MAC-адрес у віртуальну мережу на кожному комутаторі позбавляє від необхідності їх з'єднання через декілька портів, оскільки в цьому випадку відповідною віртуальною мережею є MAC-адрес. Проте такий спосіб вимагає виконання великої кількості ручних операцій з маркіровки MAC-адрес на кожному комутаторі мережі.

Використання стандарту IEEE 802.1Q. Стандарт 802.1Q поміщає тег всередину фрейму, який передає інформацію про приналежність трафіка до VLAN. На рис. 2.19 показаний формат кадру стандарту IEEE 802.1Q [32].

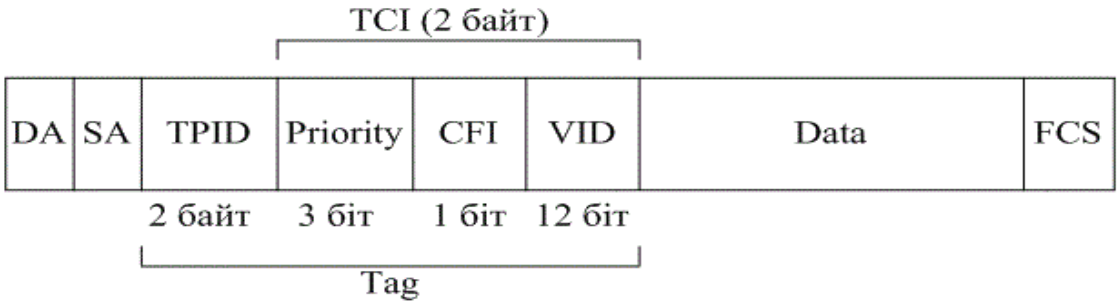

Рис. 2.19. Формат кадру за стандартом IEEE 802.1Q

Умовні позначення:

Tag-мітка (розмір тегу 4 байти);

TPID (Tag Protocol Identifier) - ідентифікатор протоколу VLAN (розмір поля 16 біт; вказує, який протокол використовується для тегирування);

Priority - рівень пріоритету (розмір поля 3 біта; використовується стандартом IEEE802.1p для завдання пріоритету, який передається трафіку);

CFI (Canonical Format Indicator) - індикатор класичного формату (розмір поля 1 біт; вказує на формат MAC-адреси: 0 - канонічний, 1 - неканонічний; використовується для сумісності між Ethernet і Token Ring мережами);

VID (VLAN ID) - ідентифікатор віртуальної мережі (розмір поля 12 біт; вказує, якому VLAN належить фрейм; діапазон можливих значень від 0 до 4095);

TCI (Tag Control Information) – керування тегом (розмір 2 байт; Priority + CFI + VID).

Переваги та недоліки основних механізмів побудови VLAN наведені на рис. 2.20.

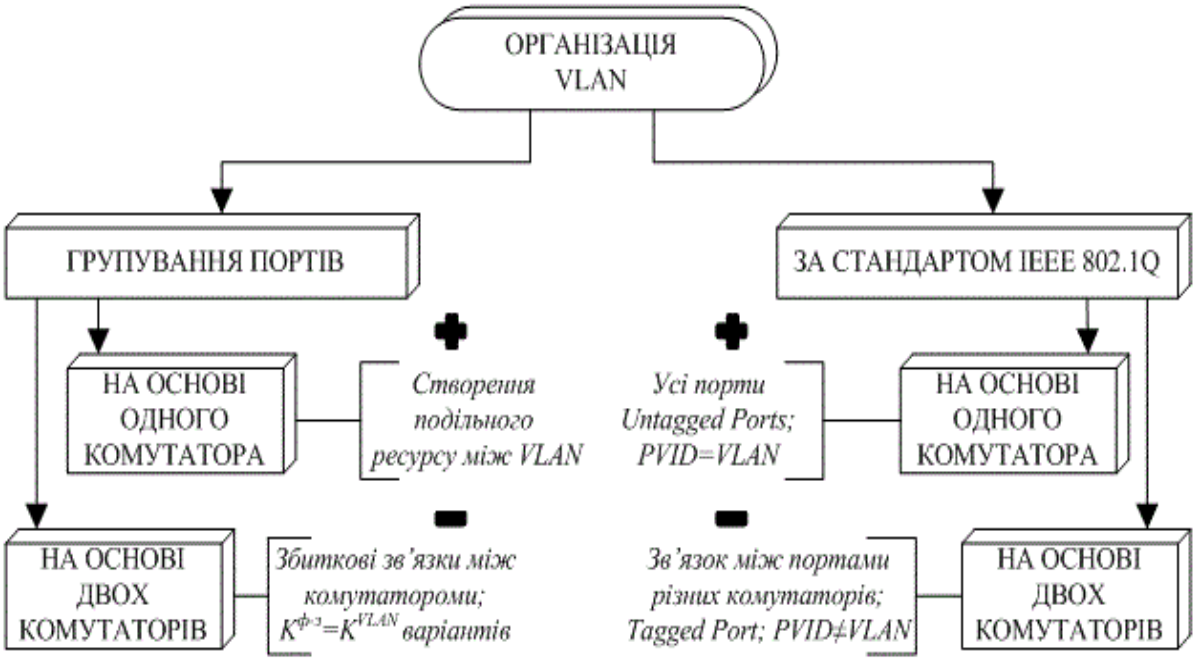

Рис. 2.20. Порівняння варіантів організації VLAN на канальному рівні

2.3.3. Модель комутатора сумісного з IEEE 802.1Q

Розглянемо детальніше процес передачі кадру через комутатор. У відношенні до трафіка кожен порт комутатора може бути як вхідним, так і вихідним. Оскільки кадр, що приймається, може відноситися як до типу Tagged, так і до типу Untagged, то за умовчанням для всіх комутаторів встановлюється можливість прийому кадрів обох типів. Діаграма станів порту комутатора, сумісного зі стандартом IEEE 802.1Q, створена в [51] і наведена на рис. 2.21.

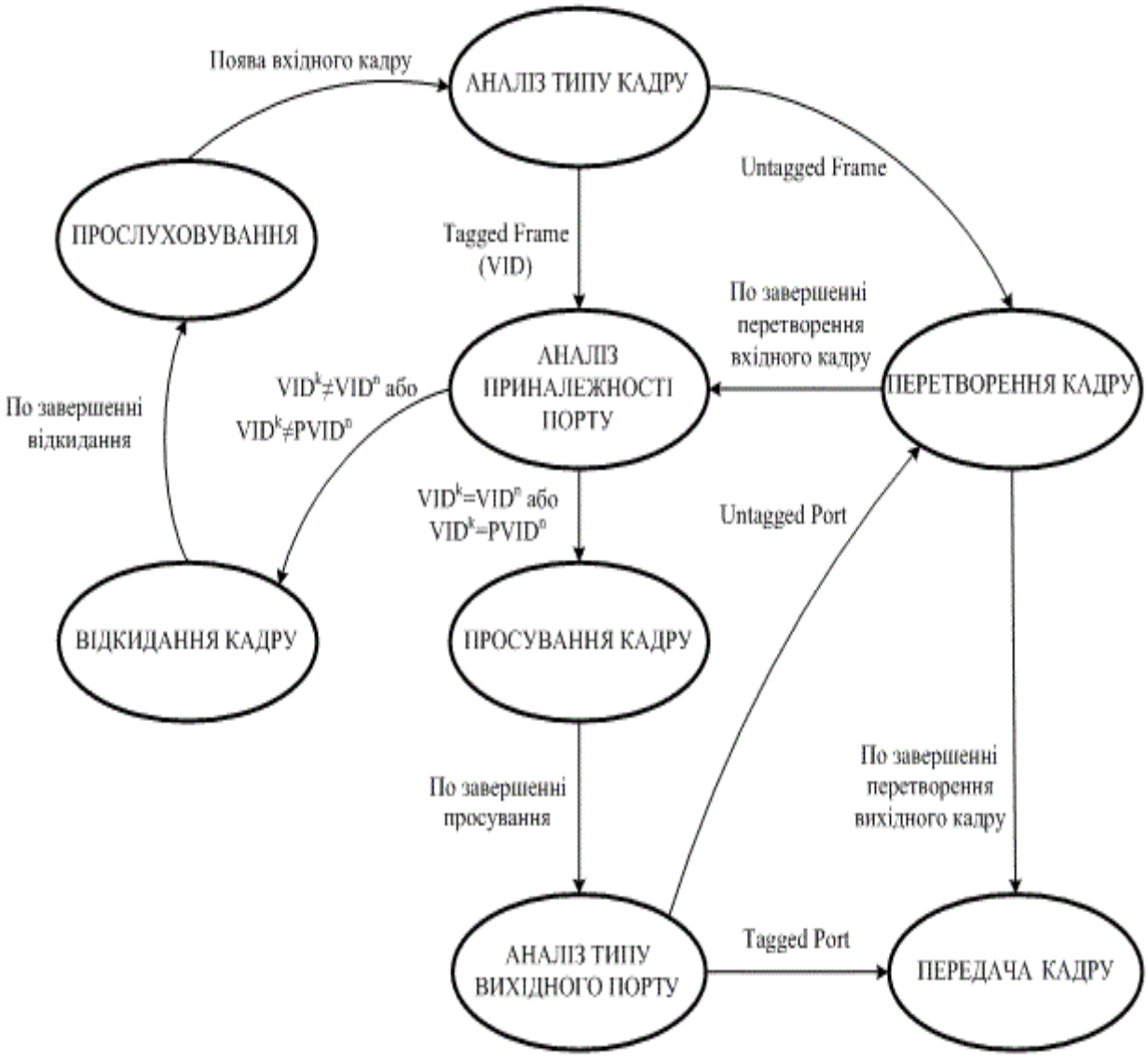

Рис. 2.21. Діаграма станів комутатора сумісного зі стандартом IEEE 802.1Q

Більшу частину часу канальний рівень перебуває в стані «Прослухування». З появою вхідного кадру канальний рівень комутатора потрапляє в стан «Аналіз типу кадру». Якщо приймається кадр Tagged, в якому є інформація про приналежність до конкретної віртуальної мережі (VID), то цей кадр передається без зміни, якщо кадр типу Untagged, у якого

не міститься інформації про приналежність до віртуальної мережі, то такий кадр перетворюється вхідним портом комутатора до типу Tagged (стан «Перетворення кадру»). Щоб таке перетворення стало можливим, кожному порту комутатора надається унікальний PVID (Port VLAN Identifier), що визначає приналежність порту до конкретної віртуальної мережі усередині комутатора. Кадр типу Untagged перетвориться до типу Tagged, для чого доповнюється міткою VID. Значення поля VID Untagged, що входить до кадру, встановлюється рівним значенню PVID порту. Просування кадрів усередині комутатора полягає в тому, що кадри можуть передаватися тільки між портами, які асоціюються з однією віртуальною мережею. Порти з однаковими ідентифікаторами усередині одного комутатора асоціюються з однією віртуальною мережею.

Якщо віртуальна мережа будується на базі одного комутатора, то ідентифікатора порту PVID, що визначає його приналежність до віртуальної мережі, цілком достатньо. Але для того, щоб розширити мережу за межі одного комутатора, одних ідентифікаторів портів недостатньо. Тому кожен порт може бути асоційованим з декількома віртуальними мережами, що мають різні ідентифікатори VID, наступний стан «Аналіз приналежності порту». Якщо адреса призначення кадру відповідає порту комутатора, який належить до тієї ж віртуальної мережі, що і сам кадр (можуть співпадати VID кадру і VID порту або VID кадру і PVID порту), то такий кадр може бути переданим і канальний рівень переходить у стан «Просування кадру». Якщо ж переданий кадр належить до віртуальної мережі, з якою вихідний порт ніяк не пов'язаний (VID кадру не відповідає PVID/VID порту), то кадр не може бути переданий і відкидається (стан «Відкидання кадру»). Канальний рівень повертається в початковий стан. Після того, як кадри усередині комутатора передані на вихідний порт, їх подальше перетворення залежить від типу вихідного порту: Tagged або Untagged, що визначається в стані «Аналіз типу вихідного порту»). Якщо вихідний порт визначений як Tagged Port, то витічний трафік створюватиметься кадрами типу Tagged з інформацією про приналежність до віртуальної мережі (стан «Передача кадру»). Отже, вихідний порт не міняє типу кадрів, залишаючи їх такими ж, якими вони були усередині комутатора. Якщо ж вихідний порт комутатора визначений як Untagged Port, то усі витічні кадри перетворяться до типу Untagged (стан «Перетворення кадру»), тобто з них видаляється додаткова інформація про приналежність до віртуальної мережі, після чого також виконується передача даних (стан «Передача кадру»).

2.3.5. Тестування програмної моделі VLAN

Механізм групування портів комутатора (режим 1). Кожен порт комутатора приписується до тієї або іншої віртуальної мережі. Якщо до

порту, якому призначена приналежність до певної віртуальної мережі, наприклад до VLAN1, підключити робочу станцію, то вона автоматично належатиме мережі VLAN1. За умови використання технології групування портів один і той же порт може бути одночасно приписаний до декількох віртуальних мереж, що дозволяє реалізовувати ресурси, які розподіляються між користувачами різних віртуальних мереж.

Приклад 1. Організувати VLAN на основі трьох комутаторів за допомогою групування портів. Кількість портів першого комутатора 5, другого 8, третього 12; робочі станції мають бути розподілені по трьох віртуальних локальних мережах. У меню групування портів вводимо дані, які показані на рис. 2.23. Кінцевий розподіл портів комутатора по трьох віртуальних мережах показаний на рис. 2.24. Отриманий результат побудови віртуальної локальної мережі продемонстрований на рис. 2.25.

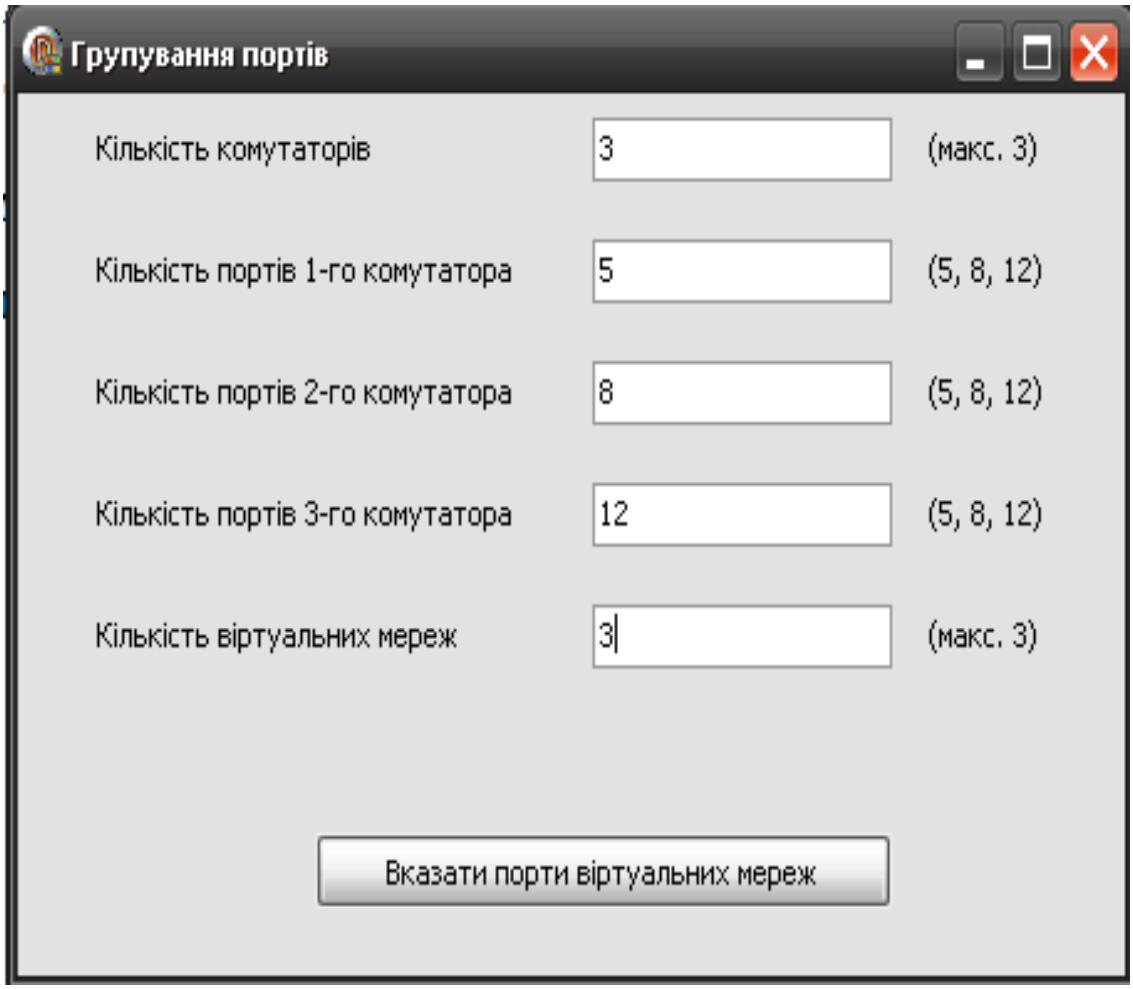

Рис. 2.23. Введення параметрів моделювання VLAN (режим 1)

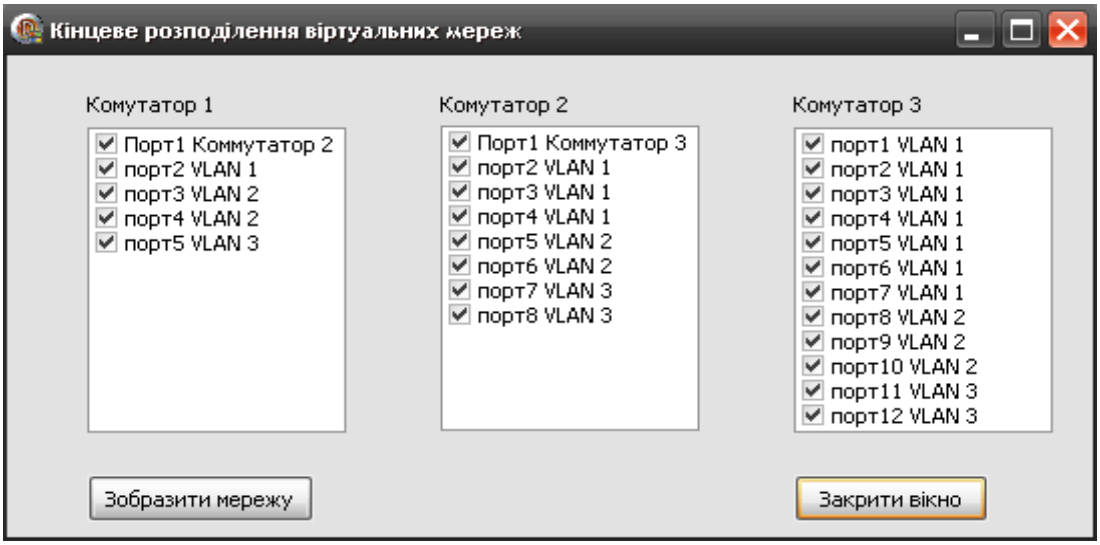

Рис. 2.24. Кінцевий розподіл портів комутатора за VLAN (режим 1)

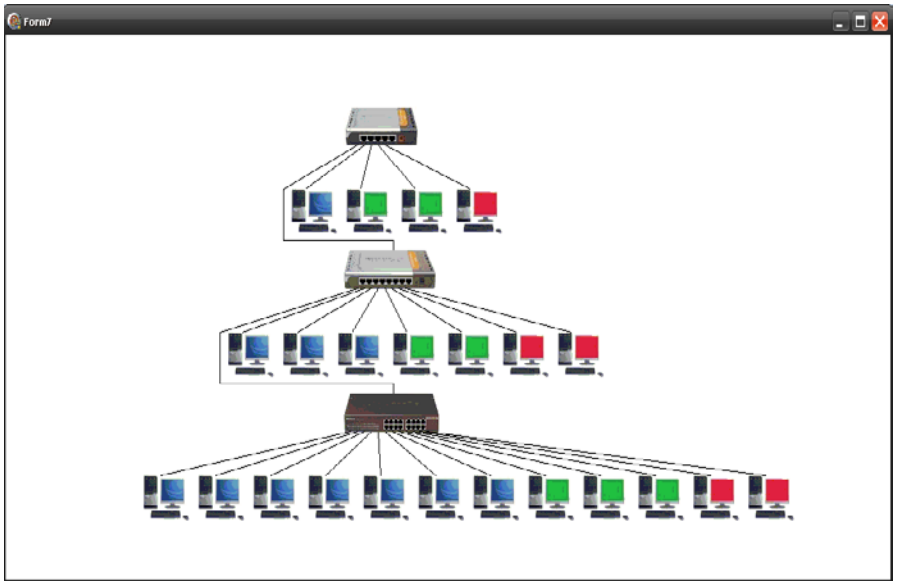

Рис. 2.25. Результат моделювання (режим 1):
VLAN1 – синій колір; VLAN2 – зелений колір; VLAN3 – червоний колір

Для оцінки правильності роботи моделі необхідно порівняти вхідні параметри, які були задані на рис. 2.23 (три VLAN, три комутатори: п'ятипортовий, восьмипортовий та дванадцятипортовий), із результатом моделювання, який наведений на рис. 2.25. Одержаний результат моделювання співпадає з вхідними параметрами моделі.

Механізм групування MAC-адрес (режим 2). Групування MAC-адрес у віртуальну мережу на кожному комутаторі позбавляє від необхідності їх з'єднання через декілька портів. Проте такий спосіб вимагає виконання великої кількості операцій з маркування MAC-адрес вручну на кожному комутаторі мережі.

Приклад 2. Організувати VLAN на основі трьох комутаторів за допомогою групування MAC-адрес. Кількість портів першого комутатора 5, другого – 8, третього – 12, загальна кількість робочих станцій в мережі не повинна перевищувати двадцять три. Вони мають бути розподілені по трьох віртуальних локальних мережах. Для отримання структури мережі необхідно ввести вхідні параметри, які показані на рис. 2.26. У меню «Групування портів» додається пункт: «Кількість станцій в мережі». Кількість станцій має бути менше сумарної кількості портів комутаторів у VLAN на два. Розподіл MAC-адрес станцій по віртуальним мережам показаний на рис. 2.27, результат моделювання наведений на рис. 2.28.

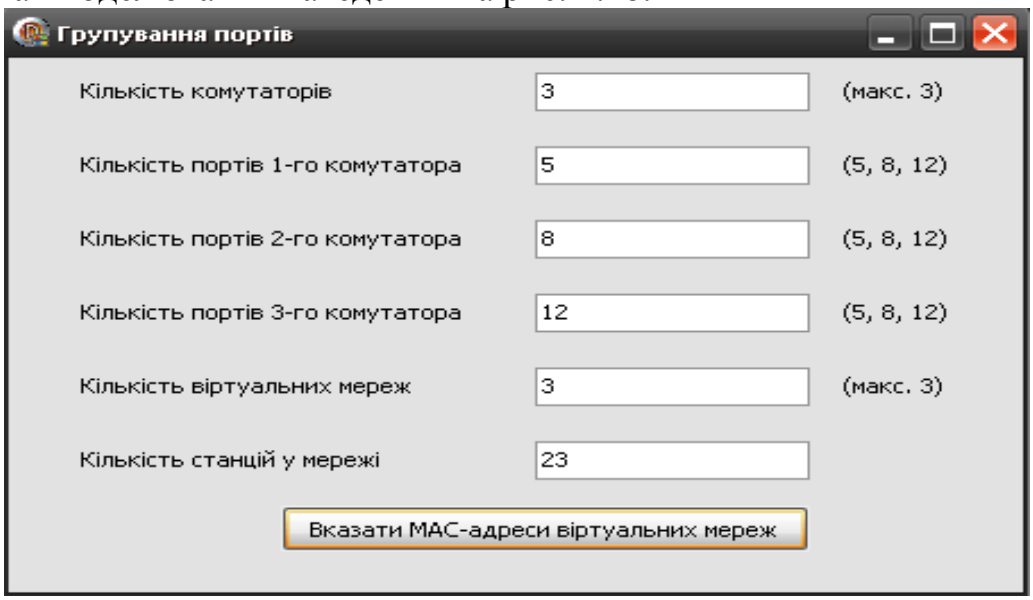

Рис. 2.26. Введення параметрів моделювання VLAN (режим 2)

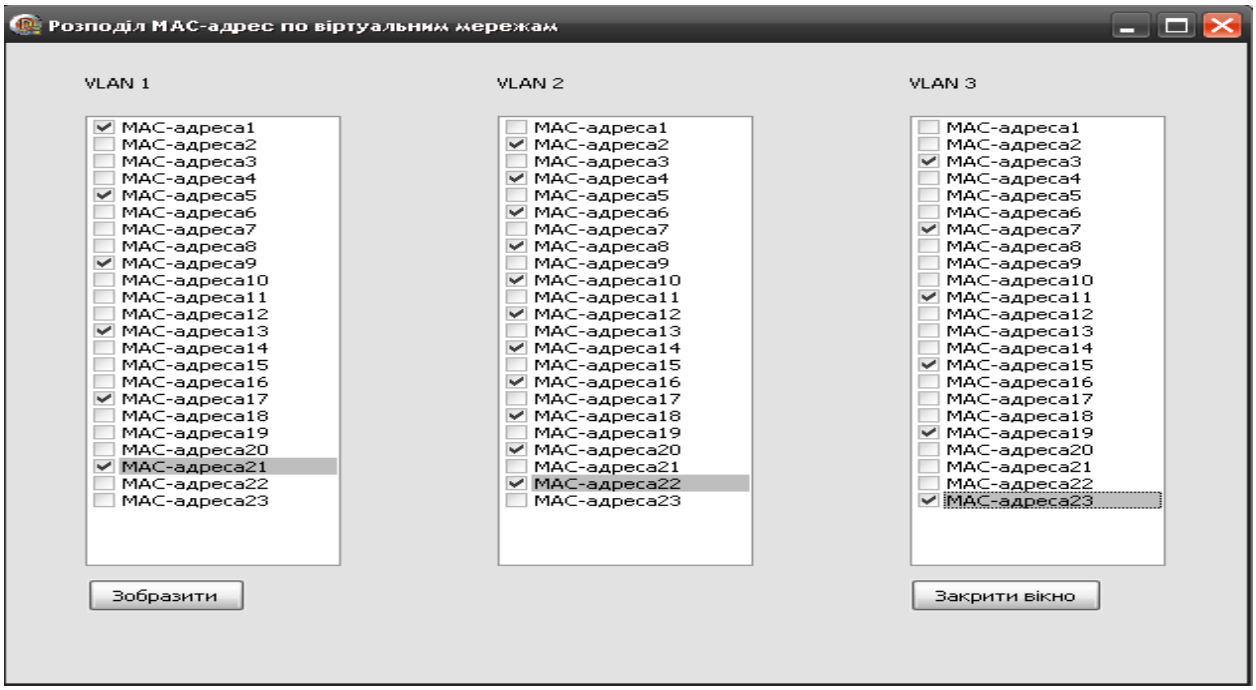

Рис. 2.27. Розподіл MAC-адрес по VLAN (режим 2)

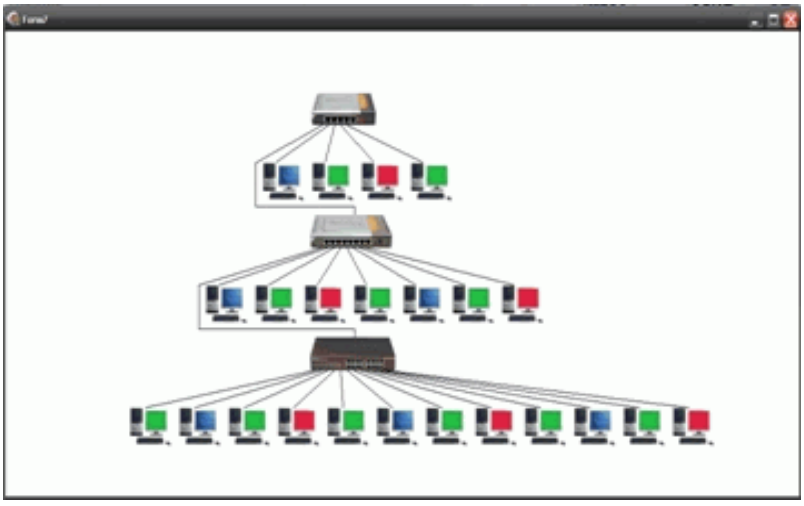

Рис. 2.28. Результат моделювання (режим 2):
VLAN1 – синій колір; VLAN2 – зелений колір; VLAN3 – червоний колір

Для оцінки правильності роботи моделі необхідно порівняти вхідні параметри, які були задані на рис. 2.26 (три VLAN, три комутатори: п'ятипортовий, восьмипортовий та дванадцятипортовий), з результатом моделювання, який наведений на рис. 2.28. Одержаний результат моделювання співпадає з вхідними параметрами моделі.

До VLAN1 належать станції з такими MAC-адресами (див. рис. 2.27): MAC-адреса1, MAC-адреса5, MAC-адреса9, MAC-адреса13, MAC-адреса17, MAC-адреса21; сумарна кількість станцій VLAN1 складає 6. На рис. 2.28 видно, що станцій, зображених синім кольором, дійсно шість.

До VLAN2 належать станції з такими MAC-адресами (див. рис. 2.27): MAC-адреса2, MAC-адреса4, MAC-адреса6, MAC-адреса8, MAC-адреса10, MAC-адреса 12, MAC-адреса14, MAC-адреса16, MAC-адреса18, MAC-адреса20, MAC-адреса22; сумарна кількість станцій VLAN2 складає 11. На рис. 2.28 видно, що станцій, зображених зеленим кольором, дійсно одинадцять.

До VLAN3 належать станції з такими MAC-адресами (див. рис. 2.27): MAC-адреса3, MAC-адреса7, MAC-адреса11, MAC-адреса15, MAC-адреса19, MAC-адреса23; сумарна кількість станцій VLAN3 складає 6. На рис. 2.28 видно, що станцій, зображених червоним кольором, дійсно шість. Сумарна кількість зображених станцій віртуальних локальних мереж відповідає введеним даним.

Використання стандарту IEEE 802.Q (режим 3). Для кожної віртуальної мережі необхідно: задати ім’я та ідентифікатор віртуальної мережі VID; визначити порти, які будуть відноситися до даної мережі; можливість роботи з різними типами кадрів (Tagged Frame або Untagged Frame); установити однакові ідентифікатори PVID портів, що входять у віртуальну мережу; задати для кожного вихідного порту тип (Tagged Port або Untagged Port).

Приклад 3. Необхідно побудувати модель віртуальної локальної мережі, для цього потрібно: задати ім'я віртуальної мережі, ідентифікатори VID, до VLAN1 віднести робочі станції, які підключені до портів комутатора, номери яких: один, сім, вісім; до VLAN2 віднести станції, що підключені до портів комутатора, номери яких: два, п'ять, шість; до VLAN3 віднести станції, які підключені до портів комутатора, номери яких: три, чотири. Пояснити отримані результати передачі кадру всередині однієї VLAN і передати кадр між різними VLAN. Приклад введення даних для моделювання локальної мережі стандарту IEEE 802.1Q показаний на рис. 2.29. Призначення портів до віртуальних мереж згідно з поставленим завданням показано на рис. 2.30. Відповідність введених даних отриманим, а саме імена віртуальних мереж та ідентифікатори VID, показана на рис. 2.31.

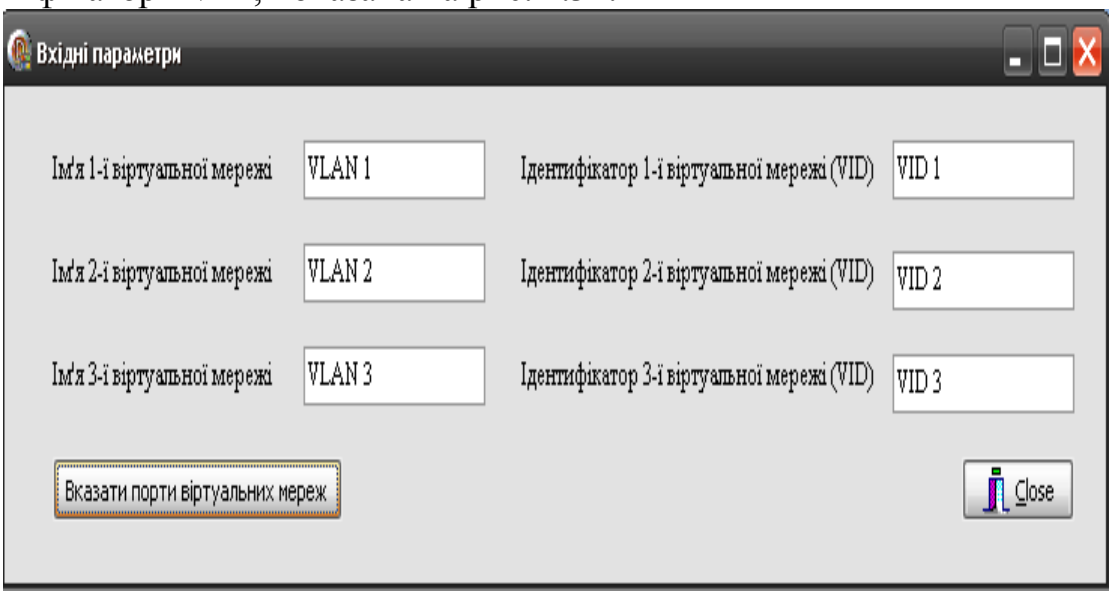

Рис. 2.29. Введення параметрів моделювання VLAN (режим 3)

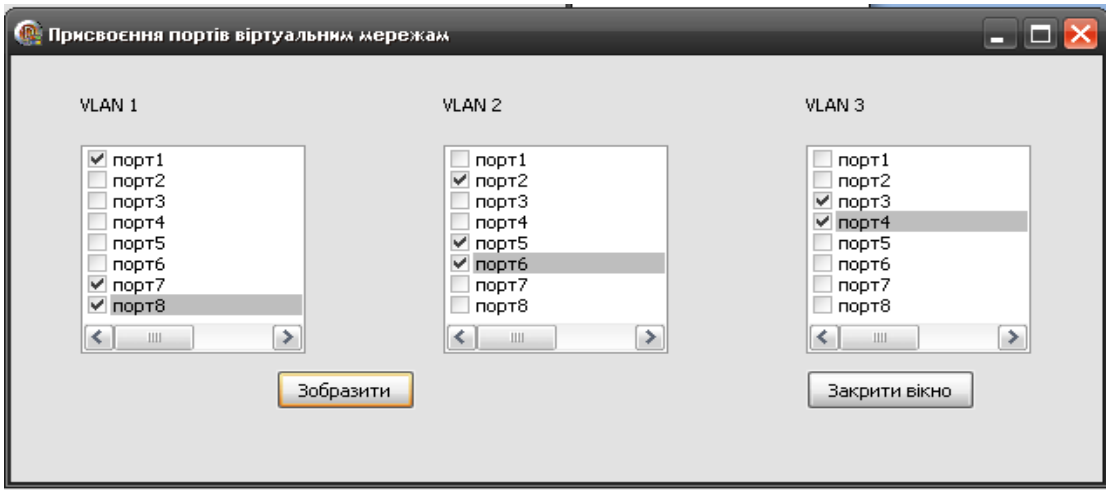

Рис. 2.30. Присвоєння портів VLAN (режим 3)

2.4.2. Процедура ініціалізації топології

Для автоматичного визначення початкової активної конфігурації дерева всі комутатори мережі після їх ініціалізації починають періодично обмінюватися пакетами BPDU (Bridge Protocol Data Unit) [32]. Пакети BPDU розміщаються в полі даних кадрів канального рівня (кадрів Ethernet).

Існує два типи BPDU [32]: конфігураційний BPDU, тобто заявка на можливість стати кореневим комутатором, на підставі якої відбувається визначення активної конфігурації, і реконфігураційний BPDU, який надсилається комутатором, що виявив подію, яка вимагає проведення реконфігурації (відмова лінії зв'язку, відмова порту, зміна пріоритетів комутатора або портів).

Для того, щоб комутатори могли ідентифікувати себе та своїх ближніх і дальніх сусідів по мережі, кожен комутатор, що підтримує STA, має унікальний ідентифікатор, який складається з двох частин. Молодшу частину становить MAC-адреса комутатора, що має довжину 6 байтів. Старша частина, що має довжину 2 байти, є пріоритетом даного комутатора, і його може змінювати адміністратор мережі на свій розсуд. Порти всередині кожного комутатора також мають свої ідентифікатори. Ідентифікатор порту складається з 2 байтів, перший з яких (старший) може змінюватися адміністратором і є пріоритетом порту, а другий являє собою порядковий номер порту для даного комутатора (номери портів починаються з одиниці).

Hello BPDU містить достатньо інформації, щоб: вибрати кореневий комутатор; розрахувати найкоротший шлях від себе до кореневого комутатора; для кожного сегмента вибрати комутатор, найбільш «близький» до кореневого (назначений комутатор); для кожного некореневого комутатора вибрати кореневий порт (найбільш «близький» до кореневого комутатора); визначити та заблокувати всі порти, які не є частиною дерева.

Комутатор протягом інтервалу встановлення початкової конфігурації фіксує значення наступних внутрішніх змінних: *RI* (Root Identifier) - ідентифікатор кореневого комутатора, в початковий момент роботи алгоритму STA кожен комутатор присвоює цієї змінній свій власний ідентифікатор; $minRPC_i$ (min Root Path Cost) - найменше значення відстані до кореня, зустрічається в пакетах BPDU, прийнятих від кореневого комутатора по *i*-му порту; $minB_i$ і $minP_i$ - ідентифікатори комутатора та порту, від якого надійшов пакет, на підставі якого присвоєно значення відстані до кореня змінної $minRPC_i$.

Робота алгоритму покривного дерева при ініціалізації топології складається з трьох етапів [29, 32-33], відповідно до цього розроблено формальну модель у вигляді діаграми станів комутатора, яку представлено на рис. 2.35.

Рис. 2.35. Формальна модель ініціалізації топології

Перший етап - визначення кореневого комутатора (root switch), від якого будується дерево. У початковому стані «Прослуховування» кожен комутатор вважає себе кореневим, генерує та передає своїм сусідам повідомлення Hello, в якому поміщає свій ідентифікатор в якості ідентифікатора кореневого комутатора. Як тільки комутатор отримує від сусіда повідомлення Hello, то стан змінюється на стан «Аналіз *RI*», в якому відбувається зрівняння пріоритету кореневого комутатора в повідомленні Hello з власним пріоритетом. Якщо пріоритети різні ($Pr_{\text{hello}} \neq Pr_{\text{власний}}$), комутатор переходить в стан «Визначення кореневого комутатора». У випадку, коли власний пріоритет менший, комутатор визначається кореневим, і відбувається повернення в стан «Прослуховування». У випадку, коли пріоритет в повідомленні Hello менший його власного, комутатор перестає вважати себе кореневим, припиняє генерувати свої повідомлення Hello, але починає ретранслювати повідомлення Hello, одержані від сусідів; кореневим стає комутатор, у якого значення пріоритету найменше. Якщо пріоритети однакові ($Pr_{\text{hello}} = Pr_{\text{власний}}$), то додатковий перехід в стан «Аналіз *MAC*-адрес», де відбувається зрівняння відповідних значень, а потім перехід в стан «Визначення кореневого комутатора», де виграє комутатор з меншим значенням *MAC*.

Другий етап - вибір кореневого порту (root port) для кожного комутатора. Якщо комутатор некореневий, то стан діаграми змінюється на

стан «Розрахунок *RPC* для кожного порту», для кожного порту його відстань до кореневого комутатора дорівнюватиме сумі *RPC* (Root Path Cost) всіх сегментів шляху до нього. У випадку, коли кореневий порт не визначений та одержані різні значення *RPC*, відбувається перехід в стан «Визначення кореневого порту», їм стає порт, найближчий до кореневого комутатора (з найменшим значенням *RPC*), і відбувається повернення в стан «Прослуховування». У випадку, коли кореневий порт не визначений та одержані однакові значення *RPC*, відбувається додатковий перехід в стан «Аналіз ідентифікатора», а потім перехід в стан «Визначення кореневого порту», де вибирається той порт, ідентифікатор якого менше.

Третій етап - вибір назначеного порту (designated port) і назначеного комутатору (designated switch) для кожного сегмента мережі. Якщо вже визначений кореневий порт у комутатора, то стан діаграми змінюється на стан «Аналіз приналежності порту». Коли порт комутатора належить сегменту, відбувається повторний перехід в стан «Розрахунок *RPC* для кожного порту», де для кожного порту (крім кореневого) виконується порівняння *RPC*. У випадку, коли існує мінімальне значення серед визначених RPC_i, стан змінюється на стан «Визначення назначеного порту і назначеного комутатора», де назначеним портом (він єдиний) в сегменті становиться порт з найменшим *RPC*, відповідний комутатор іменується назначеним комутатором для даного сегмента мережі; перехід в стан «Прослуховування». У випадку, коли є декілька портів з однаковою найкоротшою відстанню до кореневого комутатора, то відбувається додатковий перехід в стан «Аналіз ідентифікатора», а потім перехід вже в стан «Визначення назначеного порту і назначеного комутатора», де вибирається порт з найменшим ідентифікатором у якості назначеного порту сегменту. В іншому випадку (некореневий порт та всі неназначені порти) відбувається перехід в стан «Блокування порту», після завершення якого повернення в початковий стан «Прослуховування».

2.4.3. Процедура зміни топології

У тому випадку, коли має місце відмова, то необхідно встановити назначений порт (це відбудеться у всіх комутаторах, які постраждали від відмови). Після виконання цієї процедури, яка аналогічна описаній процедурі початкового вибору кореневого та назначених портів, будуть визначені нові значення кореневих портів, назначених портів і назначених комутаторів. Якщо ж відмовив кореневий комутатор, то буде обраний новий [29, 32-33].

На додаток до процедури реакції на відмову, визначається і реакція комутатора на примусову зміну адміністратором статусу порту з заблокованого на активний. При цьому посилається реконфігураційний BPDU у напрямку кореневого комутатора. Усі назначені комутатори, що знаходяться на шляху між даним портом і кореневим комутатором, відзначають подію зміни та передають повідомлення далі через свої кореневі

порти кореневому комутатору. При цьому всі комутатори, на які впливає така зміна, стають повідомлені про неї та роблять переоцінку назначених портів.

Розроблено формальну модель у вигляді діаграми станів комутатора за алгоритмом покривного дерева при зміні топології, що представлено на рис. 2.36.

Рис. 2.36. Формальна модель зміни топології

Більшу частину часу комутатор знаходиться в початковому стані «Прослуховування». Якщо це кореневий комутатор, то його стан змінюється на «Генерування конфігураційного BPDU», по завершенні процесу відбувається повернення в стан «Прослуховування». Якщо це некореневий комутатор, то перехід в стан «Прийом BPDU на кореневий порт», після завершення якого настає стан «Встановлення таймера віку повідомлення», де таймер встановлюється в початковий стан, та перебування в стані «Передача BPDU через назначений порт». У тому випадку, коли це не останній назначений порт, здійснюється перехід в стан «Аналіз таймера віку повідомлення» і якщо скінчене значення таймера (який-небудь назначений комутатор, його порт або лінія зв'язку відмовляють), то перехід в стан «Встановлення кореневого порту, назначених порту і комутатора» (це відбудеться у всіх комутаторах, які постраждали від відмови), по завершенні процесу повернення в стан «Прослуховування». У тому випадку, коли це останній назначений порт у сегменті мережі, здійснюється перехід в стан «Прослуховування».