

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОТОКОЛУ ДИСТАНЦІЙНО-ВЕКТОРНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ДЛЯ СТЕКА ПРОТОКОЛІВ E6 У ВИГЛЯДІ РОЗФАРБОВАНИХ СІТОК ПЕТРИ****МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТОКОЛА ДИСТАНЦИОННО-ВЕКТОРНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ДЛЯ СТЕКА ПРОТОКОЛОВ E6 В ВИДЕ РАСКРАШЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ****MODELLING OF DISTANCE-VECTOR ROUTING PROTOCOL FOR E6 PROTOCOL STACK BY COLOURED PETRI NETS**

**Анотація.** Розроблено протокол динамічної маршрутизації для мереж з перспективним стеком протоколів E6 рівня автономних систем та магістралей BGP-E6. Надано специфікації базових алгоритмів у вигляді розфарбованих сітей Петрі. Моделювання процесів заповнення таблиць маршрутизації доводить коректність роботи протоколу.

**Аннотация.** Разработан протокол динамической маршрутизации для сетей с перспективным стеком протоколов E6 уровня автономных систем и магистралей BGP-E6. Представлены спецификации базовых алгоритмов в виде раскрашенных сетей Петри. Моделирование процессов заполнения таблиц маршрутизации доказывает корректность работы протокола.

**Summary.** BGP-E6 dynamic routing protocol is developed for autonomous systems and back-bone networks based on innovative E6 protocol stack. Base algorithms specifications are presented in a form of Colored Petri Nets. Simulation of the model proves the protocol's correctness.

Актуальними на сьогодні є проблеми підвищення продуктивності мереж зв'язку та збільшення простору адрес [1]. Стек протоколів E6, який запропонований в 2007 році у [2], та зареєстровано в Державному реєстрі патентів України, як корисну модель № 35773, повинен вирішити одночасно обидві проблеми. Підхід до розробки та втілення стека E6 наведено у [3]: запропоновано схему адресації, концепцію комутаторів-маршрутизаторів тощо.

Можливість втілення стека протоколів E6 полягає в тому, що засоби протоколу Ethernet (детальний опис цієї технології наведено у стандартах IEEE 802.x), тобто протоколу другого рівня, можуть реалізувати повноцінно більшість функцій сучасних протоколів IP, UDP та TCP, тобто протоколів мережного та транспортного рівнів, завдяки поширенню Ethernet та суттєвому підвищенню надійності сучасних каналів зв'язку. Мережні адреси стека протоколів E6 мають замінити собою MAC адреси протоколу Ethernet, а схема адресації E6 дозволяє використання цих адрес як адрес у глобальній мережі. Таким чином, E6 одночасно збільшує простір мережних адрес в  $2^{16}$ , порівняно з IPv4, та зменшує службове навантаження кожного пакета. Також E6 стає альтернативою технологіям MPLS та PBB. MPLS (RFC 3031) та PBB (IEEE 802.1ah-2008) створюють додаткові субрівні, що фактично реалізують додаткову адресацію для використання у транспортній мережі – це дійсно підвищує ефективність комутації пакетів та дозволяє інтегрувати трафік різних типів. Але E6, на відміну від вищезазначених протоколів, передбачає інтеграцію функцій декількох рівнів в один – це дозволяє зменшити службове навантаження пакетів та зменшити час оброблення пакетів у мережному обладнанні.

Проте у літературі не описана розробка алгоритмів маршрутизації для стека протоколів E6 і не розв'язана задача їх подальшого втілення та впровадження у мережному обладнанні.

Метою цієї статті є розробка специфікації протоколу E6-BGP у вигляді розфарбованої ієрархічної сіті Петрі для використання у стеку протоколів E6 як протоколу динамічної маршрутизації у транспортних мережах.

**1. Розробка специфікації дистанційно-векторного протоколу маршрутизації для стека протоколів E6.** Еволюційний підхід до впровадження нового стека протоколів E6 передбачає на першому етапі адаптацію окремих існуючих протоколів маршрутизації, що найчастіше використовуються у сучасному мережному обладнанні, – таким чином можливо зменшити витрати ресурсів та зробити легшим перехід на новий стек протоколів. Дистанційно-векторні алгоритми маршрутизації і протоколи на їхній основі, мають відомі переваги на відміну від інших підходів: локалізація обміну маршрутною інформацією з множиною безпосередніх сусідів, передбачуване та

стабільне навантаження на мережу, а також наявність математичних доказів сходження. Найпоширенішим дистанційно-векторним протоколом маршрутизації у транспортних мережах є BGP [4]. BGP є відкритим протоколом, що дозволяє його детальне вивчення, а коректність його процедур обміну повідомленнями доведена у [5] – тому оберемо його як прототип для протоколу BGP-E6 для нового стека.

Як засіб моделювання та мови специфікації оберемо розфарбовані ієрархічні сіті Петрі (CPN), які ефективно використовуються як мова формальної специфікації протоколів, а також як засіб верифікації та оцінки ефективності протоколів [6]; CPN також є повністю алгоритмічною системою, а граф сіті Петрі забезпечує наочне візуальне відображення асинхронних паралельних процесів. Система моделювання CPNTools [7], що використовує формалізм CPN та має вбудовані можливості графічного відображення сіті, є ефективним засобом комп'ютерного моделювання телекомунікаційних мереж та інформаційних систем [8]. Загально прийнята система імітаційного моделювання NS2, використовує для описування мереж і систем мови C++/OTCL, а також бібліотеки існуючих протоколів та обладнання [9]; але на відміну від CPNTools, для графічного відображення мережі NS потребує застосування зовнішніх модулів та не дозволяє симуляції у реальному часі. Тому будемо використовувати CPNTools як середовище побудови моделей.

Окрім специфікації базового алгоритму заповнення таблиць маршрутизації, побудуємо також модель маршрутизатора та мережі, що дозволить саме реалізувати роботу протоколу маршрутизації BGP-E6.

**2. Моделювання маршрутизатора BGP-E6.** Складемо модель маршрутизатора з уніфікованих компонентів, у зв'язку з її складністю та з метою подальшого використання як базової. Об'єднаємо головною сторінкою моделі маршрутизатора (рис. 1) переходи “MsgRx”, “MsgTx”, що є точками входу до компонентів-моделей формування вхідної та розподілення вихідної черг повідомлень; перехід “RT\_Processor” – саме компонент обробки таблиць маршрутизації; позиції-порти “incoming 1” - “incoming 4” – вхідних інтерфейсів і “outgoing 1”- “outgoing 4” – вихідних інтерфейсів; позиції-порти “rtable” та “RT2” для конфігурації і виводу ідентифікатора та таблиці маршрутизації; сокети вхідної та вихідної черг у вигляді списку – “incoming queue” і “outgoing queue” відповідно. У контексті роботи компонент RT\_Processor представляє найбільший інтерес.

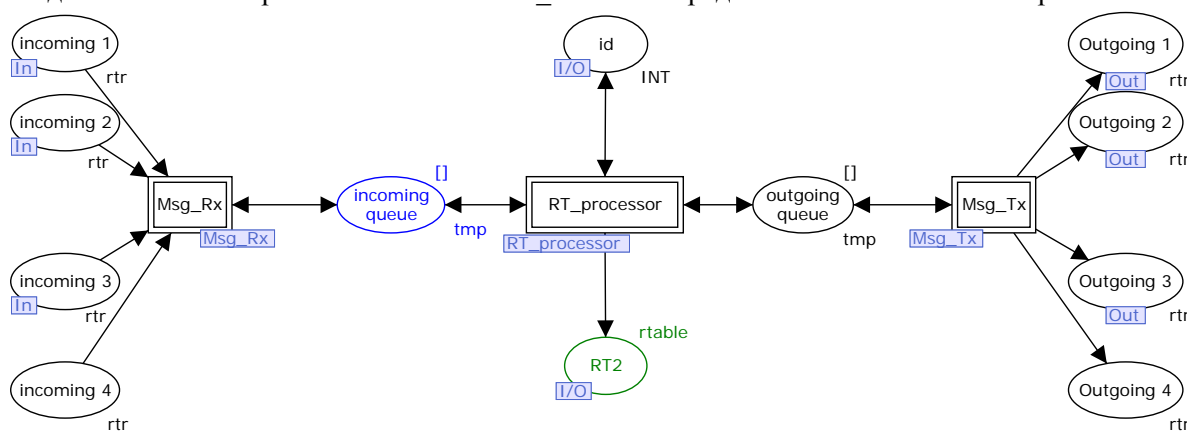


Рисунок 1 – Модель маршрутизатора

**2.1. Розробка моделі, що формує таблицю маршрутизації.** Модель, що формує таблицю маршрутизації – компонент RT\_Processor – також побудуємо з декількох компонентів, зв'язок між якими наведено на рис. 2. “RT and Msg Cmp” (Routing Table and Message Comparator) моделює алгоритм прийняття рішення про додання маршруту до таблиці, відправлення анонсу маршруту, сортування таблиці за метриками альтернативних маршрутів. Крім основного компонента, RT\_Processor повинен буде включати також допоміжні: “Initial announce” – буде виконувати анонс автономних мереж, що підтримує маршрутизатор, “Finalize chk” – буде дозволяти завжди мати таблицю у відсортованому вигляді після завершення роботи алгоритму прийняття рішення. Значення фішок у позиціях-сокетах “finalize flag”, “counter” – будуть визначати поточний стан алгоритму прийняття рішення; наявність фішки значенням «1» у позиції-сокеті “ready flag” буде «прапором» готовності до прийому маршрутних повідомлень. Анонси нових маршрутів будуть прийматися через позицію-порт “incoming” та передаються через “send out”.

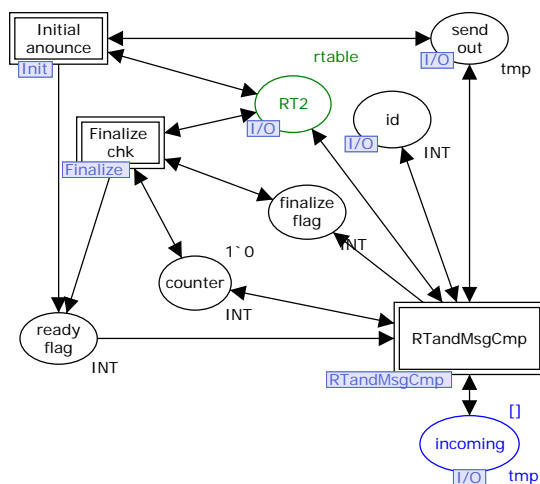


Рисунок 2 – Модель, що формує таблицю маршрутизації

**2.2. Розробка моделі алгоритму прийняття рішення.** Визначимо алгоритм прийняття рішення про додання запису до таблиці маршрутизації, аналогічний до алгоритму протоколу BGP [4,5] - він оперуватиме адресами E6 та враховуватиме наступні фактори: мережна адреса та маска, ідентифікатор маршрутизатора, номер порту, з якого прийшло повідомлення, метрика маршруту. Визначимо формат запису таблиці маршрутизації та формат повідомлення протоколу на основі переліку вищенаведених факторів, табл. 1.

Таблиця 1 – Формат повідомлення та запису таблиці маршрутизатора E6-BGP у термінах змінних CPN моделі

colset rtr =record nw:nwt * port:INT * metric:INT * neighbour:INT * id:INT timed ;	Запис таблиці маршрутизації
colset msg=record nw:nwt * port:INT * metric:INT * id:INT timed;	Маршрутне повідомлення
Опис змінних, що використані у повідомленні про маршрут та запису таблиці	
nw:nwt	Адреса мережі із маскою (описано нижче)
port:INT	Порт маршрутизатора, через який досяжна така мережа
metric:INT	Метрика маршруту
neighbour:INT	Ознака сусідства маршрутизаторів
id:INT	Ідентифікатор автономної мережі
colset nwt=product e6*mask timed;	Об'єднання E6 адреси мережі і маски
colset e6=product INT * INT * INT * INT * INT * INT timed;	E6 адреса, що складається з 6 октетів
colset mask=INT;	Маска мережі, що визначає скільки саме бітів є адресою мережі, а скільки адресою хоста у мережі
INT	Ціле число

Модель алгоритму наведемо на рис. 3. Структура моделі буде забезпечувати циклічний перегляд таблиці та порівняння існуючих записів з поточним записом у черзі.

За наявності «прапора» “ready flag” та вхідного маршрутного повідомлення у позиції-порту “incoming” відбувається перевірка виключної ситуації отримання повідомлення про власні мережі та починається перевірка умов, що призводять до рішення про додання маршруту:

а) Відсутність запису про мережу – переходи “put chk1” та “put chk5”: спрацьовування першого призводить до подальшого перегляду таблиці, другого-до додання запису, якщо таблиця цілком перевірена;

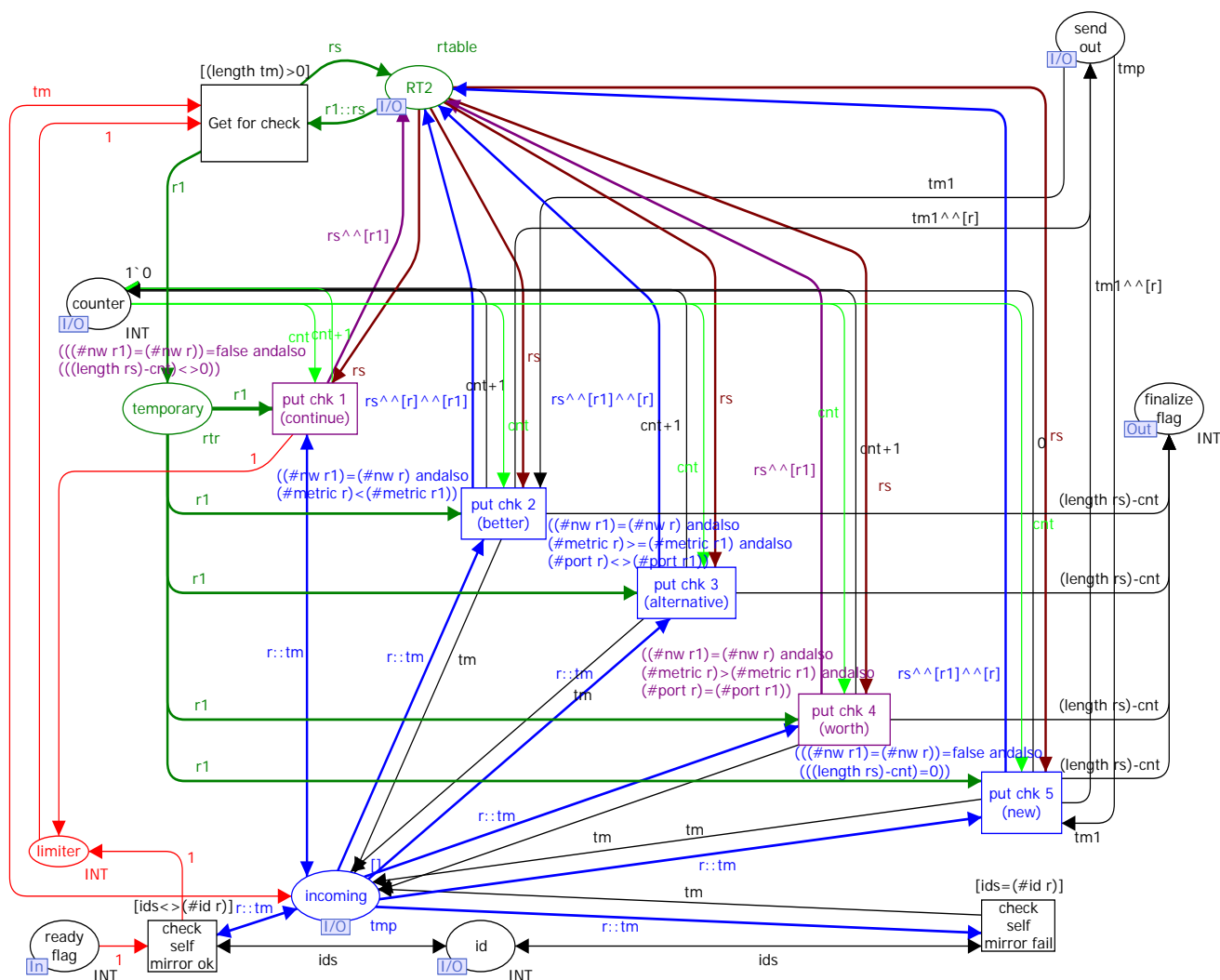


Рисунок 3 – Модель алгоритму прийняття рішення

- б) Наявність мережі з більшою метрикою – перехід “put chk2”, додає новий запис вище у списку;
- в) Наявність мережі з меншою або рівною метрикою, але на іншому порту (альтернативний маршрут) – перехід “put chk3”, додає новий запис нижче у списку;
- г) За наявності ідентичного маршруту на ідентичному порту – перехід “put chk4”, повідомлення розглядається як “Keep Alive”, і додання запису не відбувається.

Модульна структура запропонованої моделі дозволяє при подальшому удосконаленні протоколу BGP-EB додати більше характеристик маршруту і відповідних критеріїв прийняття рішення.

На початку функціонування моделі відбувається анонс власних мереж, що реалізований моделлю, наведеною на рис. 4.

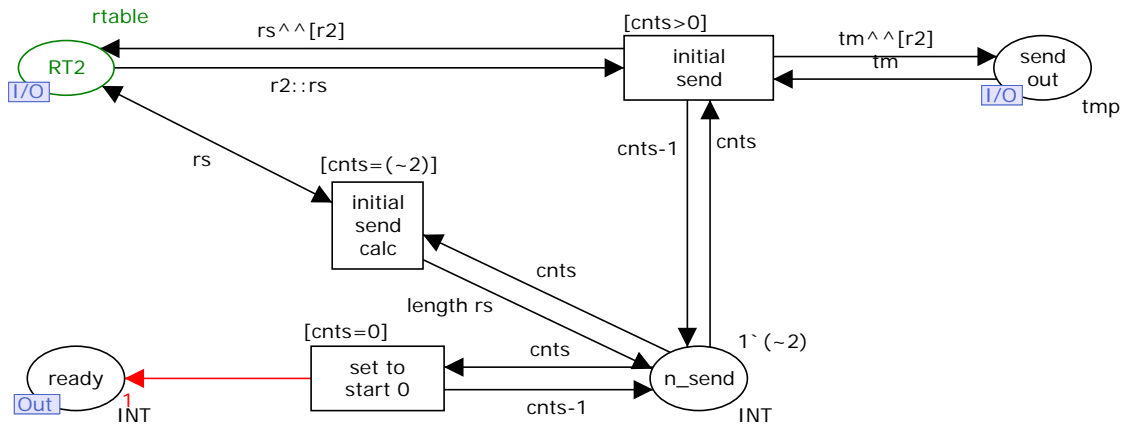


Рисунок 4 – Модель алгоритму анонсу мереж

**2.3. Розробка моделей, що формують чергу прийнятих маршрутизатором повідомлень та відсилають повідомлення про маршрути.** Побудуємо модель, що формує чергу входних повідомлень, рис.5 а; вона буде вилучати з повідомлення інформацію, яку буде розглянуто алгоритмом прийняття рішення, а також буде встановлювати ознаку сусідства та буде додавати номер порту, з якого отримує повідомлення. Аналогічно побудуємо модель, що формує повідомлення від маршрутизатора, рис. 5 б; вона буде робити вибірку з вихідної черги, сформованої RT\_Processor, буде збільшувати метрику запису на 1 та буде анонсувати маршрут на всі порти крім того, з якого він прийшов.

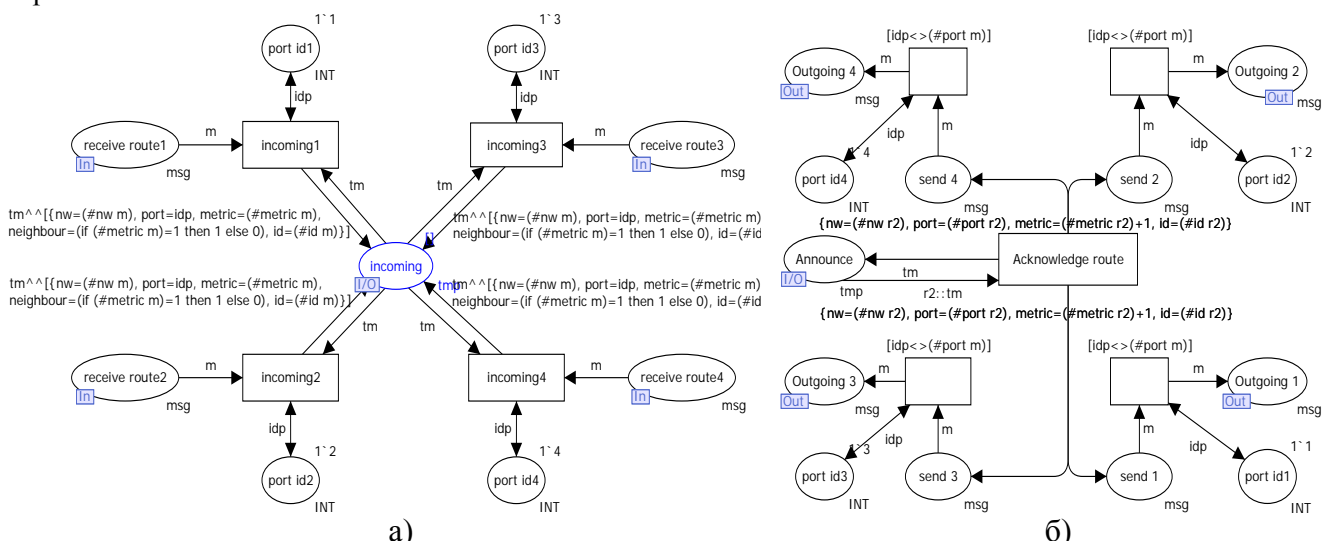


Рисунок 5 – Моделі, що формують черги входних (а) і вихідних (б) повідомлень BGP-E6

**3. Моделювання мережі на базі маршрутизаторів BGP-E6.** З метою опису та верифікації протоколу BGP-E6 побудуємо модель абстрактної мережі на базі чотирьох маршрутизаторів, рис. 6,б.

Переходи “router 1” – “router 4” є точками входу до компонентів-моделей маршрутизаторів; позиції “1r2-2r1”, “1r2-2r1” тощо є сокетами, що з’єднують між собою маршрутизатори; позиції “id1”-“id4” містять ідентифікаційні номери маршрутизаторів; позиції “rt1”-“rt4” містять адміністративно задані записи, що відповідають автономним мережам, які обслуговує маршрутизатор, та під час симуляції моделі заповнюються динамічними таблицями маршрутизації у вигляді списків.

Перелік компонентів, з яких складається модель, наведемо на рис. 6, а – ієрархія за якою вони об’єднані і зв’язки, що запропоновані, забезпечують роботу протоколу BGP-E6.

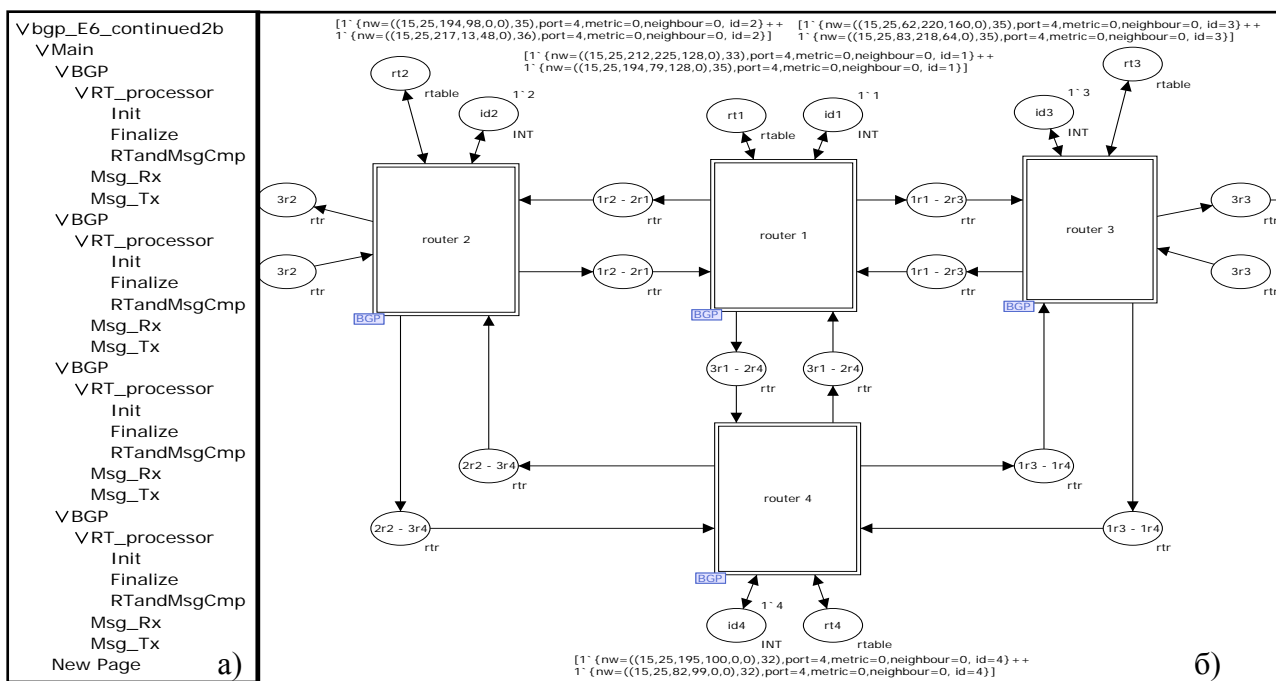


Рисунок 6 – Ієрархічна структура моделі (а) і модель мережі (б)

**4. Верифікація роботи моделі.** Коректність побудови таблиць маршрутизації протоколом динамічної маршрутизації оцінюється за наявністю у таблицях записів, що відповідають усім можливим зв'язкам у мережі, також за відповідністю метрик – в конкретній моделі метрика дорівнює кількості вузлів від маршрутизатора до мережі призначення. Система CPNTools дозволяє провести симуляцію моделі, тобто відтворити поведінку системи, що моделюється, та зібрати дані, які будуть достатніми для налаштування моделі і подальшої верифікації. Наведемо приклад таблиці маршрутизації маршрутизатора 4, що була відтворена моделлю, табл. 2. Аналогічно отримаємо таблиці маршрутизації для останніх маршрутизаторів, які разом повністю відповідають структурі мережі.

Таблиця 2 – Таблиця маршрутизації маршрутизатора з ідентифікатором 4

Записи таблиці	Опис
{nw=((15,25,195,100,0,0),32),port=4,metric=0,neighbour=0,id=4},	Власна мережа
{nw=((15,25,82,99,0,0),32),port=4,metric=0,neighbour=0,id=4},	Власна мережа
{nw=((15,25,212,225,128,0),33),port=2,metric=1,neighbour=1,id=1},	Мережа 1
{nw=((15,25,212,225,128,0),33),port=3,metric=2,neighbour=0,id=1},	Мережа 1
{nw=((15,25,212,225,128,0),33),port=1,metric=2,neighbour=0,id=1},	Мережа 1
{nw=((15,25,194,79,128,0),35),port=2,metric=1,neighbour=1,id=1},	Мережа 1
{nw=((15,25,194,79,128,0),35),port=3,metric=2,neighbour=0,id=1},	Мережа 1
{nw=((15,25,194,79,128,0),35),port=1,metric=2,neighbour=0,id=1},	Мережа 1
{nw=((15,25,217,13,48,0),36),port=3,metric=1,neighbour=1,id=2},	Мережа 2
{nw=((15,25,217,13,48,0),36),port=2,metric=2,neighbour=0,id=2},	Мережа 2
{nw=((15,25,217,13,48,0),36),port=1,metric=3,neighbour=0,id=2},	Мережа 2
{nw=((15,25,194,98,0,0),35),port=3,metric=1,neighbour=1,id=2},	Мережа 2
{nw=((15,25,194,98,0,0),35),port=2,metric=2,neighbour=0,id=2},	Мережа 2
{nw=((15,25,194,98,0,0),35),port=1,metric=3,neighbour=0,id=2},	Мережа 2
{nw=((15,25,62,220,160,0),35),port=1,metric=1,neighbour=1,id=3},	Мережа 3
{nw=((15,25,62,220,160,0),35),port=2,metric=2,neighbour=0,id=3},	Мережа 3
{nw=((15,25,62,220,160,0),35),port=3,metric=3,neighbour=0,id=3},	Мережа 3
{nw=((15,25,83,218,64,0),35),port=1,metric=1,neighbour=1,id=3},	Мережа 3
{nw=((15,25,83,218,64,0),35),port=2,metric=2,neighbour=0,id=3},	Мережа 3
{nw=((15,25,83,218,64,0),35),port=3,metric=3,neighbour=0,id=3}	Мережа 3

При побудові таблиць для такої мережі за алгоритмом Белмана-Форда, базового для дистанційно-векторних протоколів, отримуємо такі ж самі результати, що підтверджує коректність побудови і роботи моделі. Для подальших досліджень планується інтегрувати до моделі також алгоритми формування динамічних метрик з урахуванням мережних характеристик і показників якості обслуговування.

Таким чином, у роботі створено специфікацію протоколу дистанційно-векторної динамічної маршрутизації BGP-E6 і доведено її працездатність. Оскільки модель повністю побудовано у вигляді сітей Петрі з мінімальним використанням мови ML, вона є формальною математичною специфікацією протоколу BGP-E6, тому може бути використана у документації для розробників ПЗ а також при розробці мережного обладнання. Модель протоколу може бути використана для подальшого вивчення стека E6, інтегруючи її з моделями мереж та генераторами трафіка.

### **Література**

1. *Huston G.* IPv4 Address Report / Huston G. // <http://www.potaroo.net/tools/ipv4/index.html>. – 2009.
2. *Воробиенко П.П.* Всемирная сеть Ethernet? / Воробиенко П.П., Зайцев Д.А., Нечипорук О.Л. // Зв'язок. – 2007. – № 5. – С. 14-19.
3. *Guljaiev K.D.* Simulating E6 Protocol Networks using CPN Tools / Guljaiev K.D., Zaitsev D.A., Litvin D.A., Radchenko E.V. // Proc. of International Conference on IT Promotion in Asia. – August 22-26, 2008, Tashkent (Uzbekistan). – P. 203-208.
4. *Lougheed K.* A Border Gateway Protocol (BGP) / K. Lougheed, Y. Rekhter // RFC 1163. – 1990.
5. *Zaitsev D.A.* Verification of Protocol BGP via Decomposition of Petri Net Model into Functional Subnets / Zaitsev D.A. // Proceedings of the Design, Analysis, and Simulation of Distributed Systems Symposium, – April 2-8 2005, San Diego, USA. – P. 72-78.
6. *Зайцев Д.А.* Исследование эффективности технологии MPLS с помощью раскрашенных сетей Петри / Зайцев Д.А., Сакун А.Л. // Зв'язок. – 2006. – № 5. – С. 49-55.
7. *Jensen K.* Colored Petri Nets – Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. / Jensen K. – Springer-Verlag. – 1997. – Vol. 1-3. – 673 p.
8. [http://www.daimi.au.dk/CPnets/intro/why\\_cpn.html](http://www.daimi.au.dk/CPnets/intro/why_cpn.html)
9. *Зайцев Д.А.* Оценка производительности сетей с коммутацией меток в системе NS / Зайцев Д.А., Литвін Д.О. // Збірник Наукових праць ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2007. – №1. – С. 25-31.