

РЕЕНТЕРАБЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ RIP ПРОТОКОЛА В ФОРМЕ РАСКРАШЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Решена задача автоматизации оценки функциональных характеристик IP-сетей с динамической маршрутизацией на основе протокола RIP в процессе проектирования сетей. Предложен метод построения реентерабельных моделей, который обеспечивает повторное использование моделей, ориентированных на технологии и инвариантных к структуре сети. Для проведения вычислительных экспериментов и получения числовых оценок параметров качества обслуживания IP-сети к моделям терминальных сетей добавлены измерительные фрагменты в параметрическом виде. Проведен сравнительный анализ параметров качества обслуживания IP-сетей при слабой и средней нагрузке в условиях нормального режима работы и при временном отключении портов маршрутизаторов. Получена оценка полезной пропускной способности сети при разных видах нагрузки и условиях функционирования сети. В результате проведенных экспериментов выявлено, что значения параметров качества обслуживания исследуемой сети существенно не изменяются при нормальном режиме работы и временном отключении портов маршрутизаторов, изменение значений дисперсии является индикатором проблем в сети. Автоматизация оценки характеристик способствует сокращению сроков проектирования сетей.

Ключевые слова: протокол динамической маршрутизации, протокол RIP, сеть IP, реентерабельная модель, раскрашенная сеть Петри, среднее время доставки пакета.

НОМЕНКЛАТУРА

σ – среднеквадратическое отклонение;
CPN – Colored Petri Nets;
IP – Internet Protocol;
ML – Markup Language;
MTU – Model Time Unit;
RIP – Routing Information Protocol;
QoS – Quality of Service;
Traf – пропускная способность сети;
TrIN – количество полученных пакетов;
ВДП – время доставки пакета;
ТС – терминальная сеть.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое распространение подходов управляемой моделью разработки дает ощутимые результаты лишь в случае адекватного выбора парадигмы моделирования. Стандарт языка UML, широко распространенного в разработке программного обеспечения продолжает вбирать в себя прогрессивные формализмы моделирования параллельных процессов. Так, например, диаграмма деятельности последнего стандарта языка UML включает элементы сетей Петри. Проектирование телекоммуникационных сетей требуют парадигм моделирования инвариантных к топологии (структурной схеме сети). Одной из таких парадигм является реентерабельная модель в форме раскрашенной сети Петри. Модель разрабатывается для определенной технологии, а параметры сети, такие как структурная схема, производительность оборудования и программного обеспечения загружаются в виде структур данных. Модель обеспечивает автоматизацию расчета функциональных характеристик сети непосредственно в процессе имитационного моделирования с помощью специальных измерительных фрагментов. Таким образом, скорость расчета с помощью имитационной модели приближается к скорости расчетов с помощью аналитических моделей, обеспечивая, как правило, большую точность оценок. Автоматизация расчета характеристик и повышение точ-

ности оценок способствуют сокращению сроков и повышению качества проектирования сетей.

В настоящей работе построена модель для IP-сети с динамической маршрутизацией на основе протокола RIP наиболее распространенной сетевой среды современных корпоративных сетей. Поскольку принципиальным для построения модели являются дистанционно-векторные процедуры RIP, модели могут быть модифицированы для использования других протоколов дистанционно-векторной маршрутизации, например BGP, являющимся основным протоколом взаимодействия автономных систем – ядра современного интернета.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть рассматривается метод построения реентерабельных моделей в форме раскрашенных сетей Петри. Представлены основные свойства протокола динамической маршрутизации RIP и параметры IP-сети.

Тогда задача автоматизации оценки функциональных характеристик сетей с динамической маршрутизацией в процессе проектирования сетей будет заключаться в построении реентерабельных моделей сети, ТС, маршрутизаторов, компонентов, реализующих протокол динамической маршрутизации, инвариантных отношению к топологии сети, топология является параметром модели, реализации повторной входимости компонентов и переключения тегов в соответствии с топологией, что способствует сокращению сроков проектирования сетей.

Измерительные фрагменты позволяют провести оценку пропускной способности сети, средних и других статистических моментов при разных видах нагрузки и условиях функционирования сети для всех или для отдельной ТС непосредственно в процессе моделирования.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Основные принципы моделирования телекоммуникационных сетей раскрашенными сетями Петри и оценки функциональных характеристик сетей непосредственно в процессе имитационного моделирования с помощью измерительных фрагментов изучены в [4]. Однако в

[4] представлені лише моделі со статическими таблицями комутації и маршрутизації. Моделирование дистанционно-векторных протоколов для сетей технологии E6 изучены в [7]. Дистанционно-векторные протоколы маршрутизации применяются как на периферии, например RIP [1, 2], так и в магистрале (ядре Интернет), например, BGP. Поэтому оценка характеристик сетей IP-RIP является актуальной [5], поскольку указанное сочетание протоколов является характерным для большинства корпоративных сетей в современном мире. Таким образом, задача проектирования IP-RIP сетей является широко распространенной.

Представленные в монографии [4] простые принципы построения моделей на основе прямого отображения структурной схемы сети вполне подходят для выполнения одноразовых работ по моделированию. Для массового решения однотипных задач моделирование сетей с одной и той же технологией и различными структурными схемами (топологией), параметрами оборудования и программного обеспечения требуется новая парадигма моделирования. Особенную актуальность задача приобретает в рамках управляемой моделью разработки [6]. В работах [3, 8] предложена новая парадигма моделирования телекоммуникационных сетей раскрашенными сетями Петри на основе реентерабельных компонентов, параметризации топологии и переключения тегов.

В настоящей работе построена реентерабельная модель сети IP-RIP, которая позволяет автоматизировать оценку функциональных характеристик [8, 9] конкретных за-

данных сетей, что способствует сокращению сроков их проектирования. Кроме того, модель может быть использована для оптимизации параметров самого протокола RIP, его дальнейшего развития и разработке новых протоколов дистанционно-векторной маршрутизации.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленных задач построены модели, реализующие взаимодействие маршрутизаторов и ТС, работу RIP протокола, генерацию трафика и расчет параметров QoS, для IP-сетей с произвольной топологией. Описание топологии сети содержит связи между маршрутизаторами и связи между маршрутизаторами и ТС, информацию о подключении устройств к портам. Модель, описывающая основные взаимодействия в сети маршрутизатора с маршрутизатором и маршрутизатора с ТС, представлена на рис. 1.

Топология сети является одним из основных параметров модели и описана в позиции *Topology*. Количество маршрутизаторов и ТС также являются параметрами модели, их значения задаются соответствующими константами в объявлении переменных, функций и констант, описанных с помощью языка программирования CPN ML. Взаимодействие маршрутизатора с маршрутизатором реализуется переходом *Router*, который представляет подмодели всех маршрутизаторов сети, и позициями *rIN*, *rOUT*, маркировка которых описывает все порты всех маршрутизаторов. Передача данных в сети осуществляется последовательностью срабатывания переходов *SwitchTagR* и *TransmitR*, т.е. пакет из выходного

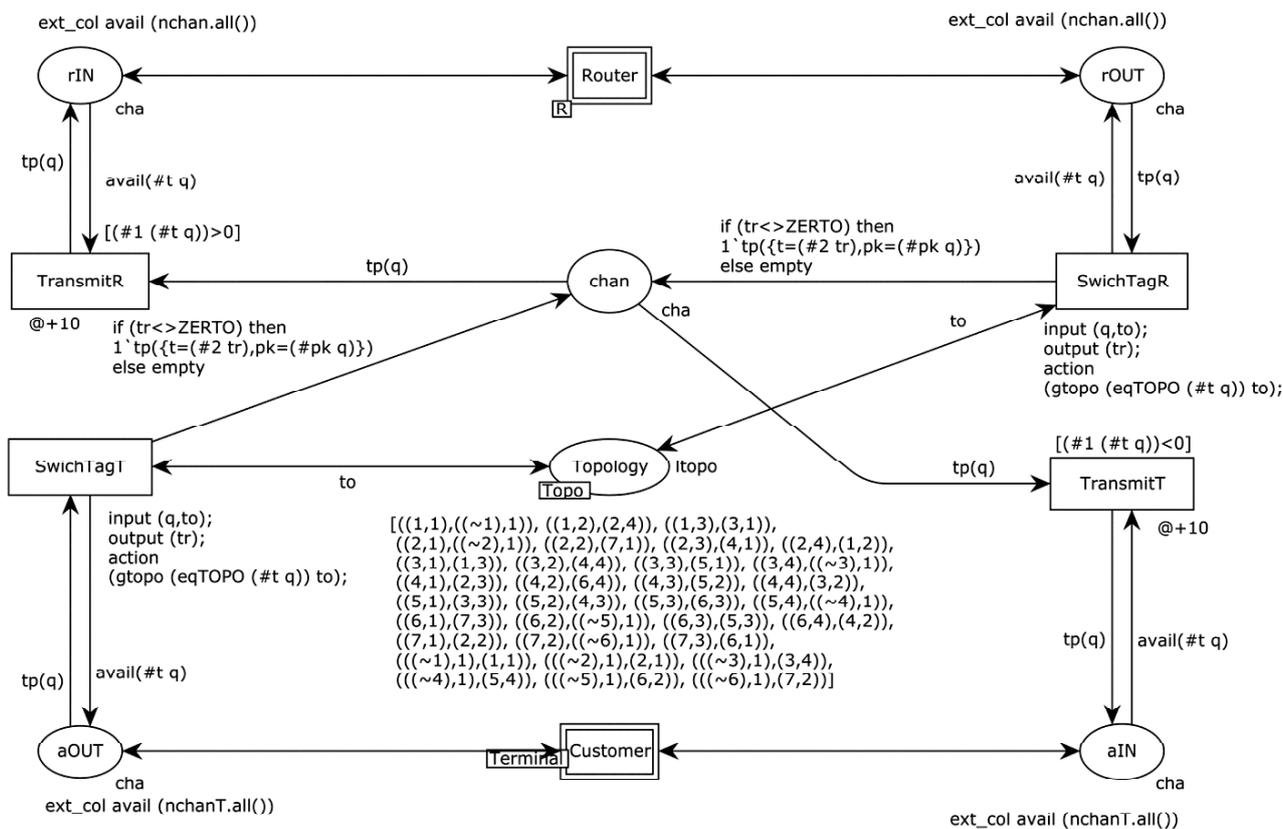


Рисунок 1 – Модель взаимодействия элементов сети

порта *rOUT* перенаправляется во входной порт *rIN* в соответствии с топологией сети за счет переключения тегов, идентифицирующих положение пакета в сети. Промежуточная позиция *chan* моделирует каналы передачи данных в сети, пакеты передаются на вход маршрутизаторов, выполняется переход *TransmitR*, или TC, выполняется переход *TransmitT*.

Модель взаимодействия маршрутизатора с TC в сети представлена следующими компонентами: переход *Customer* и позиции *aIN*, *aOUT* моделируют все TC и их входные/выходные порты, соответственно. Передачу пакета в сеть (позицию *chan*), сгенерированного TC, осуществляет переход *SwitchTagT*, выполняется функция *gtopo()*, которая в соответствии с топологией сети (позицией *Topology*) переключает теги, определяет следующее положение пакета в сети: номер и порт маршрутизатора. Если рассмотреть описание типов и переменных, то структура пакета в модели $q = record\ t:tag * pk:pkrtm$ состоит из двух основных частей тега *tag* и привычного IP-пакета *pk*.

Таким образом, за счет параметров сети и процедуры переключения тегов, обеспечивается повторная входимость в элементы модели (позиции *rIN*, *rOUT*, *aIN*, *aOUT*), позволяющая существенно сократить размер модели, свернув топологию сети, и как следствие, время исследования сети при разных условиях.

Построение моделей, выполняющих динамическую маршрутизацию в IP-сети на основе протокола RIP, ре-

ализовано на выше описанных принципах построения реентерабельных моделей. Модель порта IP-маршрутизатора с RIP компонентами, представленная на рис. 2, описывает все порты всех IP-маршрутизаторов сети. Основными позициями модели маршрутизатора являются *IN* и *OUT* входные/выходные порты ($28 = 7 * 4$ элементов в каждой позиции), *Buf* буфер маршрутизатора, *RT* таблица маршрутизации (7 элементов, по количеству маршрутизаторов). Переход *getpkt* в соответствии с таблицей маршрутизации определяет выходной интерфейс адреса назначения, выполняется функция *grec()*, переключает тег номера порта и записывает пользовательский пакет в буфер маршрутизатора. Если в таблице маршрутизации отсутствует информация об IP-адресе получателя, то пакет удаляется, счетчик потерянных пакетов, позиция *ndrop*, увеличивается на единицу. Переход *put* извлекает пакет из буфера маршрутизатора и направляет в выходной порт позицию *OUT*. Далее пакет попадает на главную страницу модели, описанную выше и представленную на рис. 1. Все порты моделей работают в полнодуплексном режиме передачи данных с обязательной проверкой свободности/занятости порта.

Опишем компоненты модели, реализующие работу протокола RIP. Процесс функционирования протокола запускают переход *initRT* и позиция *rnum*, создавая пустые таблицы маршрутизации в позицию *RT* по количеству маршрутизаторов в сети. Количество маршрутизаторов и TC определяются константами *RN* и *TN*. Первые

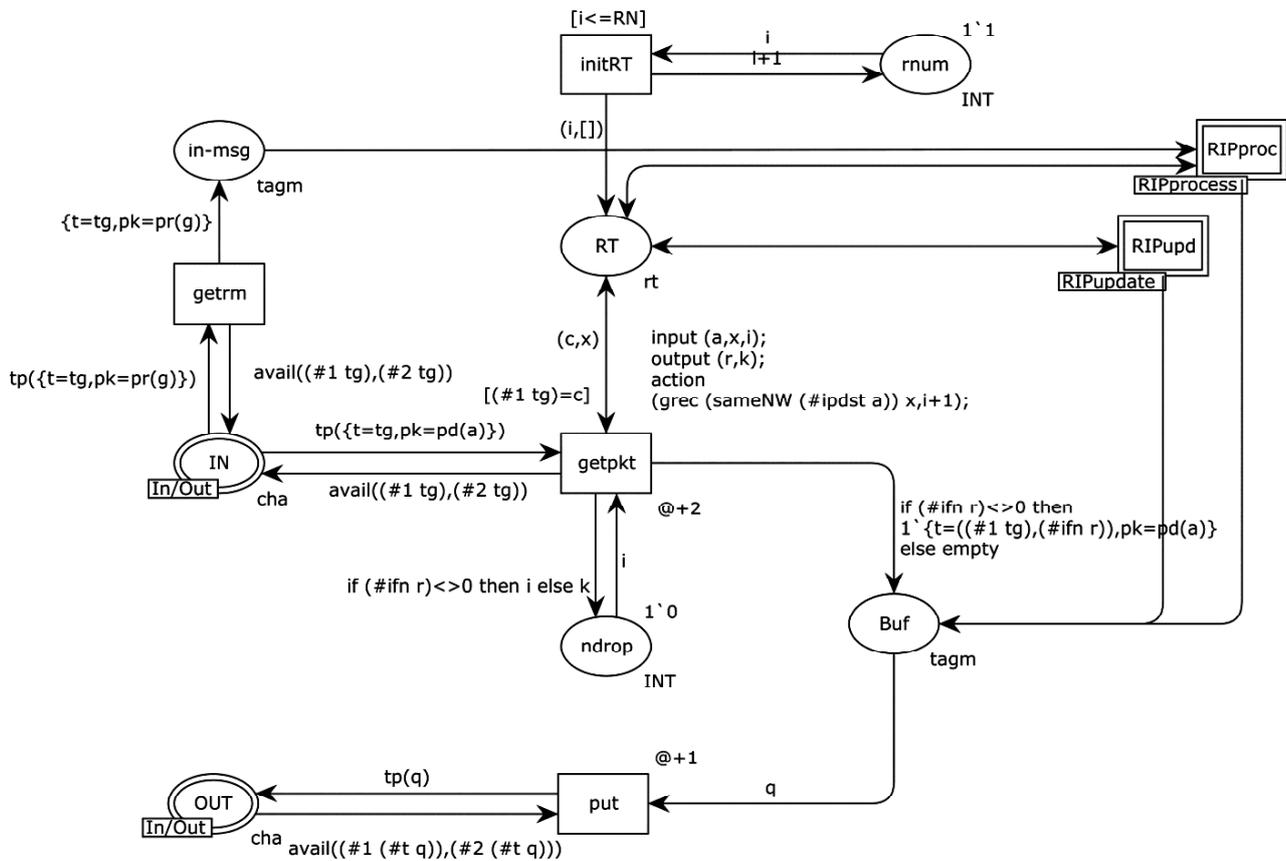


Рисунок 2 – Модель порта IP-маршрутизатора с RIP компонентами

записи в таблиці маршрутизації визначаються наявністю приєднаних ТС, при надходженні в вхідний порт позицію *IN* службової інформації, запускається перехід *getrm*, який поміщає пакет в спільну позицію *in-msg*. Далі пакет обробляється підмоде-

лю *RIPProc*, яка представлена на рис. 3. Процедура *RIPupd* моделює передачу таблиці маршрутизації сусіднім маршрутизаторам і запускається в відповідності з заданими технологічними періодами, подмодель представлена на рис. 4.

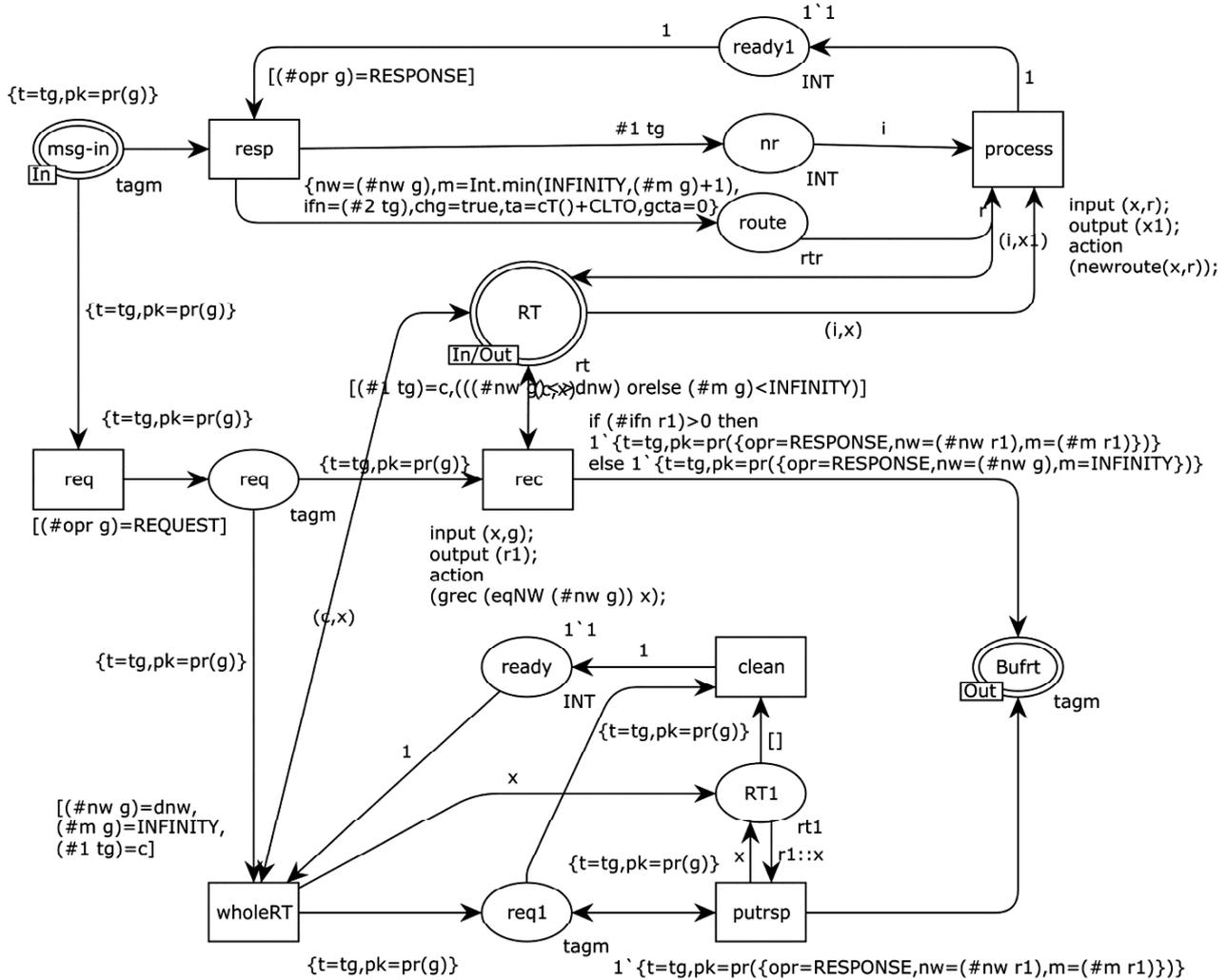


Рисунок 3 – Модель обробки повідомлень протоколу RIP

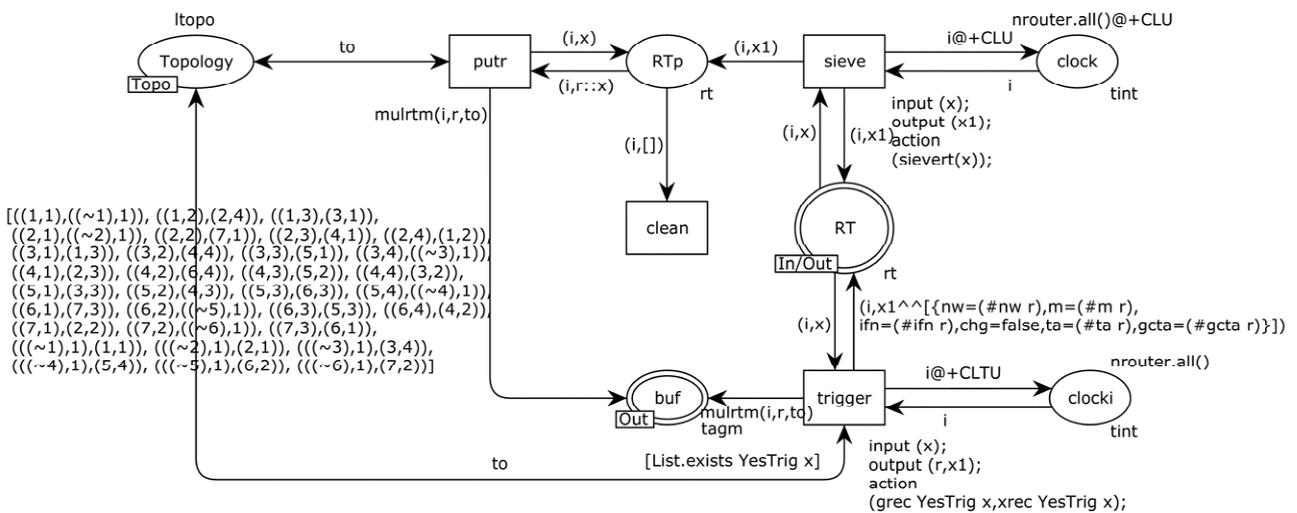


Рисунок 4 – Модель передачі таблиці маршрутизації по таймерам

Модель обробки повідомлень протоколу RIP виконує дві функції: обробку команд відповіді RESPONSE і запиту REQUEST. Перехід *resp* преобразує відповідь в відповідності з форматом запису таблиці маршрутизації і зберігає запис в позиції *route*, метрика збільшується на одиницю $(\#m\ g)+1$, встановлюється признак змінення $chg=true$, змінюється таймаут старіння $ta=cT()+CLTO$. Перехід *process* оброблює маршрутне оновлення з допомогою функції *newroute()*.

При обробці запиту розрізняють запит на передачу однієї запису, виконуваний переходом *rec*, і всієї таблиці, виконуваний переходом *wholeRT*. При формуванні відповіді перехід *rec* виконує пошук вказаної в запиті мережі з допомогою функції *grec()* і повертає відповідну запис; при відсутності запису вказується метрика INFINITY. Для передачі всієї таблиці перехід *wholeRT* дублює її в позицію *RT1* і переходом *putrsp* таблиця передається по записам в буфер маршрутизатора позицію *Bufrt*; перехід *clean* виконує очищення порожньої таблиці і повертає признак готовності *ready* для наступного сеансу обробки запиту.

Робота компоненти *RIPupdate*, представленої на рис.4, аналогічна обробці запиту, тільки ініціюється по таймерам. Вся таблиця ретранслюється в буфер маршрутизатора позицію *buf* переходом *putr*, при запуску таймера регулярних оновлень *clock*. Для цього в позиції *RTp* зберігається копія таблиці при виконанні переходу *sieve*, при копіюванні таблиці реалізована її фільтрація в відповідності з таймаутами функцією *sievert()*; перехід *clean* очищає порожню таблицю. Функція *mulrec()* використовує інформацію про топологію мережі і служить для дублювання запису на всі порти. Для формування однієї запису з установленим признаком *chg* виконується перехід *trigger* і функція *grec()* при запуску таймера триггерних оновлень *clocki*, запис передається в буфер маршрутизатора позицію *buf* з тегами, отриманими функцією *mulrec()*.

Передавані пакети і локальні дані снабжені тегами, задаючими конкретне положення в мережі, що дозволяє моделювати одночасно роботу всіх пристроїв.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для оцінки параметрів якості обслуговування і ефективності мережі з динамічною маршрутизацією на основі протоколу RIP модель ТС, запропонована в [3], представлена реінтерабельною моделлю в формі розкритої мережі Петрі. В модель ТС додані вимірні фрагменти [8], представлені рис. 5, для розрахунку середнього часу доставки пакета, максимального і мінімального часу доставки пакета, кількості відправлених і прийнятих користувальницьких пакетів, повідомлень протоколу RIP, середньоквадратичні відхилення від середнього часу доставки пакета.

Для налагодки моделі використовувався покроковий режим імітації системи CPN Tools, при цьому виконувалась трасювання проходження окремих повідомлень протоколу RIP і користувальницьких пакетів через мережу.

Для перевірки робоспособності моделі і адекватності отримуваних результатів з раніше проведеними дослідженнями, була вибрана схема фрагмента Європейської магістралі Інтернет [4], представленої на рис. 6.

Європейська магістраль Інтернет містить сім маршрутизаторів R1...R7 і шість ТС T1...T6. Всього використано 24 IP-мережі, при цьому кожна з 6 ТС містить IP-адреса в адресному просторі відповідних країн.

Для розрахунку параметрів якості обслуговування виконувалося швидке моделювання на тривалих інтервалах часу, кількість виконуваних операцій (параметр Step) не менше одного мільйона. Вимірювання проводились в умовах слабкої (функція генерації трафіку Delay()=100..200) і середньої (Delay()=10..20) навантаження, генерованої ТС; вплив пікової навантаження не досліджувалося.

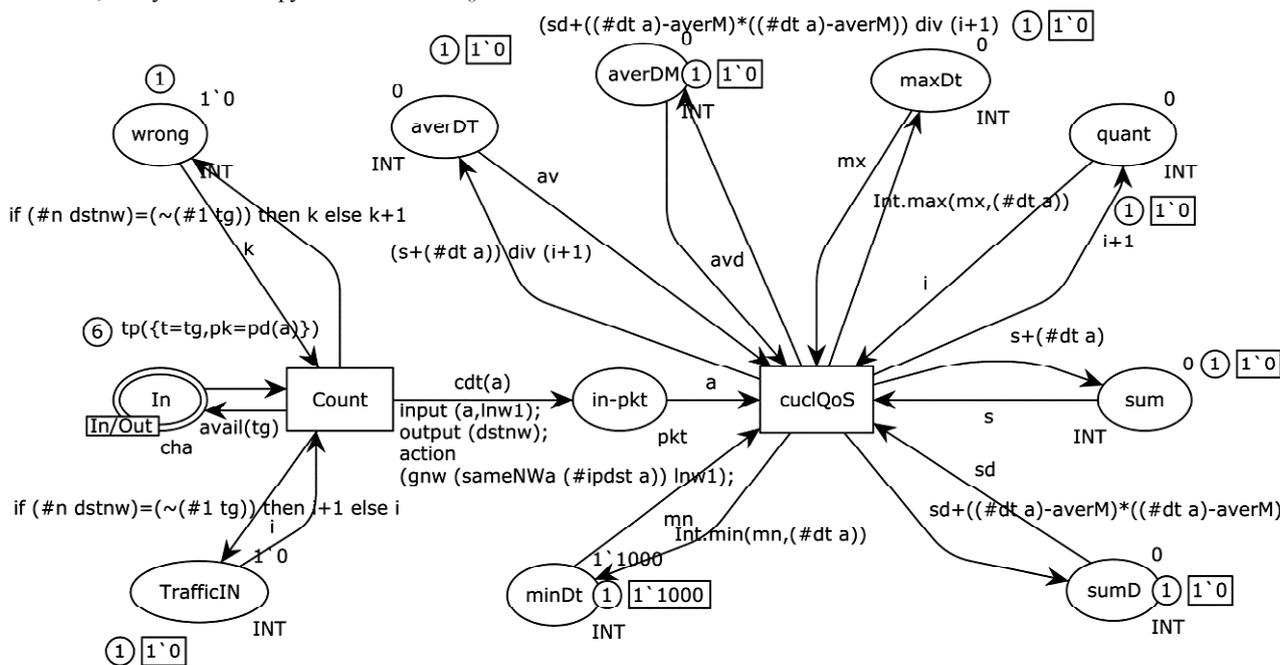


Рисунок 5 – Модель вимірних фрагментів для розрахунку QoS

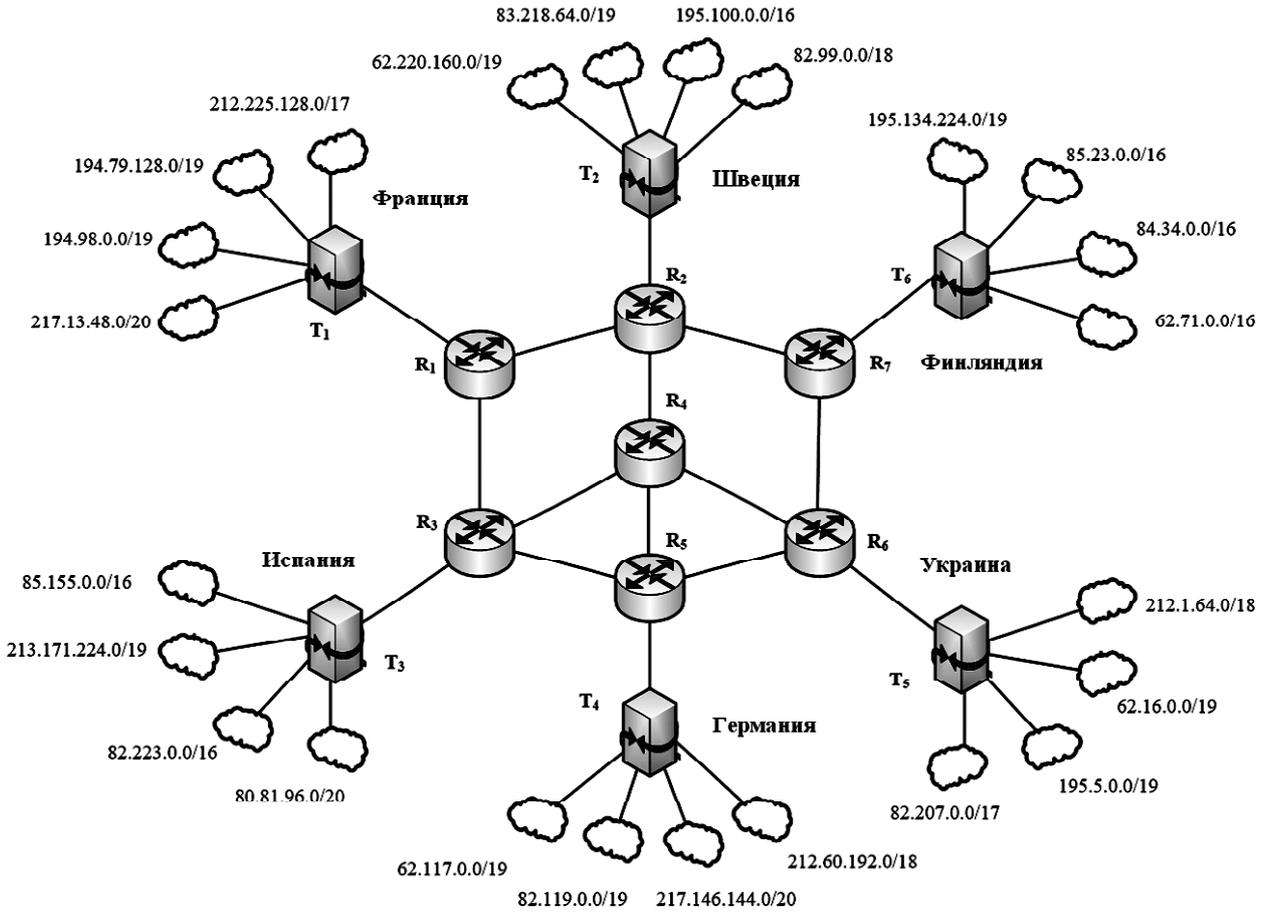


Рисунок 6 – Схема фрагмента Европейской магистрали Интернет

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 1 в условиях слабой нагрузки и табл. 2 при средней нагрузке.

Как видно из табл. 1, метод измерительных фрагментов, предложенный в [8], позволяет существенно сократить количество дополнительных расчетов параметров QoS, так как вычисления производятся непосредственно в процессе выполнения модели, при этом обеспечивается заданная точность вычислений.

Предложенный метод построения элементов моделей сети реентерабельными моделями в форме раскрашенных сетей Петри позволяет получать оценки средних и других статистических моментов для всех ТС и для отдельной ТС в частности на одной модели, что существенно сокращает размер модели.

Таблица 1 – Значения параметров QoS при слабой нагрузке

Параметры	Обычный режим	Отключен 1 порт	Отключено 2 порта
Среднее ВДП, <i>MTU</i>	42	45	47
<i>Min</i> ВДП, <i>MTU</i>	34	34	34
<i>Max</i> ВДП, <i>MTU</i>	245	257	260
Дисперсия, <i>MTU</i>	128	148	205
σ , <i>MTU</i>	11,31	12,16	14,32
<i>TrIN</i> , пакетов	49185	46657	45272
Модельное время	1272852	1212394	1178962
<i>Traf</i> , пакет/ <i>MTU</i>	0,0386	0,0384	0,0383

Таблица 2 – Значения параметров QoS при средней нагрузке

Параметры	Обычный режим	Отключен 1 порт	Отключено 2 порта
Среднее ВДП, <i>MTU</i>	51	55	55
<i>Min</i> ВДП, <i>MTU</i>	34	34	34
<i>Max</i> ВДП, <i>MTU</i>	547	571	576
Дисперсия, <i>MTU</i>	472	535	565
σ , <i>MTU</i>	21,72	23,13	23,78
<i>TrIN</i> , пакетов	54681	51542	50537
Модельное время	184727	176410	173196
<i>Traf</i> , пакет/ <i>MTU</i>	0,296	0,292	0,291

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный метод построения моделей по сравнению с методом прямого отображения [4] обеспечивает существенно большую скорость построения модели сети и оценки параметров качества обслуживания, сокращается время корректировки модели при изменении топологии и других характеристик сети.

По сравнению с методом построения параметрических моделей [3, 5] предложенный метод обеспечивает не только параметризацию моделей элементов сети, что уменьшает размер модели, но и их повторную входимость, что сокращает количество элементов модели.

Эффективность применения разработанного метода будет тем выше, чем ближе построенная модель к промышленной реализации исследуемой сети и протоколу маршрутизации.

ВЫВОДЫ

В работе решена задача автоматизации оценки функциональных характеристик IP-сетей с динамической маршрутизацией на основе протокола RIP в процессе проектирования сетей. Предложен метод построения реентерабельных моделей, который представляет собой дальнейшее развитие моделей телекоммуникационных систем в форме сетей Петри и преобразования их в класс реентерабельных раскрашенных сетей Петри. Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что построена реентерабельная модель, реализующая предложенный метод, на основе которого может быть решена практическая задача сокращения сроков проектирования IP-сетей, выполняющих динамическую маршрутизацию и проведения экспресс-анализа оценки числовых характеристик параметров качества обслуживания сети. Результаты могут быть применены для всех протоколов дистанционно-векторного типа при проектировании телекоммуникационных сетей с произвольной топологией.

Перспективы дальнейших исследований состоят в том, чтобы учитывать полученные результаты при разработке новых и оптимизации параметров существующих протоколов динамической маршрутизации.

Шмельова Т. Р.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры коммутационных систем Одесской национальной академии зв'язку ім. О. С. Попова, Одеса, Україна

РЕЕНТЕРАБЕЛЬНА МОДЕЛЬ RIP ПРОТОКОЛУ У ФОРМІ РОЗФАРБОВАНИХ СІТЕЙ ПЕТРІ

Розв'язано задачу автоматизації оцінки функціональних характеристик IP-мереж з динамічною маршрутизацією на основі протоколу RIP в процесі проектування мереж. Запропоновано метод побудови реентерабельних моделей, який забезпечує повторне використання моделей, орієнтованих на технології та інваріантних до структури мережі. Для проведення обчислювальних експериментів і отримання числових оцінок параметрів якості обслуговування IP-мережі до моделей термінальних мереж додані вимірні фрагменти в параметричному вигляді. Проведено порівняльний аналіз параметрів якості обслуговування IP-мереж при слабкому та середньому навантаженні в умовах нормального режиму роботи і при тимчасовому відключенні портів маршрутизаторів. Отримано оцінку корисної пропускної здатності мережі при різних видах навантаження і умов функціонування мережі. В результаті проведених експериментів виявлено, що значення параметрів якості обслуговування досліджуваної мережі істотно не змінюються при нормальному режимі роботи і тимчасовому відключенні портів маршрутизаторів, зміна значень дисперсії є індикатором проблем в мережі. Автоматизація оцінки характеристик сприяє скороченню термінів проектування мереж.

Ключові слова: протокол динамічної маршрутизації, протокол RIP, мережа IP, реентерабельна модель, розфарбована сіть Петрі, середній час доставки пакета.

Shmeleva T. R.

PhD, Associate Professor, Associate Professor of Switched System department, A. S. Popov, Odesa, National Academy of Telecommunications, Odesa, Ukraine

REENTERABLE MODEL OF RIP PROTOCOL IN COLORED PETRI NETS FORM

The automation task of evaluating the functional characteristics of IP-networks with dynamic routing based on RIP protocol is solved for the designing networks process. A method of reenterable model construction is proposed, this method provides reuse of models, which are technology-oriented and invariant to the network structure. Measuring fragments in parametric form added to the model of terminal networks for computing experiments and estimating of IP-network QoS parameters. A comparative analysis of IP-network QoS parameters carried out in conditions with low and medium load, and in a normal operating mode and temporarily disable the router ports. An estimation of the useful bandwidth obtained for different types of loads and conditions of the network operation. The experiments revealed that the values of QoS parameters of the tested network do not change significantly during normal operation and temporarily disable of the router ports, change the dispersion value is an indicator of problems in the network. Automation of performance evaluation promotes for reducing of network design terms.

Keywords: dynamic routing protocol, RIP protocol, IP network, reenterable model, colored Petri net, average delivery time.

REFERENCES

1. Malkin G. RFC 2453: RIP Version 2. (November 1998), 39 p.
2. Hedrick C. Routing Information Protocol, *Network Working Group*, RFC 1058, 1988, 33 p.
3. Shmeleva T. R. Parametricheskay model IP setey v forme raskrashennih setey Petri, *Sbornik UNDIS*, 2009, No. 1 (9), pp. 70–77.
4. Zaitsev D. A. Clans of Petri Nets: Verification of protocols and performance evaluation of networks, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013, 292 p.
5. Shmeleva T.R. Osenka effektivnosti protocola dinamicheskoy marshrutisazii RIP raskrashennoy setiu Petri, *Sbornik nauchnih*

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Malkin G. RFC 2453: RIP Version 2 / G. Malkin, (November 1998). – 39 p.
2. Hedrick C. Routing Information Protocol / C. Hedrick // *Network Working Group*. – RFC 1058, 1988. – 33 p.
3. Шмелева Т. Р. Параметрическая модель IP-сетей в форме раскрашенных сетей Петри / Т. Р. Шмелева // *Сборник УНДИС*. – 2009. – № 1(9). – С. 70–77.
4. Zaitsev D. A. Clans of Petri Nets: Verification of protocols and performance evaluation of networks / Zaitsev D. A. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 292 p.
5. Шмелева Т. Р. Оценка эффективности протокола динамической маршрутизации RIP раскрашенной сетью Петри / Т. Р. Шмелева // *Сборник научных трудов ОНАС им. А. С. Попова*. – 2015. – № 2. – С. 81–88.
6. Object-Oriented Analysis and Design with Applications / Grady Booch [et al.]. The Addison-Wesley Object Technology Series, 3rd ed., Boston 2007. – 691 p.
7. Гуляев К. Д. Динамическая маршрутизация в E6 сетях / К. Д. Гуляев, Д. А. Зайцев // *Радиотехника*. – 2009. – Вып. 159. – С. 294–301.
8. Зайцев Д. А. Оценка характеристик сетей Ethernet с помощью параметрических моделей Петри / Д. А. Зайцев, Т. Р. Шмелева // *Зв'язок*. – 2007. – № 4. – С. 62–67.
9. Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Наука. Ред. физ.-мат. лит., 1991. – 384 с.

Статья поступила в редакцию 13.06.2016.

После доработки 24.06.2016.

trudov ONAS im. A.S. Popova, 2015, No. 2, pp. 81–88.

6. Grady Booch...[et al.]. Object-Oriented Analysis and Design with Applications / *The Addison-Wesley Object Technology Series*, 3rd ed., Boston 2007, 691 p.
7. Gulyaev K. D., Zaitsev D. A. Dinamicheskay marshrutisaziy v E6 setyah, *Radiotekhnika*, 2009, Vip. 159, pp. 294–301.
8. Zaitsev D. A., Shmeleva T. R. Ozenka harakterestik setey Ethernet s pomoschiu parametricheskikh modeley Petri, *Zvyazok*, 2007, No. 4, pp. 62–67.
9. Ventzel E. S., Ovcharov L. A. Teoriya sluchainih prosessov i ee inženierne prilogeniya. Moscow, Nauka. Red. fiz.-mat. lit., 1991, 384 p.