

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора Стрелковської Ірини Вікторівни на дисертаційну роботу Єременко Олександри Сергіївни за темою «Методи управління трафіком із забезпеченням відмовостійкості та мережної безпеки на основі використання динамічних тензорних моделей телекомунікаційних систем», поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Актуальність тематики дисертаційної роботи Єременко О.С. визначається важливою роллю, що традиційно відводиться протоколам та технологіям управління трафіком у цілому, які використовуються в сучасних мульти-сервісних телекомунікаційних мережах (ТКМ). При цьому від ефективності рішень задач щодо управління трафіком, які, наприклад, включають маршрутизацію, розподіл та резервування каналного та буферного ресурсу, багато в чому залежить загальний рівень якості обслуговування, відмовостійкості, мережної безпеки, масштабованості тощо.

Існуючі технологічні рішення по управлінню трафіком досить обмежено враховують динаміку стану телекомунікаційної мережі, її топологічних та функціональних параметрів, так як базуються на використанні виключно статичних математичних моделей та евристичних схем. Крім того, протоколи маршрутизації та профілювання трафіка практично не оперують з характеристиками потоків пакетів, які передаються, що безсумнівно негативно відображається на результуючій ефективності ТКМ у цілому.

Відомо, що основним напрямом вдосконалення існуючих технологічних і протокольних рішень управління трафіком є перегляд математичних моделей, алгоритмів і методів, на основі яких вони створені. Відповідно до зазначених недоліків відомих протоколів основна увага дослідників у цій області повинна приділятися розробці саме динамічних моделей телекомунікаційних мереж, за допомогою яких можна оцінити стан елементів ТКМ у будь-який момент часу. Це особливо важливо з точки зору того, що процеси маршрутизації, розподілу



та резервування ресурсів тощо відносяться до процесів реального часу, вимагаючи реакції на зміни в стані мережі з затримкою від десятків мілісекунд до десятків секунд.

Тому тематика дисертаційної роботи Єременко О.С., яка присвячена вирішенню наукової проблеми щодо розвитку теорії управління трафіком з підтримкою якості обслуговування за множиною показників в умовах нестаціонарного режиму роботи телекомунікаційної мережі із забезпеченням її відмовостійкості та мережної безпеки в ТКМ у цілому, є актуальною.

Наукова новизна, ступінь обґрунтованості та достовірності результатів роботи

При вирішенні поставленої наукової проблеми у роботі здобувачем отримано такі основні наукові результати:

1. Вдосконалено систему тензорних моделей та методу маршрутизації та управління трафіком з підтримкою якості обслуговування за множиною показників: пропускну здатністю та середньої міжкінцевою затримкою пакетів. Новизна представлених моделей полягає у використанні динамічних тензорних метрик, які введені на основі тензорного узагальнення системи нелінійних диференціальних рівнянь, що описують за допомогою стаціонарної точкової апроксимації нестаціонарного потоку динаміку зміни середньої затримки пакетів на інтерфейсах маршрутизаторів мережі. Це дозволило отримати рішення, в яких гарантується виконання умов щодо забезпечення якості обслуговування не тільки в якийсь окремий момент часу, але й протягом всього таймера оновлення маршрутів.

Новизна запропонованого дворівневого методу внутрішньо доменної ієрархічно-координаційної QoS-маршрутизації на основі резервування ресурсів полягає в узгодженому розв'язанні задач маршрутизації та резервування каналного ресурсу на основі використання принципу цільової координації та підтримці міжкінцевої якості обслуговування за показниками пропускну здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів. Застосування методу орієнтує

на підвищення масштабованості ТКМ, так як маршрутні задачі та задачі щодо резервування мережного ресурсу розв'язуються розподілено (на приграничних маршрутизаторах) з наступною координацією отриманих рішень.

2. Вперше представлено модель багатошляхової маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником імовірності своєчасної доставки пакетів у телекомунікаційній мережі, новизною якої є врахування нестационарного характеру роботи інтерфейсів маршрутизаторів мережі. Використання отриманих за допомогою розробленої динамічної моделі маршрутних рішень дозволяє підвищити ймовірність своєчасної доставки пакетів протягом всього таймера оновлення маршрутних таблиць.

3. Набули подальшого розвитку потокові моделі відмовостійкої маршрутизації без резервування елементів телекомунікаційної мережі, новизною яких є формування нелінійних умов використання шляхів, що не перетинаються або перетинаються лише за вузлами при балансуванні навантаження. Це сприяє підвищенню швидкісних показників якості обслуговування при розв'язанні задач відмовостійкої маршрутизації.

4. Набули подальшого розвитку моделі та методи швидкої перемаршрутизації в ТКМ. Новизна цих рішень полягає, *по-перше*, в отриманні у лінійній формі умов захисту каналу, вузла, шляху та пропускної здатності мережі, при реалізації як одношляхової, так і багатошляхової стратегій маршрутизації; *по-друге*, у введенні системи критеріїв оптимальності рішень щодо відмовостійкої маршрутизації з встановленням ієрархії співвідношень маршрутних метрик та вагових коефіцієнтів у відповідних цільових функціях; *по-третє*, у забезпеченні захисту приграничних маршрутизаторів ядра мережі в ході визначення основних і резервних міждоменних шляхів в ієрархічній мультидоменній мережі. Це дозволило забезпечити збалансоване завантаження каналів зв'язку мережі, підвищити продуктивність телекомунікаційної мережі та масштабованість рішень щодо швидкої, в т.ч. ієрархічної, перемаршрутизації зі зниженням обчислювальної складності їх протокольної реалізації.

5. Вперше запропоновано систему поточкових моделей відмовостійкої ма-

ршрутизації, новизною яких є забезпечення захисту шлюзу за замовчуванням з підтримкою балансування навантаження за множиною приграничних маршрутизаторів, яке надходило від мереж доступу. Це дозволило підвищити засобами маршрутизації відмовостійкість ТКМ як на рівні доступу, так і на рівні ядра мережі.

6. Вперше запропоновано тензорну модель відмовостійкої маршрутизації в мультисервісній телекомунікаційній мережі, новизною якої є реалізація схеми захисту рівня якості обслуговування як за показником пропускнуої здатності, так і середньої міжкінцевої затримки пакетів.

7. Вперше запропоновано методи безпечної маршрутизації та швидкої безпечної перемаршрутизації конфіденційних повідомлень за шляхами, які перетинаються. Новизна запропонованих методів полягає, *по-перше*, у використанні так званих композитних шляхів, які містять мережні фрагменти з послідовним та (або) паралельним з'єднанням каналів зв'язку мережі, *по-друге*, в оптимізації процесу вибору множини композитних шляхів із балансуванням за ними частин повідомлення, що передається, із забезпеченням допустимих значень його ймовірності компрометації. Крім того, новизна методу безпечної швидкої перемаршрутизації визначається тим, що при порушенні вимог мережної безпеки багатшляхова передача частин конфіденційного повідомлення здійснюватиметься за розрахованою множиною резервних шляхів. При цьому підтримується схема захисту рівня мережної безпеки за показником імовірності компрометації повідомлень при компрометації основного мультишляху або одного чи декількох шляхів, які входять в основний мультишлях.

Основні недоліки по роботі:

1. У роботі на стор. 164 викладено: «За допомогою середовища MATLAB було отримано рішення диференціального рівняння (2.12) в аналітичному вигляді:

$$\tau(t) = \frac{1}{\varphi - \lambda} \cdot [\dots\dots\dots] \quad (2.18)»$$

На наш погляд, можна здобути лише приблизний вираз затримки пакетів на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ за допомогою середовища MATLAB.

2. У другому розділі при розв'язанні задач маршрутизації та управління трафіком у ТКМ основна увага приділялась пошуку оптимальних рішень, що дійсно сприяє підвищенню ефективності використання мережного ресурсу. Проте, наявність нелінійних динамічних умов (2.12), (2.14) та обмежень (2.29), (2.48) вимагає проведення додаткового аналізу отриманих результатів не тільки на оптимальність, але й на стійкість, що особливо важливо в умовах коливань як характеристик трафіка, так і структурно-функціональних параметрів самої мережі.

3. У роботі в разі реалізації міждоменної відмовостійкої швидкої перемаршрутизації пропонується знизити об'єм службового трафіка, пов'язаного з проведенням координації доменних рішень, на підставі зменшення кількості ітерацій координаційної процедури (3.60), (3.61). Однак кількісний аналіз об'єму створюваного службового навантаження, віднесеного до кожної з ітерацій, не проводився. Тому важко судити про те, яка кількість ітерацій є критичною не тільки за часом збіжності запропонованого методу до оптимальних рішень, але й за об'ємом створюваного при цьому службового трафіка.

4. При розробці моделей і методів швидкої перемаршрутизації в ТКМ вважаються відомими вузли та (або) канали, які потрібно захистити в ході розрахунку резервних шляхів. Проте, хто і за якими алгоритмами приймає рішення, які саме елементи телекомунікаційної мережі треба в поточний момент часу захистити, у роботі не вказано.

5. У роботі для адекватного переходу від нелінійної до лінійної моделі багатопляхової швидкої перемаршрутизації пропонується ввести додаткову множину керуючих змінних (3.33), кожна з яких характеризує верхній поріг для значень маршрутних змінних основного та резервного шляхів. Таким чином, розмір оптимізаційної задачі зросте приблизно на 50%. З роботи неясно, чи може це призвести при певних умовах до нівелювання обчислювальних переваг, пов'язаних з відмовою від нелінійної постановки оптимізаційної задачі.

6. Запропоновані у роботі рішення, які представлені відповідними моделями маршрутизації та управління трафіком, орієнтовані на потоковий характер трафіка. Але не зрозуміло, яким чином у результатах роботи враховуються фрактальні характеристики сучасного мультимедійного трафіка, наприклад, параметр самоподібності Херста. Відкритим залишилось питання щодо забезпечення якості обслуговування даних, які передаються в мережі не потоком, а за допомогою окремих повідомлень.

7. В авторефераті не у всіх формулах пояснені позначення, при розв'язанні оптимізаційних задач не вказано за якими змінними проводиться максимізація або мінімізація. Наприклад, на стор. 22 не вказано за якими змінними здійснюється критерій оптимізації білінійної цільової функції вигляду (33).

Практична значимість роботи

Наукові результати, які отримані дисертантом у роботі, можуть знайти своє застосування на практиці в ході розробки, перш за все, нових протоколів маршрутизації, механізмів розподілу та резервування каналних ресурсів як для існуючих IP/MPLS-технологій, так і для новітніх SDN-мереж з централізованою або гібридною архітектурою. Впровадження запропонованих моделей та методів управління трафіком в ТКМ орієнтує на

- отримання більш точних оцінок міжкінцевої якості обслуговування: від 7-10% до 12-18%;
- забезпечення максимальних значень ймовірності своєчасної доставки пакетів при підвищенні вимог до міжкінцевої затримки від 28% до 30-37% у порівнянні з рішенням, отриманим на основі моделі Traffic Engineering;
- підвищення продуктивності мережі від 1,7 до 2,5 разів за рахунок використання методів багатопляхової відмовостійкої маршрутизації без резервування елементів мережі;

- зниження верхнього порогу завантаженості каналів зв'язку в середньому від 37,12% до 59,41% при захисті каналу та від 31,5% до 56,3% при захисті вузла ТКМ;

- зниження ймовірності компрометації конфіденційних повідомлень, які передаються в мережі, в середньому від 5-10% до 25-50%.

Практична значимість дисертації також підтверджена актами реалізації основних результатів роботи у ході виконання наступних НДР:

- № 299-1 «Підвищення масштабованості технологічних рішень щодо забезпечення якості обслуговування в конвергентних телекомунікаційних системах» (ДР №0115U002432);

- № 308 «НИТКА-3» (ДР №0116U000066 т).

Крім того, запропоновані моделі та методи використано в навчальному процесі кафедри інфокомунікаційної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, про що свідчить наявність методичних праць та відповідний акт впровадження.

Основні результати дисертаційної роботи досить повно викладено у 91 публікації та двох звітах з НДР. Загалом 30 статей опубліковано у фахових виданнях, 8 без співавторства, 6 у міжнародних періодичних виданнях, 6 статей індексується наукометричною базою Scopus. Не дивлячись на те, що дві статті опубліковано в одному номері журналу, їх загальна кількість відповідає встановленим вимогам. Результати роботи отримали досить широку апробацію у ході 60 доповідей на наукових конференціях, 23 з яких на конференціях рівня IEEE.

Зміст автореферату в цілому відповідає основним положенням дисертаційної роботи. Мова дисертаційної роботи ясна та чітка. Дисертант вільно володіє науково-технічною термінологією. Матеріал дисертації викладено послідовно й продумано, із чітким розумінням мети та методів дослідження.

Висновки

Дисертаційна робота виконана на достатньому науковому рівні та представляє собою закінчене наукове дослідження. За своїм змістом, рівнем наукової новизни, кількістю та змістом публікацій та апробацій, а також стилем оформлення дисертація Єременко Олександри Сергіївни відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів». Автор дисертації, Єременко О.С., за рівнем своєї кваліфікації заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Офіційний опонент

Директор Навчально-наукового інституту Інфокомунікацій та програмної інженерії Одеської національної академії зв'язку ім. О.С. Попова,
доктор технічних наук, професор

І.В. Стрелковська

