

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ СМУГАМИ ПРОПУСКАННЯ ПОРТІВ ПАКЕТНОГО КОМУТАТОРА

Інститут інформаційно-діагностичних систем Національного авіаційного університету

Методом комп'ютерного моделювання фрагменту мережі з комутацією пакетів обґрунтована можливість суттєвого підвищення коефіцієнта завантаження обладнання пакетних комутаторів шляхом впровадження механізмів адаптивного керування комутатором.

Цілі та задачі комп'ютерного моделювання роботи пакетного комутатора

У [1] запропонована ідея автоматичного адаптивного керування шириною смуг пропускання портів пакетних комутаторів (ПК), що знайшли широке застосування у телекомунікаційних мережах. Попередній теоретичний аналіз цієї ідеї показав доцільність її подальшої розробки: її реалізація надає можливість суттєвого підвищення коефіцієнта завантаження комутатора, що, в свою чергу, істотно підвищує продуктивність мережного обладнання. З метою визначення рівнів працездатності та ефективності адаптивних алгоритмів керування смугами пропускання портів ПК скористаємося імітаційним комп'ютерним моделюванням [2]. Моделювання повинне показати, наскільки досліджувана система керування комутатором підвищує ефективність його роботи. Для цього пропонується порівнювати величину втрат інформаційних пакетів для випадку некерованого комутатора з величиною втрат пакетів комутатором, що є замкнутим за допомогою адаптивного регулятора. Щодо змісту терміна «адаптивний» стосовно регулятора підкреслимо, що він залежить від показника загасання функції Белмана, і може настроюватися за швидкістю перерозподілу пропускних спроможностей портів на поточну динаміку пульсацій трафіку. За інших рівних умов втрати інформації зменшуються при збільшенні швидкодії регулятора. Отже, необхідно змоделювати роботу комутатора при різних коефіцієнтах завантаження і різних показниках швидкодії. При цьому доцільно визначити, наскільки рівень швидкодії регулятора впливає на коефіцієнт завантаження

комутатора при заданому нормативному рівні втрат пакетів.

Загальні умови проведення експериментів

Звісно [1], що у реальних умовах експлуатації обладнання ми маємо можливість реалізувати механізм перерозподілу ширини смуг пропускання окремих портів комутатора при збереженні їхньої суми. На перший погляд, існує можливість безпосереднього поточного перерозподілу ширини смуг пропускання портів пропорційно поточним інтенсивностям трафіку. Але визначити миттєве значення інтенсивності трафіка не є можливим, оскільки для цього потрібно досить тривалий проміжок часу. Тому процес вирівнювання коефіцієнтів завантаження повинен мати інерційний характер, що має за мету відстеження тенденції змін у інтенсивностях потоків. А ключовим фрагментом алгоритму керування пакетним комутатором має бути модуль, що здійснює вирівнювання керованих перемінних. Його відтворення на рівні моделювання передбачає розробку програм для обчислення матриці коефіцієнтів зворотного зв'язку для замикання диференціального рівняння вирівнювання керованих перемінних. У підсумку зазначений модуль має в якості вхідних перемінні матриці вагових коефіцієнтів при керованих перемінних і керуваннях, а також коефіцієнт загасання функції Белмана і матрицю коефіцієнтів при векторі керування. Також вхідною величиною є параметр точності рішення рівняння Рікаті. Вихідною для цього блоку є матриця коефіцієнтів зворотного зв'язку.

Вищезазначений модуль виконує функцію вирівнювання значень компо-

нент фазового вектора керованого об'єкта. При цьому сума компонентів зберігається і, виходячи саме з цієї умови, доцільно побудувати алгоритм вирівнювання керованих перемінних. Керувати необхідно шириною смуг пропускання портів комутатора. Для формування керування слід забезпечити спостереження за значеннями інтенсивності трафіків на портах комутатора. Необхідно зв'язати задачу динамічного вирівнювання керованих перемінних з умовою спрямованого впливу на ширину смуг пропускання комутатора. Такий зв'язок здійснюється через коефіцієнти завантаження портів комутатора. При цьому на кожному кроці вирівнювання обчислюються поточні значення коефіцієнтів завантаження. Тобто для регулятора керованими перемінними (що динамічно вирівнюються) є саме коефіцієнти завантаження портів комутатора. Після виконання кожного кроку інтегрування рівняння вирівнювання коефіцієнти завантаження наближаються один до одного, і згідно з побудовою рівняння настроювання значення суми цих коефіцієнтів зберігається. Зрозуміло, що таке припущення є справедливим для досить малого кроку інтегрування. На досить тривалому відрізку часу сума коефіцієнтів завантаження може і не зберігатися. Тому на кожному кроці інтегрування рівняння настроювання має здійснюватися перерахунок знайдених нових (рекомендованих) коефіцієнтів завантаження у нові рекомендовані значення ширини смуг пропускання портів комутатора. У реальних умовах система працює при постійно діючих збурюваннях. Чим більше її швидкодія, тим краще вона справляється з поточними збурюваннями, під якими розуміються пульсації трафіків на вводах портів комутатора. Вищезазначене може бути безпосередньо перевірене шляхом імітаційного моделювання. Відповідний експеримент будуватиметься таким чином, щоб при заданому коефіцієнті швидкодії системи у рамках вибраної моделі трафіка методом проб підібрати початкове значення коефіцієнту завантаження портів комутатора виходячи з умови, що на протязі заданого проміжку часу втрати пакетів будуть не більшими за норму. При цьому очікува-

ний результат моделювання буде полягати у підтвердженні факту, що при підвищенні швидкодії комутатора припустиме значення початкових коефіцієнтів портів комутатора буде збільшуватися.

Загальна схема експериментів

Проведемо два допоміжних експерименти. Перший експеримент здійснимо за таких умов. Вибравши модель потоків на портах комутатора таку ж, що і в основному експерименті, і відключивши механізм керування смугами пропускання, будемо намагатися шляхом проб визначити таке початкове значення коефіцієнтів завантаження цих портів, при якому величина втрат пакетів не перевищує заданого нормативного значення. Проведення цього експерименту є доцільним у тому сенсі, що при порівнянні його результату з результатом здійснення основного експерименту ми очікуємо істотного підвищення коефіцієнта завантаження в зв'язку з реалізацією функції керування шириною смуг пропускання портів. Другий експеримент полягає у наступному. Параметри трафіків приймаються постійними і за цих умов доводиться, що збільшення швидкодії регулятора веде до зменшення втрат пакетів.

Обчислювальна схема моделювання процесів вирівнювання коефіцієнтів навантаження

Структурна схема пакетного комутатора (ПК) із чотирма портами, що реалізує адаптивне керування смугами пропускання окремих портів за допомогою попередньо синтезованого регулятора, відображена на рисунку 1.

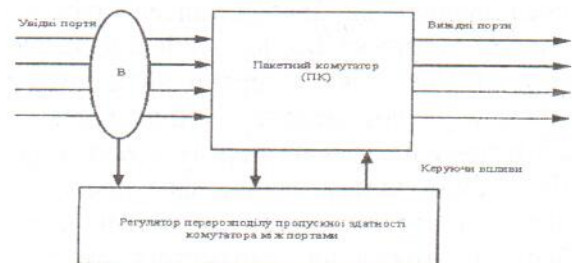


Рис. 1. Структурна схема дослідного пакетного комутатора з регулятором смуг пропускання його портів

Згідно рис.1 ПК має чотири порти, умовно зображених у вигляді стрілок. Параметри потоку пакетів на кожному із портів вимірюються за допомогою вимірювального блоку В. Також на регулятор надходить інформація щодо величин смуг пропускання кожного із портів. На виході регулятора виробляються керуючі впливи, що впливають на ширину смуг пропускання портів.

Схема побудови середовища, що моделює роботу пакетного комутатора на комп'ютері при експериментальних дослідженнях ефективності запропонованої системи авторегулювання, показана на рисунку 2.

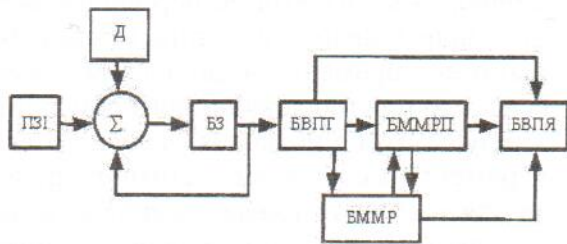


Рис. 2. Схема середовища моделювання роботи пакетного комутатора

Схема формування поточних значень інтенсивності потоку пакетів моделюється певним фрагментом комп'ютерної програми АА. При кожному звертанні до нього формується певне випадкове число, яке у даному експерименті трактується як поточне значення інтенсивності потоку пакетів. Програма використовує відому підпрограму генерації випадкових чисел (на основі давальника випадкових чисел), що рівномірно розподілені у довільно обраних межах. Давальник Д згідно рис.2 включений у контур формування послідовності випадкових чисел і разом з блоком затримки БЗ, що здійснює затримку на один такт генерації випадкового числа, моделює характер змін інтенсивності потоку пакетів на портах комутатора. Далі таким чином сформована послідовність випадкових чисел подається через блок вимірювання параметрів трафіка (БВМТ) на блок моделювання механізмів роботи портів (БММРП) ПК (на всі його чотири порти) та на блок моделювання механізмів регулятора (БММР). Моделюються наступні механізми. Усереднена

на поточному кроці інтегрування інтенсивність потоку порівнюється з виділеною на цьому ж кроці шириною смуги порту. І якщо поточне значення інтенсивності потоку перевищує виділену ширину смуги, то усі пакети на даному кроці втрачаються, тобто, точніше, число, яке імітує кількість втрачених пакетів, у подальшому використовується для підрахунку коефіцієнту втрат пакетів. Якщо ж поточне значення інтенсивності потоку не перевищує виділену ширину смуги, то усі числа, що моделюють кількість оброблюваних на портах комутатора пакетів використовуються для підрахунку коефіцієнту завантаження мережного обладнання. БММР моделює систему адаптивного регулювання перерозподілом смуг портів комутатора. У запропонованій моделі формування трафіку пакетів (перші чотири блоки на рис.2) тривалість тактів затримки і тактів звертання до датчика випадкових чисел збігаються. Блок ПЗІ задає початкові значення інтенсивності потоків. Вивідні дані цього блоку подаються на суматор Σ . Вихід суматора підключений до входу блоку затримки БЗ, на виході котрого виробляється поточне значення інтенсивності потоку. При рівності тактів генерування і затримки кожне наступне значення інтенсивності утвориться як сума попереднього значення інтенсивності і поточного значення випадкової добавки. Блок БВПЯ служить для вимірювання параметрів якості комутатора. Адекватність реальним трафікам забезпечується вибором величини такту генерування випадкових чисел, початкових значень інтенсивностей потоків і меж змін у величинах випадкових чисел давальника Д.

Під час моделювання при роботі із схемою формування поточних значень інтенсивності потоків тривалість тактів генерування випадкових чисел і тактів затримки у БЗ були вибрані однаковими. При цьому вдалося досягти достатньої правдоподібності змодельованого трафіку за характером змін за часовою координатою. Слід зазначити, що в даній роботі під час настроювання програми формування поточних значень інтенсивностей потоків не була використана можливість зміни тривалості тактів генерування ви-

падкових чисел і затримки для випадку, коли вони не збігаються. Але така можливість може бути у більш загальному випадку конструктивно використана.

З урахуванням вищезазначеного, виконаємо три обчислювальних експерименти із моделювання роботи комутатора без регулятора і з регулятором при різних показниках загасання функції Белмана.

У першому експерименті змодельовано роботу пакетного комутатора згідно рис.2 в типовому режимі його експлуатації для випадку, коли регулятор не включений. Такий експеримент бажано виконати для того, щоб експериментальним шляхом підібрати параметри моделі пульсацій трафіка, що з достатньою для даної задачі дослідження точністю відбивають реальну роботу мереж з пакетною комутацією. В другому експерименті здійснимо моделювання роботи комутатора з регулятором для випадку, коли задаються різні значення показників загасання функції Белмана. Це потрібно зробити, для того щоб мати можливість виявлення залежності ефективності роботи комутатора від значень показника загасання. У третьому – моделюється робота комутатора з регулятором для випадку підвищених (у порівнянні з обраними у першому експерименті) значень інтенсивностей потоків пакетів на портах комутатора. У цьому випадку використовується модель пульсацій трафіка з параметрами, що були обрані в процесі проведення першого експерименту.

Зміст та результати першого експерименту

Початкові умови щодо всіх портів вибираються рівними. Ширина смуги пропускання кожного порту складає 2000 пакетів у секунду. Використовується запропонована схема формування послідовності випадкових чисел, що моделюють характер змін інтенсивностей потоків пакетів на усіх чотирьох портах комутатора. Величини початкових інтенсивностей потоків на виводі блоку ПЗІ підбираються за умови, що на протязі заданого проміжку часу (5 секунд) втрати пакетів склали не більш 1%. Також підбирається величина діапазону величин, у межах якого здійснюється генерація випадкових чисел давальником Д.

Як результат цього експерименту встановлено, що при встановленні діапазону змін випадкових чисел в межах від -43.5 до $+43.5$ і при значенні величини тактового інтервалу $0,01$ секунди величина втрат пакетів має чисельне значення $39,7$. За цих умов встановлюється початкове значення інтенсивності потоків на рівні 646 пакетів/с, а значення коефіцієнту завантаження мережного обладнання в початковий момент складає 0.323 . Таким чином, за результатом експерименту можна зробити висновок, що вибрана модель генерування трафіків пакетів є цілком прийнятною, оскільки отримані значення втрат пакетів і коефіцієнта завантаження обладнання приймають правдоподібні значення, що є характерними для більшості існуючих пакетних мереж.

Зміст та результати другого експерименту

Початковий стан комутатора характеризується рівними пропускними спроможностями всіх чотирьох портів, що складають 50 умовних одиниць. Інтенсивності чотирьох потоків пакетів, що моделюються, складають відповідно 90 , 20 , 30 і 50 умовних одиниць. Через кожну соту частку секунди інтенсивності потоків змінюються за випадковим законом. Виробляється чотириразове звертання до давальника випадкових чисел, які рівномірно розподілені на відріжку $(-1 - +1)$. Як результат, інтенсивність кожного потоку змінюється на величину обумовленої випадкової добавки. Інтегрування рівняння настроювання відповідно до співвідношень, що надані у [1], здійснюється з кроком 0.00001 с. Регулятор розраховується для діагональних матриць P і R оптимізуючого функціоналу, вираз котрого також наведено у [1]. Усі діагональні ненульові члени цих матриць рівні 99 . Обчислення регулятора проводяться з точністю $\varepsilon = 10^{-15}$. Розрахунки виконані для чотирьох значень показників загасання функції Белмана – відповідно 5 , 10 , 15 і 20 .

Показник якості роботи комутатора у даному експерименті розраховується виходячи з кількості загублених пакетів з інформацією. Вважається, що чим менші втрати пакетів, тим якісніша робота ме-

режного обладнання. На кожнім кроці інтегрування рівняння настроювання щодо кожного порту визначається результат порівняння поточної інтенсивності потоку пакетів і пропускної здатності порту. Якщо інтенсивність потоку перевищує пропускну здатність порту, то обчислюється різниця між поточними значеннями інтенсивності і пропускної здатності, і ця різниця інтегрується. Інтегрування проводиться щодо всіх чотирьох портів. Якщо інтенсивність потоку менше або дорівнює пропускній здатності порту, то інтегрування не проводиться, тому що в цьому випадку втрач інформації немає.

Приведемо матричні коефіцієнти підсилення регуляторів, синтезованих для різних значень коефіцієнта загасання α функції Белмана. Коефіцієнт підсилення позначимо k_y .

Коефіцієнт загасання $\alpha = 5$:

$$k_y = \begin{pmatrix} -1.74668 & 2.19518 & 0.04087 & -0.48938 \\ -2.50862 & 0.27224 & 2.67741 & -0.44103 \\ -2.69343 & 0.53494 & 0.49045 & 1.66804 \\ -7.6194 & -1.92295 & 2.63654 & 0.04835 \\ -0.94675 & -1.66024 & 0.44958 & 2.15742 \\ -0.18481 & 0.26270 & -2.18696 & 2.10907 \end{pmatrix}$$

Коефіцієнт загасання $\alpha = 10$:

$$k_y = \begin{pmatrix} -4.26424 & 8.51807 & 1.64588 & -5.89971 \\ -8.10692 & -2.97170 & 10.87593 & 0.20269 \\ -2.51212 & -0.69031 & 1.71060 & 1.49183 \\ -3.84268 & -11.48977 & 9.23006 & 6.10239 \\ 1.75212 & -9.20839 & 0.06472 & 7.39154 \\ 5.54480 & 2.28139 & -9.16533 & 1.28914 \end{pmatrix}$$

Коефіцієнт загасання $\alpha = 15$:

$$k_y = \begin{pmatrix} -12.12065 & 10.79528 & 0.74251 & 0.58285 \\ -6.49124 & 1.07810 & 11.20656 & -5.79341 \\ -8.67741 & -3.33983 & 4.05131 & 7.96594 \\ 5.62941 & -9.71719 & 10.46404 & -6.37626 \\ 3.44324 & -14.13512 & 3.30879 & 7.38309 \\ -2.18617 & -4.41793 & -7.15525 & 13.75935 \end{pmatrix}$$

Коефіцієнт загасання $\alpha = 20$:

$$k_y = \begin{pmatrix} -17.73214 & 11.53499 & 1.75425 & 4.44289 \\ -22.60185 & -0.38484 & 16.19068 & 6.79601 \\ -22.70127 & 2.62209 & 2.05193 & 18.02725 \\ -4.86971 & -11.91983 & 14.43643 & 2.35311 \\ -4.96913 & -8.91290 & 0.29767 & 13.58436 \\ -0.09942 & 3.00693 & -14.13875 & 11.23125 \end{pmatrix}$$

Аналіз результатів перших двох експериментів

Для приведених значень показників загасання і при відповідних їм коефіцієнтах підсилення імітаційне моделювання дає наступні значення показника якості (ПК) роботи комутатора, що зведені в таблицю 1. (Підкреслимо, що за даних умов показник якості – це кількість втрачених пакетів на протязі одного сеансу моделювання).

Таблиця 1

α	5	10	15	20
ПК	1665	1274	1117	1078

Для порівняння вкажемо, що у випадку нерегульованого комутатора відповідний показник якості приймає істотно більше значення і дорівнює 2769. Це значення отримане моделюванням трафіка при відключеному регуляторі, коли пропускну здатність портів комутатора в часі не змінюються. Порівняння з даними таблиці показує реальність можливості одержання вигаши порядку 50%, що є істотним корисним результатом.

Зміст та результати третього експерименту

Початкові значення ширини смуг пропускання всіх чотирьох портів комутатора рівні 2000 умовних одиниць (наприклад, пакетів у секунду). Інтенсивності модельованих потоків пакетів, що надходять до портів комутатора, у початковий момент часу вибираються рівними, і вони адитивно змінюються (збурюються) за допомогою давальника випадкових чисел, що рівномірно розподілені в межах від -43.5 до $+43.5$ умовних одиниць. Збурювання виробляється через кожен соту частку секунди, чим імітується наявність реальних випадкових пульсацій. Відзначимо, що рівномірний розподіл збурювань трафіків є найбільш жорсткою умовою з точки зору цілей експерименту, оскільки за даних умов висуваються найбільш жорсткі вимоги до регулятора комутатора. Тому при будь-яких інших, тобто більш повільно мінливих у часі пульсаціях за умови, що діапазон пульсацій зберігається, регулятор буде забезпечувати менші, ніж у даному граничному ви-

падку, втрати пакетів інформації. Інтегрування рівнянь настроювання поточних значень ширини смуг пропускання портів ведеться на відріжку часу 5 секунд із кроком 0.00001 секунди за методом Ейлера. Загальна пропускна здатність комутатора складає 8000 умовних одиниць (чотири порти по 2000 одиниць). На обраному відріжку моделювання (5 секунд) розраховуються втрати пакетів. Відповідний показник якості визначається так само, як і в першому експерименті. Початкові значення інтенсивностей трафіків вибираються таким чином, щоб втрати пакетів за період 5 секунд не перевищували 0.1%, тобто щоб губився не більш ніж кожен тисячний пакет, що відповідає прийнятним нормативам якості роботи комутатора. Таким чином, втрати в нашому випадку, коли протягом 5 секунд через 4 порти комутатора проходить 40000 пакетів, не повинні перевищувати значення 40 пакетів, або бути близькими до цього значення за величиною. Вибір цих початкових значень інтенсивностей потоків проводиться за допомогою проб значень незбуреної інтенсивності і прогнозування за лінійним законом втрат на основі виконаних проб. У якості результату виконаного моделювання отримано результати, що зведені в таблицю 2 (прийняті в таблиці скорочення поміщені нижче за текстом).

Таблиця 2

α	5	10	15	20
ПЯ	40.06	41.04	39.46	40.00
ПЗІ	1700	1748	1765.5	1772
КЗ	0.85	0.874	0.88275	0.886

У таблиці 2 умовна позначка ПЗІ означає початкове незбурене значення інтенсивності трафіка на вході кожного із портів. Умовна позначка КЗ означає коефіцієнт завантаження порту. Початкові інтенсивності потоків пакетів обрані так, що показник якості має при усіх випробуваних показниках загасання функції Белмана приблизно однакове значення, що підтверджується даними таблиці 2.

Аналіз результатів третього експерименту

З експерименту видно, що із збільшенням параметра швидкодії від значення 5 до значення 20 коефіцієнт заванта-

ження може бути збільшений від значення 0.85 до значення 0.88. Це є прийнятним практично корисним результатом.

Зазначимо, що під час відсутності регулятора показник якості складає 2818 – надзвичайно велике число в порівнянні з нормативними значеннями показників якості, що досягаються при включеному в контур керування регуляторі, що наведено в табл. 2.

Висновки

У результаті чисельного імітаційного моделювання показано, що запропонована у [1] ідея автоматичного адаптивного керування шириною смуг пропускання портів комутатора є працездатною й ефективною. Головним практичним результатом є обґрунтована можливість суттєвого підвищення коефіцієнта завантаження обладнання пакетних комутаторів шляхом впровадження адаптивного керування комутатором. Найбільш показовим є порівняння результатів першого і третього експерименту. З порівняння видно, що якщо для не керованого комутатора досяжним є коефіцієнт завантаження 0,323, то для комутатора, замкнутого регулятором, можливий коефіцієнт завантаження відповідно до таблиці 2 може досягати значення 0,886. Таким чином, ми маємо істотне збільшення продуктивності комутатора.

У реальних умовах пульсації трафіків можуть мати не передбачувані особливості. Тому в принципі рівень збурювань, в умовах яких працює комутатор у реальній мережі, завжди може стати вище граничного значення, при якому регулятор забезпечує нормативну якість надання мережних послуг. В другому експерименті показано, що за умов існування постійних значень інтенсивностей трафіків втрати пакетів зменшуються при збільшенні параметра швидкодії системи. Отже, шляхом настроювання цього параметра є можливим здійснити адаптацію пакетного комутатора до особливостей реальних пульсацій трафіків.

Список літератури

1. Кочергин Ю. А. Математические машины и системы // Институт Кибернетики АН Украины. – К., 2005. – №4. – С. 9–17.
2. Быков В. В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. – М: Сов. Радио, 1971. – 328 с.