

УДК 681.324.658 (045)

Муранов О.С.,  
Кочергін Ю.А.,  
Чуприн В.М.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕХАНІЗМУ ПРОГНОЗУВАННЯ ТРАФІКА НА ЯКІСТЬ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ КОМУТАТОРОМ

Національний авіаційний університет

*Виконано аналіз системних помилок адаптивного керування механізмом перерозподілу пропускної здатності пакетного комутатора між його портами. Для зменшення помилок керування запропоновано використання прогнозування в контурі керування механізмом перерозподілу. Уведення механізму прогнозування дозволяє зменшити, а за певних умов і усунути помилки керування, що призводять до втрат пакетів*

### **Сутність проблеми**

В роботі [1] запропоновано новий адаптивний механізм покорокового дискретного керування перерозподілом пропускної здатності пакетного комутатора між його портами (або, як кажуть зв'язківці, механізм перерозподілу ширини смуги пропускання комутатора між його портами). Цей механізм адаптує у реальному часі смуги пропускання портів комутатора під динаміку змін інтенсивності потоків пакетів, що надходять до цих портів. Але за умови, що сумарна смуга усіх портів у будь-який поточний момент часу не перевищує пропускну здатність комутатора. Завдяки роботі цього механізму динаміка процесу перерозподілу смуги комутатора між його портами майже співпадає із динамікою тренду трафіка на портах. Це дає суттєвий корисний ефект: підвищується коефіцієнт можливого завантаження обладнання комутатора трафіком.

Під час роботи механізму адаптивного перерозподілу виникають помилки, що негативно впливають на якість керування. Проте характер цих помилок, механізм їхнього утворення та ступень впливу на якість керування в роботі [1] не досліджено. Тому однією із цілей у рамках цієї статті є дослідження механізму утворення помилок адаптивного керування смугою пропускання комутатора та характеру впливу цих помилок на якість керування.

Механізм перерозподілу повинен мати високі динамічні характеристики, досягнення котрих, зважаючи на високі швидкості обробки пакетів у сучасному вузловому обладнанні, являє собою нетривіальну задачу. Зокрема, в моменти часу, коли інтенсивність потоку пакетів на якомусь порту швидко збільшується, то необхідно швидко збільшити його смугу пропускання, тобто цьому порту треба якомога швидше виділити більшу частку пропускної спроможності комутатора (звісно, за рахунок зменшення часток пропускної спроможності, що виділяються іншим портам). І навпаки. Неважко передбачити, що за таких умов введення у контур адаптивного керування будь-якого механізму короткострокового прогнозування трафіку, що просувається через порти комутатора, може суттєво покращити ефективність роботи системи керування. Дослідження можливого впливу такого прогнозування на зменшення помилок керування комутатором складає іншу ціль цієї статті.

### **Робота механізму прогнозування у складі системи керування**

На рис. 1 показано, яким чином механізм прогнозування інтегрується у склад системи адаптивного керування перерозподілом пропускної здатності пакетного комутатора між його портами.

Потоки пакетів, які на рис. 1 зображені стрілками, перш ніж потрапити на увідні порти комутаційного пристрою

(ПК) проходять через блок вимірювання (БВ), котрий послідовно, крок за кроком, у реальному часі із наперед заданим часовим інтервалом вимірює поточні значення параметрів цих потоків, а результати вимірювань надсилає на вхід блоку прогнозування (БПР). Перш за все, вимірюються на одnoseкундних часових інтервалах поточні значення інтенсивності потоку пакетів  $I_1, I_2, \dots, I_N$ , де  $N$  – кількість портів у ПК. У свою чергу, блок БПР послідовно, крок за кроком, приймає від блоку БВ результати вимірювань значень параметрів потоків пакетів, здійснює їхню обробку таким чином, щоб сформувати послідовності виборок даних (часових рядів), що задовольняють встановленим вимогам у рамках задіяного методу прогнозування. Окрім того, блок БПР безпосередньо реалізує задану процедуру прогнозування, а результати прогнозних оцінок значень

параметрів трафіку, зроблених на момент прийняття управлінських рішень, передає на вхід блоку формування команд управління (БФК). Слід зазначити, що блок БПР здійснює прогнозування не за поточними значеннями пульсацій пакетного трафіку, а за їх усередненими значеннями  $I_1, I_2, \dots, I_N$ . Тобто, на кожному кроці прогнозування на основі кількох останніх точок тренду потоку пакетів на кожному із портів визначається найближча майбутня точка цього тренду. Тренд – це згладжений потік, що формується шляхом усереднення первісного поточного потоку пакетів. На практиці в залежності від конкретних умов застосування ПК коефіцієнт усереднення обирається у діапазоні від 5 до 120 (і більше). Найчастіше використовуються п'ятисекундні, десятисекундні, п'ятнадцятисекундні та тридцятисекундні інтервали усереднення.

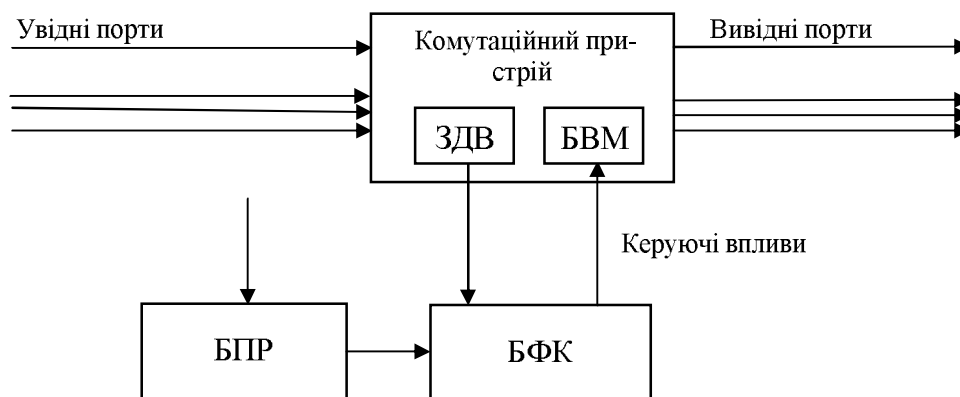


Рис. 1. Узагальнена структура системи керування смугами портів комутатора

У той же час в момент початку кожного кроку керування від задавальника параметрів портів (ЗДВ), що функціонує у складі ПК, на інший вхід блоку БФК надсилається інформація щодо поточних значень встановлених параметрів для кожного із портів комутаційного пристрою. Тобто, від ЗДВ на БФК передаються встановлені на попередньому кроці керування значення ширин смуг пропускання портів. На основі цієї інформації та отриманих поточних прогнозних оцінок параметрів потоків блок БФК виробляє потік керуючих впливів (у формі відповідних команд управління), що подаються на вхід блоку виконавчих механізмів (БВМ) вузлу керу-

вання ПК. Ці виконавчі механізми блоку БВМ згідно з отриманими командами від блоку БФК здійснюють відповідні зміни параметрів портів ПК (тобто, збільшують або зменшують смуги пропускання портів) у блоці ЗДВ цього комутатора. Алгоритм керування вибирають, виходячи із технічних умов застосування обладнання. У будь-якому випадку швидкодію системи регулювання узгоджують із динамікою змін у тренді.

### Постановка завдань

*Завдання 1.* За умов відсутності механізму прогнозування дослідити механізм керування перерозподілом з метою

виявлення можливих шляхів утворення помилок, що впливають на якість керування. Визначити показники якості керування та характер впливу цих помилок на якість керування.

*Завдання 2.* Дослідити механізм адаптивного керування в умовах використання механізму прогнозування. Визначити характер впливу прогнозування на показники якості керування.

**Аналіз похибок адаптивного керування в умовах відсутності механізму прогнозування**

На рис. 2 лінія  $\Gamma_1$  відображає тренд потоку на першому порті комутатора, отриманого як результат усереднення вимірних поточних значень інтенсивності цього потоку на п'ятисекундних інтервалах. Верхній графік відображає відрізок зростаючого тренду, а нижній графік – відрізок спадаючого тренду. Як бачимо, тренд має сходинкоподібну форму, де висота сходинки є випадковою величиною, що залежить від динаміки змін тренду, а ширина сходинки – це обраний адмініст-

ратором інтервал усереднення. Форма тренду визначається обраним механізмом згладжування первісного трафіка. У даному випадку обрано механізм так званого „відра токенів”, що детально розглянутий у [2]. Цей механізм дозволяє перетворити пульсуючі потоки пакетів, що надходять до портів комутатора, у згладжені потоки сходинкоподібної форми – саме такі, що показані на рис. 2. У кінці кожного п'ятисекундного інтервалу на основі результатів усереднення автоматично змінюється відповідний параметр механізму „відра токенів” (точніше, генератора токенів), що приводить до стрибкоподібних змін інтенсивності згладженого потоку пакетів: на ділянках зростаючого тренду сходинки йдуть вгору, а на ділянках спадаючого тренду сходинки йдуть вниз. Зрозуміло, що згладжувальні властивості умовного „відра токенів” діють лише у певних межах: під час надто сильних сплесків трафіку вхідні черги пакетів переповнюються і „зайві” пакети втрачаються.

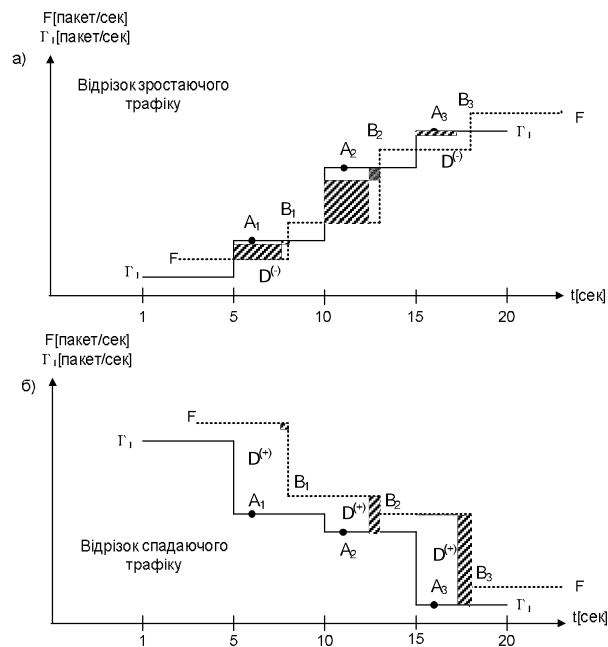


Рис. 2. Утворення помилок адаптивного керування без прогнозування

Адаптивний механізм керування перерозподілом має змінювати смугу пропускання порту ПК синхронно із змінами та пропорційно змінам тренду. Дискретний характер змін тренду обумовлює дис-

кретність керування. Смуга пропускання, що виділена першому порту, на рис. 2 позначена лінією  $F$ . Як бачимо, лінія  $F$  повторює за формою лінію  $\Gamma_1$ , проте із певним запізненням. Величина запізнення

обумовлена, головним чином, швидкодією механізму керування (оскільки на кожному кроці керування потрібен час на обробку даних, що надходять до блоку БФК, а на роботу виконавчих механізмів блоку БВМ). Окрім того, лінія  $F$  проходить дещо вище за лінію  $\Gamma 1$ . Відстань по висоті між цими лініями обумовлюється прийнятим запасом щодо неперевикнення трендом виділеної смуги порту. На рис. 2 тривалість роботи механізму керування визначається відстанню між точками  $A$  та  $B$ . Зокрема, на інтервалі між п'ятою та десятою секундами тривалість роботи механізму керування визначається часовим проміжком між точками  $A1$  та  $B1$ , на інтервалі між десятою та п'ятнадцятою секундами – часовим проміжком між точками  $A2$  та  $B2$  і т.д. При цьому помітимо: щоб уникнути неоднозначності у показах ЗДВ (що передає встановлені значення ширини смуг портів до блоку БФК), моменти початку роботи механізму керування (точки  $A1$ ,  $A2$ ,  $A3$ ) дещо зміщені відносно початку сходинок лінії  $\Gamma 1$ .

Розглянемо роботу механізму керування на відрізку зростаючого тренду. Як бачимо, у цьому випадку існують часові ділянки, коли лінія  $F$  розташована нижче, ніж лінія  $\Gamma 1$ . (рис. 3 вони затемнені). На цих ділянках інтенсивність згладженого потоку пакетів перевищує виділену для нього ширину смуги порту. Тобто, внаслідок недооцінки необхідної ширини смуги порту, зробленої на попередньому кроці керування, виник дефіцит смуги на поточному кроці керування, що призвів до втрати певної кількості пакетів. Такого роду помилки адаптивного керування назвемо помилками недооцінки смуги  $D(-)$ . Як протипага помилкам  $D(-)$ , уведемо показник помилок переоцінки смуги пропускання порту  $D(+)$ , що пов'язується із ситуацією надлишкового надання смуги певному порту, коли виділена смуга перевищує інтенсивність згладженого потоку пакетів.

За результатами аналізу роботи механізму керування на відрізках зростаючого тренду, зроблено наступні висновки:

1) за будь-яких умов на відрізках зростаючого тренду можуть виникнути лише помилки недооцінки смуги  $D(-)$ ;

2) помилки переоцінки смуги  $D(+)$  на відрізках зростаючого тренду не виникають за будь-яких обставин;

3) показник помилок  $D(-)$  збільшується пропорційно збільшенню висоти та (або) ширини сходинки у тренді (тобто, пропорційно збільшенню стрибків у тренді та (або) зменшенню швидкодії механізму керування);

4) за умов, коли величина стрибків у тренді менша за відстань між лініями  $\Gamma 1$  та  $F$ , помилки керування типу  $D(-)$  або  $D(+)$  взагалі не виникають.

Розглянемо роботу механізму керування на відрізку спадаючого тренду (див. нижній графік на рис. 2). Як бачимо, у цьому випадку не існують часові ділянки, коли лінія  $F$  розташована нижче, ніж лінія  $\Gamma 1$ . Це свідчить про відсутність помилок типу  $D(-)$ . На будь-яких ділянках спадаючого тренду інтенсивність згладженого потоку пакетів не перевищує виділену для нього ширину смуги порту. Проте внаслідок запізнення моментів змін ширини смуги порту відносно змін тренду згладженого потоку пакетів виникають ділянки (на рис. 2 вони затемнені), де різниця у рівнях між лініями  $\Gamma 1$  та  $F$  є більшою, ніж прийнятий запас щодо не перевищення трендом виділеної смуги порту. Отже, на цих ділянках виникають помилки переоцінки смуги  $D(+)$ , що негативно впливають на рівень завантаженості порту.

За результатами аналізу роботи механізму керування на відрізках спадаючого тренду, зроблено наступні висновки:

1) за будь-яких умов на відрізках спадаючого тренду можуть виникнути лише помилки переоцінки смуги  $D(+)$ ;

2) помилки недооцінки смуги  $D(-)$  на відрізках спадаючого тренду не виникають за будь-яких обставин;

3) показник помилок  $D(+)$  збільшується пропорційно збільшенню висоти та (або) ширини сходинки у тренді (тобто, пропорційно збільшенню стрибків у тре-

нді та (або) зменшенню швидкодії механізму керування);

4) за умов, коли величина стрибків у тренді менша за відстань між кривими  $I_1$  та  $F$ , помилки керування типу  $D(-)$  або  $D(+)$  практично не виникають.

Слід підкреслити, що помилки недооцінки типу  $D(-)$  у механізмі керування є явно небажаними, оскільки вони призводять до втрат пакетів. У той же час помилками переоцінки типу  $D(+)$  при вирішенні більшості експлуатаційних завдань можливо знехтувати, оскільки вони лише несуттєво погіршують рівень завантаженості порту. На жаль, обидва типи помилок носять системний характер, що пов'язано із інерційністю процесу керування. Ці помилки неможливо повністю усунути. Проте їх можливо зменшити і, навіть, перетворити один тип помилок в інший. У контексті адаптивного керування інтерес являє можливість перетворення помилок типу  $D(-)$  в помилки типу  $D(+)$ . Така можливість виникає, якщо у контур системи керування перерозподілом смуг портів комутатора включити механізм прогнозування тренду.

### Аналіз похибок адаптивного керування в умовах використання механізму прогнозування

Величина помилок (як  $D(-)$ , так і  $D(+)$ ) є пропорційною площам затемнених прямокутників, що зображені на рис. 2. Зрозуміло: щоб зменшити похибки керування, треба вчинити дії, які приводять до зменшення площ цих прямокутників. Висоти прямокутників можливо зменшити, якщо збільшити коефіцієнт усереднення первісного трафіка. Проте така дія призведе до збільшення затримок пакетів у вхідних чергах портів комутатора, що в багатьох випадках – вкрай небажано. Ширини прямокутників можливо зменшити, якщо збільшити швидкодію автоматичної системи регулювання (так, щоб відстань, наприклад, між точками  $A_1$  та  $B_1$  була меншою). Проте таке можливо зробити лише до певних меж, оскільки цій системі притаманна кінцева інерційність.

Пропонується ще один спосіб зменшення площ затемнених прямокутників шляхом використання на кожному кроці керування процедури прогнозування найближчої майбутньої точки тренду, де цей тренд має стрибкоподібно змінитися. На практиці важливо зменшити помилки недооцінки смуги порту  $D(-)$ , котрі, як вже вказувалось, можуть виникати лише на відрізках зростаючого тренду. Тому для пояснень ефекту зменшення помилок недооцінки за рахунок використання механізму прогнозування розглянемо відрізок зростаючого тренду, що складається із трьох сходинок (рис. 3).

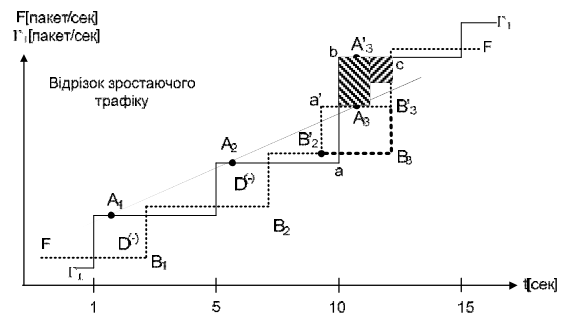


Рис. 3. Ефект зменшення помилок недооцінки смуги порту внаслідок використання механізму прогнозування

Точками  $A_1, A_2, A_3$  позначено моменти початку кроків керування. У ці моменти від ЗДВ на БФК передаються встановлені на попередньому кроці керування значення ширин смуг пропускання портів. Точками  $B_1, B_2, B_3$  позначено моменти закінчення кроків керування. У ці моменти виконавчі механізми блоку БВМ закінчують процес збільшення або зменшення смуг пропускання портів комутатора. Затемнені площі трьох прямокутників на рис. 3 ілюструють величини похибок недооцінки  $D(-)$  щодо трьох поточних кроків керування. Зокрема, величина похибки недооцінки на третьому кроці керування за умов відсутності прогнозування визначається площею прямокутника  $авсB_3$ . Покажемо, яким чином прогнозування може зменшити похибку недооцінки на третьому кроці керування. Для цього використаємо найпростіший механізм лінійного прогнозу, тобто на основі даних щодо двох точок тренду  $A_1$  та  $A_2$  визначимо

прогнозу оцінку висоти третьої сходинки, яку позначимо як  $A_{13}$ . Знаючи координати двох точок, неважко побудувати пряму, що проходить через ці точки. Зрозуміло, що прогнозна точка  $A_{13}$  має знаходитись на цій прямій. Знаючи прогнозу точку ще то того, коли відбудеться черговий стрибок тренду, можливо модифікувати алгоритм керування таким чином, щоб безпосередньо перед цим стрибком (рис. 3 – у точці  $B_{12}$ ) змінити смугу пропускання порту до величини  $A_{13}$ . Тоді величина похибки недооцінки на третьому кроці керування визначиться площею прямокутника  $a'bcB'3$ . Як бачимо, площа цього прямокутника менша за площу прямокутника  $abcB3$  за умови, якщо помилка прогнозу буде не перевищувати висоту сходинки тренду.

Таким чином, удосконалення механізму керування у напрямку зменшення помилок типу  $D(-)$  полягає в тому, що на кожному кроці прогнозування на основі кількох останніх точок тренду потоку пакетів визначається найближча майбутня точка цього тренду. Ця точка сприймається системою регулювання як значення ширини смуги порту, що має бути встановлено безпосередньо перед найближчим майбутнім стрибком тренду. Чим менша похибка прогнозу, тим менша помилка недооцінки ширини смуги порту.

Якщо вищенаведений механізм застосувати до спадаючих ділянок тренду, то можливо упевнитись, що в деяких випадках маємо погіршення, але помилки переоцінки  $D(+)$ , яка на практиці у більшості випадків не є суттєвою. Якщо це не так, то механізм прогнозування на спадаючих ділянках тренду слід відключати.

Привабливою особливістю використання прогнозування на зростаючих відрізках трафіку є існування ефекту перетворення помилок недооцінки  $D(-)$  у помилки переоцінки  $D(+)$ , які, як вже вказувалось, зазвичай не мають суттєвого значення. Припустимо, що прогнозне значення висоти третьої сходинки на рис. 3 виявилось більшим, ніж  $A_3$ . Тоді лінія  $A'3B'3$  проходила вище лінії  $bc$ , що означало

зникнення помилки недооцінки і появу помилки переоцінки. Ця ситуація відображена на рис. 4.

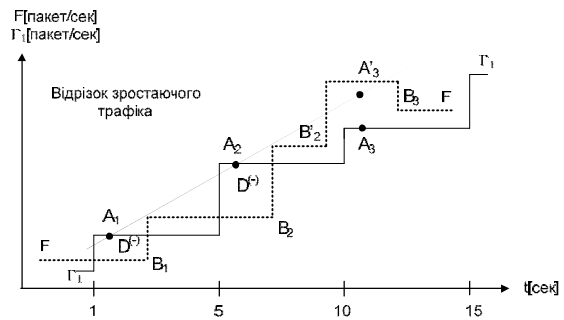


Рис. 4. Ефект перетворення помилки типу  $D(-)$  у помилку типу  $D(+)$

### Висновки

Робота системи адаптивного перерозподілу пропускну здатності комутатора між його портами супроводжується виникненням системних помилок керування, що призводить, в одних випадках, до підвищення рівню втрат пакетів, а в інших, до зниження коефіцієнту завантаження комутатора корисним трафіком.

При вирішенні більшості експлуатаційних завдань більш важливою є задача зменшення помилок, що пов'язані із втратами пакетів. Цю задачу пропонується вирішувати шляхом уведення в контур адаптивного керування механізму прогнозування тренду трафіка пакетів.

Механізм прогнозування дозволяє зменшити, а за певних умов і усунути помилки, що призводять до втрат пакетів.

### Список літератури

1. Кочергин Ю.А. Задача авторегулювання перерасподіленням пропускну здатності пакетного комутатора между его портами // Математичні машини і системи. Вип. 2. – 2006.
2. Олифер В.І., Олифер Н.А. Компьютерные сети. 3-е изд. – СПб: Питер, 2006. – 958 с.