

# АНАЛІЗ ПОХИБОК АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПЕРЕРОЗПОДІЛОМ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КОМУТАТОРА

Андрій Муранов

Національний авіаційний університет, Україна



МУРАНОВ Андрій Сергійович, к.т.н.

Рік та місце народження: 1983 рік, м. Київ, Україна.

Освіта: Національний авіаційний університет, 2006 р.

Посада: доцент кафедри телекомунікаційних систем НАУ.

Наукові інтереси: інформаційні технології, телекомунікаційні системи та мережі.

Публікації: 20 наукових публікацій, навчально-методичні посібники.

**Анотація.** У результаті аналізу системи адаптивного керування перерозподілом пропускної здатності пакетного комутатора виявлено два різновиди системних помилок керування. Ці помилки призводять до втрат пакетів та (або) зниження можливого ступеня завантаженості комутатора корисним трафіком. Для зменшення негативного впливу таких помилок на якість роботи механізму пропонується модифікувати механізм згладжування пульсуючого трафіка, а в контур адаптивного керування включити механізм прогнозування тренду трафіка.

**Ключові слова:** пакетний комутатор, адаптивне керування, перерозподіл навантаження, помилки керування.

## Вступ

Згідно [1] пропускна спроможність комутатора має розподілятися між його портами пропорційно поточним величинам інтенсивності потоків пакетів, що надходять до цих портів, а динаміка процесу перерозподілу за певних умов має співпадати із динамікою пульсації трафіка на увідних портах комутатора. Проте у [1] відсутня інформація щодо можливих помилок регулювання, пов'язаних із адаптивністю та дискретністю процесу такого перерозподілу. Помилки регулювання у разі неприйняття дій щодо їхнього знешкодження можуть суттєво знизити корисний ефект від застосування адаптивного способу керування комутатором. Тому дослідження механізму адаптивного керування смугою пропускання комутатора з метою виявлення можливих шляхів утворення та усунення помилок, що впливають на якість керування, являє собою певний теоретичний і практичний інтерес.

## Постановка завдання

Припустимо, що маємо систему адаптивного керування смугою портів пакетного комутатора, структурна схема котрої представлена на рис. 1. Необхідно виявити механізм утворення помилок адаптивного керування, вплив цих помилок на якість керування та визначити шляхи зменшення помилок, що впливають на якість керування.

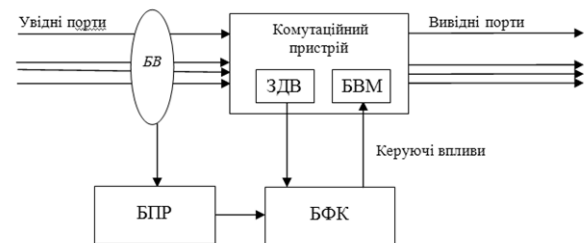


Рис. 1. Структура адаптивної системи керування смугою портів комутатора: БВ – блок вимірювань; БПР – блок прогнозування; БФК – блок формування команд; ЗДВ – задавальник; БВМ – блок виконавчих механізмів

## Аналіз досліджень і публікацій

Аналізу функціонування системи адаптивного керування пакетним комутатором присвячено ряд наукових праць, зокрема [1–4]. Проте питання щодо виникнення та шляхів усунення системних помилок адаптивного керування не знайшло відображення у цих працях. У той же час системні помилки адаптивного керування, у разі їхнього виникнення, можуть суттєво знизити якість функціонування пакетного комутатора.

**Ціль дослідження** – визначення шляхів підвищення якості адаптивного керування пакетним комутатором за рахунок зменшення системних помилок.

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

На рис. 2 лінія  $\Gamma_1$  відображає тренд потоку на першому порту комутатора, отриманого як результат усереднення виміряних поточних значень інтенсивності цього потоку на п'ятисекундних інтервалах. Цей тренд формується програмними засобами обробки вхідних черг пакетів, утворюваних на першому порту комутатора. 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 адміністратором інтервал усереднення. Форма тренду визначається обраним механізмом згладжування первісного трафіка.

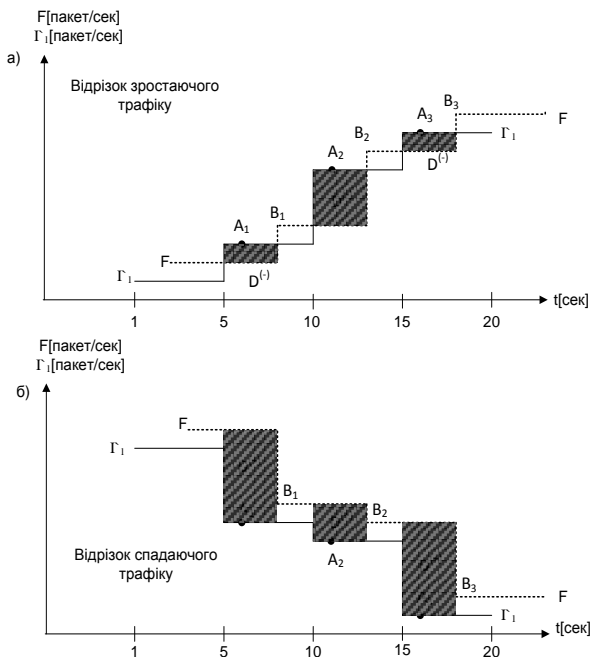


Рис. 2. Утворення помилок адаптивного керування без прогнозування

У даному випадку обрано модифікований механізм «відра токенів», що детально розглянутий вище у [3]. 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 униз. 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. Адаптивний механізм керування перерозподілом має змінювати смугу пропускання порту пакетного комутатора (ПК) синхронно із змінами та

пропорційно змінам тренду. Дискретний характер змін тренду обумовлює дискретність 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, та на роботу виконавчих механізмів блоку БВМ, див. рис. 1). 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  $A_1$  та  $B_1$ , на інтервалі між десятою та п'ятнадцятою секундами – часовим проміжком між точками  $A_2$  та  $B_2$  і т.д. При цьому помітимо: щоб уникнути неоднозначності у показах ЗДВ, (що передає встановлені значення ширини смуг портів до блоку БФК, див. рис. 2), моменти початку роботи механізму керування (точки  $A_1, A_2, A_3$ ) дещо зміщені вправо відносно початку сходинки 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  $\Gamma_1$ . (На рис. 2 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, за кінцевим рахунком, призводить до втрати повної кількості пакетів на цьому кроці керування. Такого роду помилки адаптивного регулювання назовемо 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 реальну інтенсивність згладженого потоку пакетів на поточному кроці керування.

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 неперевикнення 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 тренді та (або) зменшенню швидкодії механізму керування);

4. За умов, коли величина стрибків у тренді менша за відстань між кривими  $\Gamma_1$  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 неконтрольованих утрат пакетів. У той же час помилками переоцінки типу  $D^{(+)}$  при вирішенні більшості експлуатаційних завдань можна 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 можна зменшити і навіть перетворити один тип помилок в інший. У контексті адаптивного керування інтерес являє собою можливість перетворення помилок типу  $D^{(-)}$  у 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. 1. Зрозуміло: щоб зменшити похибку 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 – украй небажано. Ширину 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 (див. рис. 3).

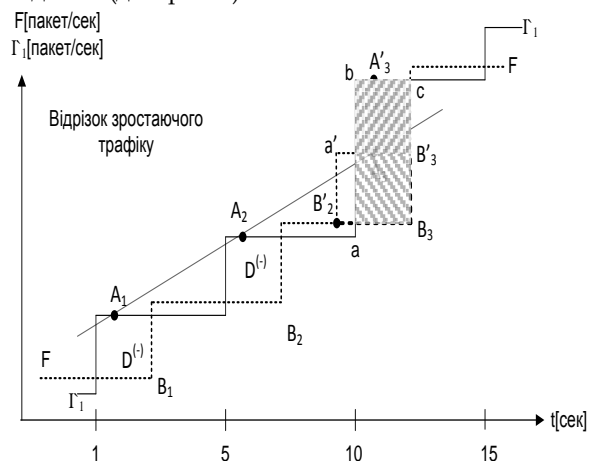


Рис. 3. Ефект зменшення помилок недооцінки смуги порту внаслідок використання механізму прогнозування

Точками  $A_1, A_2, A_3$  позначено моменти початку кроків керування. У ці моменти від ЗДВ на БФК (див. рис. 1) 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  $abcB_3$ . Покажемо, яким чином прогнозування може зменшити похибку недооцінки на третьому кроці керування. Для цього, як приклад, 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  $A^1_3$ . Знаючи координати двох точок, неважко побудувати пряму, що проходить через ці точки. Зрозуміло, що прогнозна точка  $A^1_3$  має знаходитись на цій прямій. Знаючи прогнозу точку ще то того, коли відбудеться черговий стрибок тренду, можна модифікувати алгоритм керування таким чином, щоб безпосередньо перед цим стрибком (на рис. 3 – у точці  $B^1_2$ ) змінити смугу пропускання порту до величини  $A^1_3$ . Тоді величина похибки недооцінки на третьому кроці керування визначиться площею прямокутника  $a^1bcB^1_3$ . Як бачимо, площа цього прямокутника менша за площу прямокутника  $abcB_3$  за умови, якщо помилка прогнозу не буде перевищувати висоту сходинки тренду.

У вищерозглянутому прикладі використано найпростіший механізм прогнозування тренду. Зрозуміло, що застосування більш досконалих механізмів прогнозування, скоріш за все, підвищить точність прогнозу і, отже, у більшій мірі зменшить площу прямокутника  $a^1bcB^1_3$ . Зокрема прогнозування, що засноване на апроксимації вузлів тренда за допомогою експоненціальної функції більш реалістично відображає «поведінку» змін у тренді. До того ж похідні від експоненти також являються експонентами, котрі, у свою чергу, можуть бути розкладені у ряд Маклорена. Обмежуючись усього кількома першими членами цього ряду, можливо вирішити задачу прогнозування з достатньо прийнятною точністю. У цьому зв'язку інтерес викликають також кубічні сплайни, яким притаманна, як стверджують спеціалісти, відносно висока точність прогнозування часових рядів, і в той же час, як показано в роботі [3], вони достатньо просто реалізуються програмними засобами.

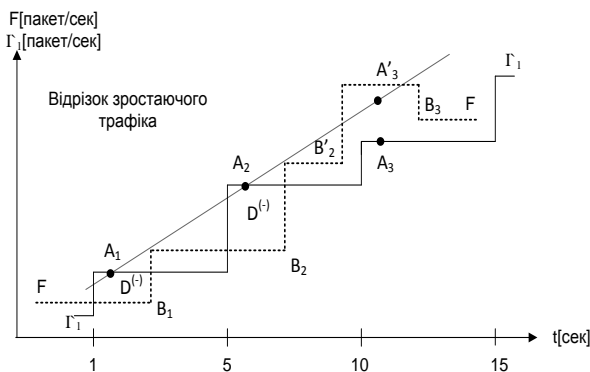


Рис. 4. Ефект перетворення помилки типу  $D^{(-)}$  у помилку типу  $D^{(+)}$

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 можна 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 відключити.

Привабливою особливістю використання прогнозування на зростаючих відрізках тренду 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  $A^1_3 B^1_3$  проходила б вище лінії  $bc$ , що означало б зникнення помилки недооцінки і появу помилки переоцінки. Ця ситуація відображена на рис. 4.

Як бачимо на рис. 4, площа прямокутника, що відображає існування помилок недооцінки типу  $D^{(-)}$  за умов відсутності прогнозування, при включенні механізму прогнозування нівелюється. Замість нього виникає площа прямокутника, що відображає існування помилок переоцінки типу  $D^{(+)}$ .

## Висновки

1. Робота системи адаптивного перерозподілу пропускної здатності комутатора між його портами супроводжується виникненням системних помилок регулювання, що призводить, в одних випадках, до підвищення рівня втрат пакетів, а в інших, – до зниження коефіцієнта завантаження комутатора корисним трафіком. Запропоновано розділяти ці помилки на помилки недооцінки смуги пропускання порту  $D^{(-)}$  та помилки переоцінки смуги пропускання порту  $D^{(+)}$ .

2. Для зменшення помилок регулювання запропоновано застосовувати механізм прогнозування тренду, що має формуватися відповідно до модифікованого алгоритму «відра токенів» [2]. Показано, що використання механізму прогнозування у контурі керування механізмом перерозподілу пропускної спроможності комутатора забезпечує можливість не тільки зменшення помилок недооцінки  $D^{(-)}$ , але і перетворення цих помилок у помилки переоцінки  $D^{(+)}$ .

3. При вирішенні більшості експлуатаційних завдань більш важливою є задача зменшення помилок, що пов'язані із втратами пакетів, тобто зменшення помилок типу  $D^{(-)}$ . Цю задачу пропонується вирішувати шляхом уведення в контур адаптивного керування механізму прогнозування тренду трафіку пакетів. Таке удосконалення механізму перерозподілу дозволяє зменшити, а за певних умов і усунути помилки, що призводять до втрат пакетів.

## Література

[1] Кочергин Ю. А. Задача авторегулювання перерасподіленням пропускної спроможності пакетного комутатора между его портами /

Ю. Кочергин // Математичні машини і системи. — К. : ІК АНУ, 2006. — Вип. 2. — С. 60–70.

[2] Антонов В.К. Метод построения качественных регуляторов / В. Антонов // Кибернетика и вычислительная техника. — К. : ІК АНУ, 2000. — Вип. 126. — С. 40–48.

[3] Муранов О.С. Метод динамічного перерозподілу продуктивності пакетного комутатору між його портами з використанням механізму

прогнозування пульсацій трафіка / Муранов О.С., Чуприн В.М., Потапов В.Г. // Проблеми інформатизації та управління : збірник наукових праць. №2(24). — К. : НАУ, 2008. — С. 136–144.

[4] Муранов О.С. Аналіз механізмів керування ресурсами пакетних мереж / Муранов О.С. // Защита Информации: Сборник научн. трудов Национального авиационного университета. — Вип. 14. — К. : НАУ, 2007. — С. 191–193.

#### УДК 654.16 (045)

##### **Муранов А.С. Анализ погрешностей адаптивного управления перераспределения пропускной способности коммутаторов**

**Аннотация.** В результате анализа системы адаптивного управления перераспределением пропускной способности пакетного коммутатора обнаружено две разновидности системных ошибок управления. Эти ошибки приводят к потерям пакетов и (или) снижению возможной степени загруженности коммутатора полезным трафиком. Для уменьшения негативного влияния таких ошибок на качество работы механизма предлагается модифицировать механизм сглаживания пульсирующего трафика, а в контур адаптивного управления включить механизм прогнозирования тренда трафика.

**Ключевые слова:** пакетный коммутатор, адаптивное управление, перераспределение нагрузки, ошибки управления.

##### **Muranov A.S. Analyzing the errors of adaptive control of switch capacity reallocation**

**Abstract.** Two sorts of systemic control errors have been detected in the course of an analysis of a system of adaptive control of packet switch capacity reallocation. These errors result in packet loss and/or in decreasing the possible occupancy of the switch with useful traffic. To reduce the negative influence of such errors on the equipment operation quality, we suggest modifying the bursty traffic smoothing mechanism as well as including a traffic trend predicting mechanism into the adaptive control loop.

**Key words:** packet switch, adaptive control, load reallocation, control errors.

Отримано 5 вересня 2013 року, затверджено редколегією 24 вересня 2013 року