

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І  
АРХІТЕКТУРИ**

На правах рукопису

**МХАМАД ІБРАГІМ АХМАД АЛЬОМАР**

УДК 004.7(045)

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ  
РОЗПОДІЛОМ РЕСУРСІВ ПАКЕТНИХ МЕРЕЖ**

Спеціальність 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук

Науковий керівник - кандидат технічних наук,  
доцент Вишняков Володимир Михайлович

Київ – 2015

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ .....</b>	<b>4</b>
<b>ВСТУП .....</b>	<b>8</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АДАПТИВНОГО РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ ПАКЕТНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ ПУЛЬСАЦІЙ ТРАФІКУ .....</b>	<b>16</b>
1.1. Характеристика технології адаптивного управління розподілом ресурсів пакетних мереж .....	16
1.2. Аналіз системних помилок адаптивного управління .....	24
1.3. Аналіз можливих шляхів удосконалення технологій управління розподілом ресурсів пакетних мереж .....	31
1.4. Вплив можливих удосконалень на помилки управління .....	35
Висновки до першого розділу .....	39
<b>РОЗДІЛ 2. ФОРМУВАННЯ ТРАФІКА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ ЗАСОБІВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ .....</b>	<b>41</b>
2.1. Асимптотично самоподібний процес як модель пакетного трафіка .....	42
2.2. Визначення можливостей згладжування та прогнозування пакетного трафіку .....	49
2.3. Розробка технологічної схеми формування пакетного трафіку .....	51
2.4. Розробка процедур віднесення пакетного трафіка до класу самоподібних процесів .....	58
2.5. Дослідження впливу параметрів усереднення трафіка на його статистичні характеристики .....	62
2.6. Розробка процедури корекції у реальному часі інтервалу усереднення пакетного трафіку .....	66
Висновки до другого розділу .....	68
<b>РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ РОЗПОДІЛОМ РЕСУРСІВ ПАКЕТНИХ МЕРЕЖ .....</b>	<b>70</b>
3.1. Загальна характеристика технології управління розподілом ресурсів	

пакетної мережі .....	70
3.2. Розробка алгоритму адаптивного управління .....	71
3.3. Вибір показників якості прогнозування .....	78
3.4. Розробка методу та розрахункової схеми прогнозування .....	82
3.5. Розробка технологічної схеми адаптивного розподілу продуктивності вузлового обладнання між його портами .....	88
Висновки до третього розділу .....	96
<b>РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАФІКУ ТА ТЕХНОЛОГІЇ АДАПТИВНОГО РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ ПАКЕТНОЇ МЕРЕЖІ НА КОМП'ЮТЕРНИХ МОДЕЛЯХ .....</b>	<b>99</b>
4.1. Експериментальне дослідження характеристик пакетного трафіку ...	99
4.2. Оцінка впливу засобів прогнозування на якість адаптивного управління смугами портів вузлового обладнання .....	106
4.3. Оцінка можливостей удосконаленої технології адаптивного розподілу ресурсів щодо зменшення помилок управління .....	115
Висновки до четвертого розділу .....	124
<b>ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ .....</b>	<b>128</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>131</b>
<b>ДОДАТОК. Вибірки пакетного трафіку на вузлі Інтернет ДНДІАСБ .....</b>	<b>138</b>

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

СУАР - система управління адаптивним розподілом ресурсів пакетних мереж

ВО - вузлове обладнання

IDC - індекс дисперсії

PDU - протокольний блок даних

$K_{BO}$  - коефіцієнт завантаження вузлового обладнання;

$k_1, k_2, \dots, k_N$  - коефіцієнти завантаження портів вузлового обладнання,

де  $N$  – кількість портів у вузловому обладнанні ( $k_i = I_i/C_i$  або  $k_i = I_i/\Delta F_i$ );

$C_{BO}$  - пропускна здатність вузлового обладнання;

$C_i$  - пропускна здатність  $i$ -го порту вузлового обладнання;

$\Delta F_i$  - ширина смуги пропускання  $i$ -го порту вузлового обладнання;

$\Delta F_{\Sigma}$  - сума смуг пропускання портів вузлового обладнання;

$I_{BO}$  - швидкість (інтенсивність) обробки пакетів у вузловому обладнанні;

$I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_N$  - інтенсивність трафіка на портах вузлового обладнання, де індекс  $i = 1, 2, \dots, N$  позначає номери портів обладнання;

$\tau$  – проміжок часу;

$\tau_c$  – інтервал вимірювань поточних значень інтенсивності потоку пакетів;

$\tau_y$  - інтервал усереднення трафіка;

$\tau_k$  - інтервал між початком сусідніх кроків дискретно-адаптивного управління;

$\tau_{\partial}$  - тривалість кроку управління;

$\tau_i$  - тривалість кроку інтегрування рівняння настроювання;

$\tau_n$  - тривалість здійснення функції прогнозування величини наступного елемента часового ряду;

$l$  - кількість кроків інтегрування у межах одного кроку управління;

$L$  - сумарна кількість кроків адаптивного управління на протязі одного сеансу вимірювань;

$\tau_3$  - тривалість повного заповнення буферної пам'яті на увідному порту;  
 $S$  - максимально можливе значення інтервалу усереднення в межах одного кроку управління;

$D^{(-)}$  – помилки адаптивного регулювання, що утворюються в процесі прогнозування внаслідок недооцінки ширини смуги портів комутатора;

$D^{(+)}$  – помилки адаптивного регулювання, що утворюються в процесі прогнозування внаслідок переоцінки ширини смуги портів комутатора;

$I_k$  – поточне значення інтенсивності потоку пакетів на  $k$ -ому порту комутатора у момент  $t$ ;

$I'_k$  – усереднене значення інтенсивності потоку пакетів на  $k$ -ому порту комутатора;

$K(D^{(-)})$  - покроковий коефіцієнт помилок недооцінки смуги порту;

$X(t)$  – випадковий процес безперервного аргументу;

$Z(t)$  – нестационарний випадковий процес безперервного аргументу, що відображає телетрафік;

$T$  – проміжок часу, на якому розглядається процес;

$H$  – параметр Херста;

$a$  – коефіцієнт масштабної інваріантності стосовно безперервного процесу  $Z(t)$ ;

$X(t)$  – випадковий процес дискретного аргументу (часу), якщо  $t = 1, \dots, k$ ;

$k$  – поточний номер часового інтервалу усереднення процесу  $X$ ;

$\{X_k; k = 0; 1; 2; \dots\}$  напівскінчений відрізок стаціонарного випадкового процесу  $X$  дискретного аргументу (часу)  $t = 1, \dots, k$ ;

$M[X_t]$  – середнє значення (або математичне очікування) процесу  $X$ ;

$\sigma^2 = M[(X_t - M)^2]$  – дисперсія процесу  $X$ ;

$R(k) = M[(X_{t+k} - M)(X_t - M)]$  – кореляційна функція процесу  $X$ ;

$r(k) = R(k)/R(0) = R(k)/\sigma^2$  – коефіцієнт кореляції процесу  $X$ ;

$\{X_k^{(\tau)}; k = 0; 1; 2; \dots\}$  - часовий ряд, що моделює пакетний трафік;

$K$  - об'єм вибірки часового ряду  $\{X_k^{(\tau)}; k=0;1;2; \dots\}$ ;

$x_k^\tau$  – кількість пакетів, що надійшли в канал транспортування пакетів протягом  $k$ -го інтервалу часу тривалістю  $\tau$ ;

$\{I_k^{(\tau)}; k=0;1;2; \dots\}$  - часовий ряд, що моделює дискретні зміни інтенсивності тренду пакетного трафіку;

$\mu^{(\tau)}(q)$  –  $q$ -й абсолютний (тобто, початковий) статистичний момент процесу  $X$ , що усереднений на інтервалі тривалістю  $\tau$ ;

$q$  – порядок статистичного моменту процесу  $X$  (перший, другий і т.д.);

$L(t)$  – повільно мінлива функція на нескінченності;

$\beta$  – параметр функції кореляції самоподібного процесу (визначає кут нахилу графічного відображення залежності коефіцієнту кореляції від інтервалу кореляції);

$\tau_k$  – інтервал кореляції процесу  $X$ ;

$x(k)$  – реалізація часового ряду як функція від  $k$  - поточного порядкового номеру члена цього часового ряду (моделює пакетний трафік на портах комутатора);

$\Delta T_c$  - інтервал стаціонарності потоків пакетів на портах вузлового обладнання ;

$D^+$  - коефіцієнт недооцінки;

$D^-$  - коефіцієнт переоцінки;

$K_\Delta$  – врахована кількість кроків адаптивного управління;

$E_\Delta$  – показник економії ширини смуг портів вузлового обладнання;

$K_\Delta$  – врахована кількість кроків адаптивного управління;

$N$  – загальна кількість портів у вузловому обладнанні;

$W_{i,j}$  – встановлена ширина смуги  $i$ -го порту вузлового обладнання на  $j$ -му кроці адаптивного управління на основі рішення рівняння Белмана;

$Wp_{i,j}$  – встановлена на основі прогнозу ширина смуги  $i$ -го порту вузлового обладнання на  $j$ -му кроці адаптивного управління;

$Er$  – параметр помилок прогнозу;

$k_{error}$  - кількість точок, в яких прогнозована ширина смуги порту була недостатньою;

$T_{\Delta}$  – проміжок часу, на якому розглядається процес;

$b_m$  [байт] – об'єм «відра токенів»;

$B_1$  [байт] – поточний рівень токенів у відрі;

$m_m$  [байт] – довжина токену;

$r_m$  [біт/с] – швидкість заповнення «відра токенів»;

$\tau_m$  - період подачі токенів у Відро;

$R_{\Pi}$  - поточна швидкість реального потоку пакетів на порту вузлового обладнання;

$R_{\Pi max}$  - максимальне значення поточної швидкості реального потоку пакетів на порту вузлового обладнання;

$M$  [байт] – довжина (розмір) пакета (порція інформації, що витікає із «відра токенів»);

$\Delta R_{\Pi}$  - величина змін швидкості реального потоку;

$\Delta t_{\Pi}$  - тривалість змін швидкості реального потоку;

$k_m$  - поточний рівень токенів у Відрі;

$C_i^{\theta}$  - вирахуване (або прогнозне) значення ширини смуги пропускання порту, де  $\theta$  - номер порту вузлового обладнання.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Одна з основних проблем експлуатації пакетних мереж полягає у недостатній досконалості існуючих технологій обробки протокольних блоків даних (*PDU*), які в умовах пульсуючого трафіка поки що не в змозі забезпечити високу ступінь завантаження високовартісного вузлового обладнання (*ВО*), зокрема магістральних мультиплексорів, потужних комутаторів/маршрутизаторів, шлюзів, серверів, мультимедійних трансляторів тощо. Ступінь навантаження *ВО* поточним трафіком на проміжку часу  $\tau$  визначається коефіцієнтом завантаження  $K_{BO}$  - відношенням досягнутої на цьому проміжку швидкості (інтенсивності) обробки *PDU*  $I_{BO}$  до пропускної спроможності цього обладнання  $C_{BO}$ , тобто  $K_{BO} = I_{BO} / C_{BO}$ . По мірі підвищення завантаження *ВО* на часових ділянках сплесків трафіка ймовірність його перенавантаження зростає, що призводить до лавиноподібного збільшення втрат пакетів і, отже, до перевищення нормативного значення коефіцієнту втрат пакетів, що неприпустимо. Тому доводиться суттєво обмежувати середню швидкість обробки *PDU* на портах *ВО* у порівнянні із його пропускною здатністю з тим, щоб убезпечитись від неконтрольованого зростання втрат пакетів під час пульсацій трафіку. Робота пакетної мережі може вважатися лише тоді ефективною, коли кожен її ресурс є суттєво завантаженим, але не перенавантаженим. Оскільки обладнання сучасних пакетних мереж є високо вартісним, то міркування економічної доцільності змушують прагнути до найбільш повного використання ресурсів такого обладнання, щоб оброблювати якомога більші обсяги даних у перерахунку на одиницю вартості задіяного обладнання. І при цьому в умовах пульсацій трафіка намагатися не знизити якість обробки інформації нижче певних припустимих рівнів (зокрема, не збільшити коефіцієнт втрат пакетів, їхні затримки тощо). Тобто, необхідно намагатися забезпечити оптимальний компроміс між рівнем завантаження ресурсів мережі і якістю надання послуг. На практиці, навіть за умов



використання сучасних методів інженерії трафіку реально досягнуті рівні коефіцієнту завантаження ВО не перевищують 0,6. При більших значеннях цього коефіцієнту різко падає якість обробки пакетів під час значних пульсацій трафіка. Як бачимо, існує достатньо вагомий резерв збільшення економічної ефективності використання ресурсів пакетної мережі, зокрема збільшення коефіцієнту завантаження її вузлового обладнання.

### ***Провідна наукова ідея***

В роботі [1] Ю.А.Кочергіна „Задача авторегулювання перерасподіленням пропускної спроможності пакетного комутатора между его портами” (У зб. „Математичні машини і системи”. К.: ІК АНУ, 2006. Вип. 2. – С. 60-70) пропонується ефективний спосіб збільшення навантажень на ВО (зрозуміло, без погіршення якості обробки потоків пакетів) за рахунок використання механізму адаптивного перерозподілу пропускної спроможності пакетного комутатора між його портами у реальному часі. Проте цей спосіб потребує суттєвої доробки, оскільки не враховує статистичні характеристики реального пакетного трафіку (нестационарний характер пульсацій, ступінь самоподібності тощо), що суттєво зменшує ефективність застосування вищезазначеного способу на практиці. Окрім того, не враховується негативний вплив системних помилок, пов'язаних із адаптивністю та дискретністю процесу такого перерозподілу. Тому, якщо знайти способи перетворення нестационарних потоків трафіку у квазістационарні відрізки трендів цього трафіку, розробити методи підвищення самоподібності трафіку, виявити та використати можливості зменшення системних помилок адаптивного управління, то будуть усунені основні перешкоди на шляху використання способу адаптивного управління ресурсами ВО на практиці.

### ***Мета та завдання дослідження***

Метою дисертаційної роботи є удосконалення технології адаптивного управління розподілом пропускної спроможності вузлового обладнання (ВО) пакетних мереж з тим, щоб в умовах значних пульсацій трафіку забезпечити

можливість її використання на практиці для збільшення коефіцієнту завантаження ВО пакетної мережі без порушень нормативів якості обробки та передавання пакетних даних.

Удосконалення вищеназваної технології пропонується здійснювати шляхом розробки нової технології формування трендів пакетних потоків на портах ВО, що забезпечить їхню квазістаціонарність та самоподібність, а також зменшить кількість системних помилок адаптивного управління.

Для досягнення вищевказаної цілі поставлено та вирішено наступні завдання:

- визначення можливостей та шляхів удосконалення технології адаптивного розподілу ресурсів пакетної мережі в умовах пульсацій пакетного трафіку на основі аналізу характеристик цієї технології та механізму утворення помилок адаптивного управління;

- розробка технології формування пакетного трафіка для забезпечення роботи засобів адаптивного управління (обґрунтування моделі пакетного трафіка, визначення можливостей його згладжування та прогнозування, дослідження впливу параметрів усереднення трафіка на його статистичні характеристики, розробка процедур віднесення пакетного трафіка до класу самоподібних процесів, розробка технологічної схеми формування трафіку);

- удосконалення технології управління розподілом ресурсів пакетних мереж (вибір алгоритму адаптивного управління, вибір методу та розрахункової схеми прогнозування, розробка технологічної схеми адаптивного розподілу пропускної спроможності ВО між його портами);

- експериментальні дослідження пакетного трафіку та комп'ютерної моделі системи адаптивного розподілу пропускної здатності ВО між його портами (дослідження адекватності отриманих вибірок прийнятій моделі пакетного трафіка, експериментальна оцінка впливу засобів зменшення системних помилок на якість адаптивного управління, експериментальна оцінка технології адаптивного управління щодо можливостей підвищення завантаженості обладнання).

**Предметом дослідження** є технологічні схеми та показники якості формування і прогнозування пакетного трафіку, а також технологічні схеми та помилки адаптивного управління механізмом розподілу продуктивності вузлового обладнання між смугами пропускання його портів в умовах пульсацій трафіку.

**Об'єктом дослідження** є процеси адаптивного розподілу пропускної здатності вузлового обладнання пакетної мережі між смугами пропускання його портів в умовах пульсуючого трафіку, що має забезпечувати підвищення завантаженості цього обладнання без втрат у якості обслуговування користувачів.

**Зв'язок роботи з науковими та учбовими програмами, планами, темами**

Висвітлені в дисертації наукові результати отримано, здебільшого, в рамках науково-дослідної роботи, яка була виконана Київським національним університетом будівництва і архітектури (КНУБА) на замовлення Державного НДІ автоматизованих систем у будівництві Держбуду України (НДІАСБ), що здійснює свою діяльність у сфері створення комп'ютерних систем для потреб будівельної галузі. Отримані результати використовуються у навчальному процесі КНУБА при викладанні навчальної дисципліни «Комп'ютерні мережі», а також враховані при формуванні змісту навчальної програми „Вища математика” для студентів Національного Авіаційного Університету (НАУ), що вчать за телекомунікаційним напрямом (у цю програму додано розділ „Прогнозування часових рядів”).

**Методи дослідження.** Під час моделювання пакетного трафіку використовувався апарат теорії ймовірності та випадкових процесів, математичної статистики, теорії телетрафіка (в частині аналізу фрактальних процесів), а також методи прогнозування часових рядів. При синтезі адаптивного механізму управління розподілом ресурсів вузлового обладнання використано наукові результати Р.Белмана щодо динамічного

програмування та результати теорії конструювання регуляторів В.К.Антонова. Розгляд моделі пакетного трафіку як фрактального процесу виконано на основі робіт О.І.Шелухіна, Д.Є. Соколова та М.М. Петрова. В основу аналізу часових рядів узяті класифікація Дж. Бокса та Г. Дженкінса. В основі розроблених механізмів прогнозування тренду пакетного трафіку лежать роботи К. Де Бора, А.А. Лігуна та В.В. Кармазіної.

### ***Наукова новизна одержаних результатів***

1) Вперше надано математичне представлення дискретних асимптотично самоподібних процесів, що дало змогу провести аналіз впливу процедури усереднення на статистичні характеристики самоподібного трафіку. Вперше знайдено функціональний зв'язок між параметрами усереднення пакетного трафіка та його статистичними характеристиками, що дозволило визначити критерії та умови формування тренду трафіка (зокрема, обґрунтувати вибір інтервалу усереднення трафіку), придатного для обробки в системі адаптивного управління розподілом продуктивності ВО.

2) Вперше показано, що збільшення інтервалу усереднення трафіку приводить до збільшення ступеню його самоподоби (тобто, до збільшення значень параметру Херста), що сприяє прогнозуванню його тренду, але при цьому зростає час затримок та коефіцієнт втрат пакетів. В роботі розроблено нову процедуру визначення інтервалу усереднення пакетного трафіку, яка, з одного боку, забезпечує максимально можливу ступінь самоподібності усередненого трафіку, а з іншого, не допускає перевищення припустимого значення затримок пакетів.

3) Вперше запропоновано спосіб та відповідна технологічна схема формування пакетного трафіка, що забезпечує перетворення нестационарного пульсуючого потоку пакетів у послідовність квазістационарних відрізків процесу із заданими обмеженнями на максимальну величину поточних значень їхньої інтенсивності, а також узгодженість інтервалів стаціонарності потоків пакетів на портах ВО з інтервалами кроків дискретного управління. Запропонований спосіб дозволяє отримати згладжений квазістационарний

тренд трафіку сходинкоподібної форми, пристосований для вирішення задач короткострокового прогнозування у реальному часі.

4) Вперше запропоновано спосіб та відповідна технологічна схема підвищення якості адаптивного управління параметрами ВО пакетних мереж в умовах пульсуючого трафіку за рахунок цілеспрямованого його формування та включення у контур управління засобу прогнозування, що зменшує кількість помилок управління та сприяє перетворенню помилок недооцінки ширини смуг портів вузлового обладнання в помилки переоцінки смуг цих портів, які несуттєво впливають на якість роботи обладнання. Запропонований спосіб адаптивного управління оптимізовано на використання в умовах значних пульсацій пакетного трафіку.

#### ***Практична цінність роботи***

Отримані теоретичні результати дозволили удосконалити технологію адаптивного розподілу ресурсів пакетної мережі в напрямках:

- зменшення впливу системних помилок адаптивного управління на якість роботи вузлового обладнання (зокрема, за інших рівних умов зменшити рівень втрат пакетів під час адаптивного керування механізмом перерозподілу пропускної здатності вузлового обладнання між смугами пропускання його портів);

- збільшення рівню завантаженості вузлового обладнання (із значеннями коефіцієнту використання пропускної здатності комутуючого обладнання у діапазоні 0,65 – 0,75) за інших рівних умов його застосування;

- забезпечення можливості використання технології адаптивного управління розподілом ресурсів вузлового обладнання в умовах значних пульсацій трафіку.

***Особистий внесок здобувача.*** Основні положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно, обмежуються обсягом тих результатів наукової діяльності, які відображені у цій роботі.

***Апробація результатів дисертації.*** Результати дисертаційної роботи доповідались на п'яти науково-технічних конференціях: X Міжнародній

науково-технічній конференції «Новітні комп'ютерні технології» NOCOTE'2012 (м. Севастополь, 2012); 73-й науково-практичній конференції КНУБА (м. Київ, 2012); Міжнародній науково-практичній конференції аспірантів і студентів «Інженерія програмного забезпечення» (м. Київ, 2012); XI Міжнародній науково-технічній конференції «Новітні комп'ютерні технології» NOCOTE'2013 (м. Севастополь, 2013); 74-й науково-практичній конференції КНУБА (м. Київ, 2013).

**Впровадження результатів роботи.** Результати роботи впроваджені в рамках науково-дослідної роботи, яка була виконана КНУБА на замовлення Державного НДІ автоматизованих систем у будівництві Мінрегіон України (НДІАСБ), що здійснює свою діяльність у сфері створення комп'ютерних систем для потреб будівельної галузі, та ВАТ „Укртелеком” (Договори про НДР №165-ХО4 (№ держреєстрації 0113U000093), №513-9-931, №514-9-931, №401/03). Автор дисертації був виконавцем цих робіт. Отримані результати використовуються у навчальному процесі КНУБА при викладанні навчальної дисципліни «Комп'ютерні мережі», а також враховані при формуванні змісту навчальної програми „Вища математика” для студентів НАУ, що вчать за телекомунікаційним напрямом (у цю програму додано розділ „Прогнозування часових рядів”).

**Достовірність результатів.** Для перевірки достовірності одержаних результатів проведено експериментальні дослідження з метою вирішення трьох наступних завдань: 1) отримання та статистична обробка вибірок трафікового навантаження на інтернет-вузол Державного НДІ автоматизованих систем у будівництві (НДІАСБ) з метою визначення функціональних залежностей між параметрами цих вибірок та оцінками статистичних характеристик пакетного трафіка, а також перевірки адекватності обраної моделі трафіка реальним умовам функціонування інтернет-вузлу; 2) оцінка впливу запропонованих засобів прогнозування трафіка на якість адаптивного управління розподілом ресурсів вузлового обладнання; 3) оцінка якості адаптивного управління розподілом

продуктивності вузлового обладнання між його портами згідно із запропонованою технологічною схемою. Виконано комп'ютерне моделювання запропонованих засобів та схем адаптивного управління. В якості вхідних даних застосовувались усереднені вибірки типового трафікового навантаження, що були експериментально отримані на інтернет-вузлі ДНДІАСБ. Результати випробувань свідчать про коректність програмної реалізації запропонованих елементів та схем адаптивного управління. Результати моделювання у достатній мірі корелюються із результатами теоретичних досліджень, що відображені у дисертаційній роботі.

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 8 наукових працях (у тому числі, 6 статей опубліковано у фахових виданнях, 2 тези доповідей, апробованих на конференціях). Дві статі опубліковано без співавторів.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів та висновків, що містять основні отримані результати. Загальний обсяг роботи складає 140 сторінок. Робота містить 3 таблиці, 23 рисунків та список використаних джерел, що складається із 110 найменувань, включаючи список опублікованих пошукачем наукових праць. У додатку наведені типові вибірки пакетного трафіку на вузлі Інтернет ДНДІАСБ.

## РОЗДІЛ 1

# ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АДАПТИВНОГО РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ ПАКЕТНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ ПУЛЬСАЦІЙ ТРАФІКУ

У даному розділі досліджено характеристики, у т.ч. системні помилки, адаптивного управління розподілом ресурсів пакетних мереж з метою виявлення недоліків, що утруднюють впровадження цього способу управління в умовах значних пульсацій трафіку. На основі аналізу звісних методів підвищення завантаженості вузлового обладнання (*ВО*) визначено можливі шляхи удосконалення технології адаптивного управління розподілом ресурсів пакетних мереж. Досліджено вплив цих удосконалень на показник помилок адаптивного управління.

### 1.1. Характеристика технології адаптивного управління розподілом ресурсів пакетних мереж

Адаптивне управління розподілом ресурсів пакетних мереж - це вид динамічного управління, що здійснюється у реальному часі відповідно до наступного принципу: елементам мережі, навантаження котрих у даний момент наближається до критичної межі, виділяється більша частка мережних ресурсів за рахунок зменшення частки ресурсів, що виділяється недовантаженим елементам. При цьому вважається, що сума усіх ресурсів мережі під час здійснення управління не змінюється і визначається сумарною продуктивністю задіяного обладнання. Під елементами мережі розуміється, перш за все, *ВО* (зокрема, пакетні комутатори, маршрутизатори та шлюзи), а також канали передачі інформації - фізичні або логічні. Під ресурсами мережі розуміється пропускна здатність  $C_{BO}$  вузлового обладнання (пакетних комутаторів, маршрутизаторів, шлюзів та їх портів) та (або) ширина смуги пропускання фізичного (у Гц) або логічного (у кількості протокольних блоків даних *PDU*, що передані за одиницю часу) каналів транспортування інформації. Терміни «пропускна здатність порту» та «ширина смуги



пропускання порту» у даній роботі вважаються синонімами. Під навантаженням розуміється величина інтенсивності потоків пакетного трафіка, тобто кількість  $PDU$ , що передаються через канал або оброблюються вузловим обладнанням за одиницю часу. Коефіцієнт навантаження ВО  $K_{BO}$  (або  $i$ -го порту цього обладнання  $k_i$ ) на інтервалі спостереження  $\tau$  визначається відношенням досягнутої на цьому проміжку інтенсивності (швидкості) обробки  $PDU$   $I_{BO}$  (або  $I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_N$ , де  $N$  кількість портів обладнання) до пропускнуої спроможності обладнання  $C_{BO}$  (або пропускнуої спроможності  $i$ -го порту цього обладнання  $C_i$ ). Характерний приклад застосування принципу адаптивного управління: маршрутизатор (або комутатор), пропускна здатність котрого перерозподіляється між смугами його портів синхронно із змінами інтенсивності потоків пакетів, що просуваються через ці порти.

1.1.1. Структурна схема системи адаптивного управління портами вузлового обладнання пакетної мережі показана на рис.1.1 [2].

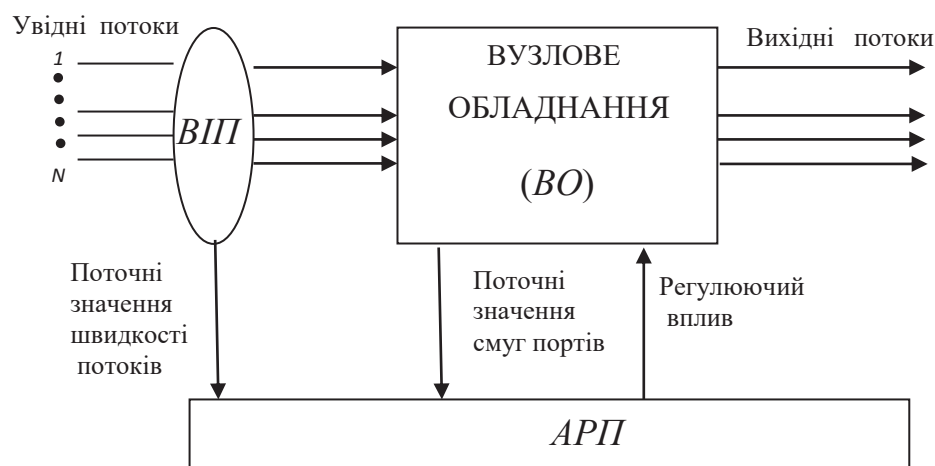


Рис.1.1. Структурна схема адаптивного управління смугами пропускання портів вузлового обладнання пакетної мережі

В якості увідних потоків  $PDU$  розглядають безпосередньо необроблені потоки, що надходять у реальному часі від інших вузлів пакетної мережі і зображені на рис.1.1 стрілками. Поточні значення інтенсивності увідних потоків  $PDU$  на кожному з увідних портів вимірюють за допомогою

вимірювального блоку - вимірювача інтенсивності потоків (*ВІП*). Акти вимірювань здійснюють послідовно у реальному часі із наперед заданим інтервалом  $\tau_c$ , так що на виході *ВІП* отримують тренди цих потоків. Результати вимірювань надсилають до *АРП* - адаптивного регулятора розподілу продуктивності *ВО* між його портами. Також на кожному кроці вимірювань на регулятор *АРП* від *ВО* надсилають інформацію щодо поточних значень величини смуг пропускання кожного із портів, що були виділені цим портам на попередньому інтервалі вимірювань. За допомогою регулятора *АРП* у реальному часі здійснюють ітеративну процедуру вирівнювання поточних значень коефіцієнтів завантаження портів *ВО* таким чином, щоб сума цих коефіцієнтів зберігалась незмінною. Швидкодію системи регулювання узгоджують з параметрами пульсацій трафіку. На кожному етапі ітеративної процедури здійснюють перерахунок знайдених нових значень коефіцієнтів завантаження у нові значення ширини смуг пропускання портів *ВО*. Таким чином, на виході регулятора *АРП* виробляється потік керуючих впливів, які ініціюють роботу системи перерозподілу пропускну здатності *ВО* між його портами.

Наприклад, ставиться завдання підвищити  $K_{ВО}$   $n$ - портового *ВО* шляхом застосування адаптивного способу управління потоками пакетів *ІР*, що просуваються через порти цього обладнання. Вирішення цього завдання здійснюється наступним чином. До складу штатних компонентів *ВО* додається вимірювач *ВІП*, що виконує функцію вимірювання інтенсивності (тобто, швидкості) потоків пакетів  $I_i$  [пакетів/с] на кожному із  $N$  увідних портів. Діапазон припустимих значень вимірюваної величини – від 0 до  $10^5$  пакетів/с. Середня довжина кожного пакету – 1500 байт. Вимірювання здійснюються із періодичністю  $10c$ , тобто на виході вимірювача *ВІП* через кожні  $10c$  з'являється виміряне поточне усереднене значення інтенсивності потоку для кожного із портів. Результати вимірювань подаються на вхід регулятора *АРП*. Кожен раз, коли адаптивний регулятор отримує від вимірювача *ВІП* чергове значення швидкості потоку, він здійснює

обчислення першої та другої похідної від цієї швидкості. Звісно, що значення першої похідної визначає швидкість зміни інтенсивності потоку, а друга похідна – напрямок цієї зміни. Обраховуються перша і друга похідна по дискретним точкам вимірюваних значень швидкостей потоків на портах. Обраховуються два значення першої похідної і одне значення другої похідної. Перше значення першої похідної – по двом передостаннім точкам вимірювань. Друге значення першої похідної - по двом останнім точкам. Одне значення другої похідної – по двом обчисленим значенням першої похідної. Дані щодо цих двох параметрів потоку на кожному із портів, а також дані щодо поточних значень ширини смуг пропускання портів, що подаються на інший вхід регулятора, є достатніми, щоб регулятор *АРП* мав можливість визначити величину та напрямок необхідних змін ширини смуг пропускання портів  $\Delta F_i$ , де індекс  $i = 1, 2, \dots, N$  позначає номери портів *ВО*.

Адаптивний регулятор *АРП* реалізує наступні правила управління. Якщо значення другої похідної щодо якогось порту виявиться більше, ніж нуль, то регулятор подає команду на перерозподіл пропускної здатності *ВО* у бік збільшення ширини смуги цього порту. Якщо значення другої похідної щодо якогось порту виявиться менше, ніж нуль, то регулятор подає команду на зменшення ширини смуги цього порту. Якщо значення другої похідної щодо якогось порту виявиться рівним нулю, то команда щодо зміни ширини смуги цього порту не подається. Величину ширини смуги кожного порту регулятор змінює пропорційно величині першої похідної. Із збільшенням (зменшенням) значень першої похідної щодо якогось порту ширину смуги пропускання цього порту відповідно збільшують (зменшують), але так, щоб сумарна смуга усіх портів *ВО* була не змінною і дорівнювала пропускній здатності цього обладнання. Таким чином, відбувається динамічне переналагодження смуг пропускання портів *ВО* синхронно з поточними пульсаціями потоків *PDU*, що просуваються через ці порти, та мінімізується кількість проміжків часу, коли інтенсивності потоків *PDU* перевищують смуги пропускання портів. Включення до підсистеми розподілу пропускної спроможності *ВО*

адаптивної системи регулювання, яка у реальному часі забезпечує динамічні зміни пропускних спроможностей портів синхронно із поточними змінами інтенсивності потоків *PDU*, що проходять через ці порти, створює ситуацію, коли будь-який порт у періоди зростання інтенсивності потоку має можливість «підживитись» часткою пропускної спроможності іншого порту. Як результат, створюються умови для зменшення кількості часових проміжків, коли інтенсивності потоків *PDU* перевищують смуги пропускання портів. А це, в свою чергу, надає змогу збільшувати завантаження *BO*, не порушуючи при цьому норм на припустимий рівень втрат пакетів.

### 1.1.2. Порівняння статичного та адаптивного методів управління.

Статичний метод управління передбачає, що адміністратор вузлу в процесі інсталяції вручну розподіляє наявну пропускну здатність обладнання між його портами, так що в процесі функціонування обладнання смуги пропускання його портів не змінюються. Позитивний ефект від застосування адаптивного регулювання смуг портів проілюструємо шляхом порівняння графічних зображень реалізацій пакетного трафіка на його портах в умовах застосування статичного та адаптивного методів управління.

На рис.1.2 відображено два однохвилинних часових відрізка реалізації потоку пакетів, що просуваються одночасно через два порти *BO* (відповідно через порт *A* та порт *B*). Пунктирною лінією показані повільні зміни тренду потоків, а суцільною лінією, котра флюктує впродовж цих трендів, показані пульсації потоків. Пропускні здатності (тобто, ширини смуг пропускання) обох портів  $I_1$  та  $I_2$  задані адміністратором однаковими на рівні  $10,0$  тис.пакетів/с і в процесі функціонування обладнання не змінюються. На рис.1.2 вони відображені горизонтальними прямими лініями *CD*.

Як бачимо, потоки пакетів на портах обладнання не є синхронними, мають вигляд випадкових нестационарних процесів, оскільки величини середньої інтенсивності цих потоків повільно, але суттєво змінюються у часі. Випадковий характер цих змін в обох потоках для даного прикладу є майже

однаковим (маємо швидкі флуктуації інтенсивності на фоні пульсацій трафіку різної амплітуди та тривалості).

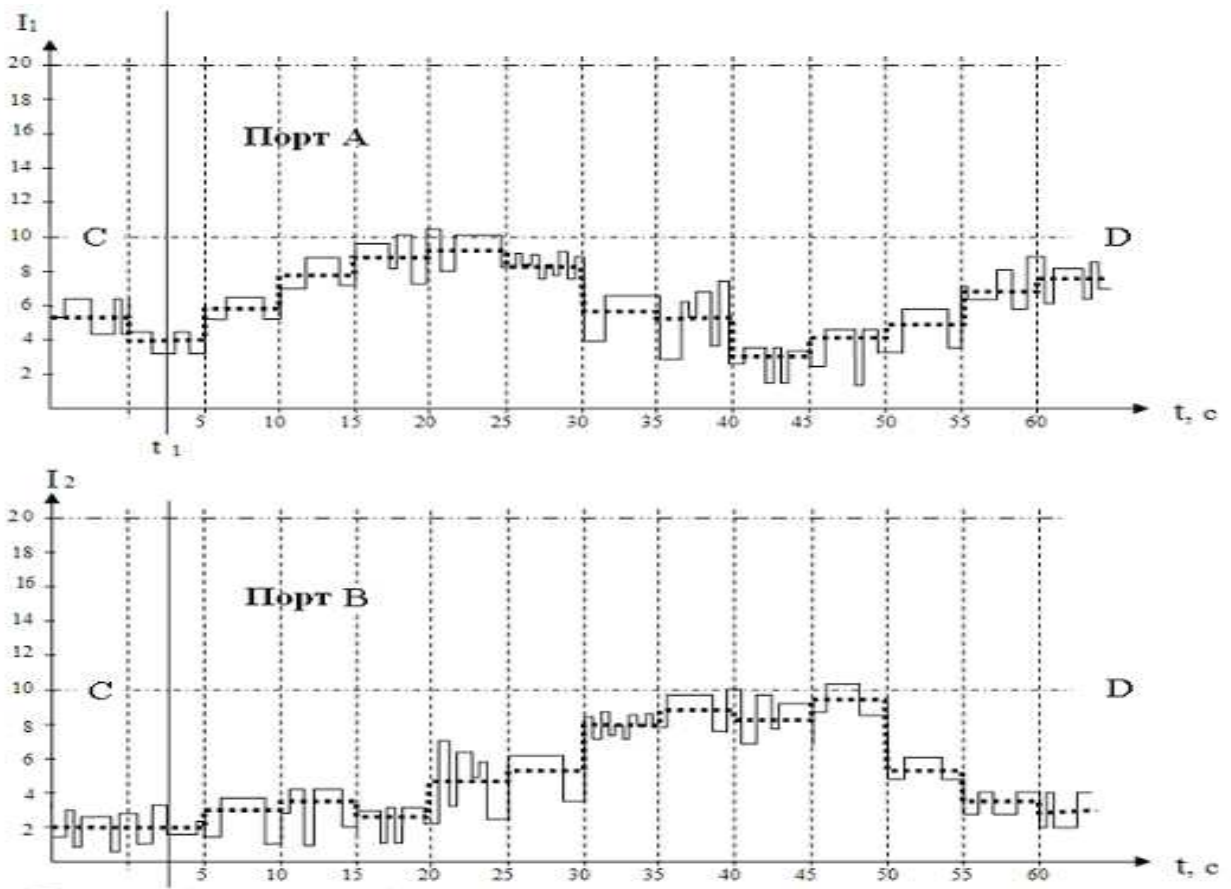


Рис. 1.2. Приклад однохвилинних реалізацій потоків пакетів на портах вузлового обладнання пакетної мережі

Ілюстрації на рис.1.2 вказують на основний недолік статичного управління смугами пропускання портів  $BO$  - низьку ефективність використання пропускної здатності обладнання. Дійсно, якщо коефіцієнт використання смуги  $i$ -го порту  $BO$   $k_i = I_i / C_i$  або  $k_i = I_i / \Delta F_i$ , де  $i$  - номер порту, вимірювати відношенням середньої інтенсивності потоку  $I_i$ , що надходить до порту на проміжку усереднення  $\tau_c$ , до пропускної здатності цього порту  $C_i$ , то для нашого прикладу в точці  $t_1$  миттєві значення цього коефіцієнту складають приблизно  $k_1 = 0,5$ , а  $k_2 = 0,2$ . У майже всіх інших часових точках існування потоків значення коефіцієнта використання портів для наведеного прикладу те ж є набагато меншими за одиницю. Винятки складають

невеличкі проміжки часу сплесків трафіку (зокрема, часовий відрізок між 45 та 50 секундою на нижньому рисунку та відрізок в районі 20 секунди на верхньому рисунку), коли миттєві значення навантаження портів перевищують їхні пропускні спроможності. Коефіцієнт використання ширини смуги порту дорівнює  $1,0$  у випадку, коли швидкість просування пакетів через порт дорівнює його ширини смуги пропускання, тобто коли поточні значення інтенсивності досягають лінії  $CD$ . Отже, в нашому випадку існує значний запас щодо підвищення завантаженості обох портів  $BO$ , оскільки усереднені на однихвилинному інтервалі коефіцієнти завантаження кожного із портів виявились значно меншими за одиницю (десь на рівні  $0,45$ ). Пульсації потоків на обох портах хоч і мають значні коливання, але вони, здебільшого, не перевищують лінії пропускних спроможностей портів, що означає відсутність перенавантажень портів. І, отже, система знищення пакетів через перенавантаження портів не включається, а черги у буферній пам'яті портів не переповнюються. Як результат, незапланованих затримок пакетів в мережі не відбувається.

Проте низький рівень завантаженості обладнання при статичному методі управління розподілом ресурсів мережі не може задовольнити сучасних власників цих ресурсів. Запровадження принципу адаптивного управління створює умови для суттєвого підвищення коефіцієнту використання ресурсів обладнання, не порушуючи при цьому умов дотримання нормативів якості обробки пакетів. В Україні для пакетних мереж норматив на коефіцієнт втрат пакетів складає  $1 \times 10^{-3}$  [3; 4, стор.42]).

На рис.1.3 відображена ситуація, коли на різних проміжках часу виділяються різні (за величиною) смуги пропускання портів  $BO$  таким чином, що на проміжках часу, коли, наприклад, на першому порту інтенсивність потоку пакетів збільшується (загрожуючи перенавантажити цей порт пакетним трафіком), ширина смуги пропускання цього порту розширюється (лінія пропускної здатності другого порту  $C_2D_2$  піднімається вверх). Одночасно з цим ширина смуги іншого порту зменшується (лінія пропускної

здатності першого порту  $C_1D_1$  пересувається униз), але не настільки, щоб на цьому порту утворились перенавантаження.

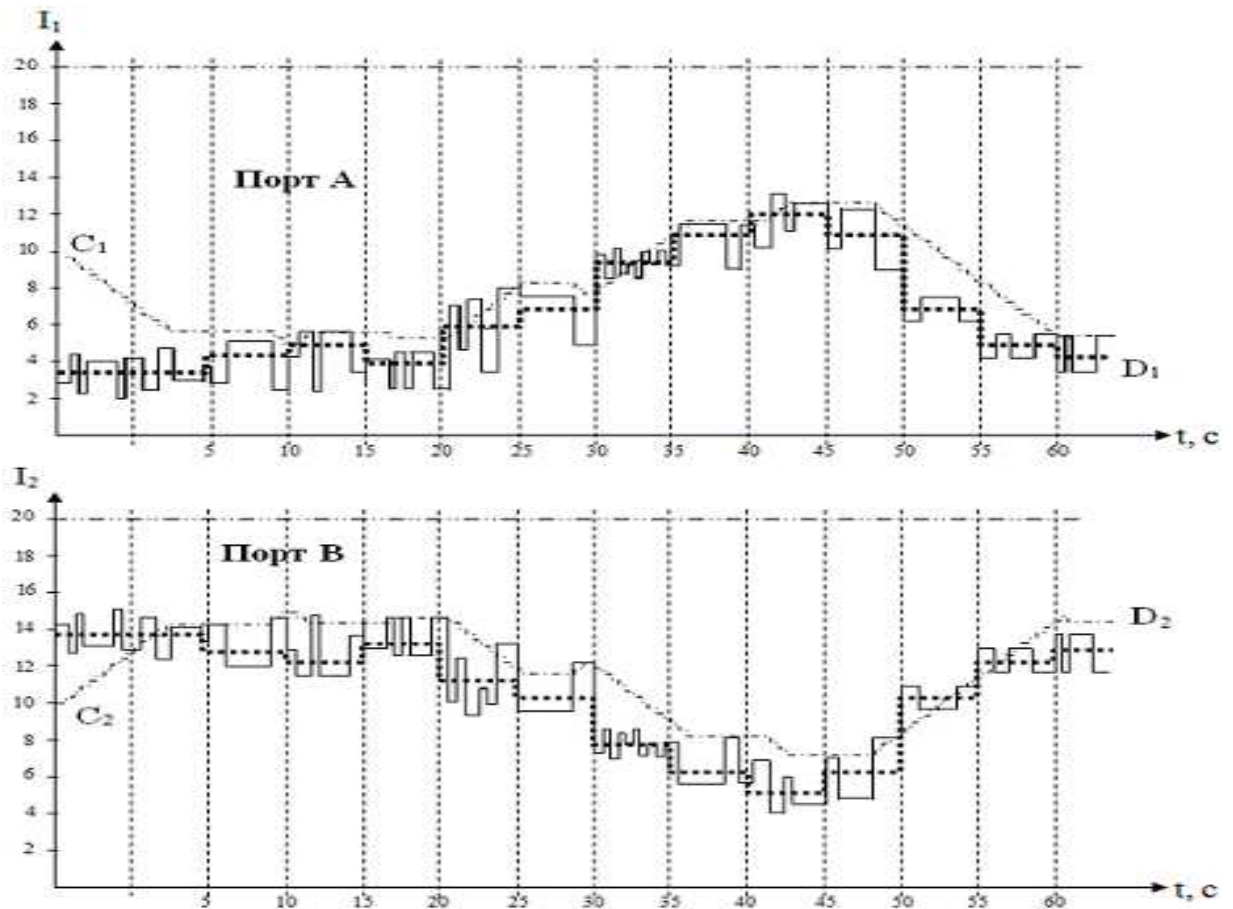


Рис.1.3. Відображення адаптивного регулювання смугами пропускання портів вузлового обладнання

Припустимо, що у складі  $BO$  функціонує аналізатор, який здатний вимірювати поточні значення відсотку знищених пакетів на вводах портів у порівнянні із загальною кількістю пакетів потоків, що надходять до цих портів. Такі вимірювання аналізатор кількості знищених пакетів здійснює через апріорі визначені достатньо короткі проміжки часу (наприклад, через кожні 10с). Припустимо також, що у складі  $BO$  функціонує система автоматичного регулювання ( $SAP$ ) з відповідними регуляторами, яка дозволяє у реальному часі перерозподіляти пропускну здатність обладнання між його портами в залежності від виміряних аналізатором даних. За цих

умов, якщо на певному проміжку часу, наприклад, на другому порту аналізатор виявить перенавантаження, то саме цьому порту додасть певну частку пропускної здатності обладнання так, щоб уникнути перенавантаження (тобто, щоб верхні піки пульсацій потоку на цьому порту стали нижче за лінію  $C_2D_2$ ). На першому порту згідно рис.1.3 на цьому проміжку часу було недовантаження – тому ширина смуги цього порту дещо звужується, але не настільки, щоб на ньому виникло перенавантаження (лінія пропускної здатності  $C_1D_1$  цього порту також не перетинається верхівками пульсацій потоку, що надходить до цього порту). Зрозуміло, якщо обидва порти одночасно увійшли в стан перенавантаження, то без втрат в якості обслуговування вийти із цього стану неможливо, і в цій ситуації будь-які системи адаптації не допоможуть. Якщо розрахувати коефіцієнти використання портів для умов, що відображені на рис.1.3, то слід констатувати, що усереднені значення цього коефіцієнту на обох портах суттєво підвищилися до рівнів, що перевищують 0,7 – 0,75. Тобто, маємо значний вигреш щодо показника завантаженості  $BO$  (від 0,45 до 0,7).

Таким чином, застосування адаптивної системи перерозподілу пропускної спроможності  $BO$  між його портами може дати суттєвий корисний ефект в плані підвищення ступеню завантаженості цього обладнання пакетним трафіком.

## **1.2. Аналіз системних помилок адаптивного управління**

Система адаптивного розподілу ресурсів пакетної мережі, поряд з перевагами, що розглянуті у попередньому підрозділі, має ряд недоліків, які пов'язані, в першу чергу, із помилками, що виникають внаслідок дискретного характеру динаміки адаптивного управління. Динаміка змін швидкостей потоків пакетів на певних проміжках часу може перевищувати швидкодію системи управління, через що черги необроблених пакетів можуть переповнювати буферну пам'ять портів і, через це, «зайві пакети» втрачатися.



Розглянемо природу виникнення помилок адаптивного управління та фактори, що сприяють їхній появі. Перш за все, підкреслимо, що на практиці на увід АРПІ (див.рис.1.1) подаються у реальному часі дані, які відображають часові залежності поточних значень інтенсивності потоків на портах ВО, що вимірюються на певним чином обраних проміжках часу. Потоки цих даних називають трендами трафіка [5].

На рис.1.4 лінія  $I_I$  відображає тренд на одному із портів ВО, отриманого як результат усереднення вимірних поточних значень інтенсивності цього потоку на десяти-секундних проміжках часу. Цей тренд формується програмними засобами обробки вхідних черг пакетів, утворюваних на даному порту обладнання. Верхній графік відображає відрізок зростаючого тренду, а нижній графік – відрізок спадаючого тренду.

Представлена форма тренду визначається обраним у даній роботі алгоритмом фізичного згладжування пакетного трафіка. У даному випадку обрано модифікований алгоритм «відра токенів», що детально розглянутий у підрозд.2.3. Цей алгоритм дозволяє перетворити пульсуючі потоки пакетів, що надходять до портів ВО, у згладжені потоки із інтенсивністю сходинкоподібної форми – саме такі, що показані на рис.1.4, де висота сходинки є випадковою величиною, що залежить від реальної динаміки змін тренду, а ширина сходинки – це обраний адміністратором або автоматизованими засобами інженерії трафіку інтервал усереднення  $\tau_y$ . У кінці кожного десяти-секундного інтервалу на основі результатів усереднення автоматично змінюється відповідний параметр алгоритму «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.

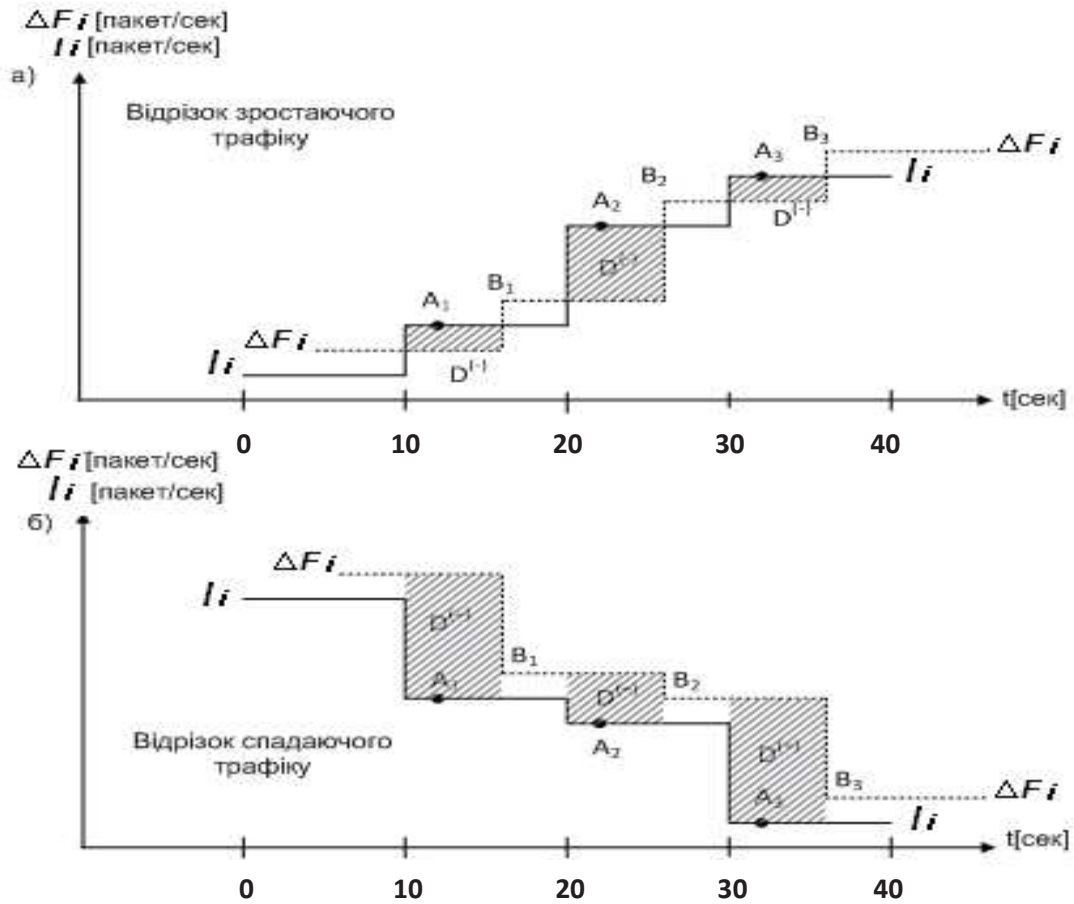


Рис.1.4. Утворення помилок адаптивного управління

Адаптивна система управління перерозподілом продуктивності  $BO$  має змінювати смуги пропускання портів  $BO$  синхронно із змінами та пропорційно змінам трендів потоків  $PDU$ , що надходять до цих портів. Дискретний характер змін трендів обумовлює дискретність управління з інтервалом  $\tau_k$ . У загальному випадку  $\tau_k = s\tau_y$ , де:  $\tau_y$  - інтервал усереднення трафіка;  $s=[1,2, \dots, S]$ ;  $S$  - максимально можливе значення інтервалу усереднення в межах одного кроку управління. На рис.1.4 проілюстровано випадок, коли  $s=1$ . Тривалість кроку управління  $\tau_\delta$  має наступне обмеження:  $\tau_\delta \leq \tau_k$ .

Смуга пропускання, що виділена  $i$ -му порту  $BO$ , на рис.1.4 позначена лінією  $\Delta F_i$ . Як бачимо, лінія  $\Delta F_i$  повторює за формою лінію інтенсивності тренду  $I_i$ , проте із певним запізненням. Величина запізнення обумовлена, головним чином, ступенем швидкодії системи управління (оскільки на

кожному кроці управління потрібен час на обробку даних, що надходять до блоку формування команд *БФК*, та на роботу виконавчих механізмів блоку *БВМ*, див.рис.3.1). Окрім того, лінія змінюваної смуги порту  $\Delta F_i$  проходить дещо вище за лінію тренду  $I_i$ . Відстань по висоті між цими лініями обумовлюється прийнятим запасом щодо неперевищення трендом виділеної смуги порту, а відстань між точками  $A$  та  $B$  на кожному кроці управління визначається швидкістю роботи системи управління. Зокрема, на інтервалі між десятою та двадцятою секундами тривалість кроку управління  $\tau_d$  відображена як проміжок між точками  $A_1$  та  $B_1$ , на інтервалі між двадцятою та тридцятью секундами – як проміжок між точками  $A_2$  та  $B_2$  і т.д. При цьому помітимо: щоб уникнути неоднозначності у показах блоку *ЗДВ* (що передає встановлені значення ширини смуг портів до блоку *БФК*, див. рис.3.1), моменти початку роботи системи керування (точки  $A_1, A_2, A_3$ ) дещо зміщені вправо відносно початку сходинок лінії  $I_i$ .

Розглянемо роботу системи управління на відрізку зростаючого тренду. Як бачимо, у цьому випадку існують часові ділянки, коли лінія  $\Delta F_i$  розташована нижче, ніж лінія  $I_i$ . (На рис.1.4 вони затемнені). На цих ділянках інтенсивність сформованого потоку пакетів перевищує виділену для нього ширину смуги порту. Тобто, внаслідок недооцінки необхідної ширини смуги порту, зробленої на попередньому кроці управління, виник дефіцит смуги на поточному кроці управління. У момент початку такого перевищення починається процес заповнення буферної пам'яті порту, тобто початок утворення черги пакетів. Швидкість заповнення буферу пакетами визначається висотою сходинки, а тривалість заповнення - тривалістю кроку управління  $\tau_d$ . Через деякий час за певних умов буфер може переповнитися, що призведе до втрати певної кількості пакетів на даному кроці управління. Такого роду помилки адаптивного регулювання 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 реальну інтенсивність сформованого потоку пакетів на поточному кроці управління.

За результатами аналізу роботи системи адаптивного управління 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 системи управління);

4) за умов, коли величина стрибків у тренді менша за відстань між лініями  $I_i$  та  $\Delta F_i$ , помилки управління типу  $D^{(-)}$  або  $D^{(+)}$  взагалі не виникають.

Розглянемо роботу системи управління на відрізку спадаючого тренду (див. нижній графік на рис.1.4). Як бачимо, у цьому випадку не існують часові ділянки, коли лінія  $\Delta F_i$  розташована нижче, ніж лінія  $I_i$ . Це свідчить про відсутність помилок типу  $D^{(-)}$ . На будь-яких ділянках спадаючого тренду інтенсивність сформованого 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.1.4 вони затемнені), де різниця у рівнях між лініями  $I_i$  та  $\Delta F_i$  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 системи управління 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 системи управління);

4) за умов, коли величина стрибків у тренді менша за відстань між кривими  $I_i$  та  $\Delta F_i$ , помилки керування типу  $D^{(-)}$  або  $D^{(+)}$  практично не виникають.

**Кількісний аналіз помилок дискретно-адаптивного управління.** В якості кількісної міри рівню помилок дискретно-адаптивного управління уведемо так званий покроковий коефіцієнт помилок недооцінки смуги порту  $K(D^{(-)})$ , який визначимо як відношення кількості втрачених пакетів через переповнення буферної пам'яті порту до загальної кількості пакетів, що надійшли до входу буферу на поточному інтервалі усереднення пакетного трафіку:

$$K(D^{(-)}) = (V_y - \Delta F_i)(\tau_\delta - \tau_3) / V_y \tau_k, \quad (1.1)$$

де  $V_y$  - усереднена на інтервалі  $\tau_k$  швидкість надходження пакетів до буферу;  $\Delta F_i$  - ширина смуги пропускання, що виділена  $i$ -му порту вузлового обладнання на інтервалі  $\tau_k$ ;  $\tau_k$  - інтервал між початком сусідніх кроків дискретно-адаптивного управління;  $\tau_\delta$  - тривалість кроку управління;  $\tau_3$  - тривалість повного заповнення буферу.

Із рис.1.4 видно, що пакети можуть втрачатися тільки через помилки недооцінки смуги порту типу  $D^{(-)}$  і тільки у разі переповнення буферної пам'яті. Ємність буферної пам'яті  $S_B$  дорівнює  $V_y \cdot \tau_3$ . Кількість пакетів, що надійшла до буферу на протязі тривалості кроку управління, позначимо як  $S_y$  і визначимо, що  $S_y = V_y \cdot \tau_\delta$ . Тоді якщо  $S_y \leq S_B$ , то переповнення буферу не виникне і  $K(D^{(-)}) = 0$ . Якщо ж  $S_y > S_B$ , то  $0 < K(D^{(-)}) \leq 1$ , то переповнення буферу відбудеться і виникнуть втрати пакетів. На рис.1.5 кількість цих втрат буде пропорційною площі прямокутника  $cdc'd'$ , тобто різниці між площею  $abcd$  та площею  $abc'd'$ .

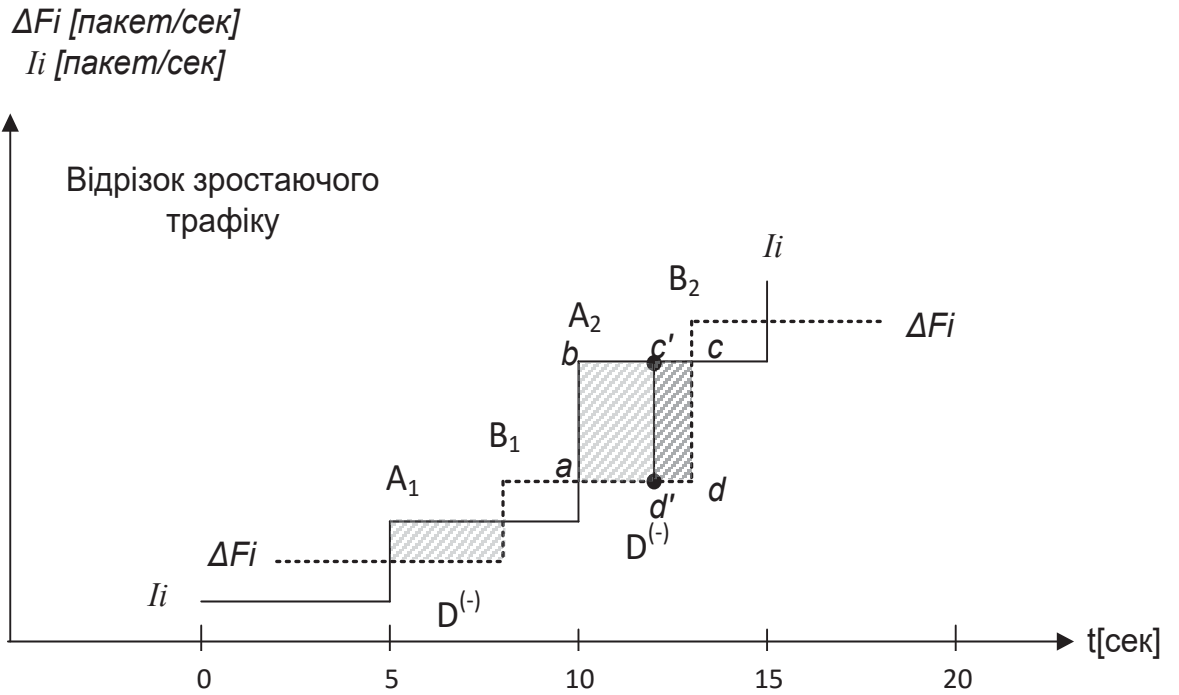


Рис.1.5. Пояснення виникнення втрат пакетів через помилки недооцінки смуги

Цю різницю можливо зменшити, якщо підвищити динамічні характеристики системи дискретного управління, але усунути її майже неможливо, оскільки реальна динаміка змін тренду на інтервалі усереднення трафіка  $\tau_y$  є випадковою величиною, що характеризується довгостроковою залежністю коефіцієнту кореляції трафіку від інтервалу кореляції (див. розділ 2.1). Тому інтерес являє не тільки відносна кількість втрачених пакетів (тобто, коефіцієнт  $K(D^{(-)})$ ) на поточному інтервалі усереднення  $\tau_y$ , але і інтенсивність подій перевищення швидкості потоку встановленої ширини смуги порту  $V_y^{nop}$ , що розглядається на квазістаціонарних ділянках тренду. Ця інтенсивність залежить від ймовірності перевищення на будь-якому із інтервалів усереднення поточної інтенсивності потоку ширини смуги порту  $V_y^{nop}$ , тобто  $P(V_y \geq V_y^{nop})$ .

### **1.3. Аналіз можливих шляхів удосконалення технологій управління розподілом ресурсів пакетних мереж**

Реальний пакетний трафік, що надходить до інтернет-вузлів низового рівня, характеризується досить частими, великими та «гострими» піками пульсацій, які, зрозуміло, негативно впливають на можливість встановлення високих рівнів завантаженості обладнання пакетної мережі. Тому в експлуатаційній практиці отримали широке застосування різноманітні методи підвищення завантаженості обладнання пакетним трафіком.

1.3.1. *Методи підвищення завантаженості обладнання пакетним трафіком.* Як правило, при розрахунках навантаження на елементи обладнання пакетних мереж застосовують відомі формули теорії телетрафіку [6;7,розділ 5], що не у повній мірі враховують пульсуючий характер реального трафіку. На практиці поточні значення інтенсивності потоків *PDU* в окремі проміжки часу можуть суттєво перевищувати пропускну спроможність каналів або портів обладнання, що призводить до перенавантажень обладнання трафіком [8;9,розділ2]. Для упередження цієї ситуації розроблено чимало методик локального управління потоками, згідно з якими накладається обмеження або на загальну кількість пакетів, що можуть зберігатися у буферній пам'яті вузлу комутації, або ж на розмір буферної пам'яті, яка виділяється різним класам пакетів [10,стор.245]. Розмір пам'яті, що виділяється під кожен клас пакетів, визначається за умови достатності для збереження черги пакетів середньостатистичної довжини [11]. Але, виходячи з того, що довжина черг змінюється в залежності від рівнів навантажень на елементи мережі, встановити необхідне значення розміру буферної пам'яті досить проблематично. На практиці має місце ситуація, за якої в разі заповнення виділеного об'єму пам'яті на якомусь із портів *ВО* подальше приймання пакетів у буферну пам'ять блокується, а усі «зайві» пакети, що не помістилися у пам'яті, знищуються. Все це призводить

до необхідності повторного передавання пакетів, що суттєво знижує продуктивність обладнання мережі [12].

Один із методів запобігання перенавантаженню у пакетній мережі описано в [10, стор.715]. Згідно цього методу в обладнанні завчасно встановлюють параметри обробки потоків *PDU* таким чином, щоб пакетам, параметри котрих співпадають із завчасно встановленими, надавався вищий пріоритет в обробці, а пакетам, параметри котрих знаходяться поза встановлених меж, присвоювався нижчий пріоритет. У процесі роботи обладнання пакети запам'ятовуються у буферній пам'яті, а їх обробка та передавання одержувачу здійснюється згідно пріоритетності. За такої ситуації у разі повного заповнення буферної пам'яті пакети, що не потрапили до цієї пам'яті, підлягають знищенню. Подібний метод передавання потоків *PDU*, згідно якого здійснюють розділення трафіка на пріоритетний та непріоритетний, і відповідно до цього передають *PDU* до місця призначення, описаний в [13, стор.3]. Окрім вищезазначеного недоліку, обидва методи об'єднує спільний недолік - низька продуктивність комутаційних пристроїв мережі в умовах пульсуючого трафіку. Низька продуктивність є наслідком вимушеного недозавантаження комутаційного обладнання пакетним трафіком. Інакше у разі збільшення навантаження неприпустимо часто будуть виникати ситуації, коли потоки *PDU* переповнюють буферну пам'ять портів ВО, що призводить до збільшення коефіцієнту втрат пакетів.

Метод управління потоками в умовах, коли інтенсивність трафіку зазнає періодичних змін, розглянуто у [14,15]. У порівнянні з вищеописаними методами, цей метод є більш продуктивним, тому що дозволяє знизити кількість повторних передач пакетів даних, викликаних переповненням пам'яті, шляхом адаптації часових інтервалів передавання підтверджень факту отримання відповідних пакетів даних при одночасній мінімізації обмежень на передавання пріоритетного трафіку. Метод надає можливість визначати поточні параметри навантажень, які надходять до вузлу комутації, інтенсивність обслуговування пакетів у вузлі, ступінь заповнення пам'яті та



приймати рішення щодо допуску пакетів до пам'яті вузлу. Але, як і всі описані вище методи управління потоками, його важко віднести до ряду високоефективних, тому що йому також властиві недоліки, обумовлені властивостями алгоритму пріорітезації пакетів.

Методи управління пакетним трафіком, що просувається через радіоканал, висвітлені у [16,17 та 18]. Методи динамічного управління потоками інформації у мережах зв'язку представлені у [19], а управління мережами NGN (тобто, четвертої генерації) – у [20, розд.5].

У [21] розглянуто метод управління пульсуючими потоками пакетів на портах комутаційного пристрою, який приймає пакети, оброблює їх згідно попередньо встановлених параметрів обробки та передає до місця призначення. Цей метод використовує так званий *алгоритм відра маркерів* [10,стор.708], що дозволяє оцінювати та обмежувати середню швидкість і величину пульсації потоку пакетів. Він заснований на порівнюванні потоку пакетів з деяким еталонним потоком, що представлений маркерами, які заповнюють умовне відро маркерів. Характерною ознакою цього методу є те, що він допускає пульсацію трафіку у визначених межах і не здатен передавати дані на вихід зі швидкістю, що перевищує пропускну здатність вихідного інтерфейсу. За типових умов використання (що припускають можливість виникнення проміжків часу у процесі обробки пакетів, коли інтенсивності потоків перевищують інсталювані значення пропускну здатностей портів) цей спосіб, завдяки застосуванню алгоритмів пріорітезації та згладжування трафіку, забезпечує досягнення коефіцієнту корисного навантаження на обладнання до рівня, який не перевищує 0,55.

Підсумовуючи викладений матеріал, можна констатувати, що всі вищеописані методи підвищення завантаженості обладнання не забезпечують можливості динамічної переінсталяції параметрів портів *ВО* в умовах швидко пульсуючого трафіку із значним розмахом і, отже, не спроможні змінювати параметри настроювання портів цього обладнання синхронно з пульсаціями трафіку. Через це на практиці, щоб запобігти перенавантаженням за умов

пульсацій трафіку, доводиться використовувати обладнання, що здатне витримувати лише короткотривалі пікові навантаження, а саме обладнання встановлювати в режим недозавантаженої експлуатації.

1.3.2. *Вплив динамічних характеристик системи перерозподілу ресурсів* розглянуто у [2]. Ця система адаптує у реальному часі смуги пропускання портів *ВО* під динаміку змін інтенсивності потоків пакетів, що надходять до цих портів. Але за двох умов: по-перше, сумарна смуга усіх портів у будь-який поточний момент часу має не перевищувати пропускну здатність *ВО*; по-друге, швидкодія системи адаптивного управління та інші її характеристики мають забезпечувати узгодженість динаміки процесу розподілу продуктивності *ВО* між його портами із динамікою змін трендів трафіка на цих портах. У [2] вплив цих умов на ефективність адаптивного управління не досліджено. На практиці первісні потоки пакетів, що просуваються каналами зв'язку до портів *ВО* мають, як показано далі в роботі, нестационарний мало прогнозований характер, що не сприяє безпомилковій роботі системи адаптивного регулювання. Помилки регулювання у разі неприйняття дій щодо їхнього знешкодження можуть суттєво знизити корисний ефект від застосування адаптивного способу управління розподілом ресурсів *ВО*. Якщо швидкодія системи адаптивного управління не є достатньою для відстежування поточних змін інтенсивності трафіку на портах *ВО*, то шляхом збільшення інтервалу його усереднення можливо сповільнити динаміку змін інтенсивності трафіку, тим самим обрати більш згладжений тренд для здійснення процесу управління. Для зменшення системних помилок адаптивного управління можливо застосувати відповідні засоби короткострокового прогнозування. У будь-якому випадку для створення умов для ефективного застосування адаптивного управління слід шукати на шляхах відповідного формування пакетного трафіку на портах *ВО*, зокрема його усереднення, згладжування, перетворення у квазістационарні потоки пакетів з обмеженою дисперсією,

підвищення ступеню самоподібності, а також розробки методів зменшення системних помилок адаптивного управління, що були досліджені вище.

#### **1.4. Вплив можливих удосконалень на якість адаптивно-дискретного управління**

1.4.1. *Аналіз похибок адаптивного керування в умовах використання механізму прогнозування.* Слід підкреслити, що помилки недооцінки типу  $D^{(-)}$  у системі адаптивного управління є явно небажаними, оскільки вони призводять до неконтрольованих 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. Обидва типи помилок носять системний характер, що пов'язано із динамічним характером процесу адаптивного управління. Ці помилки неможливо повністю усунути. Проте їх можливо зменшити і, навіть, перетворити один тип помилок в інший. У контексті адаптивного управління інтерес являє можливість перетворення помилок типу  $D^{(-)}$  в помилки типу  $D^{(+)}$ . Така можливість виникає, якщо у контур системи управління перерозподілом смуг портів комутатора включити засіб прогнозування тренду.

Ймовірність виникнення та величина помилок (як  $D^{(-)}$ , так і  $D^{(+)}$ ) безпосередньо пов'язана із величиною площ затемнених прямокутників, що зображені на рис.1.4. Зрозуміло: щоб підвищити якість адаптивно-дискретного управління, треба вчинити дії, які приводять до зменшення площ цих прямокутників. Висоти прямокутників можливо зменшити, якщо збільшити коефіцієнт усереднення первісного трафіка. Проте така дія, як вже вказувалось, призведе до збільшення затримок пакетів у вхідних чергах портів обладнання, що в багатьох випадках – вкрай небажано. Ширини прямокутників можливо зменшити, якщо збільшити швидкодію автоматичної системи регулювання (так, щоб відстань, наприклад, між точками  $H_1$  та  $B_1$  була меншою). Проте таке можливо зробити лише до певних меж, оскільки

цій системі притаманна кінцева інерційність. Існує ще один спосіб зменшення площ затемнених прямокутників шляхом використання на кожному кроці управління процедури прогнозування найближчої майбутньої точки тренду, де цей тренд має стрибкоподібно змінитися. На практиці важливо зменшити помилки недооцінки смуги порту типу  $D^{(-)}$ , 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.1.6).

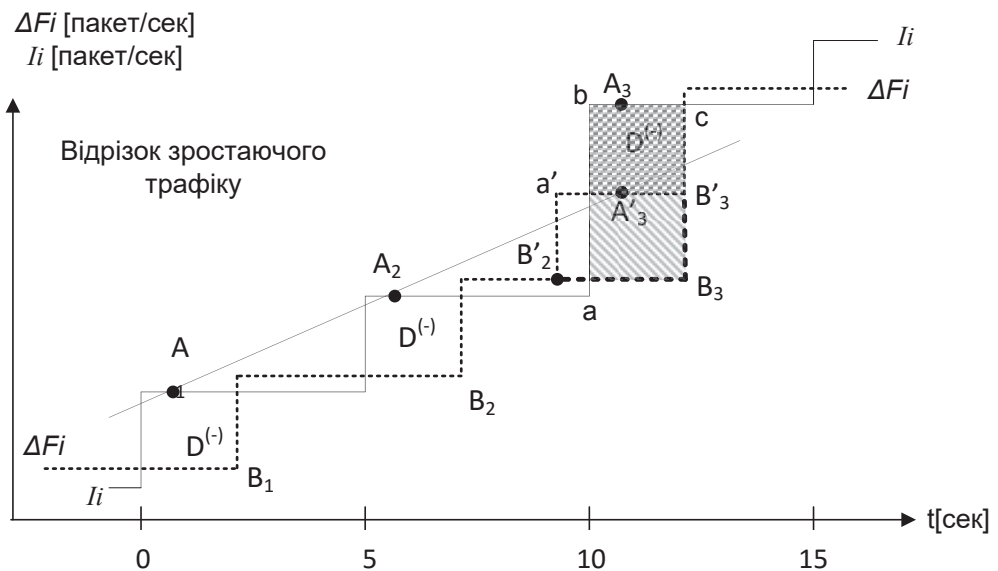


Рис.1.6. Ефект зменшення помилок недооцінки смуги порту внаслідок використання механізму прогнозування

Точками  $A_1, A_2, A_3$  позначено моменти початку кроків управління. У ці моменти від задавальника  $ЗДВ$  на блок формування команд  $БФК$  (див. рис.3.3) передаються встановлені на попередньому кроці управління поточні значення ширини смуги пропускання портів. Точками  $B_1, B_2, B_3$  позначено моменти закінчення кроків управління. У ці моменти виконавчі механізми блоку  $БВМ$  закінчують процес збільшення або зменшення смуг пропускання портів  $ВО$ . Затемнені площі трьох прямокутників на рис.1.6 ілюструють величини похибок недооцінки типу  $D^{(-)}$  щодо трьох поточних кроків

управління. 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 управління. Для цього, як приклад, використаємо найпростіший механізм лінійного прогнозу, тобто на основі даних щодо двох точок тренду  $A_1$  та  $A_2$  визначимо прогнозну 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 прогнозну точку ще то того, коли відбудеться черговий стрибок тренду, можливо модифікувати алгоритм управління 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 управління визначиться площею прямокутника  $B^1_2a^1B^1_3B_3$ . Як бачимо, площа цього прямокутника менша за площу прямокутника  $abcB_3$  на величину площі  $a^1bcB^1_3$  за умови, якщо помилка прогнозу буде не 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  $B^1_2a^1B^1_3B_3$ . 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, в 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 [22], вони достатньо просто реалізуються програмними засобами.

Таким чином, удосконалення механізму розподілу ресурсів 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 типу  $D^{(+)}$ , 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 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.1.6 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.1.7.

Як бачимо на рис.1.7, 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  $D^{(+)}$ .

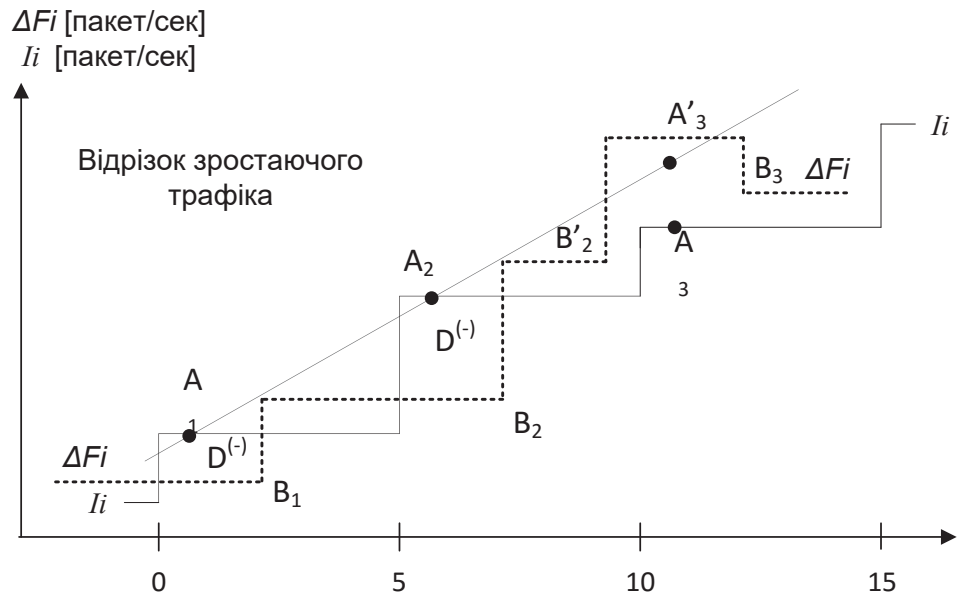


Рис.1.7. Ефект перетворення помилки типу  $D^{(-)}$  у помилку типу  $D^{(+)}$

### Висновки до першого розділу

1. Досліджено зв'язні методи підвищення завантаженості обладнання пакетним трафіком. Показано, що використання методу адаптивного управління розподілом ресурсів пакетних мереж забезпечує більш високий рівень завантаження обладнання корисним трафіком у порівнянні із можливостями статичного методу управління, не порушуючи при цьому норм на припустимі рівні втрат пакетів. Досліджувалось дискретно-адаптивне управління розподілом ширини смуг портів вузлового обладнання, на увіди котрих подавалися усереднені тренди пакетного трафіка, що згладжувалися за методом «відра токенів». Виявлено, що робота такої системи управління супроводжується виникненням системних помилок: типу  $D^{(-)}$  - недооцінки смуги пропускання портів, що призводять, за певних умов, до підвищення рівню втрат пакетів; типу  $D^{(+)}$  - переоцінки смуги пропускання портів, що призводять, до зниження завантаження обладнання корисним трафіком.

2. В якості кількісної міри рівню системних помилок дискретно-адаптивного управління вперше уведено так званий покроковий коефіцієнт помилок недооцінки смуги порту  $K(D^{(-)})$  - відношення кількості втрачених пакетів через переповнення буферної пам'яті порту до загальної кількості пакетів, що надійшли до входу буферу на поточному інтервалі усереднення пакетного трафіку. Виявлено умови виникнення втрат пакетів через помилки недооцінки смуги порту типу  $D^{(-)}$ , а також параметри, що впливають на рівень цих втрат. Показано, що системні помилки типу  $D^{(-)}$  не завжди призводять до втрат пакетів. Ці втрати залежать також від інтенсивності подій перевищення швидкості потоків встановлених смуг пропускання портів обладнання, що розглядаються на квазістаціонарних ділянках тренду.

3. Аналіз можливих шляхів удосконалення технологій управління розподілом ресурсів пакетних мереж показав, що найбільш ефективною з точки зору підвищення завантаженості мережного обладнання є технологія дискретно-аналогового управління. Однак ця технологія потребує удосконалення у двох напрямках: зменшення системних помилок недооцінки  $D^{(-)}$ , що пов'язані із втратами пакетів, та модифікації алгоритмів згладжування трафіку для формування квазістаціонарних відрізків трендів.

4. Показано, що використання механізму прогнозування у контурі дискретно-адаптивного управління забезпечує можливість не тільки зменшення помилок недооцінки  $D^{(-)}$ , але і перетворення цих помилок у помилки переоцінки  $D^{(+)}$ . При вирішенні більшості експлуатаційних завдань більш важливою є задача зменшення помилок типу  $D^{(-)}$ . Так що технологія управління розподілом ресурсів пакетних мереж має використовувати дискретно-адаптивний принцип управління із уведенням у контур адаптивного управління певним чином обраного механізму прогнозування пакетного трафіка. Таким чином удосконалена технологія розподілу ресурсів пакетної мережі дозволить зменшити, а за певних умов і усунути системні помилки дискретно-адаптивного управління, що призводять до втрат пакетів.



## РОЗДІЛ 2

### ФОРМУВАННЯ ТРАФІКА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ ЗАСОБІВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ

Ефективна робота засобів адаптивного управління розподілом ресурсів вузлового обладнання (*ВО*) є можливою, лише за умов, коли на його порти надходять пульсуючі потоки пакетів, які можливо моделювати у вигляді квазістаціонарних відрізків випадкового процесу із обмеженою дисперсією. Реальним потокам, що надходять до портів *ВО*, як показують у тому числі і результати наших експериментальних досліджень (див.розд.4), не притаманна властивість стаціонарності та її розмах пульсацій не є обмеженим. Тому пошук шляхів перетворення увідних нестаціонарних потоків у послідовності відрізків квазістаціонарного процесу з обмеженою дисперсією представляється актуальним завданням. Окрім того, вкрай бажано, щоб сформовані відрізки квазістаціонарного процесу були придатні для короткострокового прогнозування, оскільки у даній роботі для зменшення помилок адаптивного управління пропонується використати засоби прогнозування трендів сформованих потоків пакетів. Для вирішення вищеназваних завдань у даному розділі розглянута можливість моделювання пакетного трафіка у вигляді дискретних асимптотично самоподібних (фрактальних) процесів, а також доцільність використання цих моделей для прогнозування трафіка. Рівень самоподоби аналізується не через схожість процесів у сенсі їхніх статистичних розподілів, а шляхом дослідження властивостей статистичних абсолютних моментів, зокрема функції автокореляції та індексу дисперсії. Досліджено функціональний зв'язок між параметрами усереднення пакетного трафіка та його статистичними характеристиками, що дозволило визначити шляхи та умови формування тренду трафіка (зокрема, обґрунтувати вибір інтервалу усереднення трафіку), придатного для обробки в системі адаптивного управління. З метою визначення коректності процесу формування вихідного (рос., - исходного) пакетного трафіку, а також ступеня прогностичності

сформованого тренду трафіка розроблено процедури віднесення пакетного трафіка до класу самоподібних процесів на основі оцінок параметра Херста та індексу дисперсії IDC.

## **2.1. Асимптотично самоподібний процес як модель пакетного трафіка**

2.1.1. *Загальні міркування.* Розробка системи управління адаптивним розподілом ресурсів пакетних мереж (СУАР) передбачає необхідність моделювання пакетного трафіку, оскільки обґрунтування вимог до динамічних характеристик системи управління базується на знанні параметрів моделей пакетного трафіку. Характеристики пакетного трафіка суттєво відрізняються від пуасонівських або марковських моделей телефонного трафіка, що розглядаються у класичній теорії телетрафіку [6, 23-26]. Тому з урахуванням цілей даного дослідження вибір адекватної математичної моделі пакетного трафіка визначено як актуальне завдання.

Особливість прийнятого підходу полягає у намаганнях побудувати модель, яка б надавала можливість формування тренду трафіку, придатного для використання засобами СУАР.

Результати експериментальних досліджень характеристик пакетного трафіку, що відображені у розділі 4.1, а також результати інших дослідників (зокрема, див. [5,27-32]), вказують на доцільність моделювання пакетного трафіку у вигляді асимптотично самоподібних (фрактальних) процесів, котрим притаманні властивості, зокрема статистичної самоподоби, що є характерними для реального пакетного трафіка. Вичерпний аналіз цих властивостей надано, зокрема, у [5; 32].

2.1.2. *Визначення самоподібного процесу.* Самоподібним називають випадковий процес, статистичні характеристики якого (насамперед, щільність ймовірності, а також його перші два статистичні моменти, зокрема математичне чекання, дисперсія, функція кореляції і т.ін.) за певних умов проявляють властивості масштабної інваріантності, тобто коли графічне відображення форми статистичної характеристики випадкового процесу, що

розглядається, істотно не змінюється при розгляді у різних масштабах за шкалою часу.

Існує декілька не еквівалентних визначень процесів, яким притаманна властивість статистичної самоподоби. У даній роботі використано стандартне визначення масштабної інваріантності стосовно безперервного процесу  $X(t)$ , що пов'язане з виконанням наступної рівності [5]:

$$X(t) \hat{=} a^{-H} Z(at), \quad t \in T, \quad a > 0, \quad 0 < H < 1, \quad (2.1)$$

де символ  $\hat{=}$  розуміється у сенсі рівності щодо статистичного розподілу процесів  $X(t)$  та  $a^{-H} Z(at)$ , а параметр  $H$  називають параметром Херста.

При визначенні ступеню самоподоби випадкового процесу  $X(t)$  важливу роль відіграє так званий параметр Херста [5, стор.57]. Вважається, що процес  $X(t)$  є самоподібним з параметром Херста  $H$ , якщо  $X(t)$  та моделюючий його процес виду  $a^{-H} Z(at)$  мають ідентичні кінцевомірні розподіли ймовірностей для всіх  $a > 0$  [33]. Параметр Херста  $H \in (0.5; 1)$  визначає ступінь самоподоби процесу. Чим ближче цей параметр до одиниці, тим більш яскраво проявляються властивості масштабної інваріантності. Навпаки, рівність  $H = 0.5$  свідчить про відсутність самоподоби.

**2.1.3. Побудова моделі пакетного трафіку.** Згідно наданого вище визначення процес  $Z(t)$  представляється як безперервний та нестационарний (хоча він може мати стаціонарні прирости). Однак реальний пакетний трафік не є безперервним. Більш реалістично його розглядати як випадковий точковий процес, що представляється у вигляді часового ряду - послідовності відліків, кожен з котрих представляє поточне значення інтенсивності потоку пакетів. І що важливо: відліки в залежності від вирішуваних завдань можуть братися із різними ступенями усереднення поточних значень інтенсивності потоку пакетів.

З урахуванням вищезазначеного розглянемо в якості узагальненої моделі пакетного трафіка напівнескінчений відрізок стаціонарного випадкового процесу  $X$  дискретного аргументу (часу)  $t=0,1,\dots,k, \dots$ , тобто часовий ряд  $\{X_k; k=0;1;2;\dots\}$ , де  $k$  - поточний номер часового інтервалу усереднення процесу  $X$ . Будемо вважати, що цей процес має скінченні перші два статистичні моменти. Тоді можливо увести наступні позначення [34]:

$M = M[X_t]$ - середнє значення (або математичне очікування) процесу  $X$ ;

$\sigma^2 = M[X_t - M]^2$  - дисперсія процесу  $X$ ; (2.2)

$R(n) = M[(X_{t+n} - M)(X_t - M)]$ - кореляційна функція процесу  $X$ ;

$r(n) = R(n)/R(0) = R(n)/\sigma^2$  - коефіцієнт кореляції процесу  $X$ .

Значення позначки  $n$  у вищенаведених виразах означає кількість членів ряду, що розміщені між членами щодо яких визначається кореляційний зв'язок.

Якщо узяти вибірку часового ряду  $\{X_k; k=0;1;2;\dots\}$  об'ємом  $K$ , то усереднення виконується з урахуванням  $K$  членів цього ряду.

Точкове значення  $k$ -го відліку часового ряду  $\{X_k^{(\tau)}; k=0;1;2;\dots\}$  при моделюванні пакетного трафіка будемо інтерпретувати як кількість пакетів  $x_k^\tau$ , що надійшли у вузол обробки даних протягом  $k$ -го інтервалу часу тривалістю  $\tau$  [35]. Тобто, у даному випадку  $\tau$  - це інтервал усереднення пакетів у потоці. Якщо ряд  $\{X_k^{(\tau)}; k=0;1;2;\dots\}$  унормувати відносно  $\tau$ , то отримаємо ряд  $\{I_k^{(\tau)}; k=0;1;2;\dots\}$ , в якому  $k$ -й компонент визначає поточну інтенсивність трафіка на  $k$ -ому кроці його усереднення.

Кількість пакетів, що надійшли у вузол обробки даних протягом  $k$ -го інтервалу часу тривалістю  $\tau$ , дорівнює максимально можливому значенню індексу  $i_{max}$ , що задовольняє нерівності

$$\tau \geq \sum_{i=i+1}^{i\Delta\tau_{k,i}=\tau} \Delta\tau_{k,i} = \Delta\tau_{k,1} + \Delta\tau_{k,2} + \dots + \Delta\tau_{k,i_{max}}, \quad (2.3)$$

де  $\Delta\tau_{k,i}$  - проміжок часу між сусідніми пакетами у потоці,  $i = 0,1,2, \dots$  - поточний номер цього проміжку, а  $k$  - поточний номер часового інтервалу усереднення процесу  $\{X_k^{(\tau)}; k=0;1;2; \dots\}$ .

Отже,  $k$ -й компонент ряду  $\{I_k^{(\tau)}; k=0;1;2; \dots\}$ , що визначає поточну інтенсивність трафіку на  $k$ -му кроці його усереднення визначимо як

$$I_k^{(\tau)} = x_k^\tau / \tau. \quad (2.4)$$

Якщо береться значення індексу  $i_{max} \geq 2$ , то маємо справу із усередненим процесом. Якщо ж розглядається послідовність моментів проходження одиничних пакетів, то вважають, що  $i_{max} = 1$ .

Часові ряди  $\{X_k^{(\tau)}; k=0;1;2; \dots\}$  та  $\{I_k^{(\tau)}; k=0;1;2; \dots\}$  є випадковими послідовностями позитивно визначених чисел, які у загальній формі інтерпретують фізичні потоки пакетів, що потрапляють на вводи ВО, однак вони не можуть бути визнаними як повністю самоподібні випадкові процеси, оскільки математичне чекання точок представлених часових послідовностей є випадково змінними позитивними величинами. Функції розподілу цих послідовностей не піддаються визначенню. Однак результати роботи [31] вказують на можливість їхнього представлення у вигляді так званих асимптотично самоподібних випадкових процесів на рівні других статистичних моментів і, отже, на доцільність визначення рівня самоподібності не через рівність процесів у сенсі їхніх повних статистичних розподілів (щільностей ймовірності), а шляхом дослідження властивостей їхніх абсолютних статистичних моментів [5,31]:

$$\mu^{(\tau)}(q) = M \left\{ |x^{(\tau)}|^q \right\}, \quad (2.5)$$

де  $q$  – значення абсолютного моменту статистичного розподілу процесу  $X$ . Усереднення  $M$  береться по усім  $K$  членам вибірки ряду  $\{X_k; k=0;1;2; \dots\}$ .

Найбільш зручним об'єктом аналізу під час моделювання пакетного трафіку є автокореляційна функція  $R(n)$  процесу  $X$  або його коефіцієнт автокореляції  $r(n)$ . Тому у подальшому будемо обчислювати автокореляційну функцію наступним чином:

$$R^{(\tau)}(n) = M\{X_k^{(\tau)} X_{k+n}^{(\tau)}\} =$$

$$= M\left\{ \left| (1/\tau) \sum_{i=i+1}^{i\Delta\tau_i=\tau} \Delta\tau_{k,i} - M\{X_k^{(\tau)}\} \right| \cdot \left| (1/\tau) \sum_{i=i+1}^{i\Delta\tau_i=\tau} \Delta\tau_{k+n,i} - M\{X_k^{(\tau)}\} \right| \right\}, \quad (2.6)$$

де математичне чекання береться по усім  $K$  вибіркам  $\{X_k; k = 0;1;2;\dots\}$ , а  $n$  - інтервал кореляції, тобто кількість членів ряду, що розміщені між членами щодо яких визначається кореляційний зв'язок.

Стационарну послідовність  $\{X_k; k = 0;1;2;\dots\}$  називають асимптотично самоподібною другого порядку, якщо її агрегована підпослідовність  $m^{1-H} X^{(\tau)}$  має ту ж саму автокореляційну функцію, що і вихідна послідовність  $X$ . Тобто, для асимптотично самоподібної послідовності  $X$  маємо [5,31]:

$$X \hat{=} m^{1-H} X^{(\tau)}, m > 0. \quad (2.7)$$

де символ  $\hat{=}$  розуміється у сенсі рівності щодо автокореляційної функції, а параметр  $H$  називають параметром Херста. Так що вираз (2.7) за певних умов, що визначені нижче, можливо вважати математичною моделлю пакетного трафіку.

Проте не завжди реальні вибірки пакетного трафіка можуть моделюватися виразом (2.7). Наприклад, виконані нами експериментальні дослідження характеристик реального пакетного трафіка (див.розд.4.1) показали, що цьому трафіку притаманні властивості асимптотично самоподібного процесу лише після здійснення певної його обробки. Тому перш ніж подати увідні потоки даних на обробку до ВО у випадках застосування технологічної схеми адаптивного управління розподілом його ресурсів доцільно упевнитися, що

оброблюваний трафік можливо вважати асимптотично самоподібним процесом. Для цього треба визначити характерні властивості цього процесу.

#### 2.1.4. *Властивості пакетного трафіку як самоподібного процесу.*

1) *Довгострокова статистична залежність* у часі між членами часового ряду (2.7), що моделює пакетний трафік. Ця залежність є наслідком довгострокової залежності коефіцієнту кореляції самоподібного процесу від інтервалу кореляції  $n$ . У даному випадку  $n$  визначається у кількості членів ряду, що розташовані між членами, взаємна кореляція між котрими є предметом визначення.

Дійсно, як показано у [5], самоподібні процеси мають гіперболічно згасаючий коефіцієнт автокореляції виду

$$r(n) = \frac{1}{2} \left( (n+1)^{2H} - 2n^{2H} + (n-1)^{2H} \right), \quad (2.8)$$

або для асимптотично самоподібних процесів - автокореляційну функцію виду

$$R(n) \approx n^{2H-2} L(t) \text{ при } k \rightarrow \infty, \quad (2.9)$$

де  $L(t)$  – повільно мінлива функція на нескінченності, тобто для всіх  $x > 0$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{L(tx)}{L(t)} = 1.$$

У загальному випадку для усіх самоподібних процесів справедливо наступне наближення [31]:

$$R(\tau_i) \sim \tau_i^{-\beta}, \text{ де } \tau_i - \text{інтервал кореляції; } \tau_i \rightarrow \infty, 0 < \beta < 1. \quad (2.10)$$

Отже ряд, що утворений послідовними значеннями автокореляційної функції самоподібного процесу, розходиться. Тобто ряду (2.7) притаманна властивість довготривалої статистичної часової залежності між його членами [36]. Ця властивість суттєво відрізняє самоподібні процеси від процесів без довгострокової залежності, у яких кореляційна функція убиває за показовим законом, а ряд, утворений послідовними значеннями цієї кореляційної функції, не розходиться.

З фізичної точки зору довгострокову залежність відліків поточних значень інтенсивності пакетного трафіку можливо пояснити існуванням у складі ВО механізмів знищення пакетів та їхньої повторної передачі [37,38].

Довгострокова залежність значень кореляційної функції від інтервалу кореляції дозволяє говорити про можливість передбачення «поведінки» процесу на великих проміжках часу [39-41] та позбавляє від необхідності висування жорстких вимог до показників швидкодії засобів прогнозування. Однак, з іншого боку, довгострокова залежність є причиною виникнення пульсацій (сплесків) процесу, а також неприйнятності існуючих методів оцінки параметрів черг на портах ВО, що базуються на припущенні про однаковий і незалежний розподіл міжпакетних інтервалів у потоках даних.

2) **Повільно спадна дисперсія** самоподібного процесу. Звісно [42], що для традиційних стаціонарних випадкових процесів дисперсія зменшується обернено пропорційно об'єму вибірки:

$$\sigma^2(X^{(\tau)}) = \frac{1}{\tau} \sigma^2(X). \quad (2.11)$$

Проте дисперсія  $\sigma^2$  самоподібного процесу  $X$ , як і його функція автокореляції  $R(n)$ , є моментом другого порядку цього процесу. Тому вираз (2.10) є справедливим і для дисперсії, якщо вважати  $\tau_i=0$ . Отже, при усередненні самоподібного процесу дисперсія його вибіркового середнього загасає значно повільніше, ніж величина, що зворотна розміру вибірки.

Властивість повільно загасаючої дисперсії вказує на можливість пульсацій (викидів або сплесків) навіть у згладженому випадковому процесі, тобто згладжування пакетного трафіка шляхом його усереднення не завжди усуває пульсації цього трафіка. Через цю властивість використання такої поширеної міри як середньоквадратичне відхилення  $\sigma$  при здійсненні статистичної обробки потоків пакетів не є припустимим.

3) **Розподіл з вагомим хвостом**. Згідно (2.1) самоподібний процес  $X(t)$  та моделюючий його процес виду  $a^{-H}Z(at)$  мають ідентичні кінцевомірні розподіли ймовірностей для всіх  $a > 0$  [5], що подібні розподілам з так званими



«вагомими хвостами». Типовим прикладом розподілу з вагомим хвостом (РВХ) є розподіл Парето, що розглянутий у багатьох роботах, зокрема у [41, стор.275]. Випадкова величина  $Z$  має розподіл з вагомим хвостом (РВХ), якщо ймовірність  $P[Z > x] \sim cx^{-\alpha}$  при  $x \rightarrow \infty$ . Як бачимо, «хвіст» розподілу при зростанні значень  $x$  змінюється за степеневим законом. При  $0 < \alpha < 1$  середнє значення РВХ є нескінченним. При  $0 < \alpha < 2$  величина  $Z$  має нескінченну дисперсію. Вважається, що у вибірці, якій притаманний розподіл з вагомим хвостом, можуть бути істотні викиди.

4) *Повільне «згладжування» пакетного трафіку при його усередненні за шкалою часу.* Ця властивість є наслідком перших двох властивостей само подібних процесів.

5) *Персистентність самоподібних процесів.* Самоподібні процеси часто відносять до так званих персистентних стохастичних процесів, що мають тенденцію до збереження напрямку змін інтенсивності пакетного трафіка. Зазвичай вважають, що ймовірність того, що процес на  $i+1$  часовому інтервалі відхиляється від середнього в тім же напрямку, що й на  $i$ -ому інтервалі, настільки велика, наскільки значення параметру Херста  $H$  наближено до 1. Персистентність тренду пакетного трафіку надає упевненість у доцільності його прогнозування.

## **2.2. Визначення можливостей згладжування та прогнозування пакетного трафіку**

Пакетний трафік у даній роботі розглядається як послідовність квазістаціонарних ділянок із реалізаціями дискретного випадкового процесу, що у певній мірі можуть бути згладженими за допомогою процедур усереднення. З оглядом на ціль даного дослідження інтерес являє визначення умов, за яких досліджувані потоки пакетів та (або) їхні тренди, що отримані шляхом усереднення цих потоків, можуть бути визнані як потенційно прогнозовані.

Прогнозування будь-якого випадкового процесу є можливим лише в межах його інтервалу кореляції  $\tau_k$ , котрий визначається як [34,39]

$$\tau_k = \int_0^{\infty} |r(\tau)| d\tau, \quad (2.12)$$

де  $r(\tau)$  – коефіцієнт кореляції випадкового процесу. Прогнозування характеристик процесу на більш тривалий час не є можливим, оскільки віддалені один від одного більш, ніж на  $\tau_i$ , відліки процесу є статистично незв'язаними. Інтервал кореляції чисельно дорівнює площі під графіком нормованої кореляційної функції випадкового процесу (див. рис.2.1).

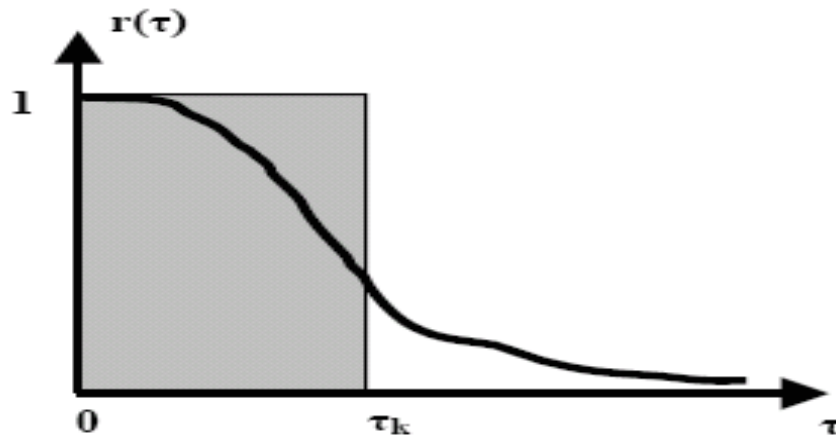


Рис.2.1. До визначення інтервалу кореляції (площа під кривою дорівнює площі заштрихованого прямокутника)

Якщо у (2.12) підставити (2.10), то отримаємо

$$\tau_k = \int_0^{+\infty} |\tau^{-\beta}| d\tau. \quad (2.13)$$

Для випадку самоподібного процесу, що характеризується параметром Херста у межах  $0,5 \leq H < 1,0$ , параметр  $\beta$  з урахуванням (2.9) має бути у межах  $0 < \beta \leq 1$ , так що для будь-якого  $R > 0$  маємо нескінченно тривалий інтервал кореляції  $\tau_i \rightarrow \infty$ , оскільки

$$\lim_{R \rightarrow +\infty} \int_0^R \frac{d\tau}{\tau^\beta} = \lim_{R \rightarrow +\infty} \left. \frac{\tau^{1-\beta}}{1-\beta} \right|_0^R = \lim_{R \rightarrow +\infty} \frac{R^{1-\beta}}{1-\beta} = \begin{cases} 0, \text{ при } \beta > 1, \\ \infty, \text{ при } \beta < 1; \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\text{Якщо ж } \beta = 1, \text{ то } \lim_{R \rightarrow +\infty} \int_0^R \frac{d\tau}{\tau} = \lim_{R \rightarrow +\infty} \ln \tau \Big|_0^R = \infty.$$

Таким чином, загальною умовою можливості прогнозування потоків пакетів або їхніх трендів є їхня належність до класу дискретних самоподібних процесів виду  $\{X_k; k = 0; 1; 2; \dots\}$ , де  $k$ -й дискретний компонент визначається виразом (2.4).

Як вже вказувалось щодо персистентних стохастичних процесів: ймовірність того, що процес на  $i+1$  часовому інтервалі відхиляється від середнього в тім же напрямку, що й на  $i$ -ому інтервалі, настільки велика, наскільки значення параметру Херста  $H$  наближено до 1. Звідсіля висновок: бажано здійснювати таке формування пакетного трафіка, яке забезпечує за інших рівних умов найбільше із можливих значень параметра  $H$ .

### 2.3. Розробка технологічної схеми формування пакетного трафіку

Запропонована у даній роботі технологія адаптивного управління розподілом ресурсів пакетного трафіка передбачає необхідність належного його формування, зокрема забезпечення узгодженості інтервалів стаціонарності потоків пакетів на портах вузлового обладнання  $\Delta T_c$  з інтервалами кроків дискретного управління  $\tau_k$ . Звісні методи формування трафіку такої можливості не передбачують. Зокрема, один із найбільш поширених, метод «відра токенів» [10] має суттєве обмеження щодо сфери застосування - тільки для випадків, коли реальний трафік має ознаки стаціонарного випадкового процесу. Проте реальний трафік та його похідні, як показано вище, слід вважати нестационарним дискретним процесом, так що безпосереднє використання методу «відра токенів» (а також інших звісних методів формування трафіку) в системах адаптивного перерозподілу пакетного трафіку навряд чи є виправданим. У даному підрозділі пропонується нова

технологічна схема обробки пакетів на портах ВО, яку пропонується використати як складовий елемент технології адаптивного управління розподілом ресурсів пакетного трафіка. В основі цієї схеми лежить метод «відра токенів», але з певними модифікаціями та доповненнями, що дозволили його застосувати в умовах обробки нестационарних потоків пакетів.

Межі застосування даної схеми розповсюджується на випадки: коли існує можливість:

1) встановити проміжки часу (так звані інтервали стаціонарності  $\Delta T_c$ ), на протязі котрих будемо мати майже постійну величину середньої швидкості потоку  $R_c$  на портах ВО;

2) забезпечити контрольовану величину пульсацій згладженого потоку пакетів.

Іншими словами, застосування даної схеми обробки трафіку є виправданим за умов, якщо існує можливість перетворення нестационарного потоку, що характеризується невизначеністю його середньої швидкості і обсягів пульсацій, у послідовність квазістаціонарних (у вузькому сенсі) відрізків процесу із визначеними обмеженнями на максимальну величину поточних значень їхньої інтенсивності. Таке перетворення забезпечує можливість реалізації дискретного управління та підвищує можливості прогнозування змін у трендах пакетного трафіку..

Алгоритм відра токенів широко висвітлений у публікаціях (наприклад, у [10]), але щодо відносно вузьких сфер його застосування. У даному випадку модифікуємо схему роботи цього алгоритму з тим, щоб його можливо було включити у контур системи адаптивного розподілу пропускної здатності вузлового обладнання між смугами пропускання його портів.

Технологічна схема обробки пакетів на одному із портів вузлового обладнання, яку пропонується використовувати як складовий елемент технології адаптивного управління розподілом пропускної здатності обладнання між смугами пропускання його портів, показана на рис.2.2.



Рис.2.2. Технологічна схема обробки пакетів на порту вузлового обладнання (як складова схеми адаптивного розподілу пропускної здатності вузлового обладнання між його портами)

Усереднений на інтервалі увідний потік пакетів надходить у реальному часі на увід *Серверу обробки увідного потоку*. За певних умов, що розглянуті далі, перед вводом цього *Серверу* можуть утворюватися черги пакетів. З виходу *Серверу* оброблений потік пакетів потрапляє на керований *Порт вузлового обладнання*. Зазначимо, що робота цієї схеми базується, як і в алгоритмі «відра токенів», на порівнянні параметрів вхідного пульсуючого потоку, що надходить з каналу зв'язку, із параметрами штучно синтезованого еталонного потоку. Еталонний потік – це утворений *Генератором токенів* потік, що втікає в умовне *Відро токенів*. А токен – це абстрактний об'єкт, носій порції інформації, що використовується для побудови еталонного потоку. *Генератор токенів* періодично із постійним інтервалом  $\tau_m$  спрямовує черговий

токен у *Відро*, що має обмежений об'єм  $b_m$  байт. Усі токени мають однакову довжину  $m_m$  байт, а період подачі токенів обирається таким чином, щоб відро заповнювалося токенами із швидкістю  $r_m$  байт/с, де  $r_m = m_m/\tau_m$ . Алгоритм роботи відра токенів побудовано таким чином, що параметр  $r_m$  задає інтенсивність (тобто, середню швидкість) обробленого потоку пакетів (на виході серверу) на даному інтервалі стаціонарності потоку  $\Delta T_c$ , а об'єм відра  $b_m$  задає максимально дозволений розмір пульсацій цього потоку.

Технологічні засоби обробки пакетів на кожному із інтервалів стаціонарності мають здійснювати наступне. Коли на заданому інтервалі стаціонарності поточна швидкість реального потоку  $R_{II}$  дорівнює швидкості заповнення *Відра*  $r_m$ , а поточний рівень токенів у відрі знаходиться у межах  $M \leq k_m \leq b_m$ , де  $M$  - розмір одного пакета у байтах, то *Сервер* буде безперешкодно пропускати пакети на увід *Порту* вузлового обладнання із швидкістю  $R_{II} = r_m$ . Якщо будуть невеликі обсяги пульсацій трафіку, коли  $\Delta R_{II} \cdot \Delta t_{II} \leq b_m$ , де  $\Delta R_{II}$  - величина змін швидкості потоку, а  $\Delta t_{II}$  - тривалість змін швидкості потоку, то поточний рівень токенів у відрі буде коливатися в залежності від «поведінки» потоку, але *Сервер* не буде перешкоджати пропуску пакетів на увід *Порту* вузлового обладнання, швидкість потоку котрих на вихідному інтерфейсі Серверу у цьому випадку буде коливатися у межах  $0 \leq R_{II} < r_m + b_m / \Delta t_{II}$ . Якщо поточна швидкість реального потоку  $R_{II}$  є меншою, ніж швидкість заповнення відра токенів  $r_m$ , і ця ситуація зберігається відносно довго, то *Відро токенів* через деякий час має переповнитися і у момент переповнення подача токенів у відро має припинитися. У цьому випадку, тобто, коли швидкість реального потоку лежить у межах  $0 \leq R_{II} < r_m$  (менша за швидкість еталонного потоку), а *Відро* є переповненим, *Сервер* також буде безперешкодно пропускати пакети на увід *Порту* вузлового обладнання без змін поточної швидкості потоку пакетів.

Проте, коли поточна швидкість реального потоку  $R_{\Pi}$  перевищує швидкість заповнення відра токенів  $r_m$ , а обсяг пульсації реального потоку перевищує об'єм *Відра*, тобто  $\Delta R_{\Pi} \cdot \Delta t_{\Pi} > b_m$ , то виникне ситуація, коли поточний рівень токенів  $k_m$  у Відрі знизиться і стане менше ніж  $M$  байт. У цьому випадку *Сервер* має блокувати надходження пакетів до *Порту* на проміжках часу поки  $k_m < M$ . У цьому випадку затримані пакети починають заповнювати *Буфер черги пакетів* і може виникнути ситуація, коли поточна довжина черги перевищить граничну припустиму довжину черги увідних пакетів. У цьому випадку «зайві» пакети будуть втрачатися.

Розглянемо технологічну схему формування трафіка більш детально. У момент, коли *Відро* заповнюється до країв (тобто, коли сумарний обсяг токенів у відрі стає рівним  $b_m$  байт), спрацьовує *Вимірювач переповнення відра* і надходження токенів до відра тимчасово припиняється. Але проходження пакетів через *Сервер обробки увідного потоку* не припиняється. Після проходження кожного окремого пакета через цей *Сервер* (див. рис.3.4) *Віднімальник токенів* віднімає від поточної кількості інформації, що міститься у *Відрі*, рівно стільки байт інформації, скільки її переносить один пакет. Тобто, із відра витікає порція інформації розміром  $M$  байт. Таким чином, в залежності від «поведінки» потоку, що просувається через *Сервер*, рівень токенів у *Відрі* коливається. Проте кожні  $\tau_m$  секунд він збільшується на  $r_m \cdot \tau_m$  байт. Якщо інтенсивність реального потоку на ввіді *Серверу* перевищує інтенсивність еталонного потоку, то рівень токенів у відрі зменшується, а у протилежному випадку – навпаки. Фактично *Відро токенів* являє собою лічильник, поточні показання котрого коливаються, але кожні  $\tau_m$  секунд вони збільшуються на  $m_m$  байт.

Функції порівняння потоків виконує *Сервер обробки увідного потоку*. Систему адаптивного розподілу налаштовують таким чином, щоб початок кожного кроку дискретного управління  $\tau_k$  співпадав із початком кожного інтервалу стаціонарності увідного потоку, тривалість котрого визначають

експериментальним шляхом. Зазвичай, тривалість кроку дискретного управління  $\tau_k$  суттєво менша, ніж тривалість інтервалу стаціонарності  $\Delta T_c$ . У кінці кожного  $i$ -го кроку управління система розподілу шляхом подачі відповідної команди на *Генератор токенів* стрибкоподібно змінює параметр  $r_m$ . І цим обмежує пропускну спроможність вивідного інтерфейсу *Серверу* вирахованим (або прогнозованим) значенням ширини смуги пропускання  $C_i^\theta$  байт/с, де  $\theta$  - номер порту вузлового обладнання, так, щоб максимально можливе значення поточної швидкості потоку пакетів  $R_{\Pi max}$  не перевищувало  $C_i^\theta$ . Максимально можливе значення  $R_{\Pi}$  може виникнути, якщо відбулася майже миттєва пульсація з максимально можливою амплітудою і з гранично припустимим обсягом  $b_m$ . Тобто,  $R_{\Pi max} = r_m + b_m / \Delta t_{\Pi}$ . Якщо ця умова не виконується, тобто  $R_{\Pi max} > C_i^\theta$ , то потік пакетів буде безперешкодно потрапляє на увід *Порту*, але *Порт* буде не здатним обробити усі пакети цього потоку. Як результат, «зайві» пакети будуть спочатку подовжувати вихідні черги *Буферу*, а потім після переповнення *Буферу* втрачатися.

*Сервер* передає пакет із увідної черги на вивідний інтерфейс тільки, якщо у момент надходження пакета на *Сервер Відро* було заповнено токенами не менш, ніж на  $M$  байт, де  $M$  – довжина (розмір) пакета. Тому у механізм відра токенів включено Вимірювач поточної кількості токенів  $k_m$  у відрі. Якщо *Сервер* пропустив пакет через себе, то у цей момент завдяки *Віднімальнику* із *Відра* викидається  $M$  байт. Якщо ж у момент надходження пакета із черги до *Сервера*, відро було заповнено менш, ніж на  $M$  байт, то вивід пакетів із черги призупиняється доти, поки *Відро* заповниться хоча б на  $M$  байт.

Як бачимо, дана технологія формування пакетного трафіка забезпечує саморегуляцію та взаємоузгодження двох потоків. Якщо середня швидкість еталонного потоку перевищує інтенсивність реального потоку, то *Відро токенів* поступово заповнюється, аж поки не переповниться (у момент переповнення припиняється подача токенів у відро). Якщо ж середня швидкість еталонного потоку буде нижчою, ніж інтенсивність реального потоку, то *Відро* поступово спустошується, аж поки кількість токенів у ньому



стане меншою, ніж довжина пакета (у цей момент пропуск пакетів через *Сервер* призупиняється).

Слід зазначити, що дана технологія припускає можливість обробки пульсацій лише у певних межах. У відсутності пульсації або при тривалій пульсації ( $\Delta t_{\Pi} \rightarrow \infty$ ) її амплітуда  $b_m / \Delta t_{\Pi} \rightarrow 0$  і, отже, пропускна здатність вивідного інтерфейсу *Сервера* буде наближатися до  $r_m < C_1^0$  байт/с. При максимально можливому обсягу пульсації  $b_m$  тривалістю  $\Delta t_{\Pi}$  пропускна здатність вивідного інтерфейсу *Сервера* буде наближатися до величини  $r_m + b_m / \Delta T_c < C_1^0$  байт/с. Так що не виключено, що на протязі невеликого проміжку часу реальна швидкість вивідного потоку буде перевищувати середню швидкість  $r_m$ . Ця ситуація спостерігається тоді, коли на протязі певного часу пакети не надходили до *Серверу*, так що *Відро* повністю наповнилося токенами. Якщо після цього на увід *Серверу* надійде тривала послідовність пакетів, то ці пакети будуть подаватися на його вивід без інтервалів один за одним із швидкістю  $R_{\Pi max} = r_m + b_m / \Delta t_{\Pi}$ . Максимальна тривалість такої пульсації складає  $b_m / (R_{\Pi max} - r_m)$  секунд, після чого обов'язково настане пауза, що необхідна для заповнення спустошеного відра.

Для отримання квазістаціонарних відрізків вхідного пакетного трафіка у схему формування включено *Усереднювач інтенсивності потоку*. Інтервал усереднення  $\tau_y$  може встановлюватися адміністратором вручну або автоматично на основі аналізу параметрів відхилень відрізків потоку від прийнятих критеріїв стаціонарності. Так що на виході *Усереднювача* маємо усереднений тренд увідного потоку у вигляді сходинкоподібної лінії, де ширина сходинки визначає усереднену поточну інтенсивність потоку. Якщо механізм відра токенів включити у контур адаптивного управління смугами пропускання портів вузлового обладнання, то необхідно забезпечити синхронність змін ширини смуги цього порту із змінами середньої швидкості згладженого тренду потоку. Для цього керуючі сигнали із виходу блока формування команд (*БФК*) слід подати на *Генератор токенів*. Ці сигнали

мають керувати величиною змін довжини токенів відповідно до обчисленої величини змін смуги пропускання  $\theta$ -го *Порту*. Якщо *БФК* на певному кроці керування збільшив смугу *Порту*, то і на *Генератор токенів* подається команда на збільшення довжини токена  $m_m$  (тобто, на збільшення швидкості еталонного потоку  $r_m$ ). У разі необхідності зменшення смуги порту подається команда на зменшення довжини токена.

Динаміка змін параметрів схеми формування трафіка на ділянці збільшення інтенсивності усередненого тренду увідного потоку показана на рис.2.3.

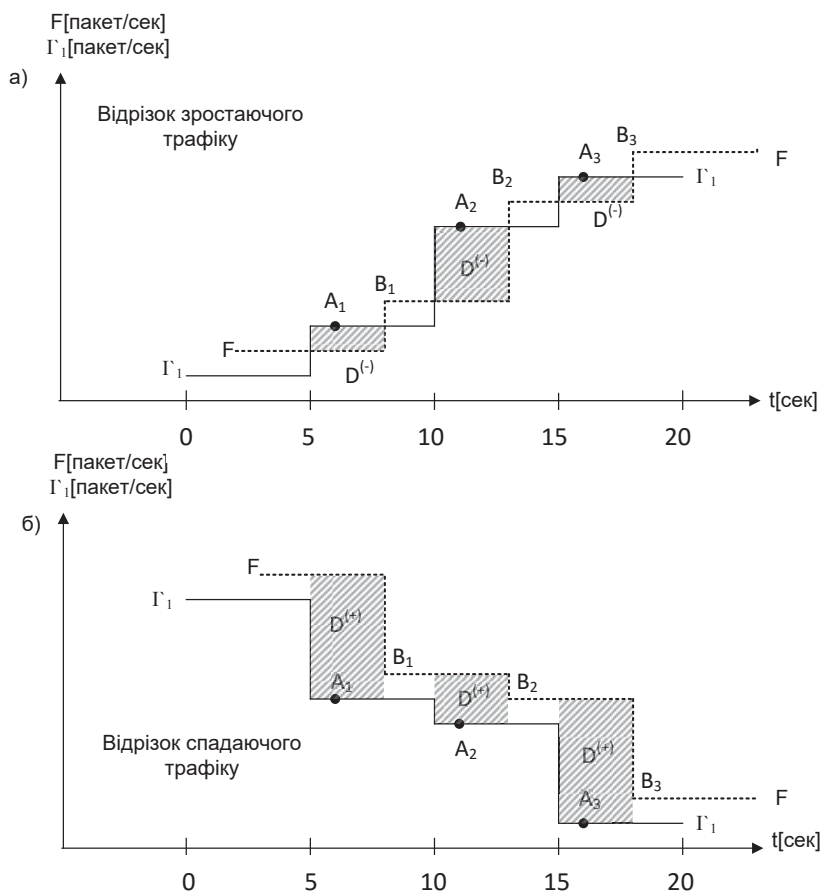


Рис.2.3. Динаміка змін параметрів схеми формування пакетного трафіка

#### 2.4. Розробка процедур віднесення пакетного трафіка до класу самоподібних процесів

Ефективність роботи механізму прогнозування, що функціонує у складі СУАР, суттєво залежить від наявності у потоці оброблюваних пакетів певних сталих (рос., - устойчивых) характеристик, щодо яких можливо оптимізувати

параметри механізму прогнозування. Вищенаведений аналіз асимптотично самоподібних процесів показав, що у ролі такої сталої характеристики доцільно використати параметр Херста (або похідні від нього). Якщо після певної обробки представницьких вибірок реального пакетного трафіка визначиться довгострокова залежність коефіцієнту автокореляції цих вибірок від інтервалу кореляції  $n$ , а значення оцінки параметру Херста  $H$  буде лежати у межах  $0,5 - 1,0$ , то можливо вважати оброблюваний пакетний трафік як такий, що володіє властивістю статистичної самоподоби. І, отже, за цих умов його можливо моделювати виразами (2.1) - (2.6). Якщо ж  $H \leq 0,5$ , то це свідчить про відсутність самоподоби. Значення  $H \geq 1,0$  вказує на повну детермінованість процесу і, отже, на відсутність доцільності його прогнозування.

Результати наших експериментальних досліджень (див.розд.4.1) показали, що реальний пакетний трафік, особливо на малих інтервалах усереднення пакетів у потоці  $\tau$ , не завжди може моделюватися виразами (2.1) - (2.6). Тому доцільно створити механізм, що дозволяє на практиці оцінювати можливість віднесення поточних вибірок трафіку до класу самоподібних процесів.

#### **2.4.1. Процедура класифікації за кутовим коефіцієнтом нахилу лінії залежності оцінок коефіцієнту автокореляції від інтервалу кореляції.**

Якщо процесу  $\{X_k; k = 0;1;2;\dots\}$  притаманна властивість самоподоби, то його автокореляційна функція  $R(n)$  буде мати вигляд (2.8). У той же час, з іншого боку, згідно (2.9) значення цієї функції є пропорційні значенню  $\tau_i^{-\beta}$ , де  $\tau_i$  - інтервал кореляції процесу  $X$ . При цьому, згідно (2.8), чим більше значення  $n$ , тим більш точно вираз (2.8) моделює реальний пакетний трафік.

Якщо виконати логарифмування виразу (2.8), то отримаємо:

$$\log R(\tau_i) \sim -\beta \log \tau_i, \quad (2.15)$$

тобто маємо лінійну залежність між  $\log R(\tau_i)$  та  $\log \tau_i$ , яку можливо відобразити графічно у вигляді прямої лінії з кутом нахилу, що залежить від параметру  $\beta$ .

З урахуванням (2.8) та (2.9) відобразимо зв'язок між  $\beta$  та параметром Херста  $H$ :

$$\beta = 2(1 - H), \quad (2.16)$$

так що у разі визначення кута нахилу прямої лінії, що відображає залежність (2.15), можливо здійснити оцінювання значення параметра Херста.

Таким чином, процедура класифікації вибірок пакетного трафіка на предмет виявлення можливості його віднесення до класу асимптотично самоподібних процесів полягає у наступному.

1. Щодо досліджуваної реалізації пакетного трафіку із заданим інтервалом усереднення пакетів  $\tau$  отримують представницьку вибірку у вигляді сукупності  $K$  членів часового ряду  $\{X_k^{(\tau)}, k = 1, 2, \dots, K\}$ , де кожний член визначається згідно (2.3) і дорівнює кількості пакетів, що надійшли в канал транспортування пакетів протягом  $k$ -го інтервалу часу тривалістю  $\tau$ .  $K$  - припустимий для аналізу об'єм представницької вибірки обирається, виходячи із законів математичної статистики.

2. Оцінюють значення математичного очікування  $M\{X_k^{(\tau)}, k=1, 2, \dots, K\}$ .

3. Оцінюють значення коефіцієнту автокореляції  $R^r(n)$  згідно виразу (1.5) для кожного  $n = 0, 1, 2, \dots, K-2$ . Звернемо увагу, що інтервал кореляції беруть не у часовому вимірі  $\tau_i$ , а у кількості членів ряду, що розміщені між членами ряду щодо яких визначається кореляційний зв'язок..

4. У логарифмічній шкалі координат для заданого інтервалу усереднення пакетів у потоці  $\tau$  будують графік залежності  $\log R(n)$  від  $\log n$ . Форма цієї залежності на графіку має виглядати (з певною похибкою, особливо при малих значеннях  $n$ ) як пряма лінія. Якщо це не так, то робиться висновок, що досліджувана реалізація пакетного трафіку не може вважатися самоподібним процесом. Чим більше побудована залежність подібна прямої лінії, тим з більшою ймовірністю отримана вибірка пакетного трафіку схожа на самоподібний процес.

5. Вимірюють приблизний кут нахилу побудованої на графіку прямої, що відображає залежність  $\log R(n)$  від  $\log n$ , і враховуючи вираз (2.16), отримують оціночне значення параметру Херста. Якщо це значення знаходиться у діапазоні 0,5 - 1,0, роблять висновок про ступінь самоподібності вибірки

пакетного трафіку. Чим ближче оціночне значення параметру Херста до 1, тим вище ступінь самоподібності досліджуваного трафіку. Якщо ж отримане значення оцінки  $H$  виявилось поза меж вищезазначеного діапазону або точно на границях цього діапазону, то досліджуваний трафік не є самоподібним.

6. Якщо вищенаведена процедура класифікації трафіку використовують у реальному часі, то слідкують за дотриманням умови його квазістаціонарності на часових проміжках обробки пакетів. Для цього розкид значень оцінок математичних очікувань досліджуваних вибірок трафіку в межах цих проміжків має не перевищувати певного порогового значення, що вибирається із сутності вирішуваних завдань.

#### 2.4.2. Процедура класифікації за індексом дисперсії

Як було вказано, рівень самоподоби випадкового процесу виявляється шляхом визначення параметра Херста  $H$ . Якщо оцінка параметра Херста відмінна від 0.5 і знаходиться в межах  $0.5 < H < 1$ , то це вважається достатньою підставою для визнання процесу самоподібним [5]. Проте якщо оцінене значення  $H$  виявилось близьким до одиниці, то це може означати також, що йдеться про детермінований, а не випадковий процес, оскільки для ряду детермінованих процесів характерна структура, що регулярно повторюється на будь-якому масштабі (це приводить до одиничного значення параметру Херста).

Оцінка параметра Херста може бути здійснена шляхом аналізу логарифмічної залежності нормованої дисперсії відліків досліджуваного процесу (індексу дисперсії IDC) від логарифму часового інтервалу його визначення [5]. У публікаціях IDC іноді називають індексом розкиду або фактором Фано [5]. У даному випадку IDC визначимо як відношення дисперсії кількості оброблених пакетів на заданому часовому інтервалі  $T$  до математичного очікування цієї величини [5]:

$$F(\tau) = \sigma^2[I(\tau)] / M[I(\tau)], \quad (2.17)$$

де  $I(\tau)$  – кількість пакетів досліджуваного потоку, що були оброблені на інтервалі  $\tau$ .

Оцінювання параметра Херста за індексом дисперсії здійснюється наступним чином.

Для самоподібних процесів натуральний логарифм  $F(\tau)-1$  як функція від натурального логарифму інтервалу  $\tau$  лінійно зростає, оскільки [5]:

$$\ln[F(\tau)-1] = (2H-1)\ln\tau + y, \quad (2.18)$$

$$\text{де } y = \ln \left[ \frac{2K}{\alpha(1-\alpha)} M_{\Gamma}(\alpha) B^{-\alpha/2} \right], \quad M_{\Gamma}(x) = \frac{\Gamma(1+x/2)\Gamma(1-x)}{\Gamma(1-x/2)}.$$

Порівнюючи (2.18) з (2.15), можливо стверджувати, що кутовий нахил прямої (2.18) також визначається виразом (2.16).

Відповідно до виразу (2.18), точки на рис.2.1 повинні утворювати пряму лінію (якщо досліджуваній вибірці трафіка притаманні властивості самоподібного процесу), що дозволяє по кутовому коефіцієнту нахилу прямої лінії однозначно визначити параметр Херста наступним чином:

$$H=1 - \beta /2. \quad (2.19)$$

## **2.5. Дослідження впливу параметрів усереднення трафіка на його статистичні характеристики**

У даній роботі рівень самоподоби досліджуваних вибірок пакетного трафіку виявлявся шляхом визначення параметра Херста  $H$  (див.підрозд.4.1). Якщо оцінка параметра Херста відмінна від 0.5 і знаходиться в межах  $0,5 < H < 1$ , то це є достатньою підставою для визнання процесу самоподібним. Проте якщо оцінене значення  $H$  виявилось близьким до одиниці, то це може означати також, що йдеться про детермінований, а не випадковий процес, оскільки для ряду детермінованих процесів характерна структура, що регулярно повторюється на будь-якому масштабі.

Як свідчать наші експериментальні дані (див. підрозд. 4.1), приблизно для 15% вибірок із загального числа досліджених реалізацій пакетного трафіка обчислені значення параметра  $H$  виявились меншими за 0,5, а ще для 80% вибірок діапазон значень параметра  $H$  знаходився у межах 0,5 - 0,7. Це означає, що 5% вибіркaм реального пакетного трафіка не притаманні властивості самоподібних процесів, що ставить під сумнів можливість їхнього прогнозування. Тим не менш, значна більшість реалізацій вихідного трафіка може бути віднесена до класу самоподібних процесів, але їхня слабка персистентність (на що вказує характерний для них діапазон невисоких значень параметра Херста: від 0,5 до 0,7) свідчить, що вони не мають стійкої тенденції до збереження напрямку змін інтенсивності пакетного трафіка. За таких умов необхідно забезпечити високу швидкість прогнозування, що не завжди можливо здійснити. Тому представляється актуальним цілеспрямоване формування пульсуючого пакетного трафіка, у т.ч. його усереднення. Це у певній мірі може згладити пульсації трендів трафіку і, отже, створити більш прийнятні умови для їхнього прогнозування.

У цьому зв'язку визначимо вплив процедури усереднення трафіка на можливу ступінь його самоподібності, тобто виявимо можливий функціональний зв'язок між параметром усереднення трафіку та параметром Херста шляхом застосування процедури визначення індексу дисперсії ІДС, розглянутої у попередньому підрозділі.

Графіки залежності  $\ln[F(\tau)-1]$  від  $\ln\tau$  для різних інтервалів усереднення  $\tau_y$  для типової вибірки вибірки трафіку показані на рис. 2.4.

Процедура та умови побудови графіків цієї залежності розглянуто у підрозд. 2.4 та 4.1 (використано натуральний логарифмічний масштаб як по вісі ординат, так і по вісі абсцис).

Як бачимо, графіки на рис. 2.4 представлені відрізками прямих ліній із різними кутами нахилу  $\beta$ . Більшим значенням інтервалу усереднення  $\tau_y$  відповідають менші значення куту  $\beta$  і, отже, згідно (2.19) більші значення

параметру Херста  $H$ . Так що, шляхом підвищення значень  $\tau$ , можливо дещо поліпшити ступінь самоподібності трендів трафіку, але за наступних умов.

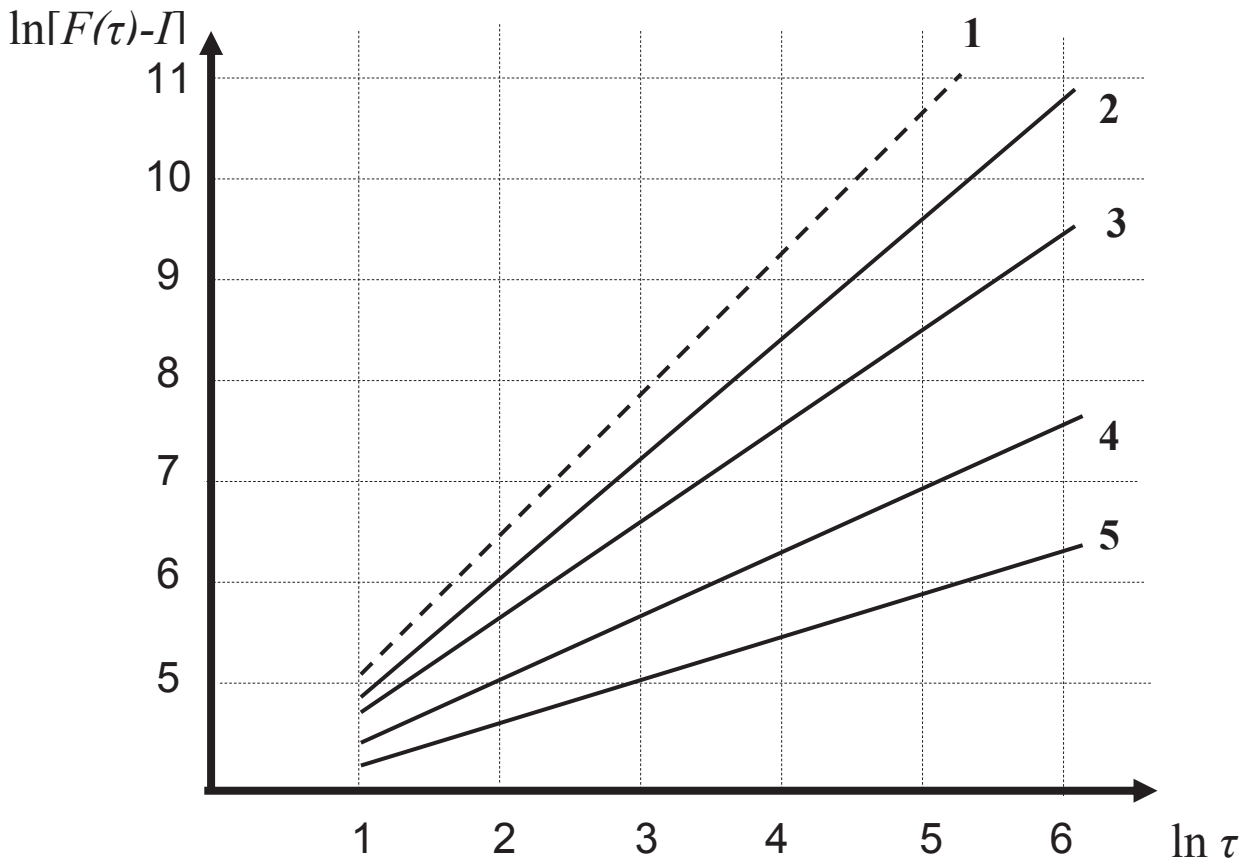


Рис.2.4. Ілюстрація залежності рівня самоподібності пакетного трафіка від інтервалу його усереднення (шляхом оцінки параметра Херста  $H$  за значеннями IDC)

1. Слід мати на увазі, що реально отримані дані лише у грубому наближенні «лягають» на відповідні прямі лінії. У дійсності вони «розкидані» навколо цих прямих. Проте з ростом значень  $\tau$  дані щодо  $\ln[F(\tau)-1]$  усе більш компактно розташовуються навколо уявних прямих, що відображають досліджувану залежність. Кутові коефіцієнти  $\beta$  цих уявних прямих визначаються шляхом лінійної регресії.

2. Не для всіх експериментально отриманих вибірок залежність ІДС від інтервалу кореляції у логарифмічній шкалі має вигляд прямої лінії, оскільки, як вже вказувалось, приблизно 15% вибірок із загального числа досліджених реалізацій вихідного (не усередненого) пакетного трафіка не є самоподібними



(обчислені значення параметра  $H$  для них виявились меншими за 0,5). Отже, процедура усереднення таких вибірок навряд чи перетворить їх у самоподібний процес.

3. Приблизно 5% від загальної кількості експериментально отриманих вибірок реалізацій трафіку мають яскраво виражений фрактальний характер (параметр  $H$  виявився більшим за 0,7). У цих випадках процедура усереднення може і не виконуватись.

4. Однак більшість вибірок ( $\approx 80\%$  від загальної кількості) мають невисоку ступінь самоподібності ( $0,5 < H < 0,7$ ), так що застосування процедури усереднення у цих випадках може дати позитивний ефект.

У табл.2.1 наведено результати кількісного аналізу залежності параметру Херста від інтервалу усереднення типової вибірки із слабо вираженою персистентністю (коли первісний не усереднений потік пакетів має  $H=0.57$ ). Отримані дані – результат обробки графіків рис.2.4.

**Таблиця 2.1**

**Дані щодо залежності параметру Херста від інтервалу кореляції**

Кутовий коефіцієнт нахилу прямої $\beta$	Значення параметру Херста $H$	Інтервал усереднення вибірки даних $\tau_y$	Примітка
0,86	0,57	1 с	Невисока персистентність
0,74	0,63	5 с	
0,68	0,66	25 с	
0,66	0,67	125 с	
0,65	0,675	625 с	Задовільна персистентність

Результати аналізу даних табл.2.1 полягають у наступному.

1. Куткові коефіцієнти нахилу ліній залежності  $\ln[F(\tau)-1]$  від  $\ln \tau$  із ростом  $\tau_y$  зменшуються. Це означає, що збільшення інтервалу усереднення трафіку підвищує рівень його самоподібності (оскільки збільшуються значення параметру Херста).

2. Позитивний ефект щодо підвищення ступеню самоподібності більш суттєво проявляється у діапазоні невеликих інтервалів усереднення. У діапазоні значних інтервалів  $\tau_y$  збільшення цих інтервалів приводить до незначного росту параметру Херста.

3. З ростом проміжків кореляції  $\tau$  точність визначення показника самоподібності трафіка збільшується.

Отже, отримані результати свідчать, що процедура усереднення пакетного трафіку, в багатьох випадках, може у певній мірі згладити пульсації, підвищити ступінь самоподібності трендів трафіку і, таким чином, створити більш прийнятні умови для прогнозування його трендів.

## **2.6. Розробка процедури корекції у реальному часі інтервалу усереднення пакетного трафіку**

Збільшення інтервалу усереднення сприяє збільшенню прогнозованості тренду трафіку, але, у той же час, призводить до збільшення втрат пакетів. Тому є доцільним здійснювати у реальному часі процедуру корекції інтервалу усереднення трафіку таким чином, щоб, з одного боку, забезпечити максимально можливу ступінь самоподібності усередненого трафіку, а з іншого, не допустити перевищення припустимого значення затримок пакетів. Якщо припустити, що механізми служби QoS налагоджені таким чином, що пакети, які затримались у буферних пристроях більше припустимого проміжку часу, будуть знищені, то процедура корекції має забезпечувати неможливість перевищення втрат пакетів припустимого значення коефіцієнту втрат пакетів. З урахуванням вищезазначеного, а також результатів, отриманих у попередніх підрозділах роботи, пропонується наступна процедура корекції у реальному часі інтервалу усереднення пакетного трафіку.

1. Отримують у реальному часі представницьку вибірку досліджуваної реалізації пакетного трафіку у вигляді сукупності  $K$  членів часового ряду  $\{X_k^{(\tau)}\}$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ , де кожний член визначається згідно (2.4), тобто кількістю пакетів, що надійшли в канал транспортування пакетів протягом  $k$ -го

інтервалу часу. На початку процедури задаються найменшим із можливих інтервалів усереднення пакетів  $\tau_{min} \cdot K$  - припустимий для аналізу об'єм представницької вибірки обирається, виходячи із законів математичної статистики.

2. Здійснюють процедуру класифікації отриманої вибірки на предмет виявлення можливості його віднесення до класу асимптотично самоподібних процесів. Зміст процедури висвітлено у підрозд.2.4.

3. Якщо за результатом оцінки параметру Херста отримана вибірка не може бути віднесена до класу асимптотично самоподібних процесів, то інтервал усереднення збільшують і повертаються до виконання п.2. Якщо отримана вибірка може бути віднесена до класу асимптотично самоподібних процесів, то переходять до виконання п.4.

4. Якщо  $H \ll 0,7$  (тобто, маємо невисоку ступінь самоподоби вибірки), то порівнюють  $IPLR$  - вимірне значення коефіцієнту втрат пакетів на поточному інтервалі усереднення  $\tau_y$  із  $IPLR_{max}$  - нормою на припустимий коефіцієнт втрат пакетів для оброблюваного класу трафіка (або порівнюють з умовами сервісної угоди). Якщо  $IPLR \ll IPLR_{max}$ , то інтервал усереднення  $\tau$  збільшують і повертаються до виконання п.2. Якщо  $H \geq 0,7$  (тобто, маємо високу ступінь самоподоби), то переходять безпосередньо до здійснення процедури прогнозування тренду трафіка з останнім значенням інтервалу усереднення.

Норми на припустимий коефіцієнт втрат пакетів для оброблюваних класів пакетного трафіка містяться, зокрема, у корпоративному стандарті ВАТ «Укртелеком» (КСТ 1.3.876-2006. Технічна експлуатація мереж передачі даних ВАТ «Укртелеком». П р а в и л а забезпечення і оцінювання рівня надання послуг).

## ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ

2.1. В якості моделі пакетного трафіка в задачах адаптивного управління розподілом ресурсів пакетних мереж доцільно використовувати математичне представлення дискретних асимптотично самоподібних процесів. Властивості цих процесів свідчать про можливість їхнього цілеспрямованого формування та прогнозування з метою застосування у вищеназваних задачах.

2.2. Показано, що рівень прогностичності пакетного трафіка безпосередньо залежить від ступеню його самоподібності, котрий, у свою чергу, визначається значеннями параметра Херста. Чим ближче значення цього параметра до 1 (із діапазону значень у межах від 0,5 до 1,0), тим вище ступінь самоподібності трафіка.

2.3. На основі результатів обробки експериментально отриманих вибірок пакетного трафіка вперше показано, що збільшення інтервалу усереднення трафіку приводить до збільшення ступеню його самоподоби (тобто, до збільшення значень параметру Херста), що сприяє прогнозуванню його тренду, але при цьому зростає час затримок та коефіцієнт втрат пакетів. Показано також, що цілеспрямоване формування пульсуючого пакетного трафіка, зокрема його усереднення, з дотриманням норм щодо припустимих втрат пакетів в багатьох випадках може у певній мірі згладити пульсації і, отже, створити більш прийнятні умови для прогнозування його трендів.

Вперше виявлена залежність між характеристиками пакетного трафіка та ступенем його прогностичності дозволила визначити умови та шляхи формування вихідного трафіка у напрямку підвищення його прогностичності.

2.4. На основі звісних методів розроблено процедури віднесення вибірок пакетного трафіка до класу асимптотично самоподібних систем, що забезпечує можливість визначення умов застосування засобів формування та прогнозування пакетного трафіку у складі системи адаптивного розподілу ресурсів пакетних мереж.

2.5. Вперше розроблено процедуру корекції у реальному часі інтервалу

усереднення пакетного трафіку, яка, з одного боку, забезпечує максимально можливу ступінь самоподібності усередненого трафіку, а з іншого, не допускає перевищення припустимого значення затримок пакетів.

2.6. Розроблено нову технологію формування пакетного трафіка. На відміну від звичайних ця технологія забезпечує можливість перетворення нестационарних потоків пакетів, що просуваються через порти вузлового обладнання, на квазістационарні відрізки з проміжками стаціонарності, які узгоджені з інтервалами кроків дискретного управління. Внаслідок вищезазначеного відкрилась можливість застосування розробленої технології формування трафіку в системах адаптивного розподілу пропускної здатності вузлового обладнання між його портами.

## РОЗДІЛ 3

### УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ РОЗПОДІЛОМ РЕСУРСІВ ПАКЕТНИХ МЕРЕЖ

#### 3.1. Загальна характеристика технології управління розподілом ресурсів пакетної мережі

Розроблювана технологія перерозподілу ресурсів пакетної мережі спрямована на підвищення коефіцієнту завантаження вузлового обладнання (ВО), оскільки цей коефіцієнт показує повноту використання продуктивності устаткування [43]. Цей коефіцієнт подібний коефіцієнту корисної дії. Тому його іноді називають інформаційним коефіцієнтом корисної дії. Як неконтрольоване розсіювання енергії призводить до зниження коефіцієнту корисної дії, так і наявність пульсацій у потоках пакетів призводить при перевищенні смуги пропускання портів ВО до необоротних втрат інформації.

Для підвищення коефіцієнту завантаження ВО у рамках заданого рівня його продуктивності, як показано у [3], доцільно застосувати механізм перерозподілу ширини смуг пропускання окремих портів за умови збереження їхньої суми. У [1] пропонується здійснювати такий перерозподіл у реальному часі пропорційно поточним інтенсивностям потоків на портах ВО. Але визначити миттєве значення інтенсивності потоку 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 в інтенсивностях потоків. Ключовим фрагментом алгоритму управління перерозподілом 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. Зазначений модуль має в якості вхідних перемінних 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 компонент фазового вектора керованого об'єкта. При цьому сума компонентів зберігається і, виходячи саме з цієї умови, має бути побудовано алгоритм вирівнювання керованих перемінних. Необхідно зв'язати задачу динамічного вирівнювання керованих перемінних з умовою спрямованого впливу на ширину смуг пропускання ВО. Такий зв'язок здійснюється через коефіцієнти завантаження портів. При цьому на кожному кроці вирівнювання обчислюються поточні значення коефіцієнтів завантаження. Тобто для регулятора керованими перемінними (що динамічно вирівнюються) є саме коефіцієнти завантаження портів. 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 ВО. 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 уводах портів комутатора.

### **3.2. Розробка алгоритму адаптивного управління**

З урахуванням вищезазначеного, задачу адаптивного управління смугами портів ВО вирішимо на основі даних спостереження за поточними значеннями інтенсивності потоків пакетів на його портах у реальному часі шляхом її зведення до звісної задачі динамічного вирівнювання коефіцієнтів

завантаження портів  $k_1, k_2, \dots, k_n$ , де  $N$  – кількість портів у ВО. Для вирівнювання значень коефіцієнтів в процесі адаптивного управління використаємо один із різновидів методу динамічного програмування – метод аналітичного конструювання регуляторів, що запропонований у [44] і удосконалений у роботах [45,46]. Цей метод дозволяє враховувати тривалість перехідних процесів у динамічно керованих системах, що є суттєвим з оглядом на умови функціонування ВО.

Коефіцієнти завантаження портів зв'яжемо із зворотними коефіцієнтами  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$  наступними співвідношеннями:

$$k_i = I_i / \Delta F_i = 1 / \eta_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (3.1)$$

де  $\Delta F_1, \Delta F_2, \dots, \Delta F_i, \dots, \Delta F_N$  - ширина смуг пропускання (пропускні здатності) портів ВО;  $I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_N$  - інтенсивність трафіка на портах ВО.

Згідно [47] сума ширини смуг усіх портів ВО має дорівнювати його пропускній здатності:

$$C' = \Delta F_1 + \Delta F_2 + \Delta F_3 + \dots + \Delta F_N. \quad (3.2)$$

Особливості конструювання регуляторів в системах адаптивного управління найбільш повно висвітлено у [48-50]. У нашому випадку рішення задачі аналітичного конструювання регуляторів в системі розподілу пропускної здатності ВО доцільно здійснювати методом динамічного програмування, що передбачає необхідність побудови функції Белмана.

У [3] розглянуто найпростіший приклад регулювання значень пропускних здатностей трьох портів ВО, тобто  $\Delta F_1, \Delta F_2, \Delta F_3$ , де пропускні здатності цих портів позначені відповідно як перемінні  $n_1, n_2, n_3$ . Процес адаптивного управління відображено на формальному рівні. Зокрема, побудована функція цих перемінних, яка задовольняє наступним умовам: вона є позитивно визначеною і дорівнює нулю тільки у випадку, якщо всі три перемінні рівні між собою.



Уведено у розгляд вектори прямих та зворотних коефіцієнтів завантаження портів:

$$k = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{pmatrix}, \quad \eta = \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{pmatrix}. \quad (3.3)$$

З масиву даних, що визначають змінні, утворено вектор

$$N = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

і задано матрицю регулюючих зв'язків у вигляді

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

Кількість стовпців у матриці має дорівнювати кількості портів ВО, а число рядків - максимально можливому числу пар портів, причому усі пари різні, але містять порти з однаковими номерами. Така розбивка на пари дозволяє встановити регулюючі зв'язки між будь-якими двома портами ВО. Напрямок передавання типу «з» відображається знаком «мінус». Напрямок передавання типу «у» відображається знаком «плюс». Так що фізичний зміст запису у першому рядку матриці (3.5) є наступним: між третім і першим портами реалізується зв'язок, що полягає у передаванні частки пропускної здатності ВО із третього порту в перший, що відбито знаками одиничних елементів у матриці. Другий рядок відповідно відображає передачу частки пропускної здатності ВО із першого порту в другий. Третій рядок відповідає передачі цього ресурсу з другого порту в третій. Зрозуміло, що між трьома портами можна утворити лише три різні пари зв'язків.

Добуток вектора (3.4) і матриці (3.5), що представлено у вигляді

$$N^T C = (n_1, n_2, n_3) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} = (n_1 - n_2, n_2 - n_3, n_3 - n_1), \quad (3.6)$$

є транспонованим вектором, тобто вектором-рядком, кожен компонент якого є різницею різних компонентів вектора  $N$ .

Далі було призначено матрицю вагових коефіцієнтів

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} \end{pmatrix}, \quad (3.7)$$

що виявилась діагональною і позитивно визначеною.

За допомогою цієї матриці у [3] побудовано наступну квадратичну форму:

$$N^T C P C^T N = (n_1 - n_2, n_2 - n_3, n_3 - n_1) \cdot \begin{pmatrix} p_{11} & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_1 - n_2 \\ n_2 - n_3 \\ n_3 - n_1 \end{pmatrix} = \quad (3.8)$$

$$= p_{11}(n_1 - n_2)^2 + p_{22}(n_2 - n_3)^2 + p_{33}(n_3 - n_1)^2.$$

Як бачимо, ця матриця являє собою зважену суму квадратів відмінків різних перемінних. Вона також є позитивно визначеною і дорівнює нулю у разі, коли усі перемінні дорівнюють нулю. Функція (3.8) придатна для аналітичного конструювання регуляторів смуг портів, а її вигляд є зручним для пошуку функції Белмана.

Задачу адаптивного розподілу пропускної здатності ВО між його портами поставимо як задачу вирівнювання коефіцієнтів завантаження портів з використанням методу динамічного програмування Белмана. Для цього потрібно конкретизувати рівняння настроювання, задати функціонал, що має бути оптимізованим, задати вид функції Белмана і записати відповідне їм рівняння Белмана. Це дозволить звести задачу аналітичного конструювання регуляторів до рішення рівняння Рікаті [46].

Задачу вирівнювання значень перемінних  $n_1, n_2, n_3$  слід вирішувати за умови збереження їхньої суми, тобто ця сума в процесі управління повинна не змінюватися і дорівнювати пропускній здатності ВО. Якщо ці перемінні утворюють вектор  $N$ , то поведження компонентів підкорюється рівнянню настроювання, вид якого конкретизуємо наступним чином:

$$\dot{N} = Ci. \quad (3.9)$$

У виразі (3.9)  $i$  - вектор керуючих впливів, що знаходиться як лінійна функція компонентів вектора  $\dot{N}$ , а  $C$  - матриця регулюючих зв'язків, зміст якої зазначений вище. Зрозуміло, що приведені рівняння настроювання при будь-якому довільному векторному управлінні забезпечує збереження суми компонент вектора  $N$ . В роботі [3] вищезазначене твердження доведено на прикладі систем авторегулювання другого порядку за допомогою теореми про сталість (рос. – устойчивость) [49,50].

Для формального представлення адаптивної системи управління розподілом пропускної здатності ВО істотне значення має формування виду функціоналу, що має бути оптимізованим згідно обраного критерію. В роботі [3] таке формування виконано з урахуванням швидкості перехідних процесів регулятора, але без урахування негативних наслідків виникнення системних помилок управління. Зокрема, рівняння настроювання для вектора керованих перемінних задано як (3.9), де  $(N-1)$ -мірний вектор керованих перемінних (пропускних здатностей портів),  $(C-1) \cdot t$  - прямокутна (у загальному виді

не квадратна) матриця зв'язків,  $u$  –  $m$ -мірний вектор управління, компоненти котрого визначаються регуляторами.

А функціонал, що підлягає оптимізації, задано у вигляді

$$I = \int_0^{\infty} (N^T C P C^T N + \alpha N^T C Q C^T N + u^T R u) dt, \quad (3.10)$$

де  $P$  –  $m \times m$ -мірна квадратна симетрична не негативно визначена матриця зв'язків,  $\alpha$  – позитивна константа – множник при функції Белмана у функціоналі, що отримав назву «показник загасання функції Белмана»,  $R$  –  $m \times m$ -мірна симетрична позитивно визначена матриця вагових коефіцієнтів при керуваннях,  $Q$  –  $m \times m$ -мірна позитивно визначена симетрична матриця квадратичної форми – функції Белмана,  $T$  – символ операції транспонування матриці. Компоненти вектора керуючих впливів  $u$  залежать від  $t$ . Як бачимо, побудова оптимізаційного функціоналу здійснюється подібно тому, як будується функціонал в задачі аналітичного конструювання регуляторів [46].

Перший член підінтегрального виразу у функціоналі (3.10) згідно (3.8) являє собою зважену суму квадратів відмінків (через коефіцієнти матриці  $P$ ) керованих змінних. Чим ця сума більше, тим більше значення функціоналу. Тому мінімізація функціоналу приводить до вирівнювання змінних, що є керованими. З фізичної точки зору це означає, що у разі збільшення інтенсивності потоку на  $i$ -му порту ВО цьому порту має призначатися більша частка пропускної здатності ВО, але за рахунок зменшення частки інших портів у такій мірі, щоб коефіцієнти завантаження усіх портів були майже однаковими.

Другий член функціоналу є функція Белмана, яка уведена у функціонал у вигляді складової із заданим показником загасання. Цей член визначає швидкість перехідного процесу вирівнювання коефіцієнтів завантаження портів ВО. Із [44] відомо, що на оптимальних траєкторіях функція мінімального значення функціоналу – функція Белмана – убуває із

швидкістю підінтегрального виразу функціоналу (3.10). Функція Белмана на оптимальних траєкторіях в цьому випадку убиває із швидкістю не меншій за здобуток її самої та показника загасання  $\alpha$ . Тому шляхом вибору значення цього показника є можливим забезпечити за умов адаптивного управління необхідну швидкодію системи регулювання.

Третій член функціоналу повністю співпадає із відповідним членом при звичайній постановці задачі аналітичного конструювання регуляторів [45]. Його введення дозволяє обмежити управління та одночасно сприяє формальному замиканню процедури визначення оптимального управління.

Систему настроювання призначимо у вигляді

$$\begin{pmatrix} \dot{n}_1 \\ \dot{n}_2 \end{pmatrix} = \frac{c}{4} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix}, \quad (3.11)$$

а функцію Белмана будемо шукати у виді квадратичної форми

$$V = N^T C Q C^T N. \quad (3.12)$$

За цих умов було синтезовано рівняння Белмана у наступному вигляді:

$$0 = \min_u \left( u^T R u \right) + N^T C P C^T N + \alpha N^T C Q C^T N + \dot{N}^T \frac{\partial V}{\partial N} + \frac{\partial V}{\partial N^T} \dot{N}. \quad (3.13)$$

Шляхом підстановки у рівняння Белмана (3.13) рівняння настроювання (3.11) та після ланцюга математичних перетворень (що, головним чином, пов'язані із рішенням так званого рівняння Рікаті) було отримано остаточний вираз для регуляторів системи адаптивного розподілу ресурсу ВО:

$$u = -R^{-1} C^T C Q C^T N, \quad u^T = -N^T C Q C^T C R^{-1}. \quad (3.14)$$

Підставляючи знайдене керування (3.14) у рівняння настроювання (3.11), одержано наступне математичне представлення адаптивної системи управління портами ВО:

$$\dot{N} = -CR^{-1}C^T CQC^T N. \quad (3.15)$$

Як бачимо, представлення (3.15) не враховує можливість виникнення системних помилок адаптивного управління та їхній негативний вплив на якість управління.

### 3.3. Вибір показників якості прогнозування

З огляду на прийняту у даній роботі модель тренду потоків пакетів, що подаються на порти ВО (див. підрозділ 2.1), задачу прогнозування пульсацій зведемо до задачі прогнозування «поведінки» дискретного часового ряду. Вибір методу прогнозування обумовлює необхідність оцінювання якості прогнозування за показниками, що адекватні умовам застосування вибраного методу. Слід розрізняти помилки прогнозування від помилок адаптивного управління: прогнозний механізм може доволі часто помилятися, але якщо при цьому вибрано правильно ширину смуг портів, то помилок в роботі адаптивного механізму управління не буде. У даному випадку мова йде про прогнозування як складову задачі динамічного управління ресурсами ВО.

Існує кілька підходів до вибору показників якості прогнозування [51,52].

У найпростішому випадку прагнуть зменшити абсолютну помилку прогнозу  $e(k)$  на кожному  $k$ -ому кроці адаптивного управління:

$$e(k) = \left| \sum I_k^{(\tau)} - \Delta F_{\Sigma} \right|, \quad (3.16)$$

де  $\sum I_k^{(\tau)}$  - сума інтенсивностей потоків на портах ВО на поточному  $k$ -ому кроці адаптивного управління,  $\Delta F_{\Sigma}$  - сума виділених смуг пропускання портів вузлового обладнання на попередньому  $(k-1)$ -ому кроці адаптивного управління. Фактично  $e(k)$  є нев'язкою між реальним увідним трафіком ВО і розрахованим значенням прогнозу цього трафіку.

У якості показника якості, з урахуванням (3.16), можливо використати так зване «відношення сигнал/шум» (або різні його модифікації [53,54], зокрема зворотне відношення цього параметра, що вимірюється у децибелах й ін.):

$$SNR = \frac{M[x(k)^2]}{M[e(k)^2]} = \frac{\sum x(k)^2}{\sum e(k)^2}, \quad (3.17)$$

де  $x(k)$  -  $k$ -ий член ряду (2.4), а  $M$  - знак усереднення по виборці  $k= 0;1;2; \dots, K$ ;  $K$  - об'єм вибірки часового ряду.

Однак така оцінка якості прогнозування, як легко помітити, залежить від величини середнього значення ряду  $x(k)$ , що не дозволяє порівнювати якість прогнозу рядів з різним середнім. Щоб уникнути цього недоліку використовують модифіковану оцінку [54]

$$SNR^{-1} = \frac{M[e(k)^2]}{M[x(k) - M[x(k)]]^2}, \quad (3.18)$$

яка не залежить від середнього значення прогнозованої ділянки ряду й відбиває ступінь поліпшення прогнозу трафіка у порівнянні із прогнозуванням за середнім значенням. Іншими словами, якщо оцінка  $SNR^{-1} = 1$ , то якість прогнозу така ж, як і у випадку прогнозу за середнім значенням прогнозованої ділянки ряду. При  $SNR^{-1} < 1$  якість прогнозу покращується. Завдяки такій властивості, оцінка  $SNR^{-1}$  дозволяє порівнювати якість прогнозу різних часових рядів між собою.

Однак у даному випадку поряд з абсолютною погрішністю прогнозу  $e(k)$  доцільно розглядати окремо помилки недооцінки ряду

$$e^+(k) = \begin{cases} e(k), & \text{якщо } e(k) \geq 0 \\ 0, & \text{якщо } e(k) < 0 \end{cases}, \quad (3.19)$$

які в задачах адаптивного управління ВО пов'язані з кількістю втрат пакетів, і помилки переоцінки ряду

$$e^-(k) = \begin{cases} |e(k)|, & \text{якщо } e(k) < 0 \\ 0, & \text{якщо } e(k) \geq 0 \end{cases}, \quad (3.20)$$

які, у свою чергу, відображають частку недовикористаної пропускної здатності обладнання.

У цьому випадку в якості показника якості прогнозу можливо розглядати *коефіцієнт недооцінки ресурсу (коефіцієнт втрат)*

$$D^+ = \frac{M[e^+(k)]}{M[x(k)]} = \frac{\sum e^+(k)}{\sum x(k)}, \quad (3.21)$$

і *коефіцієнт переоцінки ресурсу (коефіцієнт недовикористання)*

$$D^- = \frac{M[e^-(k)]}{M[x(k)]} = \frac{\sum e^-(k)}{\sum x(k)}. \quad (3.22)$$

Ці коефіцієнти, хоч і залежать від середнього значення прогнозованої ділянки ряду, однак мають чітку фізичну інтерпретацію: при заданому способі оцінки необхідної ширини смуги порту коефіцієнт недооцінки  $D^+$  виражає відношення кількості загубленої інформації до загальної кількості інформації, яку потрібно було обробити. Відповідно, коефіцієнт переоцінки  $D^-$  відбиває кількість невикористаної пропускної здатності порту до загальної кількості інформації, яку можливо було пропустити через цей порт. Очевидно, чим ближче прогностичні оцінки до дійсних значень  $x(k)$ , тим ближче до нуля коефіцієнти  $D^+$  й  $D^-$ .

Вищенаведені коефіцієнти оцінювання якості прогнозу пов'язані із необхідністю обчислення кількості загубленої інформації, що в умовах високої динаміки адаптивного управління слід вважати фактором, що може негативно вплинути на швидкість роботи механізму прогнозування. Тому використаємо більш адекватні поставленій меті показники якості прогнозування, які безпосередньо спрямовані на підвищення ефективності функціонування механізмів адаптивного управління смугами портів ВО. Саме за цими показниками будемо оцінювати якість обраних алгоритмів прогнозування.

*Показник економії ширини смуг портів вузлового обладнання:*



$$E_{\Delta} = \frac{\sum_{j=1}^{K_{\Delta}} \sum_{i=1}^N |(W_{i,j} - Wp_{i,j})|}{\sum_{j=1}^{K_c} \sum_{i=1}^N W_{i,j}}, \quad (3.23)$$

де  $K_{\Delta}$  – врахована кількість кроків адаптивного управління,  $N$  – загальна кількість портів,  $W_{i,j}$  – встановлена ширина смуги  $i$ -го порту вузлового обладнання на  $j$ -му кроці адаптивного управління на основі рішення рівняння Белмана (без використання механізму прогнозування);  $Wp_{i,j}$  – встановлена на основі прогнозу ширина смуги  $i$ -го порту вузлового обладнання на  $j$ -му кроці адаптивного управління.

Якщо під час адаптивного управління прогнозування не здійснюється, то для всіх  $i$  та  $j$  чисельник у виразі (3.23) буде дорівнювати нулю і, отже, у відносних одиницях показник економії смуг портів ВО  $E_{\Delta} = 0$ . Якщо прогнозування виявляється у середньому вдалим (з точки зору економії смуги), то  $0 \leq E_{\Delta} \leq 1$ .

Фізично показник економії  $E_{\Delta}$  відображає ступінь підвищення завантаженості ВО завдяки застосуванню блоку прогнозування в системі перерозподілу пропускної здатності обладнання відносно рівня завантаженості в умовах відсутності прогнозування. Вважається, що завдяки використанню механізму прогнозування «економиться» смуга пропускання вузлового обладнання. Однак «надлишкова» економія смуг пропускання портів може призвести до збільшення втрат пакетів. Тому необхідно контролювати якість прогнозування щодо характеристик втрат пакетів.

*Параметр помилки прогнозу:*

$$Er = \frac{k_{error}}{K_{\Delta}} \cdot 100\% \quad , \quad (3.24)$$

де  $K_{\Delta}$  – врахована кількість кроків адаптивного управління;  $k_{error}$  – кількість точок, в яких прогнозована ширина смуги порту була недостатньою.  $Er$  відображає долю помилок, що виникають під час застосування того чи іншого алгоритму прогнозування.

Уведені вище два показники (3.23) та (3.24) дозволяють надати вичерпну характеристику ступеню придатності методу прогнозування для використання у складі системи адаптивного управління смугами портів ВО. Кількість врахованих кроків адаптивного управління  $K_{\Delta}$  визначається, виходячи із часового проміжку  $T_{\Delta}$ , на якому з тих чи інших причин зручно здійснювати оцінку якості прогнозування:

$$T_{\Delta} = K_{\Delta} \cdot \tau_{\kappa}, \quad (3.25)$$

де  $\tau_{\kappa}$  - інтервал між початком сусідніх кроків дискретно-адаптивного управління.

### **3.4. Розробка методу та розрахункової схеми прогнозування**

3.4.1. *Вимоги до засобу прогнозування.* Із результатів наведеного вище аналізу характеристик пакетного трафіка витікають наступні вимоги до засобу прогнозування його тренду:

1) оскільки пакетний трафік являє собою нестационарний випадковий процес, що моделюється як самоподібний процес, характеристики котрого визначені лише на рівні перших двох статистичних моментів, то отриманих знань щодо «поведінки» цього трафіку у реальному часі явно недостатньо, щоб здійснити формальну постановку задачі оптимального вибору методу для прогнозування тренду потоку пакетів, що просуваються через порти комутатора. За цих обставин доводиться користуватися суб'єктивними міркуваннями щодо доцільності вибору того чи іншого методу прогнозування;

2) обраний метод прогнозування має реалізовувати один із алгоритмів короткострокового прогнозування часових рядів;

3) прогноз повинен постійно коригуватися у реальному часі синхронно із змінами інтенсивності потоків пакетів на портах ВО з урахуванням отриманих нових даних. Тому обчислювальна схема прогнозу має бути побудована як ітеративний процес;

4) оскільки засіб прогнозування вбудовується у контур адаптивного управління, що функціонує в режимі реального часу з відносно високими динамічними характеристиками, то цей механізм має бути високошвидкісним, що, в свою чергу, висуває підвищені вимоги до простоти програмної реалізації засобу (алгоритм прогнозування має бути не громіздким в розрахунках і використовувати мінімальну кількість точок для прогнозу і т. ін.);

5) умови застосування засобу прогнозування у складі системи адаптивного управління дозволяють не висувати підвищені вимоги до показників точності прогнозу, проте висуваються вимоги щодо збільшення впливу механізму прогнозування на якість адаптивного управління, зокрема на зменшення кількості системних помилок дискретно-адаптивного управління.

Прийняття рішення щодо застосування того чи іншого засобу прогнозування має здійснюватися з урахуванням наведених вище вимог. Можливі ситуації, коли в залежності від змін у реальному часі параметрів тренду трафіка, під час адаптивного управління доцільно користуватися різними методами прогнозування, зокрема застосовувати той метод, у якого за даних поточних умов визначиться найменше значення параметру помилок прогнозу  $Er$ .

Результати аналізу вказують на можливість застосування у складі ланцюгу адаптивного управління чимало звісних методів короткострокового прогнозування [55-66]. Проте вибір оптимального із них для визначених в роботі умов застосування - завдання окремого наукового дослідження. У даній роботі із міркувань, що наведено нижче, розглянуто лише два найпростіших методи прогнозування: метод прогнозування, що заснований на обчисленні похідних, та метод прогнозування з використанням експоненціального згладжування.

### 3.4.2. *Постановка задачі прогнозування.*

Припустимо у нашому розпорядженні знаходяться дані щодо  $N$  членів часового ряду  $z(t) \in z_t, z_{t-1}, z_{t-2}, \dots, z_{t-N}$ . Функцію  $z^*_t(l)$ , що дає в момент  $t$  прогнози для усіх майбутніх часів упередження  $l=1,2,\dots$ , назовемо прогнозуючою функцією для моменту  $t$ .

Потрібно здійснити прогноз цього часового ряду з упередженням  $l$ , тобто знайти оцінку значення члену ряду  $z_{t+l}$ . Іншими словами, необхідно знайти таку прогнозуючу функцію, у котрій середнє значення квадрата відхилення  $z_{t+l} - z^*_{t+l}$  істинного від прогнозного значення є найменшим для кожного упередження  $l$ . Окрім того, бажано вказати точність прогнозу. Зокрема, точність прогнозу визначається імовірнісними межами по обидва боки від прогнозного значення, тобто це значення буде лежати із заданою ймовірністю у визначених межах.

3.4.3. *Метод прогнозування, що заснований на похідних.* Даний метод є нескладним у реалізації та у розрахунках, характеризується високим ступенем швидкодії, але часто недостатньо точний. У нашому випадку точність прогнозу не має визначального значення. Для здійснення прогнозу на кожному кроці адаптивного управління достатньо використовувати лише три останні точки часового ряду, що моделює тренд пакетного трафіка. Отже, цей метод є придатним для застосування при сильно осцилюючих даних.

Алгоритм реалізації методу, що заснований на обчисленні похідних, полягає у наступному:

1) На поточному кроці адаптивного управління обираємо дві останні точки прогнозу  $x_{-1}$  та  $x_0$  і знаходимо першу похідну ( $f'_0$ ) щодо виділеної ширини смуги порту для останнього кроку.

2) Обираємо дві передостанні точки прогнозу  $x_{-2}$  та  $x_{-1}$  і знаходимо першу похідну щодо виділеної ширини смуги порту для передостаннього кроку ( $f'_1$ ).

3) За знайденими першими похідними знаходимо другу похідну ( $f_0''$ ) для останнього кроку управління.

4) Величина приросту прогнозного значення залежить від величини першої похідної  $f_0'$ , а його напрямок від величини другої похідної  $f_0''$ , і, отже, прогнозне значення ширини смуги порту на поточному кроці адаптивного управління визначиться як

$$x_{\text{прогнозне}} = \begin{cases} x_0(1 + f_0') + \text{prognosConstant}, & \text{якщо } f_0'' \geq 0 \\ x_0(1 - f_0') + \text{prognosConstant}, & \text{якщо } f_0'' < 0 \end{cases}, \quad (3.26)$$

Де  $x_{\text{прогнозне}}$  - прогнозне значення ширини смуги порту,  $x_0$  - поточне значення ширини смуги порту,  $\text{prognosConstant}$  – певна константа, яка характеризує випуклість апроксимуючої функції.

На наступному кроці адаптивного управління процедура знаходження прогнозного значення ширини смуги порту повторюється знову.

**Обчислювальна схема прогнозування** тренду трафіка, яка використана у даній роботі, з використанням похідних на будь-якому із портів ВО полягає у наступному:

1) «обнулюються» усі розрахункові параметри обчислювальної схеми прогнозування;

2) перевіряється достатність вихідних даних для здійснення прогнозу (у даному випадку має бути у розпорядженні останні три точки часового ряду, що відтворює тренд трафіка). Якщо останні три точки часового ряду недоступні для прогнозування, то необхідно зачекати, поки із серверу надійде до клієнта (див. структуру середовища моделювання, що розглянуто у наступному розділі) достатня кількість вихідних даних. Інакше – перехід на крок 3;

3) обираються дві передостанні точки часового ряду і на базі цих даних вираховується значення першої похідної у попередній по відношенню до моменту прогнозу точці  $(f_1')$ ;

4) обираються дві останні точки часового ряду і на базі цих даних вираховується значення першої похідної  $(f_0')$ ;

5) за знайденими першими похідними для точки прогнозу вираховується друга похідна функції, що відтворює тренд пакетного трафіка  $(f_0'')$ ;

6) на основі вирахуваних значень перших двох похідних та задавшись значенням константи, що характеризує випуклість апроксимуючої функції, визначається прогнозне значення інтенсивності тренду трафіка відповідно до виразу (3.26), яка у подальшому використовується для прийняття управлінських рішень системою адаптивного управління;

7) Перехід на крок 1.

Як бачимо, обчислювальна схема прогнозування тренду трафіка з використанням похідних досить проста та зручна для програмування і не потребує значної кількості вихідних даних, що дозволяє сподіватись на її високу швидкодію.

**3.4.3. Метод прогнозування з використанням експоненціального згладжування.** Цей метод прогнозування за своїми властивостями є схожим на попередньо розглянутий метод. Згідно цього методу [57] часовий ряд згладжується шляхом зваженого ковзного середнього з експоненціальними вагами, що дозволяє здійснювати короткострокове прогнозування.

Звісно, що функція  $x_t$  в момент  $t$  може бути описана поліномом

$$x_t = \sum_{i=0}^p \frac{a_i}{i!} p^i + \varepsilon_t, \quad (3.27)$$

де  $p^i$  - похідна від  $x_t$   $i$ -ого порядку,  $\varepsilon_t$  - помилка відхилення суми ряду від фактичного значення  $x_t$ .

Це дозволяє, розклавши функцію  $x_t$  у ряд Тейлора, обчислити прогнозне значення (3.27) в момент  $t+l$ . Зокрема, маємо:

$$x_t^* = x_t^{(0)} + lx_t^{(1)} + \frac{l^2}{2!}x_t^{(2)} + \dots + \frac{l^k}{k!}x_t^{(k)} + \dots + \frac{l^p}{p!}x_t^{(p)}. \quad (3.28)$$

Брауном Р. і Маєром Р. [59] доведено, що кожна  $k$ -та похідна ( $k = \overline{0, p}$ ) рівняння (3.28) може бути відображена через лінійну комбінацію експоненціальних середніх до  $(p+1)$ -го порядку:

$$S_t^{(k)}(x) = \alpha S_t^{(k-1)}(x) + (1-\alpha)S_{t-1}^{(k)}(x), \quad k = \overline{1, n}, \quad (3.29)$$

де

$$S_t^{(1)}(x) = \alpha \sum_{i=0}^{t-1} (1-\alpha)^i x_{t-i} + (1-\alpha)^t x_0; \quad (3.30)$$

$\alpha$  – параметр згладжування ( $0 < \alpha < 1$ ).

Із виразів (3.29), (3.30) випливають рівняння:

$$S_t^{(1)}(x) = \alpha x_t + (1-\alpha)S_{t-1}^{(1)}(x), \quad (3.31)$$

$$S_t^{(2)}(x) = \alpha S_t^{(1)}(x) + (1-\alpha)S_{t-1}^{(2)}(x),$$

.....,

$$S_t^{(k)}(x) = \alpha S_t^{(k-1)}(x) + (1-\alpha)S_{t-1}^{(k)}(x),$$

.....,

$$S_t^{(n)}(x) = \alpha S_t^{(n-1)}(x) + (1-\alpha)S_{t-1}^{(n)}(x).$$

На базі рівнянь (3.31) формулюються обчислювальні схеми прогнозування часових рядів з типовими трендами.

**Обчислювальна схема прогнозування за методом експоненціального згладжування** зводиться до нижчеописаної послідовності дій.

1. Спочатку на суб'єктивному рівні визначаються із типом тренду (адитивного, лінійно-адитивного чи квадратично-адитивного) і на цій основі обирають модель експоненціального згладжування часового ряду.

2. Підбирають параметр  $\alpha$ .

3. Обчислюють початкові умови прогнозування.

Знаходять експоненціальне середнє  $S_t^{(k)}(x)$  та оцінки коефіцієнтів моделі прогнозу щодо ідентифікованого тренду.

4. Здійснюють прогноз на один крок вперед і обчислюють  $\varepsilon_t$  – помилку відхилення фактичного значення від прогнозного.

5. Обчислюють нові експоненціальні середні, на основі котрих знову знаходять оцінки коефіцієнтів моделі прогнозу, і т.д. за рекурентною формулою.

Результати, що отримані іншими авторами свідчать: якщо темпи зростання часового ряду є суттєвими, то реалізація процедури прогнозування за методом експоненціального згладжування не є ефективною.

### **3.5. Розробка технологічної схеми адаптивного розподілу продуктивності вузлового обладнання між його портами**

**3.5.1. Особливості побудови моделі адаптивного управління.** На практиці увідні первісні потоки протокольних блоків даних *PDU* (зокрема, пакетів) на портах ВО мають невідворотні флуктуації [67, стор.197; 68]. Після формування згідно з вищерозглянутим методом вони утворюють пульсуючі дискретні потоки різних (щодо тривалості передавання) *PDU*. Інтенсивність (швидкість) цих потоків не може бути визначена та виміряна миттєво [4, розд.9]. Як правило, засоби вимірювання інтенсивності потоків даних [69], що функціонують у складі будь-якого сучасного ВО, підраховують кількість *PDU*, що проходять через визначені адміністратором точки вимірювань із певним чином обраними проміжками дискретності. Мінімально можлива дискретність -  $1c$ . Ці дані, у разі потреби, можуть накопичуватися у відповідних технологічних базах даних і використовуватися адміністратором для вирішення різноманітних експлуатаційних завдань.

Тривіальне рішення задачі адаптивного управління може бути наступним: на основі результатів вимірювань поточної інтенсивності



(швидкості) потоків, що проходять через окремі порти, перерозподіляють пропускні здатності портів у перемикальному режимі з урахуванням подій щодо можливого перевищення сумарної швидкості потоків величини пропускної здатності ВО. У цьому випадку для вимірювань характеристик інтенсивності потоку пакетів використовується інформація щодо поведінки потоку у минулому. До поточного моменту прийняття управлінських рішень ці вимірювання мають відношення в тому сенсі, що додатково припускається: протягом відрізка часу, що йде після вимірювання, інтенсивність потоку практично не змінюється. Зважаючи на специфіку технологічного середовища функціонування обладнання пакетних мереж, таке рішення не є ефективним через високу динамічність і непередбачуваність змін потоків, що надходять до окремих портів. Процес вимірювань не є миттєвим. Окрім того, потрібен певний час на прийняття управлінських рішень та на приведення в дію регулятора перерозподілу ресурсів ВО. Тому, оскільки під час вимірювань затримку неможливо усунути, то будь-які зміни інтенсивностей потоків будуть призводити до виникнення помилок адаптивного управління. Ці помилки, як показано вище, носять системний характер (тобто, є системними, оскільки являються неминучим наслідком використання принципу адаптивного управління) і з теоретичної точки зору їх неможливо повністю усунути. Проте, як показано у підрозділі 1.4, існує можливість суттєво зменшити їхній вплив на якість адаптивного управління. Отже, є доцільним відслідковувати тенденції щодо змін швидкостей потоків на портах комутатора. Таку функцію слідкування можливо реалізувати шляхом застосування відповідного диференціального рівняння настроювання портів. Приклади застосування диференціальних рівнянь для відображення названої функції слідкування надані, зокрема, у [44,48]. При цьому увідними функціями управління будуть інтенсивності потоків на портах, а вивідними – рекомендовані значення смуг пропускання портів. Наближення до режиму рівності коефіцієнтів навантаження портів створює сприятливу ситуацію, коли пульсації на різних портах не призводять

до втрат інформації, якщо величини пульсацій знаходяться в межах запасу пропускної здатності обладнання.

У процесі рішення задачі адаптивного управління варто взяти до уваги наступні міркування. У силу високої динамічності і не повної передбачуваності характеру змін у швидкостях реальних потоків пакетів, що проходять через окремі порти, існує можливість оцінювання тенденції у змінах швидкостей потоків лише на коротких відрізках часу. Тому доцільно будувати алгоритм настроювання параметрів вузлового обладнання за адаптивним принципом, зокрема так, як це показано у роботах [48,70]. Саме це і дозволяє реалізувати диференціальне рівняння настроювання. При цьому поточні зміни потоків повинні впливати на ширину смуг пропускання портів з урахуванням так званого рівняння настроювання, яке, у свою чергу, має відображати прийнятий закон перерозподілу пропускної спроможності вузлового обладнання між його портами. Рівняння настроювання повинне забезпечувати відстеження тенденцій зміни потоків (включаючи можливість їхнього прогнозування) і бути диференціальним. У такому випадку сформульована задача в постановочному плані буде змістовною, замкнутою і внутрішньо несуперечливою, а очевидним корисним наслідком її рішення буде підвищення коефіцієнта використання ресурсів  $BO$  при забезпеченні норми на припустимий рівень втрат пакетів.

У даній роботі пошук шляхів підвищення ефективності завантаженості  $BO$  здійснювався на основі звісної математичної моделі адаптивної системи управління пакетним комутатором, що надана у [3, розділ 2]. Аналізуючи параметри такої моделі, можливо скласти уявлення про фактори, що впливають на якість управління, і, от же, визначити шляхи підвищення якості адаптивного управління розподілом ресурсів вузлового обладнання.

**3.5.2. Структура та принцип дії запропонованої системи адаптивного управління смугами портів вузлового обладнання.** Засоби управління, що реалізуються у складі вузлового обладнання ( $BO$ ), як правило, побудовані таким чином, що функція управління, яку вони здійснюють в процесі

функціонування у реальному часі, враховує лише виміряні поточні значення параметрів потоку пакетів на портах  $BO$ , і, отже, інформація щодо „поведінки” потоків у минулому в процесі прийняття управлінських рішень щодо змін параметрів портів  $BO$  не використовується. На практиці це призводить до прийняття вузлом управління помилкових управлінських рішень, і, як наслідок цього – неадекватності ширини смуги пропускання портів  $BO$  реальній ситуації. Природа цих помилок адаптивного управління пояснена у попередньому підрозділі. Недоліком такої схеми побудови системи управління є те, що вона не передбачає можливості використання апостеріорної (тобто, раніш отриманої) інформації щодо „поведінки” потоків пакетів на попередніх проміжках часу роботи  $BO$  для управління системою встановлення параметрів портів. У [43] пропонується включити у контур адаптивного управління блок прогнозування без відповідного усереднення та формування пакетного трафіку. Однак за таких умов, як показано вище, під час здійснення адаптивного управління доведеться мати справу із майже не прогнозованими швидко змінюваними пульсаціями нестационарних потоків пакетів (а не з квазістационарними відповідним чином згладженими трендами цих потоків). Так що існуючі технології управління розподілом ресурсів пакетних мереж важко віднести до ряду високоефективних, тому що їм властиві недоліки, що обумовлені недосконалістю існуючих методів формування пакетного трафіку та алгоритмів використання апостеріорної інформації для прийняття оптимальних рішень.

За прототип розроблюваної системи адаптивного управління розподілом ресурсів  $BO$  приймемо розглянутий у розд.1.1 вузол керування комутаційним пристроєм, що складається із послідовно з'єднаних блоку вимірювання поточних значень параметрів потоку пакетів на увідних портах цього пристрою, блоку формування команд управління змінами параметрів портів та блоку виконавчих механізмів вузлу керування комутаційним пристроєм. Названі три блоки вузлу керування фактично утворюють ланцюг автоматичного регулювання параметрів портів  $BO$ . Функціонування цього

вузлу засновано на методі управління потоками, що має назву „відро токенів”. В основі цього методу, як показано у підрозд.3.2, лежить принцип порівняння параметрів потоків пакетів, що надходять до портів ВО, з деякими еталонними параметрами портів цього обладнання, що дозволяє оцінювати та обмежувати середню швидкість і величину пульсацій потоків пакетів. Завдяки застосуванню алгоритмів пріорітезації та засобів згладжування трафіку, побудованих за методом „відра токенів”, в реальних умовах забезпечується досягнення відносно великих значень коефіцієнту корисного навантаження на обладнання, проте значення цього коефіцієнту не перевищує 0,55.

Характерною ознакою вузлів керування, заснованих на методі „відра токенів” є те, що вони не використовують апостеріорну інформацію про характер пульсацій трафіку на портах ВО і не здійснюють прогнозування трафіку в процесі формування команд управління змінами параметрів портів. Внаслідок використання неповної інформації механізми формування команд управління приймають значну кількість помилкових рішень щодо напрямку та величини змін у параметрах портів комутатора, що суттєво знижує ефективність їх функціонування. Це призводить до некомпенсованих втрат пакетів через відносно великий рівень неоптимальних управлінських рішень, що приймаються засобами блоку формування команд управління змінами параметрів портів ВО. Щоб знизити рівень таких помилок доводиться знижувати навантаження на порти і, отже, знижувати економічні показники експлуатації ВО.

В основу запропонованого методу адаптивного управління поставлена задача підвищення ефективності функціонування вузлу адаптивного управління розподілом пропускної здатності ВО шляхом удосконалення його конструктивної побудови, зокрема, оснащенням цього вузлу блоками формування потоків пакетів, що надходять до портів ВО, та прогнозування значень параметрів сформованих потоків, а також програмуванням системи на використання апостеріорної інформації щодо вимірних значень

параметрів потоків трафіку на увідних портах ВО. Це створює умови для надійного прогнозування значень параметрів потоків на моменти формування команд, і тим самим зменшує кількість помилково виданих командних рішень.

Запропонована структура адаптивної системи управління розподілом пропускної здатності ВО між смугами пропускання його портів показана на рис.3.1.

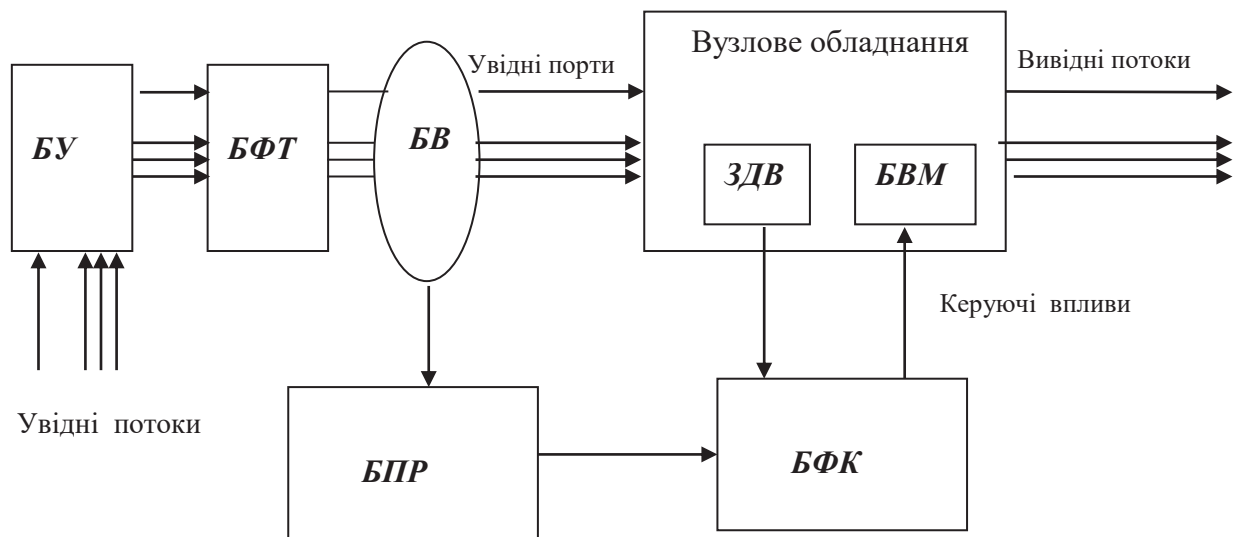


Рис.3.1. Запропонована структура адаптивної системи управління розподілом пропускної здатності вузлового обладнання між смугами пропускання його портів

Як бачимо, увідні потоки *PDU*, перш ніж потрапити на порти ВО, спочатку надходять на обробку до послідовно з'єднаних блоків *БУ* та *БФТ*. *БУ* - блок усереднення потоків пакетів на увідних портах ВО. *БФТ* - блок формування трендів цих потоків. Принципи функціонування цих блоків детально розглянуто у попередньому розділі.

Вузол керування складається із послідовно з'єднаних блоку вимірювання (*БВ*) поточних значень параметрів потоків пакетів на увідних портах ВО, блоку формування команд управління (*БФК*) змінами параметрів портів та блоку виконавчих механізмів (*БВМ*) вузлу керування розподілом пропускної здатності ВО між його портами. До складу вузлу керування

входить також блок задавальника (ЗДВ) - пристрій, що фіксує поточні значення параметрів портів на кожному кроці управління та передає їх в якості вихідних даних на БФК. Окрім того, між блоком вимірювання та блоком формування команд управління уведено блок прогнозування (БПР) значень параметрів потоків пакетів.

Уведений до складу вузлу керування блок прогнозування значень параметрів потоків пакетів функціонує згідно методу, який вибирається відповідно до конкретних технічних умов застосування обладнання. Він здійснює функції приймання вимірних значень параметрів трендів потоків, формування вибірок даних для здійснення прогнозу, прогнозування значень параметрів трендів потоків на момент прийняття управлінських рішень та видачі результатів прогнозу на вхід блоку формування команд управління БФК. Таке прогнозування „поведінки” трендів трафіка на основі даних про параметри цих трендів, що були отримані на проміжках часу до моментів формування команд, дозволяє або зменшити кількість втрачених пакетів під час їхнього просування через порти ВО при заданих рівнях завантаження обладнання, або підвищити коефіцієнт завантаженості обладнання при заданих рівнях втрат пакетів.

На рис.3.1 показано, яким чином блок прогнозування інтегрується у склад системи адаптивного управління перерозподілом пропускнуої здатності ВО між його портами.

Усереднені та згладжені потоки пакетів, які на рис.3.1 зображені стрілками, перш ніж потрапити на увідні порти ВО проходять через блок вимірювання (БВ), котрий послідовно, крок за кроком, у реальному часі із наперед заданим часовим інтервалом вимірює поточні значення параметрів цих потоків (точніше, їхніх трендів), а результати вимірювань надсилає на вхід блоку прогнозування (БПР). Перш за все, на певним чином обраних часових інтервалах усереднення (зокрема, згідно процедурі корекції, що висвітлена у підрозд.2.6) вимірюються поточні значення інтенсивності потоку пакетів  $I_1, I_2, \dots, I_N$ , де  $N$  – кількість увідних портів ВО. 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 вибірок 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. Ще раз зазначимо, що тренд – це згладжений потік, що формується шляхом усереднення первісного поточного потоку пакетів та дії удосконаленого алгоритму „відра токенів” (див. підрозд.3.2). На практиці в залежності від конкретних умов застосування ВО коефіцієнт усереднення обирається у діапазоні від 5 до 120 (і більше).

У той же час, в момент початку кожного кроку управління від задавальника параметрів портів (*ЗДВ*), що функціонує у складі ВО, на інший вхід блоку *БФК* надсилається інформація щодо поточних значень встановлених параметрів для кожного із портів вузлового обладнання. Тобто, від *ЗДВ* на *БФК* передаються встановлені на попередньому кроці управління значення ширини 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 керування перерозподілом ресурсів ВО. Ці виконавчі механізми блоку *БВМ* згідно з отриманими командами від блоку *БФК* здійснюють відповідні зміни параметрів портів ВО (тобто, збільшують або зменшують смуги пропускання портів) у блоці *ЗДВ* цього обладнання. Математичну модель адаптивного

управління вибирають, виходячи із технічних умов застосування обладнання. Одна із таких моделей розглянута у підрозділі 3.1. У будь-якому випадку швидкодію системи регулювання узгоджують із динамікою змін у трендах.

### **Висновки до третього розділу**

1. Виконано формальне представлення адаптивної системи управління розподілом пропускну здатності вузлового обладнання (ВО). Зокрема, вирішено задачу адаптивного управління смугами портів ВО шляхом її зведення до звісної задачі динамічного вирівнювання коефіцієнтів завантаження портів. Для вирівнювання значень коефіцієнтів в процесі адаптивного управління використано метод динамічного програмування, що передбачає необхідність побудови функції Белмана. Цей метод дозволяє враховувати тривалість перехідних процесів у динамічно керованих системах, що є суттєвим з оглядом на умови функціонування ВО. Конкретизовано рівняння настроювання. Задано функціонал, що має бути оптимізованим. Задано вид функції Белмана і записано відповідне рівняння Белмана, що дозволило звести задачу аналітичного конструювання регуляторів до рішення рівняння Рікаті. Шляхом підстановки у рівняння Белмана рівняння настроювання та після ланцюга математичних перетворень (що, головним чином, пов'язані із рішенням рівняння Рікаті) отримано остаточний вираз для регуляторів системи адаптивного розподілу ресурсу ВО. Проте отримане математичне представлення системи адаптивного управління не враховує можливість виникнення системних помилок адаптивного управління та їхній негативний вплив на якість управління.

2. Для зменшення помилок адаптивного управління запропоновано у ланцюг управління включити засіб прогнозування пульсацій потоків пакетів. У свою чергу, вибір методу прогнозування обумовлює необхідність оцінювання якості прогнозування за показниками, що адекватні умовам застосування вибраного методу. Для оцінювання якості прогнозування



запропоновано використати два наступні показники: показник економії ширини смуг портів вузлового обладнання  $E_{\Delta}$ , що відображає ступінь підвищення (у відсотках) завантаженості ВО завдяки застосуванню блоку прогнозування в системі перерозподілу пропускної здатності ВО відносно рівня завантаженості в умовах відсутності прогнозування; параметр помилки прогнозу  $E_r$ , який відображає долю помилок, що виникають під час застосування того чи іншого алгоритму прогнозування. Уведені показники дозволили надати вичерпну характеристику якості прогнозування у разі використання адаптивного методу управління смугами портів ВО.

3. Розроблено вимоги до засобу прогнозування тренду потоку пакетів в умовах пульсацій трафіка. Цим вимогам відповідає чимало звісних методів короткострокового прогнозування. Однак в роботі розглянуто лише два найпростіших із них: метод прогнозування, що заснований на обчисленні похідних, та метод прогнозування з використанням експоненціального згладжування. Перший є нескладним у реалізації та у розрахунках, характеризується високим ступенем швидкодії, але не є достатньо точним (хоч у нашому випадку точність прогнозу не має визначального значення). Другий - більш точний, але якщо темпи зростання часового ряду є суттєвими, то реалізація процедури прогнозування за методом експоненціального згладжування не є ефективною.

Доцільно провести додаткове дослідження з метою визначення оптимального методу прогнозування для систем адаптивного управління, що функціонують в умовах значних пульсацій пакетного трафіку.

4. За результатами аналізу моделі адаптивного управління розроблено структуру та відповідну технологічну схему реалізації механізму перерозподілу ширини смуг портів ВО в умовах пульсацій трафіку. Звісна технологічна схема адаптивного управління не передбачає відповідного усереднення та формування пакетного трафіка. Однак за таких умов під час здійснення адаптивного управління доводиться мати справу із майже не прогнозованими швидко змінюваними пульсаціями нестационарних потоків

пакетів. Запропоновані засоби усереднення та формування дозволили отримати на уводах портів ВО квазістаціонарні, відповідним чином згладжені тренди цих потоків. Включення цих засобів в систему адаптивного управління дозволило підсилити можливості прогнозування і, тим самим, зменшити кількість системних помилок дискретного-адаптивного управління.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАФІКУ ТА КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ АДАПТИВНОГО РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ ПАКЕТНОЇ МЕРЕЖІ

У даному розділі відображені результати експериментальних досліджень пакетного трафіку на вузлі Інтернет низового рівня з метою визначення можливостей його моделювання самоподібним стохастичним процесом.

Проведено експериментальне дослідження запропонованих засобів прогнозування пакетного трафіку з метою визначення ступеню придатності прийнятих обчислювальних схем прогнозування для застосування в системах адаптивного управління ресурсами вузлового обладнання (СУАР).

Здійснено комп'ютерне моделювання запропонованої СУАР і на базі розробленої моделі виконана експериментальна оцінка ефективності уведених удосконалень в технологію адаптивного управління розподілом ресурсів пакетної мережі.

#### **4.1. Експериментальне дослідження характеристик пакетного трафіку**

**4.1.1. Обґрунтування доцільності проведення експериментальних досліджень.** Моделюванню трафіка у телекомунікаційних мережах присвячено чимало публікацій (зокрема, [71-75]). Чисельні спостереження за «поведінкою» потоків пакетів на портах ВО свідчать про нестационарний та пульсуючий характер змін інтенсивності цих потоків у реальному часі, що обумовлено механізмом статистичного мультиплексування індивідуальних потоків клієнтів пакетної мережі [68;76, лекц. №14]. У роботах [32-36] показана можливість моделювання пакетного трафіка самоподібним процесом. Проте опубліковані дані (зокрема, ті, що наведені у [77-83]), враховуючи появу та швидкий розвиток в Інтернет нових інформаційних сервісів, потребують певних уточнень. Наприклад, якщо зовсім недавно вважалося, що пакетний трафік на вузлах Інтернет низового рівня має

асиметричний щодо напрямків передавання характер, то за останні два-три роки внаслідок широкого впровадження нових мультимедійних послуг характер трафіка суттєво змінився. На теперішній час, як свідчать результати наших експериментальних досліджень, з високою долею ймовірності його можливо вважати симетричним (див. рис.4.2). Тому у даний час доцільно експериментальним шляхом уточнити параметри моделі пакетного трафіку [84-86].

Для досліджень доцільно обрати типовий мережний фрагмент Інтернет низового рівня з приблизно однаковою часткою корпоративних та домашніх клієнтів. Цій умові відповідає вузол Інтернет Державного НДІ автоматизованих систем у будівництві (ДНДІАСБ) (м.Київ). У період з 05.12.11 по 20.12.11 на базі цього вузлу експериментальним шляхом було отримано представницькі вибірки даних, що були використані нами для оцінки характеристик пакетного трафіку.

**4.1.2. Схема експерименту з отримання представницьких вибірок пакетного трафіка.** Ціль експерименту – оцінити ступінь фрактальності (самоподібності) пакетного трафіку, що просувається через типовий вузол мережі Інтернет нижнього рівня. Місце проведення експерименту – корпоративний сегмент IP-мережі з вузлом Інтернет ДНДІАСБ. Зміст експерименту – вимірювання та реєстрація у реальному часі інтенсивності потоків пакетів на портах вузлового маршрутизатора [87,88]. Умови експерименту – доступ до портів маршрутизатора з боку користувачів здійснювався безпосередньо через канали IP.

Узагальнена структура сегментованої мережі доступу до вузлу Інтернет ДНДІАСБ показана на рис.4.1. В якості інструментального засобу збору даних про досліджуваний трафік використовувався мережний аналізатор *Sniffer* фірми *Network General*, що був підключений до дзеркального порту вузлового маршрутизатору [89,90]. Функціональність аналізатора дозволяє підраховувати кількість пакетів, що просуваються через точки спостереження з мінімальним інтервалом в  $1с$ . Дані з виходу аналізатора подавались через

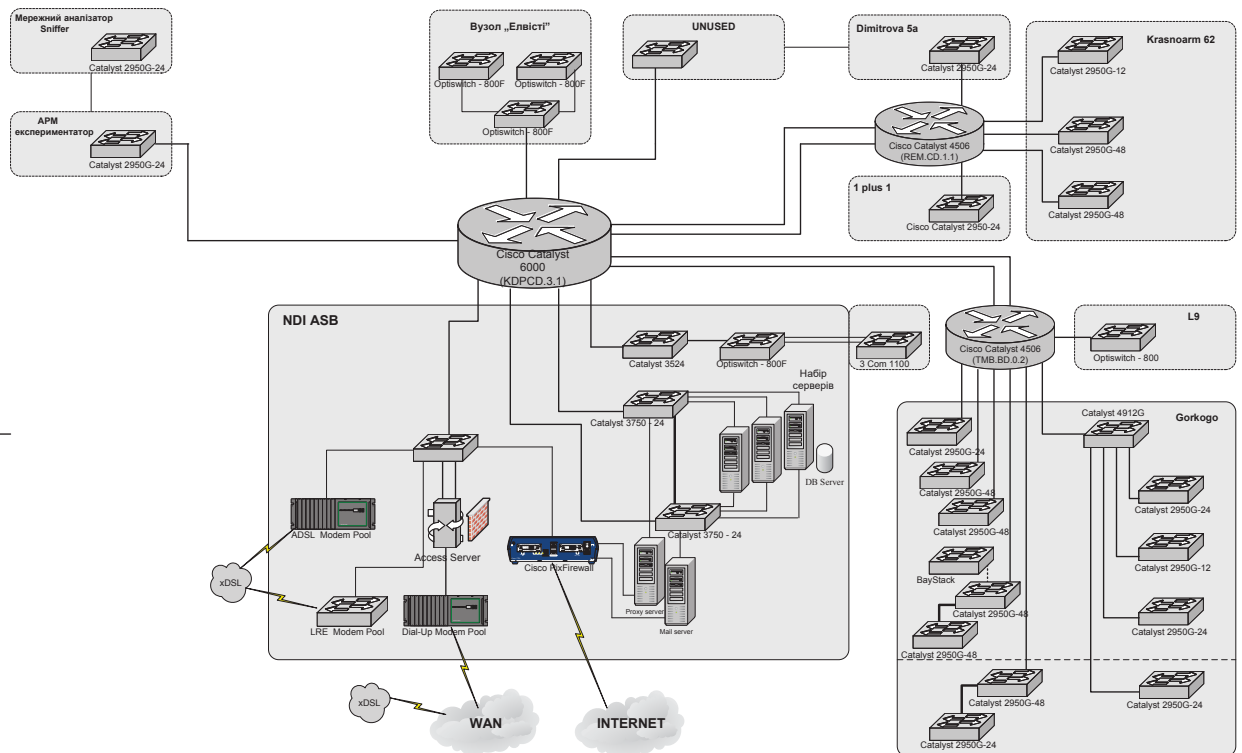


Рис.4.1. Схема організації експеримента по отриманню вибірок пакетного трафіка в сети Интернет

порт *Ethernet* на АРМ експериментатора, програмне забезпечення котрого дозволяло усереднювати отримані первісні дані, здійснювати їхню кореляційну обробку, будувати гістограми та графіки, відобразити результати обробки на екрані монітора тощо [91,92]. Агреговані первісні дані про інтенсивність трафіка на портах вузлового маршрутизатора записувалися у текстові файли. Ступінь агрегації даних визначався кількістю клієнтів, що були підключені до відповідних портів маршрутизатора (від кілька сотень до кілька тисяч). Було прийнято одногодинний формат запису зареєстрованих показань аналізатору. Тобто, кожен текстовий файл представляв вибірку даних розміром 3600 показань. Такий обсяг вибірки за будь-якими статистичними критеріями може вважатися представницьким [93,94].

4.1.3. *Результат експерименту.* За вищезазначених умов отримані погодинні вибірки даних обумовили можливість виявити характер «поведінки» пакетного трафіка, що генерується у мережному сегменті ДНДІАСБ. На рис.4.2 представлена добова гістограма однієї із характерних реалізацій пакетного трафіку на одному із портів вузлового маршрутизатора ДНДІАСБ. Проміжок усереднення – 1 хвилина. Інші реалізації трафіку мають подібні характеристики.

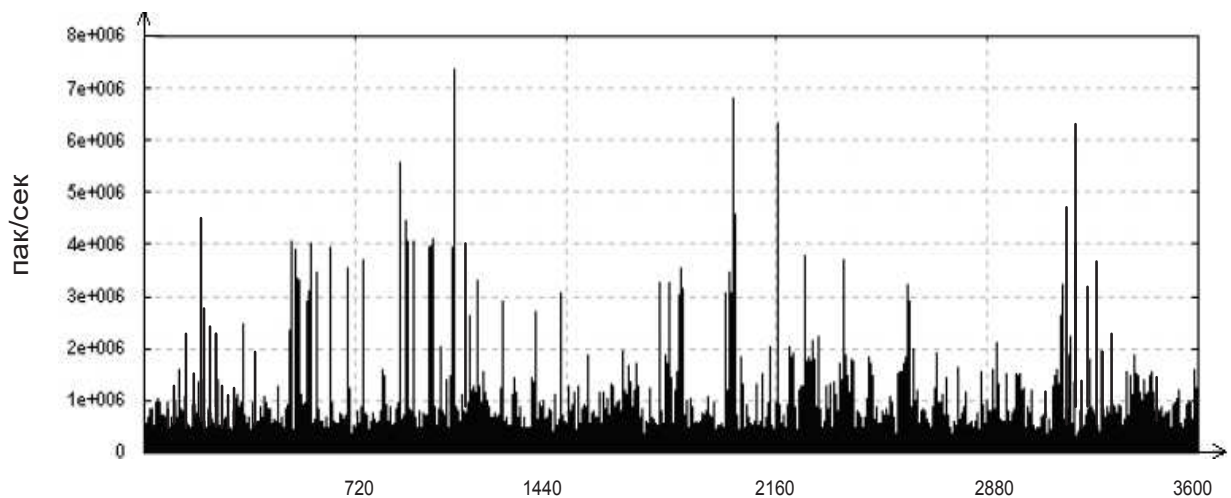


Рис. 4.2. Зразок експериментально отриманої вибірки даних, що відображає характер пакетного трафіку на порту вузлового маршрутизатора ДНДІАСБ

Аналіз рис. 4.2 дозволяє стверджувати, що вибірка даних має пульсуючий характер. Розмах сплесків іноді перевищує десятковий порядок (на гістограмі – від 10 тис. до 100 тис.пак./с). Спостерігаються викиди достатньо сильної амплітуди, але сильні сплески трапляються відносно рідко і вони є короткотривалими. Середнє значення інтенсивності потоку пакетів (на гістограмі для увідного трафіку – 43,31 тис.пак./с) у порівнянні із амплітудою сплесків (на гістограмі – до 96,98 тис.пак./с) – відносно мале. Характеристики увідного та вивідного трафіку – приблизно однакові. Групування сплесків не спостерігається (що позбавляє необхідності скремблювання потоку пакетів).

На рис.4.3 представлена залежність коефіцієнту автокореляції  $r(k)$  отриманої вибірки від відстані між точками  $k$  цієї вибірки (зрозуміло, що у

нашому випадку вибірки даних – це часові ряди, що моделюють характер змін інтенсивності потоків пакетів на портах вузлового маршрутизатора).

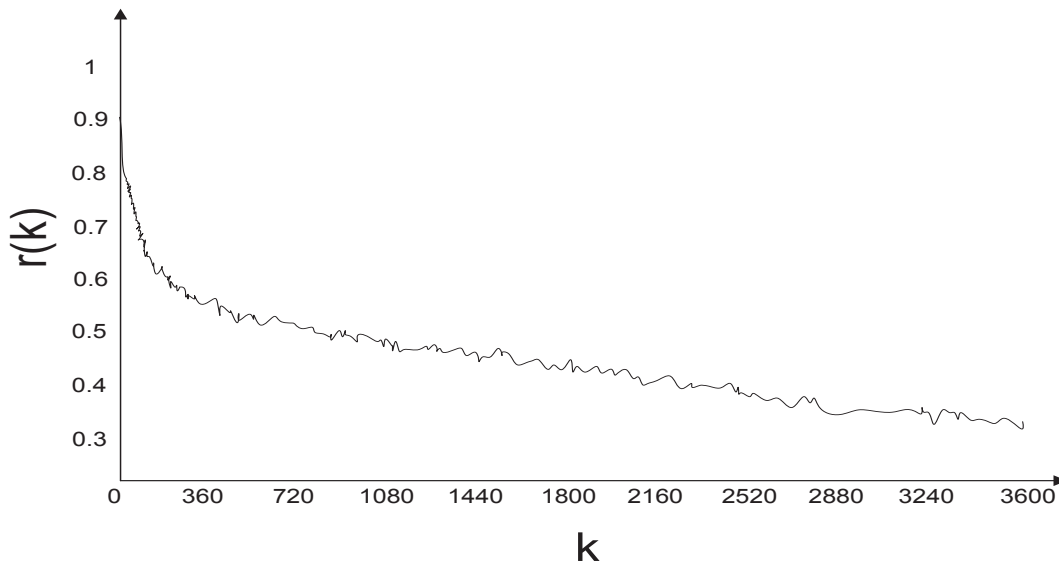


Рис. 4.3. Залежність коефіцієнту автокореляції отриманих реалізацій трафіка від відстані у часі між вимірними значеннями його інтенсивності

Як бачимо, коефіцієнт автокореляції даних досліджуваної вибірки навіть на великих проміжках кореляції не спадає нижче значення 0.37, що вказує на один із проявів можливої самоподібності трафіка. Окрім того, бачимо спорадичні сплески значень  $r(k)$ , що вказує на існування пульсацій трафіка.

Було обраховано середні значення коефіцієнту автокореляції для вибірок, що отримані в умовах повного та неповного завантаження мережного сегменту ДНДІАСБ. Для неповного завантаження ВО характерні середні значення  $r(k)$  знаходяться в районі 0.36, а для повного завантаження – в районі 0.67. У цілому, отримані вибірки вказують на схожість досліджуваного пакетного трафіку на самоподібний процес. Усе це дозволяє сподіватися на ефективність застосування запропонованих у даній роботі процедур формування пакетного трафіку.

На вузлу ДНДІАСБ надаються послуги Інтернет-телефонії, але, як свідчать результати, що отримані у [95-97], характеристики мовного трафіка майже не впливають на статистичні характеристики потоків пакетів. Проте, щоб у цьому впевнитись, необхідно, як вказувалось у підрозділі 2.5, оцінити значення параметра Херста. Для цього у натуральному логарифмічному

масштабі (як по вісі ординат, так і по вісі абсцис) позначимо точки, що відображають обчислені значення коефіцієнта автокореляції від проміжків кореляції, які були усереднені по усій множині отриманих вибірок даних (див. рис.4.4).

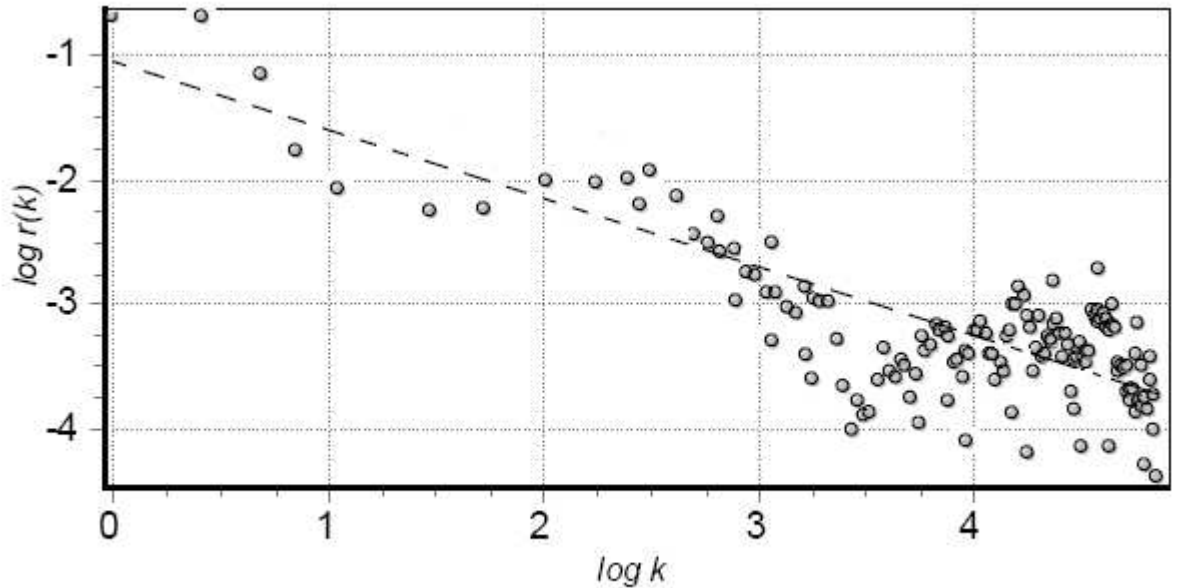


Рис.4.4. Оцінювання значення параметра Херста

Як бачимо, точки на рис.4.4 у цілому не дуже точно, але все ж таки групуються навколо прямої лінії (особливо при великих значеннях  $k$ ). Тому у грубому наближенні кутівий коефіцієнт  $\beta$  цієї уявної прямої лінії може бути визначений шляхом лінійної регресії. Якщо процес самоподібний, то, виходячи із виразів (2.9) та (2.10), кутівий коефіцієнт має визначатися як  $\beta = 2 - 2H$ . На виборці, що відображена на рис.4.4, отримаємо значення  $\beta = 0.524$ . Отже, параметр Херста за цих умов виявляється рівним 0.738, що вказує на відносно суттєвий рівень самоподібності досліджуваного пакетного трафіка.

Як було вказано у підрозд.2.4.2, більш точну оцінку параметру Херста отримують по ІДС, тобто по індексу дисперсії  $F(\tau)$ , що обчислюється згідно виразу (2.18) як функція від проміжку кореляції  $\tau$ . Для досліджуваної вибірки



залежність  $F(\tau)-1$  від  $\ln \tau$  має вигляд прямої лінії, тобто лінійно зростає (див. рис.4.5), що дозволяє однозначно визначити параметр Херста. Як бачимо, пряма, що отримана шляхом лінійної регресії, має кутовий коефіцієнт 0.46. Це означає, що параметр Херста  $H=0,77$ .

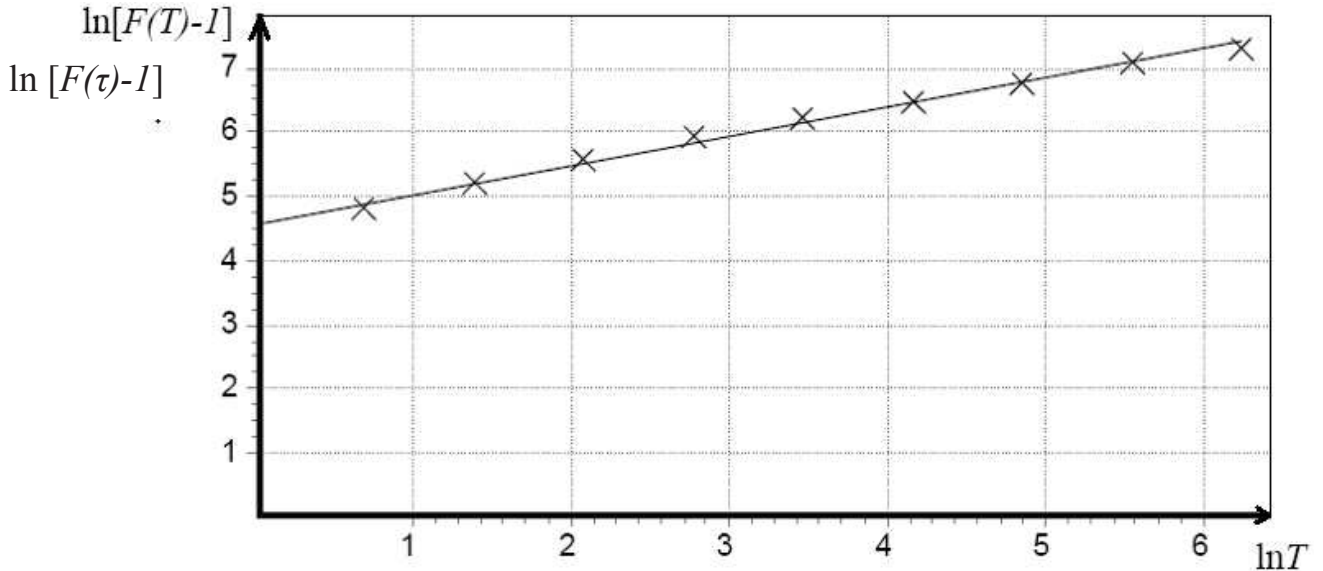


Рис.4.5. Оцінювання параметру Херста  $H$  за значеннями IDC  $\ln \tau$

Таким чином, констатуємо: для розглянутої реалізації досліджуваного трафіку значення параметра Херста, що отримані виходячи з вигляду кривої коефіцієнта кореляції (див. рис.4.4) та шляхом аналізу IDC (0.738 й 0.77 відповідно), з прийнятною для практичних цілей точністю вказують на істотно виражені фрактальні властивості досліджуваного трафіку.

Проте не усі досліджені реалізації трафіку виявились самоподібними. А для значної частини реалізацій характерна невисока ступінь самоподібності. Отримані експериментальні дані свідчать: приблизно для 15% вибірок із загального числа досліджених реалізацій пакетного трафіка обчислені значення параметра  $H$  виявились меншими за 0,5, а ще для 80% вибірок діапазон значень параметра  $H$  знаходився у межах 0,5 - 0,7, і тільки 5% реалізацій мали яскраво виражений фрактальний характер. Тому представляється актуальним пошук методів попереднього формування

трафіку з тим, щоб підвищити ступінь його самоподібності. Один із таких методів розглянуто у підрозд.2.6.

## **4.2. Оцінка впливу засобів прогнозування на якість адаптивного управління смугами портів вузлового обладнання**

4.2.1. *Ціль та загальна схема експерименту.* Даний експеримент не передбачає необхідність моделювання пакетного трафіка та роботи вузлового обладнання (ВО). Ставиться більш обмежена ціль - оцінити придатність обраних вище методів прогнозування для використання у складі СУАР. В якості показників ступеню придатності використаємо показник економії ширини смуг портів ВО  $E_{\Delta}$  (відображає відносну точність прогнозу щодо необхідної ширини смуг портів) та параметр помилок прогнозу  $Er$  ( визначає відносну кількість актів поточного прогнозування, на яких прогнозована ширина смуг портів виявилась недостатньою). Ці показники визначаються виразами (3.23) та (3.24) і залежать від величини часового проміжку  $T_{\Delta}$ , на якому здійснюється оцінка якості прогнозування. Величина  $T_{\Delta}$  визначається виразом (3.25).

У базі даних (БД) зберігається вибірка часового ряду, елементи котрого представляють поточні значення інтенсивності потоку пакетів на порту маршрутизатору вузлу Інтернет. Елементи цієї вибірки послідовно один за одним подаються у реальному часі на вводи досліджуваної обчислювальної схеми прогнозування та вирішувальної схеми, засобами якої здійснюється оцінка вищевказаних показників якості прогнозування (див. рис.4.6). Обсяг вибірки та період подачі даних із вибірки задається експериментатором. На кожному поточному періоді подачі із вибірки чергового елементу часового ряду засобами досліджуваної обчислювальної схеми здійснюється прогнозування значення наступного елементу часового ряду. В якості вихідних даних для його прогнозування беруться значення кількох попередніх елементів цього ряду.

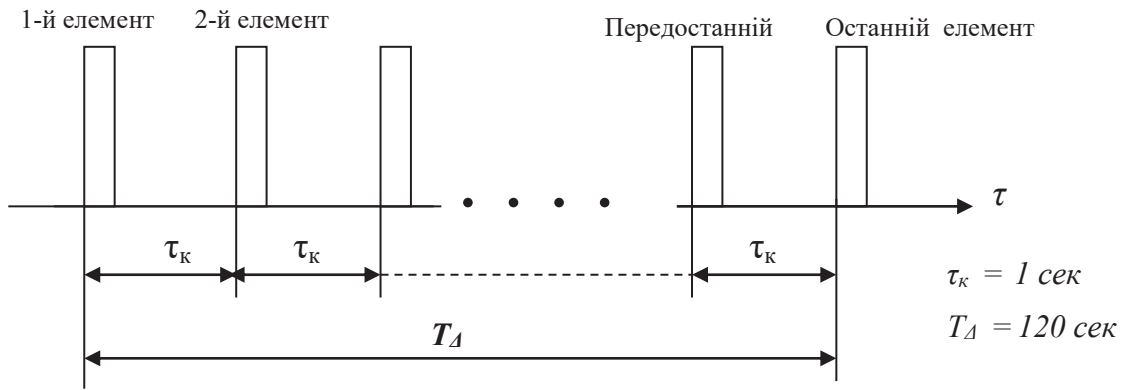


Рис.4.6. Послідовність подачі елементів вибірки часового ряду на вирішувальну схему та схему прогнозування

Кількість врахованих під час прогнозування елементів ряду залежить від методу прогнозування. Після отримання на ввіді вирішувальної схеми чергового елемента ряду його значення порівнюється із його прогнозом оцінкою. І якщо прогнозне значення виявляється меншим, ніж дійсне отримане значення елемента ряду, то фіксується помилка недооцінки смуги порту, яка враховується у виразі (3.24), а абсолютне значення різниці між дійсним і прогнозним значенням враховується у виразі (3.23) для підрахунку показника економії смуги порту. Іншими словами, отримане на попередньому періоді прогнозне значення інтенсивності потоку порівнюється із отриманим реальним поточним значенням інтенсивності потоку, що дає змогу обчислити величину та знак різниці між прогнозним та реальним значенням інтенсивності потоку. Ця різниця у виразі (3.23) позначиться як  $Wp_{i,j}$ , а різниця між попереднім та поточним значеннями інтенсивності потоку позначиться як  $W_{i,j}$ . Обсяг вибірки, що використовується на протязі одного сеансу вимірювань, позначиться як  $K_\Delta$ . Кількість портів ВО у виразі (3.23):  $N=1$ .

**4.2.2. Розробка програмного середовища прогнозування.** Для експериментальної оцінки придатності запропонованих засобів прогнозування за вищевказаними показниками створено програмне середовище [98,99], яке забезпечує:

1) зберігання експериментально отриманих вибірок пакетного трафіку в обсязі та форматі, що розглянуті у підрозділі 4.1 (ці вибірки представляють певним чином обрані ділянки тренду трафіка на портах маршрутизатору вузлу Інтернет і фізично відображають поточні рівні інтенсивності потоків пакетів на цих портах, що виміряні на визначених інтервалах усереднення трафіка  $\tau_y$ );

2) знімання показань щодо поточних рівнів інтенсивності потоків пакетів на портах ВО у режимі реального часу з інтервалом  $\tau_k$ , де  $\tau_k$  - інтервал між початком сусідніх кроків дискретно-адаптивного управління задається користувачем;

3) прогнозування за допомогою засобів досліджуваної обчислювальної схеми у реальному часі наступних значень інтенсивності трафіку на основі попередньо отриманих значень на інтервалах часу, що задається користувачем;

4) оцінка якості прогнозування за показниками (3.23) та (3.24);

5) видачу результатів оцінки якості прогнозування у графічній та (або) табличній формах.

Програмне середовище прогнозування побудовано за схемою «менеджер/клієнт» [76], що складається із двох макроелементів: сервер (Server), що забезпечує зберігання експериментально отриманих вибірок трафіку та надання інформації про трафік у вигляді відповідей на запити клієнта; клієнт (Client), що здійснює прогнозування та оцінювання якості прогнозування. Програмне середовище включає в себе як основні класи, так і допоміжні класи-утиліти. Логічний зв'язок між класами показано на рис.4.7. Фізично макро-елементи можуть бути розташовані на одному комп'ютері.

Сервер забезпечує взаємодію засобів прогнозування із засобами зберігання даних у реальному часі. Така взаємодія здійснюється через інтерфейс сервера з клієнтською програмою.

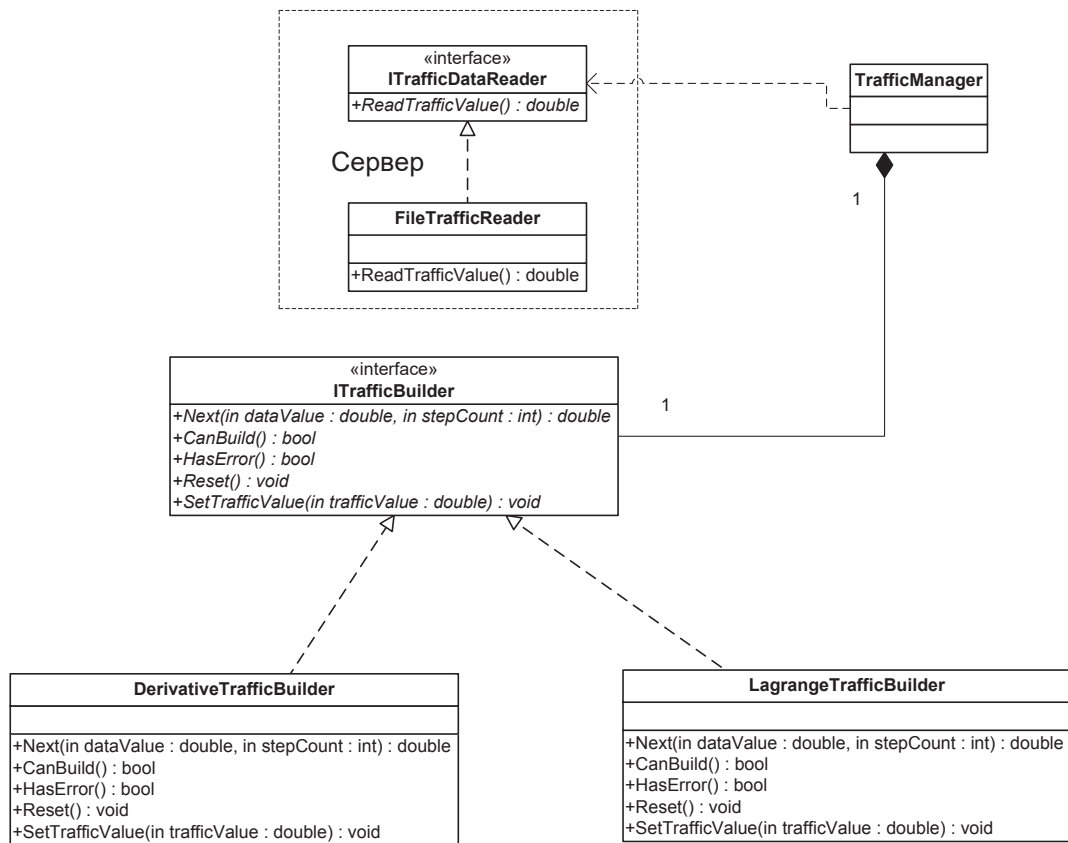


Рис.4.7. Діаграма класів середовища прогнозування

Цей інтерфейс реалізує програмне забезпечення (ПЗ) `ITrafficDataReader`, що відображає функцію `ReadTrafficValue`. У ПЗ класу `FileTrafficReader` зберігаються експериментально отримані вибірки з параметрами тренду потоків пакетів. ПЗ `Server` (на рис.4.7 не показано) реалізує механізми функціонування та конфігурування серверу.

Усе вищезазначене серверне ПЗ знаходиться у файлі `TrafficDataReader.cs`.

Клієнтське ПЗ знаходиться у файлі `MainForm.cs`. і складається із чотирьох класів:

1) `TrafficManager` реалізує інтерфейс користувача та управління прогнозними процедурами для коректного отримання даних із серверу;

2) ITrafficBuilder здійснює динамічне управління класами, що реалізують механізми прогнозування;

3) DeravativeTrafficBuilder реалізує обчислювальну схему за методом прогнозування, що заснований на похідних;

4) LagrangeTrafficBuilder реалізує обчислювальну схему прогнозування за методом експоненціального згладжування.

Клієнт після запуску в роботу намагається знайти і з'єднатись з сервером згідно з опціями, що редагуються у файлі Client.exe.config. Після успішного здійснення цієї процедури створюються об'єкти, що відповідають за коректність передачі даних із серверу та прогнозування даних.

ПЗ клієнта має усі необхідні функціональні можливості, такі, наприклад, як:

CanBuild – метод, що повертає значення “істини” або “ні” в залежності від того, чи достатньо даних для прогнозування;

Next – приймає поточне значення інтенсивності пакетного трафіку та повертає прогнозне значення на задану кількість кроків, що передається іншим параметром;

Reset – метод, що очищає всі дані, котрі зберігаються в об'єкті протягом його використання. Цей метод необхідний при зміні конфігурації прогнозу або при виявленні похибки прогнозування; HasError – метод, що повертає “істину” у разі виявлення помилок у прогнозних даних;

SetTrafficValue – метод, за допомогою якого, об'єкти інформуються про встановлене значення пропускної спроможності каналу. Даний метод необхідний для виявлення помилки прогнозу на наступному кроці.

У файлі Option.sc – знаходяться класи управління параметрами прогнозу (користувач може змінювати будь-які параметри).

У StatUtility.cs знаходиться клас, в якому реалізовано обчислення показників ступеню придатності досліджуваного засобу прогнозування для використання у складі СУАР.

Utility.cs – містить допоміжні класи, наприклад класи приведення типів та інші класи, що необхідні для написання комп'ютерних програм.

Представлене програмне середовище прогнозування розроблене за допомогою Microsoft Visual Studio 2003 [99] (мова програмування - C#) і розраховане на використання у середовищі Microsoft Windows ME (або більш пізніх версій). Інтерфейс ПЗ дозволяє виконувати перегляд реальних та прогнозованих даних, а також їхніх характеристик як у графічному, так і в табличному представленнях. Окрім зазначених функцій, за допомогою спеціально розробленого “меню” користувач може керувати параметрами механізмів прогнозування у рамках задіяних методів, а також здійснювати безпосереднє керування самим процесом прогнозування.

#### 4.2.3. Зміст експерименту

Для моделювання пульсацій потоків пакетів під час тестування засобів прогнозування обрано типові дані щодо відрізків трафіку у розрізі різних періодів часу, що отримані на портах головного маршрутизатору вузлу Інтернет ДНДІАСБ за умов, що висвітлені у підрозділі 4.1.

Рис.4.8 ілюструє характер реальних даних на одному із портів маршрутизатора. Характеристики типової вибірки наведено у таблиці 4.1.

**Таблиця 4.1**

#### **Основні характеристики типової вибірки даних**

Параметр/Часовий ряд	10_12_2011 (morning).txt
Період подачі даних	Один елемент даних у секунду
Довжина (обсяг) вибірки	14400 щосекундних показів за 4 години

Згідно даних табл.4.1 інтервал подачі даних із вибірки на засіб прогнозування обрано на рівні  $\tau_k = 1 \text{сек}$ . Вибір тривалості цього інтервалу у даному експерименті не є критичним. Важливо лише, щоб  $\tau_k \geq \tau_n$ , де  $\tau_n$  - тривалість здійснення функції прогнозування величини наступного елементу

часового ряду. Тривалість одного сеансу вимірювань обрана на рівні *120 сек*, тобто обсяг вибірки, необхідний для одного сеансу - *120* елементів часового ряду.



Рис.4.8. Зразок типового тренду трафіка на порту маршрутизатора

Для отримання більш сталих результатів оцінювання якості прогнозування здійснювалось усереднення результатів прогнозування на одногодних вибірках даних. Таким чином, необхідний обсяг даних визначено на рівні  $120 \text{ с} \times 30 = 3600$  елементів. Загальний обсяг вибірки, що був задіяний в експерименті - *14400* елементів часового ряду (тобто, чотирьохгодинна вибірка).

У процесі прогнозування здійснювалась оптимізація (точніше, - підбір експериментальним шляхом) параметрів механізмів прогнозування у розрізі вищеназваних методів.

#### 4.2.4. *Результати експерименту*

Розглянемо результати прогнозування, що отримані з використанням визначеної вище вибірки за двома досліджуваними методами: методом, що



базується на використанні похідних; методом експоненціального згладжування.

Результати прогнозу за методом, що заснований на похідних, представлені на рис.4.9, де показані часові залежності параметра помилки прогнозу (більш світла лінія) та показника економії смуги пропускання ВО (більш темна лінія), що розраховані згідно із цим методом. Як бачимо, на вибраній двохвилинній вибірці показник похибки прогнозу для методу, заснованому на похідних, дорівнює 12%, а показник економії смуги пропускання порту - 0,64.

Щодо середніх значень цих показників, узятих на одногодинному інтервалі усереднення, то маємо наступні результати: усереднене значення показника помилки прогнозу дорівнює 10,45%, що свідчить про можливість дещо менших, але достатньо великих втрат пакетів навіть на достатньо “непоганих” даних., а усереднене значення показника економії смуги – 0,66, що слід вважати задовільним результатом.

Результати прогнозу за методом експоненціального згладжування представлені на рис.4.10.

Для цього методу параметр помилок прогнозу на двохвилинній вибірці дорівнює лише 6%, а показник економії – 0,66.

Середнє значення параметру помилок щодо досліджуваної одногодинної вибірки трафіку приблизно дорівнює 6.87%, що є значно краще, ніж у попередньому методі. Середнє значення параметру економії смуги – 0,67, що є майже аналогічним результатом у порівнянні із попереднім методом.

Аналіз отриманих у рамках даного експерименту показав, що у випадках мало осцилюючих даних метод прогнозування з використанням похідних часто дає суттєво гірші результати. Можливо тому, що він базується усього на трьох точках.



Рис. 4.9. Часові залежності параметра помилки та показника економії при обчисленнях за методом, що заснований на похідних



Рис. 4.10. Часові залежності параметра помилки та показника економії при обчисленнях за методом експоненціального згладжування

У той же час результати прогнозування за методом експоненціального згладжування у меншій мірі залежать від характеру вихідних даних і у порівнянні із попереднім методом дає кращі результати.

### **4.3. Оцінка ефективності уведених удосконалень в технологію адаптивного розподілу ресурсів пакетної мережі**

**4.3.1. Ціль та задачі комп'ютерного моделювання роботи системи управління адаптивним розподілом ресурсів вузлового обладнання (СУАР).** Нашою метою у цьому підрозділі є експериментальна оцінка показника зменшення кількості помилок адаптивного управління у разі застосування запропонованих удосконалень в технологію адаптивного розподілу ресурсів пакетної мережі. Для цього скористаємося імітаційним комп'ютерним моделюванням [44,102]. Моделювання повинне показати, що запропоновані удосконалень дозволяють знизити рівень системних помилок дискретно-адаптивного управління у порівнянні із звичною технологічною схемою реалізації СУАР. Для цього потрібно порівняти результати моделювання роботи відповідних технологічних схем в однакових умовах їхнього функціонування. За цих умов, якщо отримані у даній роботі теоретичні результати є коректними, рівень помилок в удосконаленому ВО має виявитися більш низьким. Наше завдання - оцінити, наскільки саме слід очікувати зниження рівню вищеназваних помилок.

#### **4.3.2. Побудова середовища, що моделює роботу СУАР.**

Технологічна схема, що моделює роботу СУАР на комп'ютері показана на рис.4.11.

Цю схему доцільно розділити на три відносно незалежних з точки зору програмування блоки: блок формування поточних значень інтенсивності потоку пакетів (БФТ), блок моделювання роботи СУАР

(*БСУАР*) та блок вимірювання параметрів якості функціонування ВО (*БВЯО*).



Рис. 4.11. Середовища моделювання роботи СУАР

Цю схему доцільно розділити на три відносно незалежних з точки зору програмування блоки: блок формування поточних значень інтенсивності потоку пакетів (*БФТ*), блок моделювання роботи СУАР (*БСУАР*) та блок вимірювання параметрів якості функціонування ВО (*БВЯО*). Програмний таймер (*Timer1*) задає  $\tau_k$  - інтервал між початком сусідніх кроків дискретно-адаптивного управління. Інший програмний таймер (*Timer2*) задає  $\tau_i$  - тривалість кроку інтегрування рівняння настроювання. Блок вивідного інтерфейсу результатів експерименту є допоміжним і на схемі рис.4.11 не відображається.

*БФТ* має моделювати часову послідовність (з періодом  $\tau_k$ ) результатів поточних вимірювань у реальному часі інтенсивності дискретного самоподібного процесу, який утворюється згідно запропонованої технології шляхом обробки моделі пульсуючого трафіка з параметрами, що є схожими на параметри тренду реального пакетного трафіка, хоча б на рівні перших двох статистичних моментів. *БСУАР* має моделювати роботу механізмів системи адаптивного управління, у т.ч. засобів прогнозування. *БВЯО* має

здійснювати оцінку величини, що напряму пов'язана із кількістю системних помилок дискретно-адаптивного управління, що утворюються на протязі наперед визначеної тривалості сеансів вимірювань. Кількість системних помилок у даному експерименті напряму пов'язується із величиною показника недооцінки смуги  $D^{(c)}$ , визначення котрого надано у підрозділі 1.2.

Слід зазначити, що у даному експерименті мова не йде про безпосереднє моделювання пакетного трафіка і, тим більш, вузлового обладнання, оскільки трудомісткість та вартість такого моделювання була б суттєво вищою у порівнянні із запропонованою схемою експерименту.

В основу *БФТ* доцільно покласти програмний генератор випадкових чисел з розподілом Парето, оскільки першим двом статистичним моментам цього розподілу властиві характеристики самоподібного процесу. При кожному звертанні до БФТ (з періодом  $\tau_k$ ) формується певне випадкове число, яке у даному експерименті трактується як поточне значення інтенсивності потоку пакетів, параметри котрого моделюють параметри потоку на виході «відра токенів». Програма реалізації *БФТ* використовує відому підпрограму генерації випадкових чисел, що рівномірно розподілені у довільно обраних межах, та спеціально розроблену підпрограму функціонального перетворення рівномірного розподілу у розподіл Парето. Так що ***БФТ* моделює характер змін інтенсивності потоку пакетів на портах ВО.**

Далі таким чином сформовані послідовності випадкових чисел подаються на програмно реалізований *БСУАР*, точніше, на  $N$  блоків прогнозування ( $БПРГ1 \div БПРГN$ ), кожний з котрих видає прогнозне значення інтенсивності потоку для відповідного порту ВО. Блоки прогнозування на розсуд експериментатора можуть реалізовувати одну із двох обчислювальних схем: алгоритму прогнозування, що заснований на похідних, або методу прогнозування з використанням експоненціального згладжування, що розглянуті у підрозділі 3.3. Блоки прогнозування на

кожному кроці адаптивного управління видають прогнозні значення поточної інтенсивності потоків пакетів на портах ВО.

У склад *БСУАР*, після блоків прогнозування, включено блок моделювання механізмів роботи регулятора (*БММР*) та схема прийняття рішень (*СПР*) щодо перевищення або не перевищення прогнозних значень інтенсивності потоків на портах ВО виділених смуг цих портів.

Основне призначення *БММР* - здійснювати динамічно у реальному часі вирівнювання керованих перемінних, в якості котрих узято коефіцієнти завантаження портів. Робота *БММР* розглянута у підрозділі 3.1 і полягає в покроковому інтегруванні рівняння настроювання (3.15). Система настроювання призначена у вигляді (3.11). Регулятори системи адаптивного розподілу смуг портів відповідають виразу (3.14). В якості вхідних перемінних узято елементи матриці вагових коефіцієнтів при керованих перемінних та елементи матриці коефіцієнтів при векторі керування. Вихідною для цього блоку є матриця коефіцієнтів зворотного зв'язку. Шляхом вибору значення коефіцієнту загасання функції Белмана встановлюється бажана швидкість рішення рівняння настроювання. Можливо також задати параметр точності рішення рівняння Рікаті.

Процедура адаптивного управління - багатокрокова. Зрозуміло, що інтервал кроку інтегрування  $\tau_i$ , інтервал кроку управління  $\tau_\Delta$  та інтервал між початком сусідніх кроків дискретно-адаптивного управління  $\tau_k$  характеризуються наступними співвідношеннями:

$$\tau_i \ll \tau_\Delta \ll \tau_k, \quad \tau_\Delta = l \tau_i, \quad (4.3)$$

де  $l$  - кількість кроків інтегрування у межах одного кроку управління.

На кожному кроці інтегрування рівняння настроювання обчислюються нові поточні значення коефіцієнтів завантаження і здійснюється перерахунок знайдених нових (рекомендованих) коефіцієнтів завантаження у нові рекомендовані значення ширини смуг пропускання портів ВО. Зрозуміло, що на кожному кроці інтегрування коефіцієнти завантаження мають

вирівнюватися таким чином, щоб значення суми цих коефіцієнтів зберігалося постійним і дорівнювало значенню пропускну здатності ВО.

На кожному кроці інтегрування у межах кожного поточного кроку управління у *СПР* прогнозне значення інтенсивності потоку на кожному із портів ВО порівнюється із виділеною шириною смуги для цього порту. І якщо поточне значення інтенсивності потоку перевищує виділену ширину смуги, то величина цього перевищення фіксується у *БВЯО* і у подальшому використовується для підрахунку сумарної величини параметру недооцінки смуг портів  $D^{(-)}$  на визначеному часовому інтервалі проведення експерименту. Якщо ж поточне значення інтенсивності потоку не перевищує виділену ширину смуги, то вважається, що помилок недооцінки смуг портів не виникає. Пояснення щодо обраного показника рівню помилок дискретно-адаптивного управління, а саме покрокового коефіцієнту помилок недооцінки смуги порту  $K(D^{(-)})$ , надано у розділі 1.2.

**4.3.3. Оцінюваний показник ефективності проведених удосконалень технології.** У даному експерименті поставлено обмежену ціль: оцінити на кількісному рівні доцільність запропонованих удосконалень технології адаптивного управління смугами портів ВО, не торкаючись питань щодо впливу ємності буферної пам'яті цих портів та довжини інтервалу між початком сусідніх кроків дискретно-адаптивного управління на якість управління. (Ці питання заслуговують окремого дослідження). Фактично у даному експерименті оцінюється параметр недооцінки смуги портів ВО для двох випадків - із включеним та виключеним блоком прогнозування. Отримані оцінки порівнюються між собою і за результатами порівняння робиться висновок щодо ступеню ефективності запропонованих удосконалень досліджуваної технології. Тому у рамках даного експерименту вираз (1.1), що конкретизує зміст коефіцієнту  $K(D^{(-)})$ , можливо спростити наступним чином. Вважати, що експеримент проводиться за однакових умов щодо вибору ємності буферної пам'яті портів ВО та тривалості інтервалу між початком сусідніх кроків дискретно-адаптивного управління  $\tau_k$ . Тоді

достатньо обмежитися визначенням параметру  $SD^{(-)}$  - сумарної величини недооцінки смуги портів:

$$SD^{(-)} = \sum \sum D^{(-)}_{i,k}, \quad (4.4)$$

де  $D^{(-)}_{i,k}$  - параметр недооцінки смуги  $i$ -го порту ВО ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) на  $k$ -ому кроці адаптивного управління ( $k = 1, 2, \dots, L$ );  $L$  - сумарна кількість кроків адаптивного управління на протязі одного сеансу вимірювань;  $N$  - кількість портів ВО.

Як бачимо, параметр  $D^{(-)}_{i,k}$  згідно із рис.1.5 визначається величиною площі прямокутника  $cdc'd'$ .

Фактично обрана схема даного експерименту має забезпечувати можливість оцінювання на кожному кроці адаптивного управління величину параметра недооцінки смуги портів ВО  $D^{(-)}_{i,k}$  та інтегрування цього параметру як за кількістю портів ВО, так і за кількістю кроків управління, що були здійснені на протязі обраного сеансу вимірювань.

**4.3.4. Зміст експерименту.** Перед початком здійснення експерименту виконується настройка параметрів *БФТ*. Зокрема, задається величина розмаху пульсацій та величина інтервалу між сусідніми кроками адаптивного управління (підбирається величина діапазону величин, у межах якого здійснюється генерація випадкових чисел). Шляхом здійснення процедури класифікації отриманих на виході *БФТ* вибірок даних за кутовим коефіцієнтом нахилу лінії залежності оцінок коефіцієнту автокореляції від інтервалу кореляції (див. підрозділ 2.5) отримується упевненість, що на вводи моделі СУАР подаються вибірки часового ряду, якому притаманні характеристики самоподібного процесу. Експериментальним шляхом підбираються параметри моделі, які більш/менш правдоподібно відбивають реальну роботу мереж з пакетною комутацією.

Даний експеримент виконується у три етапи. На першому етапі дані з виходу *БФТ* щодо поточної інтенсивності потоків подаються в обхід блоків



прогнозування на *БММР* та *СПР* і здійснюється покрокове інтегрування рівняння настроювання в умовах відсутності прогнозування тренду трафіка. Значення інтервалу  $\tau_k$  обирається таким чином, щоб його тривалість не перевищувала тривалість періоду квазістаціонарності модельованого процесу. Тривалість одного сеансу вимірювань має бути достатньою, щоб у блоці *БВЯО* сформувався представницький (згідно статистичних критеріїв) обсяг вибірки даних для оцінки показника  $SD^{(c)}$ . Швидкість настроювання задається величиною показника загасання Белмана. Точність інтегрування (тобто, припустима остаточно нев'язка коефіцієнтів вирівнювання) задається в процесі експерименту в залежності від отриманих результатів його проведення. На другому етапі дані з виходу *БФТ* щодо поточної інтенсивності потоків подаються на вводи блоків прогнозування на *БММР* та *СПР* і здійснюється покрокове інтегрування рівняння настроювання в умовах здійснення прогнозування трендів потоків на портах ВО. Умови проведення другого етапу у порівнянні із першим етапом не змінюються. У процесі експерименту задаються різні значення показника загасання функції Белмана для того, щоб мати можливість виявлення залежності ефективності роботи СУАР від значень показника загасання. На третьому етапі через вихідний інтерфейс комп'ютерної моделі отримуються результати оцінки показника  $SD^{(c)}$  як з блоком прогнозування, так і без його включення, що надає змогу на кількісному рівні оцінити корисний ефект від запропонованих удосконалень досліджуваної технології.

З урахуванням вищезазначеного було виконано два етапи експерименту за умови, що ВО має чотири порти ( $N=4$ ). Розрахунки виконані для чотирьох значень показників загасання функції Белмана – відповідно 5, 10, 15 і 20. Інтегрування рівнянь настроювання поточних значень ширини смуг пропускання портів здійснювалось на відрізку часу 5 секунд із кроком 0.0001 секунди за методом Ейлера. Регулятор розраховувався для діагональних матриць  $P$  і  $R$  оптимізуючого функціоналу (3.10) з точністю  $\varepsilon = 10^{-15}$ .

#### 4.3.5. *Результати експерименту.*

У результаті настройки *БФТ* встановлено діапазон змін випадкових чисел в межах від -43.5 до +43.5 при значенні величини тактового інтервалу 0,1 секунди. За цих умов залежність коефіцієнту автокореляції отриманих вибірок від інтервалів кореляції на п'ятисекундних інтервалах має лінійний характер з параметром Херста в діапазоні  $0,65 \div 0,78$ , тобто вибрана модель генерування потоків є цілком прийнятною.

На кожному кроці інтегрування рівняння настроювання щодо кожного із чотирьох портів визначався результат порівняння поточної інтенсивності потоку пакетів і встановленої пропускної здатності цього порту. Якщо інтенсивність потоку перевищувала пропускну здатність порту, то обчислювалась різниця між поточними значеннями інтенсивності і пропускної здатності, і ця різниця інтегрувалась. Інтегрування проводилось щодо всіх чотирьох портів. Якщо інтенсивність потоку була меншою або дорівнювала пропускну здатності порту, то інтегрування не проводилось. Отримано наступні матричні коефіцієнти підсилення регуляторів  $K_y$ , синтезованих для різних значень коефіцієнта загасання  $\alpha$  функції Белмана.

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  $\alpha = 20$  :

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

Для приведених значень показників загасання і при відповідних їм коефіцієнтах підсилення імітаційне моделювання дає дані щодо значення показника сумарної недооцінки смуги портів ВО  $SD^{(-)}$ , які зведені в таблицю 4.2.

**Таблиця 4.2**

**Результати моделювання СУАР**

Показник загасання $\alpha$	5	10	15	20
Показник недооцінки смуги $SD^{(-)}$ без прогнозування	1665	1274	1117	1078
Показник недооцінки смуги $SD^{(-)}$ з використанням прогнозування при обчисленні похідних	1248	1102	1039	998
Показник недооцінки смуги $SD^{(-)}$ з використанням прогнозування за методом експоненціального згладжування	1098	981	873	814

Аналіз даних табл.4.2 дозволяє зробити наступні висновки.

1) З підвищенням значень показника загасання Белмана  $\alpha$  (від 5 до 20) значення показника недооцінки смуги портів ВО зменшуються (приблизно на 35%) і, отже, кількість системних помилок адаптивного управління у цій же мірі зменшується. Цей результат пояснюється тим, що із збільшенням швидкості вирівнювання коефіцієнтів підсилювання у рівнянні настроювання за інших рівних умов кількість кроків інтегрування зменшується і відповідно зменшується площа прямокутника  $c d c' d'$  на рис.1.5.

2) З включенням у склад СУАР блоків прогнозування підвищується якість роботи системи адаптивного перерозподілу смуг портів ВО, оскільки значення показника недооцінки смуги портів ВО на п'ятисекундних інтервалах при інтегруванні рівняння настроювання з кроком 0.0001 секунди за методом Ейлера зменшуються в середньому на 25 ÷ 35%. Пояснення цього результату дано у підрозділі 1.4.

3) Вибір методу прогнозування суттєво впливає на якість адаптивного управління. Зокрема досліджені методи прогнозування (з використанням похідних та метод експоненціального згладжування) виявились не рівноцінними. Обчислювальна схема прогнозування за методом експоненціального згладжування дає щодо показника  $SD^{(c)}$  приблизно на 20% кращі результати у порівнянні із прогнозуванням з використанням похідних.

*Загальний результат експерименту:* запропоновані удосконалення технології адаптивного управління розподілом ресурсів обладнання пакетної мережі у відповідності із результатами теоретичних досліджень цієї технології дають суттєвий позитивний ефект.

## ВИСНОВКИ ДО ЧЕТВЕРТОГО РОЗДІЛУ

4.1. Швидкий розвиток в Інтернет нових інформаційних сервісів зумовив необхідність отримання упевненості, що реальний трафік сучасних пакетних мереж може адекватно представлятися дискретним самоподібним

випадковим процесом. З цією метою проведено експериментальні дослідження характеристик тренду пакетного трафіку на вузлі Інтернет ДНДІАСБ (м.Київ). Результати обробки експериментально отриманих вибірок даних на основі розроблених процедур класифікації тренду (зокрема, шляхом оцінювання параметру Херста) показали, що:

1) на десяти секундних інтервалах усереднення значна частина отриманих вибірок, що представляють пульсації тренду пакетного трафіку, може бути віднесена до самоподібного процесу;

2) інша значна частина вибірок шляхом згладжування (у т.ч., шляхом зміни інтервалу усереднення) може бути трансформована у часові ряди з ознаками самоподібного процесу;

3) незначна частина отриманих вибірок, навіть після згладжування, не виявляла ознак самоподібного процесу.

Таким чином, у більшості випадків реальний трафік сучасних пакетних мереж може адекватно представлятися дискретним самоподібним випадковим процесом.

4.2. В роботі показана теоретична доцільність застосування в системах адаптивного управління ресурсами вузлового обладнання (СУАР) обчислювальних схем прогнозування. Розглянуто дві схеми прогнозування: з використанням похідних та згідно методу експоненціального згладжування. У цьому зв'язку визнано актуальним проведення експериментального дослідження запропонованих схем прогнозування з метою визначення ступеню їхньої придатності для застосування у СУАР. Розроблено відповідне середовище прогнозування у реальному часі відповідно до схеми «менеджер/агент» і на експериментально отриманих вибірках даних здійснено прогнозування за вищевказаними обчислювальними схемами. Придатність схем прогнозування оцінювалась за показником економії смуг портів вузлового обладнання та за параметром помилок прогнозування. Показано, що обидві схеми прогнозування придатні для використання у складі СУАР. Показник економії смуг оцінено у середньому на рівні  $0,6 \div 0,7$

(ідеальний прогноз забезпечує значення цього показника на рівні 1,0), а параметр помилок - на рівні 6,0%÷12,0%, тобто у середньому виникає одна помилка на десять актів прогнозування.

4.3. Отримані результати теоретичних досліджень свідчать, що запропоновані удосконалення технології управління розподілом ресурсів пакетних мереж зменшують рівень системних помилок дискретно-адаптивного управління. Однак не дозволяють на кількісному рівні оцінити величину зменшення цього рівню. Тому визнано актуальним здійснити імітаційне комп'ютерне моделювання системи адаптивного управління смугами пропускання портів вузлового обладнання (СУАР) і на базі розробленої моделі виконати експериментальну оцінку ефективності уведених удосконалень в СУАР. Побудовано відповідне програмне середовище, що моделює роботу СУАР. Фактично у даному експерименті здійснювалося покрокове інтегрування рівняння настроювання і оцінювався параметр недооцінки смуги портів ВО для двох випадків - із включеним та виключеним блоком прогнозування. Отримані оцінки порівнювалися між собою і за результатами порівняння робився висновок щодо ступеню ефективності запропонованих удосконалень досліджуваної технології.

Результати моделювання показали, що:

- з включенням у склад СУАР блоків прогнозування підвищується якість роботи системи адаптивного перерозподілу смуг портів ВО, оскільки значення показника недооцінки смуги портів ВО на п'ятисекундних інтервалах при інтегруванні рівняння настроювання з кроком 0.0001 секунди за методом Ейлера зменшуються в середньому на 25 ÷35%.

- обчислювальна схема прогнозування за методом експоненціального згладжування дає щодо обраного показника недооцінки смуги портів ВО приблизно на 20% кращі результати у порівнянні із прогнозуванням з використанням похідних.

У цілому результати моделювання показали, що запропоновані удосконалення дозволяють знизити рівень системних помилок дискретно-

адаптивного управління у порівнянні із звичною технологічною схемою реалізації СУАР.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Аналіз можливих шляхів удосконалення технологій управління розподілом ресурсів пакетних мереж показав, що найбільш ефективною з точки зору підвищення завантаженості мережного обладнання є технологія адаптивного дискретно-аналогового управління. Однак ця технологія потребує удосконалення у двох напрямках: зменшення системних помилок недооцінки смуги пропускання портів вузлового обладнання  $D^{(-)}$ , що призводять до втрат пакетів, та модифікації алгоритмів згладжування трафіку для формування квазістаціонарних відрізків трендів.

2. Показано, що використання механізму прогнозування у контурі дискретно-адаптивного управління забезпечує можливість зменшення помилок недооцінки  $D^{(-)}$ . Так що технологія управління розподілом ресурсів пакетних мереж має використовувати дискретно-адаптивний принцип управління із уведенням у контур адаптивного управління механізму прогнозування пакетного трафіка.

3. В якості моделі пакетного трафіка в задачах адаптивного управління розподілом ресурсів пакетних мереж доцільно використовувати математичне представлення дискретних асимптотично самоподібних процесів. Вперше показано, що збільшення інтервалу усереднення трафіку приводить до збільшення ступеню його самоподоби (тобто, до збільшення значень параметру Херста), що сприяє прогнозуванню його тренду, але при цьому зростає час затримок та коефіцієнт втрат пакетів. В роботі розроблено нову процедуру визначення інтервалу усереднення пакетного трафіку, яка, з одного боку, забезпечує максимально можливу ступінь самоподібності усередненого трафіку, а з іншого, не допускає перевищення припустимого значення затримок пакетів.

4. Розроблено нову технологію формування пакетного трафіка. На відміну від звичайних ця технологія забезпечує можливість перетворення нестационарних потоків пакетів, що просуваються через порти вузлового обладнання, на



квазістаціонарні відрізки з проміжками стаціонарності, які узгоджені з інтервалами кроків дискретного управління.

5. Для зменшення помилок адаптивного управління запропоновано у ланцюг управління включити засіб прогнозування пульсацій потоків пакетів. Для оцінювання якості прогнозування запропоновано використати два наступні показники: показник економії ширини смуг портів вузлового обладнання  $E_{\Delta}$ , що відображає ступінь підвищення завантаженості ВО завдяки застосуванню блоку прогнозування в системі перерозподілу пропускної здатності ВО відносно рівня завантаженості в умовах відсутності прогнозування; параметр помилки прогнозу  $E_r$ , який відображає долю помилок, що виникають під час застосування того чи іншого алгоритму прогнозування. Уведені показники дозволили надати вичерпну характеристику якості прогнозування у разі використання адаптивного методу управління смугами портів ВО.

6. Розроблено нову структуру та відповідну технологічну схему реалізації механізму перерозподілу ширини смуг портів ВО в умовах пульсацій трафіку. Запропоновані засоби усереднення та формування дозволили отримати на уводах портів ВО квазістаціонарні, відповідним чином згладжені тренди потоків пакетів. Включення цих засобів в систему адаптивного управління дозволило підсилити можливості прогнозування і, тим самим, зменшити кількість системних помилок дискретного-адаптивного управління.

7. Здійснено експериментальні дослідження характеристик тренду пакетного трафіку на вузлі Інтернет ДНДІАСБ (м.Київ). Результати обробки отриманих вибірок даних на основі розроблених процедур класифікації тренду (зокрема, шляхом оцінювання параметру Херста) показали, що у більшості випадків реальний трафік сучасних пакетних мереж може адекватно представлятися дискретним самоподібним випадковим процесом.

8. На експериментально отриманих вибірках даних здійснено прогнозування за двома обчислювальними схемами: з використанням похідних та згідно методу експоненціального згладжування. Придатність схем

прогнозування оцінювалась за показником економії смуг портів вузлового обладнання (ВО) та за параметром помилок прогнозування. Показано, що обидві схеми прогнозування придатні для використання у складі механізму адаптивного перерозподілу ресурсів ВО. Показник економії смуг оцінено у середньому на рівні  $0,6 \div 0,7$  (ідеальний прогноз забезпечує значення цього показника на рівні 1,0), а параметр помилок - на рівні  $6,0\% \div 12,0\%$ , тобто у середньому виникає одна помилка на десять актів прогнозування.

9. Здійснено імітаційне комп'ютерне моделювання системи адаптивного управління смугами пропускання портів вузлового обладнання (СУАР) і на базі розробленої моделі виконана експериментальна оцінка ефективності уведених удосконалень у СУАР. У даному експерименті здійснювалося покрокове інтегрування рівняння настроювання і оцінювався параметр недооцінки смуги портів ВО для двох випадків - із включеним та виключеним блоком прогнозування. Отримані оцінки порівнювалися між собою і за результатами порівняння робився висновок щодо ступеню ефективності запропонованих удосконалень досліджуваної технології.

Результати моделювання показали, що:

- з включенням у склад СУАР блоків прогнозування підвищується якість роботи системи адаптивного перерозподілу смуг портів ВО, оскільки значення показника недооцінки смуги портів ВО на п'ятисекундних інтервалах при інтегруванні рівняння настроювання з кроком 0.0001 секунди за методом Ейлера зменшуються в середньому на  $25 \div 35\%$ .

- обчислювальна схема прогнозування за методом експоненціального згладжування дає щодо обраного показника недооцінки смуги портів ВО приблизно на 20% кращі результати у порівнянні із прогнозуванням з використанням похідних.

У цілому результати моделювання показали, що запропоновані удосконалень дозволяють знизити рівень системних помилок дискретно-адаптивного управління у порівнянні із звичною технологічною схемою реалізації СУАР.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кочергін Ю.А. Задача авторегулирования перераспределением пропускной способности пакетного коммутатора между его портами / Кочергін Ю.А. // Математичні машини і системи. - К.: ІК АНУ, 2006. Вип. 2. – С. 60-70.
2. Кочергін Ю.А. Підвищення ефективності використання обладнання авіаційних телекомунікаційних систем: дисертація кандидата технічних наук: 05.12.02 (телекомунікаційні системи та мережі) / Кочергін Юрій Анатолійович. – К.: НАУ, 2007. – 276 с.
3. Корпоративний стандарт Укртелекому „Технічна експлуатація МПД «Укртелекому». Правила технічної експлуатації мереж передавання даних ВАР «Укртелеком»: КСТ 64.2-21560766.001-2002. – [Чинний від 01.04.2002]. – К. : ДВІА «Зв’язок», 2002. – 87 с.
4. Конахович Г. Ф. Сети передачи пакетных данных / Г. Ф. Конахович, В. М. Чуприн. – К.: „МК-Пресс”, 2006. – 272 с.
5. Городецкий А. Я. Информатика. Фрактальные процессы в компьютерных сетях / А. Городецкий, В. Забровский. – Санкт-Петербург: Изд-во СПб ГТУ, 2000. – 96 с.
6. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Клейнрок Л. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
7. Захаров Г. П. Проектирование и техническая эксплуатация сетей передачи дискретных сообщений [Учебное пособие для вузов] / Захаров Г. П., Малиновский С. Т., Яновский Г. Г. – М. : Радио и связь, 1988. – 360 с.
8. Абилов А. В. Сети связи и системы коммутации / Абилов Андрей Васильевич. – М. : Радио и связь, 2004. – 288 с.
9. Ильченко М. Б. Сотовые радиосети с коммутацией пакетов / Ильченко М. Б., Бунин С. Г., Войтер А. П. – К.: Наукова думка, 2003. – 266 с.
10. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник [для вузов] / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – [3-е изд.]. – Санкт-Петербург: Питер, 2006. – 956 с.
11. Bolla R. Dynamic inter-vehicle communication network for the support of real-time traffic control / Bolla R., Davoli F., Nobile C. // Proc/ 8<sup>th</sup> IFAC Symp. On Transportation. – Crete (Greece), June 1997. – P.1108-1112.
12. Акуличев А. Б. Оценка задержки передачи пакетов в каналах со случайным множественным доступом / Акуличев А. Б. // Электросвязь. – 1994. – №9. – С.28-29.
13. Патент США №5311513, МПК<sup>7</sup>: H04L1/00. Устройство формирования пакетного трафика; заявл. 02.09.05.
14. Патент ФРГ DE № 2004111800, МПК<sup>7</sup>:H04Q1/00. Устройство управления трафиком; заявл. 05.10.05.
15. Патент Российской Федерации №2272362, МПК<sup>8</sup>:H04L12/56. Система управления пакетным коммутатором; заявл. 20.03.06.

16. А. с. 1162058 СССР, МКИ Н 04 L 7/02. Устройство для управления передачей данных по радиоканалу / Р. Г. Оффенгенден, А. П. Войтер (СССР); заявл. 04.05.83.
17. Бунин С. Г. Ретрансляция пакетов в радиосети Ad Hoc / С. Г. Бунин, А. П. Войтер // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: труды 16-й Международной Крымской конференции, 27-28 марта 2006 г. – Севастополь: Севастопольский гидрофизический институт, 2006. – С.353-354.
18. Комашинский В. И. Управление потоками в сетях радиосвязи с интеграцией служб / В. И. Комашинский, В. А. Портнов // Радиотехника. – 2006. – №6. – С8-15.
19. Лазарев В. Г. Динамическое управление потоками информации в сетях связи / В. Г. Лазарев, Ю. В. Лазарев. – М. : Радио и связь, 1983. – 216 с.
20. Бакланов И. Г. NGN: Принципы построения и организации / Бакланов И. Г. – М. : Эко-Трендз, 2008. – 400 с.
21. Пат. України на корисну модель, МПК<sup>8</sup>:H04L12/56.Спосіб управління пульсуючими потоками протокольних блоків даних / Кочергін Ю.А.; заявл. 27.01.09.
22. Brown R.G. Smoothing, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.Y., 1963.
23. Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях. Монография / Под ред. О.И. Шелухина - М.: Радиотехника, 2003.- 480 с.
24. Левин Б. Р. Вероятностные модели и методы в сетях связи и управления / Б. Р. Левин, В.Р. Шварц. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.
25. Корнышев Ю. Н. Теория телетрафика : [Учебник для вузов] / Корнышев Ю. Н., Пшеничников А. П., Харкевич А.Д. – М. : Радио и связь, 1996. – 272 с.
26. Крылов В. В. Теория телетрафика / Крылов В. В. – Н.: НГТИ, 2000. – 106 с.
27. Ghaderi M. On the Relevance of Self-Similarity in Network Traffic Prediction [Электронный ресурс] / Ghaderi M.  
<http://www.cs.uwaterloo.ca/cs-archive/CS-2003/28/TR-CS-2003-28.pdf>.
28. Erramitti A. Fast and physically-based generation of self-similar network traffic with applications to ATM performance evaluation / Erramitti A., Pruthi P., Willinger W. // Proc. of the WSC. – 1997. – P. 997-1004.
29. Петров В. В. Структура телетрафика и алгоритм обеспечения качества обслуживания при влиянии эффекта самоподобия / Петров В. В. – М.: Радио и связь, 2004. – 101 с.
30. Петров М. Н. Самоподобие в системах массового обслуживания с ограниченным буфером / М. Н. Петров, Д. Ю. Пономарев. // Электросвязь. – 2002. – № 2. – С.35-39.

31. Norros I. The Management of Large Flows of Connectionless Traffic on the Basis of Self-Similar Modeling : IEEE International Conference on Communications (ICC '95) / Norros I. – Seattle (USA). – 1995. – P.344-356.
32. Ryu B. K. Fractal Network Traffic : From Understanding to Implications / Ryu B. K. – Columbia : Columbia University, 1996. – 143 p.
33. Brown R.G. Smoothing, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.Y., 1963.
34. Венцель Е. С. Теория вероятностей / Венцель Е. С. – М. : Высшая школа, 1985. – 386 с.
35. Берколайко М. З. Образы всплесков при действии операторов свертки / М. З. Берколайко, И. Я. Новиков // Математические заметки. – 1994. – Т. 55, № 5. – С.13-36.
36. Фомичев, С. М. Обзор математических моделей каналов связи и их применение в телекоммуникационных системах / С. М. Фомичев, А. В. Абилов. – М., 2001. – 60 с. – Деп. в ВИНТИ, 13 июня 2001г., №1523-В01.
37. Олифер В. Г. Новые технологии и оборудование IP-сетей / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2001. – 512 с.
38. Нефёдов В. И. Основы радиоэлектроники и связи / Нефёдов В. И. – М.: Высшая школа, 2005. – 510 с.
39. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика / Пугачев В. С. – М. : Наука, 1979. – 496 с.
40. Айвазян С. А. Прикладная статистика. Основы эконометрики / С.А.Айвазян. – М.: Юнити-Дана, 2001. – 432 с.
41. Крамер Г. Математические методы статистики / Крамер Гаральд. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
42. Тихонов В. И. Статистическая теория радиоэлектронных систем / [Тихонов В. И., Ефименко В. С., Журавлёв А. Г.] ; под ред. В. И.Тихонова. – М. : ВАТУ, 2002. – 379 с.
43. Чуприн В.М., Конахович Г.Ф., Потапов В.Г. Експлуатація телекомунікаційних систем: [підручник для ВНЗ] / Чуприн В.М.-К.:Вид-во «НАУ», 2012. -798 с.
44. Летов А. М. Динамика полета и управление / Летов А. М. – М. : Наука, 1969. – 359 с.
45. Антонов В. К. Метод построения качественных регуляторов / Антонов В. К. // Кибернетика и вычислительная техника. – 2000. – Выпуск 126. – С.40-48.
46. Антонов В. К. Побудова регуляторів із заданою якістю руху за допомогою обмеження зміни функції Ляпунова-Белмана / Антонов В. К. // Вісник НАУ. – 2001. – № 4 (11). – С.129-132.
47. Тепляков И. М. Телекоммуникационные системы : [Учебное пособие] / Тепляков И. М. – М. : ИП „Радиософт”, 2008. – 240 с.
48. Срагович В. Г. Теория адаптивных систем / Срагович В. Г. – М. : Наука, 1976. – 319 с.
49. Валеев К. Г. Построение функций Ляпунова / К. Г. Валеев, Г. С. Финин. – К. : Наукова думка, 1981. – 412 с.

50. Антонов В. К. Теорема об устойчивости / Антонов В. К. // Теория и методы исследования авиационных автоматических систем и тренажеров. Выпуск 3. Изд-во КИИГА, 1993. – С.14-19.
51. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. SOFTSWITCH. – СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 2006. -368 с.
52. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика / Пугачев В. С. – М. : Наука, 1979. – 496 с.
53. Айвазян С. А. Прикладная статистика. Основы эконометрики / С.А.Айвазян. – М.: Юнити-Дана, 2001. – 432 с.
54. Крамер Г. Математические методы статистики / Крамер Гаральд. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
55. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределённости / Репин В.Г. – М.:Сов.радио, 1977. – 432 с.
- 56.Варианты метода «Гусеница»-SSA для анализа многомерных временных рядов. <http://www.gistatgroup.com> .
- 57.Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования. – М.: Статистика, 1979. – 254 с.
58. Приставка О.П., Приставка П.О., Смирнов С.О. Статистичний аналіз в АСОД. Часові ряди: Редагування, прогнозування: Навчальний посібник. – Д.: РВВ ДДУ, 2001. – 92 с.
59. Brown R.G. Smoothing, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.Y., 1963.
60. Метод прогнозирования многомерных случайных процессов на основе комплексирования аналогов. [www.i2.com.ua](http://www.i2.com.ua) .
61. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. – М.: Мир. – Вып.1. – 1974: – 406 с.; Вып.2. – 198 с.
62. Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам. – М.: Радио и связь, 1985. – 303 с.
63. Traffic Modeling Based on FARIMA Models. Xue F., Liu J., Shu Y., Zhang L., Yang O.W.W // CCECE99 Proceed. . May 1999. . P. 162-167.
64. Приставка П.О. Поліноміальні сплайни при обробці даних.: Дніпропетровськ 2004. 29 с.
65. Ghaderi M. On the Relevance of Self-Similarity in Network Traffic Prediction, 2003. <http://www.cs.uwaterloo.ca/cs-archive/CS-2003/28/TR-CS-2003-28.pdf>.
66. Sadec N., Khotanzad A., Chen T. ATM Dynamic Bandwidth Allocation Using FArima Prediction Model. <http://snoopy.seas.smu.edu/papers/icccn03.pdf>.
67. Прокис Дж. Цифровая связь / Прокис Дж. – М. : Радио и связь, 2000. – 687 с.
68. Таненбаум Э. Компьютерные сети / Таненбаум Э. – Санкт-Петербург : Питер, 2002. – 848 с.
69. Иванова Т. И. Компьютерные технологии в телефонии / Иванова Т. И. – М. : Эко-Трендз, 2002. – 300 с.
70. Стратонович Р. Л. Принципы адаптивного приёма / Стратонович Р. Л. – М. : Сов. Радио, 1973. – 141 с.

71. Романов А. И. Телекоммуникационные сети и управление : [учебное пособие] / Романов А. И. – К. : ВПЦ «Киевский университет», 2003. – 246 с.
72. Комашинский В. И. Системы подвижной связи с пакетной передачей информации. Основы моделирования / В. И. Комашинский, А. В. Максимов. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 176 с.
73. Akimaru H. Teletraffic: Theory and applications / Akimaru H., Kawashima K. -Springer-Verlang: ITU-T, 1999. –Р. 677-689.
74. Бурлаков М. В. Модели, алгоритмы и вычислительные процедуры оптимизации ситуационного управления в системах обслуживания: диссертация доктора технических наук : 05.12.02 (телекоммуникационные сети и системы) / Бурлаков Михаил Валерьянович. – К. : НТУУ «КПИ», 1993. – 398 с.
75. Цой С. А. Исследование математических моделей сетей связи / Цой С. А. // Теория прикладной информатики : [Сб. научн. трудов / под ред. проф. А. Ф. Терпугова]. – Томск: Издательство Томского университета, 2004. – Вып.1. – С.110-126.
76. Чуприн В.М., Конахович Г.Ф., Потапов В.Г. Експлуатація телекомунікаційних систем: [підручник для ВНЗ] / Чуприн В.М.-К.:Вид-во «НАУ», 2012. -798 с.
77. Петухов А. П. Периодические всплески / Петухов А. П. // Математический сборник. – 1997. – Т. 188, №10. – С.69-94.
78. Петухов А. П. Периодические дискретные всплески / Петухов А. П. // Алгебра и анализ. – 1996. – № 3. – С. 151-183.
79. Mandelbrot B. V. The fractal Geometry of Nature / Mandelbrot B. V. – New York (USA): Freeman, 1983. – 111 p.
80. Новиков И. Я. Основы теории всплесков / И. Я. Новиков, С. Б. Стечкин // Успехи математических наук. – 1998. – Т. 53, № 6 (324). – С.53-128.
81. Grassberger P. Characterization of strange attractors / Grassberger P., Procaccia I. // Phys. Rev. Lett. 58. – 1983. – P. 2387-2389.
82. Manthorpe S. The Danger of Data Traffic Models / Manthorpe S. // Tech Rep. 25, COST 242, Spring wally. – 1995. – P.14-28.
83. Петухов А. П. Кратномасштабный анализ и всплеск-разложение пространств периодических распределений / Петухов А. П. // Доклады РАН. – 1997. – Т. 356, №2. – С. 12-13.
84. Заборовский В.С. Моделирование процессов в современных высокоскоростных компьютерных сетях / В. С. Заборовский, Б. А. Майзель // Вычислительные, измерительные и управляющие системы : Труды Санкт-Петербургского Государственного технического университета. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГТУ, 1995. – № 452. – С.1-15.

85. Ляхов А. И. Асимптотический анализ моделей иерархических локальных сетей с многопроцессорными серверами / Ляхов А. И. // М.:Электросвязь, 1998. – № 12. – С. 34-39.

86. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями / Клейнрок Л. – М. : Мир, 1979. – 600 с.

87. Аломар Мхамад. Експериментальні дослідження характеристик пакетного трафіку на вузлу Інтернет низового рівня / Аломар Мхамад // Защита информации : Сб. научн. трудов Национального авиационного университета. – К. : НАУ, 2012. – Специальный выпуск . – С.137-142.

88. Росляков А.В. Оконечное оборудование сети ISDN / Росляков А.В.. – М.:Горячая линия-Телеком,2008. -104 с.

89. Бакланов И. Г. Технологии измерений в современных телекоммуникациях / Бакланов И. Г. – М. : Эко-Трендз, 1998. – 371 с.

90. Уайндер С. Справочник по технологиям и средствам связи / Уайндер С. –М. : Мир, 2000. – 429 с.

91. Стеклов В. К. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку : підручник [для студентів вищих навчальних закладів] ; під ред. В. К. Стеклова / Стеклов В. К., Беркман Л. Н., Кільчицький Є. В. – К. : Техніка, 2004. – 576 с.

92. Цыбаков Б. С. Модель телетрафика на основе самоподобного случайного процесса / Цыбаков Б. С. // Радиотехника. – 1999. – № 5. – С. 24-31.

93. Стеклов В. К. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку : підручник [для студентів вищих навчальних закладів] ; під ред. В. К. Стеклова / Стеклов В. К., Беркман Л. Н., Кільчицький Є. В. – К. : Техніка, 2004. – 576 с.

94. Петров М. Н. Самоподобие в системах массового обслуживания с ограниченным буфером / М. Н. Петров, Д. Ю. Пономарев // Электросвязь. – 2002. – №2. – С. 35.

95. Емельянов С. В. Новые типы обратной связи. Управление при неопределённости / С. В. Емельянов, С. К. Коровин. – М. : Наука. Физматлит, 1997. – 352 с.

96. Шелухин О. И. Цифровая обработка и передача речи / О. И. Шелухин, Н. Ф. Лукьянцев. – М. : Радио и связь, 2000. – 424 с.

97. Горелов Г.В. Качество управления речевым трафиком в телекоммуникационных сетях / Горелов Г.В., Ромашкова О.Н., Чан Туан Ань. М.: Радио и связь,2001. -46 с.

98. Культин Н.Б. С++Builder в задачах и примерах / Культин Н.Б. –СпБ.: БХВ-Петербург, 2005. – 429 с.

99. С. Бобровский. Самоучитель программирования на языке С++ в системе Borland C ++ Builder 5.0. М.: БИНОМ, 2009. -187 с.

100. А.Б. Иванов. Контроль соответствия в телекоммуникациях и связи. Часть 1. – М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 2001.



101. Agilent Technologies. Test and Measurements. 2000 Catalog and CD-ROM, 2011.

102. А.Ф.Романенко, Г.А.Сергеев. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. М.: “Советское радио”, 1988. -302 с.

103. Альомар М. Аналіз системних помилок адаптивного управління розподілом ресурсів мереж з комутацією пакетів / В.М. Вишняков, М. Альомар // Новітні комп'ютерні технології : матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції – К. : Мінрегіон України, 2012. – С.145-146.

104. Альомар М. Збільшення корисного завантаження вузлового обладнання комп'ютерних мереж / В.М. Вишняков, М. Альомар // Новітні комп'ютерні технології. – Кривий Ріг : ДВНЗ «Криворізький національний університет», 2013. – Випуск XI. - С.159-160.

105. Alomar Saleh, Alomar Mhamad, Chuprin V.M. Adaptive Method of Increase of Package Network Load/Scientific Reserch, Engineering, 2013, 5, 1006-1011. <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2013.512122>

106. Альомар М. Удосконалення технології управління розподілом ресурсів пакетних мереж / М. Альомар // Проблеми розвитку глобальних систем зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM : тези доповідей науково-технічної конференції 28-30 листопада 2012 року. – К.: НАУ, 2012. – С. 45.

107. Альомар М. Прогнозування самоподібного трафіка у пакетних мережах / М. Альомар // Управління розвитком складних систем. – Вип. 20. – К.: КНУБА, 2014. – С. 102 – 109.

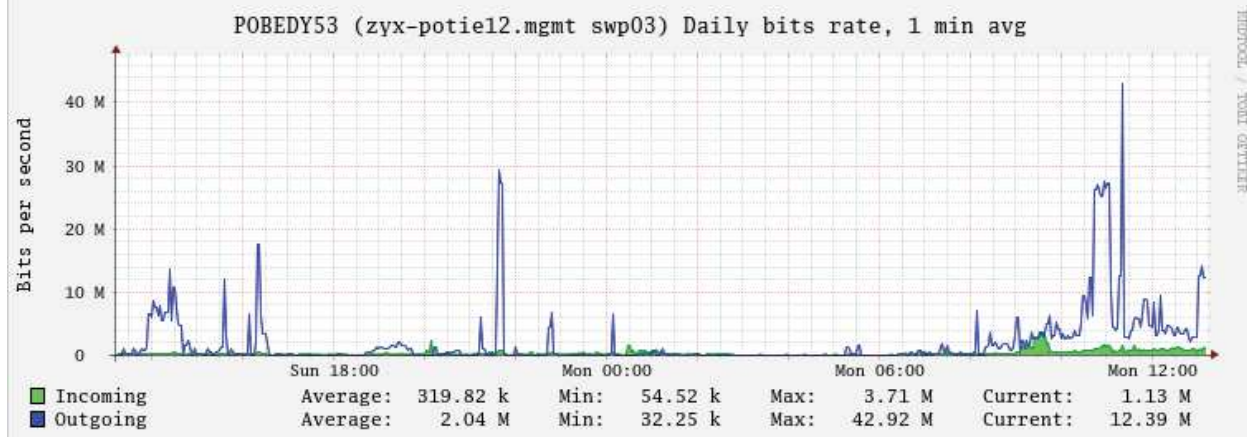
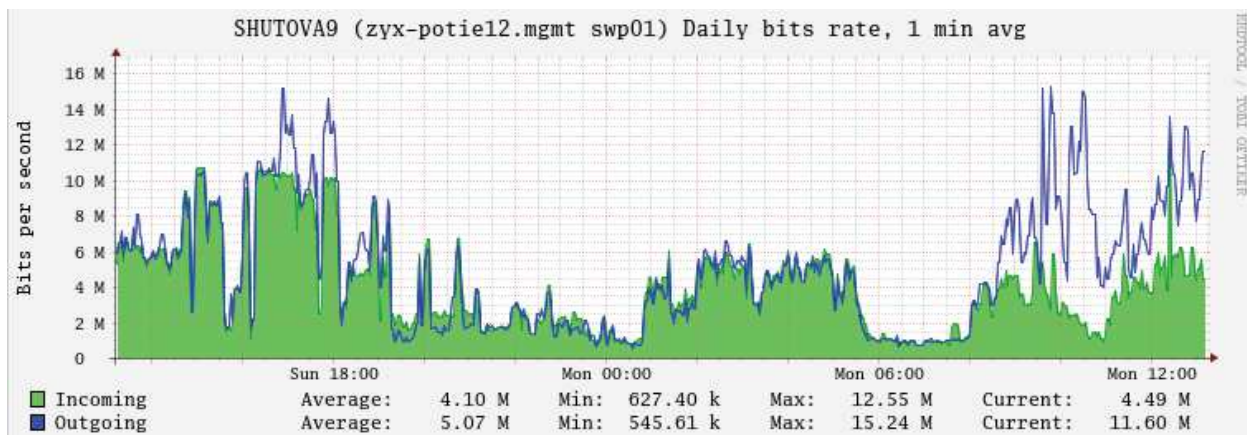
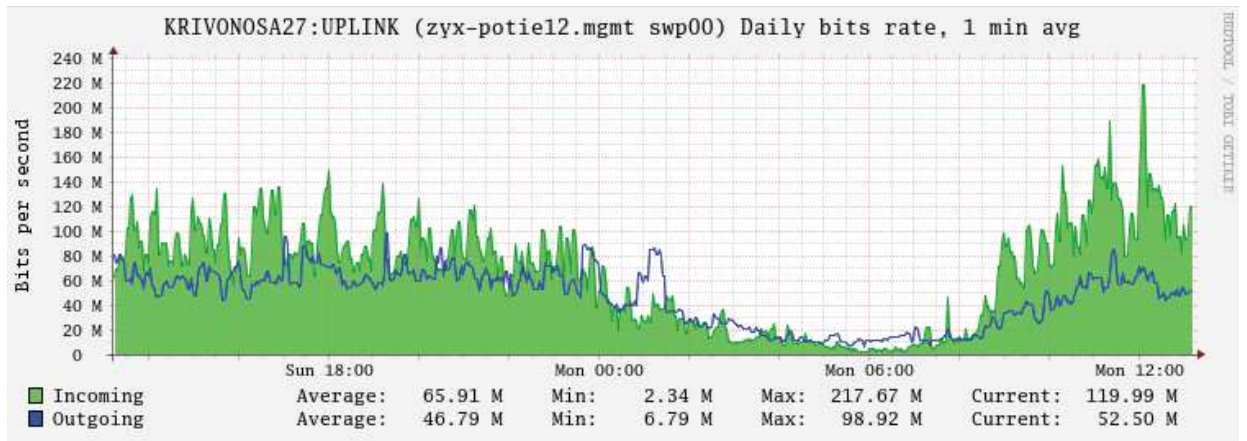
108. Alomar Mhamad, Saleh Alomar, Atef Obeidat. Influence of traffic prognostic mechanism on quality of adaptive control of switchboard. Contemporary Engineering Sciences, Vol. 7, 2014, no. 33, 1763-1776. <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2014.4797>.

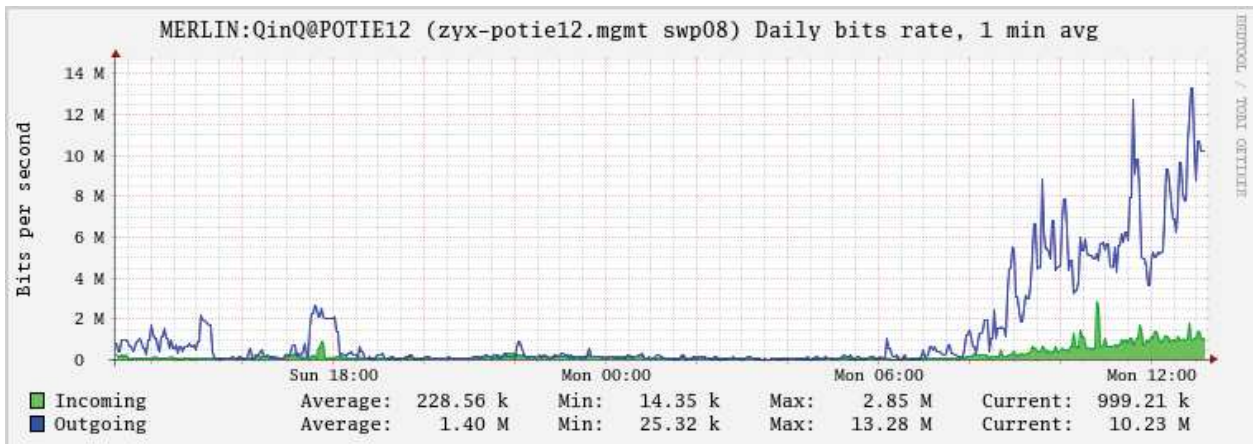
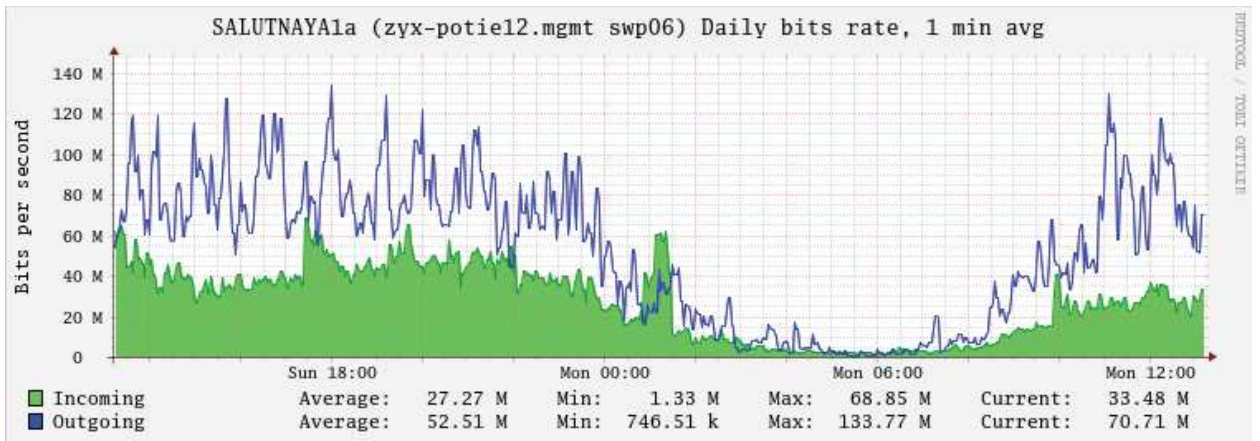
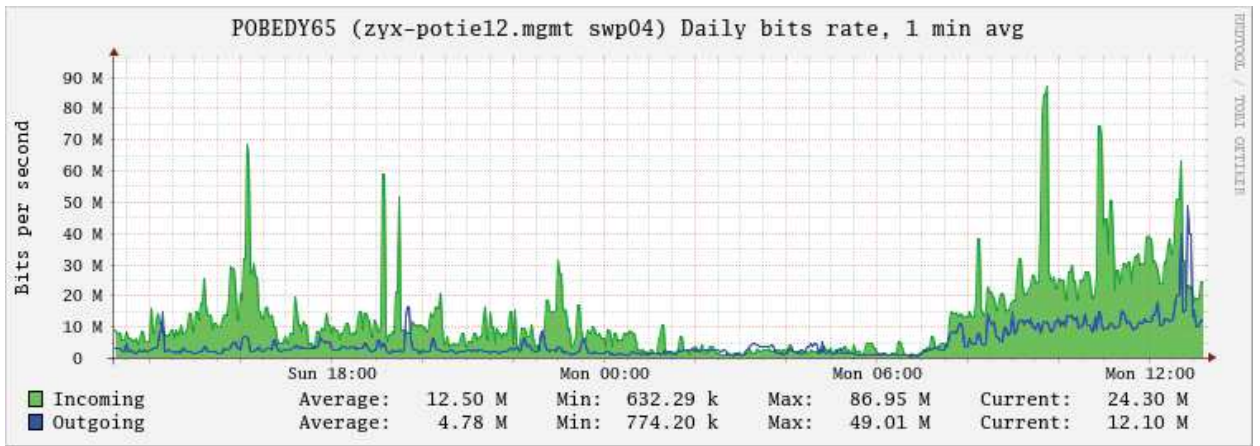
109. Мхамад Ібрагім Ахмад Альомар. Дослідження методу адаптивного управління портами пакетного комутатора [Текст] / І. А. Мхамад // Молодий вчений. — 2014. — №12. С.17-22.

110. Мхамад Ібрагім Ахмад Альомар. Збільшення корисного завантаження вузлового обладнання комп'ютерних мереж // Управління розвитком складних систем. – Вип. 21. – К.: КНУБА, 2015. – С.112 – 116.

## ДОДАТОК 1

## ТИПОВІ ВИБІРКИ ПАКЕТНОГО ТРАФІКУ НА ВУЗЛІ ІНТЕРНЕТ ДНДІАСБ





## ДОДАТОК 2

## ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. директора ДІ Державний науково-дослідний інститут автоматизованих систем в будівництві (ДНДІАСБ)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 р.

« \_\_\_\_\_ »

С.В. Басько

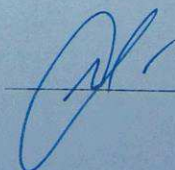
## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня кандидата технічних наук Мхамеда Ібрагіма Ахмеда Альомара у комп'ютерній мережі ДНДІАСБ

Я, що нижче підписався, начальник відділу маркетингу та ведення баз даних ДНДІАСБ Дерев'янка О.А., склав цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Мхамеда Ібрагіма Ахмеда Альомара «Удосконалення технології розподілу ресурсів пакетних мереж» використовуються комп'ютерній мережі ДНДІАСБ.

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект
Математичне представлення фрактальної моделі пакетного трафіка (п.2.1-п.2.2 дисертації)	Представлена математична модель пакетного трафіка дозволила здійснити постановку задачі з визначення статистичних властивостей цього трафіка, що необхідно для вибору методів інженерії трафіка у конкретних умовах функціонування комп'ютерної мережі ДНДІАСБ.
Схема та методика здійснення експерименту з отримання представницьких вибірок трафіка на дзеркальному порту комутатора комп'ютерної мережі ДНДІАСБ (п.2.3-2.6 дисертації)	З використанням запропонованої пошукачем схеми та методики, що базуються на запропонованій математичній моделі пакетного трафіка, була здійснена серія експериментів з отримання представницьких вибірок пакетного трафіка. Мета експериментів – на основі визначених значень параметра Херста оцінити ступінь самоподібності досліджуваного трафіка.
Результати статистичної обробки представницьких вибірок пакетного трафіку (п.4.1 дисертації)	Отримані результати статистичної обробки представницьких вибірок пакетного трафіка дозволили виявити тонку структуру активності прикладних застосувань клієнтів комп'ютерної мережі ДНДІАСБ і, завдяки чому, більш ефективно здійснювати інженерію трафіка.

Начальник відділу маркетингу та ведення баз даних ДНДІАСБ



О.А.Дерев'янка