

## МЕТОД ДИНАМІЧНОГО ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ПРОДУКТИВНОСТІ ПАКЕТНОГО КОМУТАТОРУ МІЖ ЙОГО ПОРТАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕХАНІЗМУ ПРОГНОЗУВАННЯ ПУЛЬСАЦІЙ ТРАФІКА

Національний авіаційний університет

*Запропонований метод динамічного перерозподілу потоків між портами пристрою пакетної комутації дозволяє збільшити припустиме навантаження мережного обладнання без суттєвого погіршення якості надаваних мережних послуг. Метод базується на поточній сплайн-інтерполяції у реальному часі динамічних характеристик пульсацій трафіка на портах пакетного комутатора та на адаптивному авторегулюванні смуг пропускання портів комутатора в залежності від характеристик пульсацій трафіку. Обраний спосіб поліноміальної сплайн-інтерполяції дозволяє отримати необхідну точність апроксимації реальних пульсацій трафіку. Надані приклади правил авторегулювання смугами пропускання портів комутатора, що реалізують розглянутий метод*

### **Вступ**

Обґрунтований вибір величини коефіцієнту завантаження ресурсу з урахуванням тонкої структури умов його використання має вирішальне значення у задачах оптимізації роботи комп'ютерної мережі, оскільки величина цього коефіцієнту безпосередньо впливає на довжину черг пакетів до ресурсу, на величину затримок пакетів у чергах і, за кінцевим рахунком, на якість надання мережних послуг. Тому у процесі вдосконалення роботи мережі намагаються знайти розумний компроміс у досягненні двох протилежних цілей, сутність котрих полягає у наступному. З одного боку, намагаються покращити якість обробки трафіка, тобто знизити затримки у просуванні пакетів та зменшити втрати пакетів, що, на практиці, досягається, головним чином, за рахунок резервування ресурсів каналів передавання та комутуючих пристроїв. З іншого боку, намагаються, у міру можливостей, збільшити завантаження ресурсів мережі з метою покращення економічних показників їхнього використання. Компроміс у досягненні вищезазначених цілей складає основний зміст інженерії трафіку.

Наразі вирішення вищезазначеної задачі шукали на шляхах застосування засобів та механізмів боротьби з перенаван-

таженнями у мережі [1 – 3]. Тим не менш, активне використання усіх цих механізмів, як показала експлуатаційна практика, дозволяє збільшити коефіцієнт завантаження мережного обладнання у середньому до величини 0,5 – 0,55, не більше. Тому розробка методів управління ресурсами мережі, що дозволяють забезпечити подальше збільшення завантаження висиковартісного мережного обладнання без помітного зниження якості мережних послуг, є актуальним завданням.

### **Ціль роботи**

Дослідити можливість збільшення припустимого коефіцієнту завантаження обладнання без суттєвого зниження якості обслуговування у мережах із пакетною комутацією за рахунок використання механізму адаптивного динамічного перерозподілу ресурсів мережі у процесі її функціонування за критерієм максимізації навантаження на основі використання даних, що отримуються у процесі моніторингу характеристик потоків пакетів у реальному масштабі часу. Зокрема, пропонується динамічно перерозподіляти пропускну здатність пакетного комутатора (маршрутизатору або шлюзу) між його портами в залежності від змін поточного

навантаження трафіком цих портів. Пропускна здатність комутуючого пристрою перерозподіляється між його портами пропорційно поточним величинам інтенсивностей потоків пакетів, що надходять до цих портів. Такий підхід, як свідчать результати моделювання, дозволяє збільшити коефіцієнт завантаження комутуючого обладнання у мережі у багатьох практично виникаючих ситуаціях до величин порядку 0,65–0,7.

Так, наприклад, якщо миттєва інтенсивність потоку пакетів на якомусь порту в певних межах збільшується, то цьому порту треба виділити більшу частку пропускної спроможності комутатора (звісно, за рахунок зменшення часток пропускної спроможності, що виділяються іншим портам). І навпаки, якщо потік пакетів на якомусь порту зменшується, то відповідно зменшується і частка пропускної спроможності комутатора, яка цьому порту виділяється. При цьому динаміка процесу перерозподілу за певних умов має співпадати із динамікою пульсацій трафіка на вхідних портах комутатора. Такий перерозподіл доцільно здійснювати не тільки на основі визначення поточного стану характеристик потоків пакетів, що надходять до його портів, але і шляхом використання результатів прогнозування характеру змін інтенсивностей цих потоків. Прогнозування „поведінки” потоків пакетів на портах комутатора дозволяє підвищити динамічні характеристики системи автоматичного регулювання і, за кінцевим рахунком, підвищити коефіцієнт завантаження мережного обладнання.

Вищенаведене являє собою спрощене пояснення основної ідеї адаптивного регулювання пропускних спроможностей портів комутатора. На практиці необхідно враховувати ряд умов, що є характерними для задач управління трафіковими навантаженнями: класифікація трафіка, пріоритетизація класів трафіка, механізми керування чергами тощо. Тому актуальність розробки технології спеціального управління потоками даних на портах комутуючих

пристроїв пакетної мережі не викликає сумніву, оскільки навіть поверхневий аналіз вказує на перспективність такої розробки у широкому спектрі застосувань.

Зрозуміло, що в якості об'єкту досліджень за вищевказаним напрямком доцільно вибрати найбільш вартісні елементи обладнання мережі, якими є, в першу чергу, магістральні комутатори, маршрутизатори та шлюзи, а також, в багатьох випадках, граничні (крайові) комутатори і маршрутизатори абонентського доступу. Наприклад, комутатори каналного рівня (*ATM*, *FRAME RELAY* тощо) та комутатори/маршрутизатори мережного рівня (*IP*, *IPX* тощо). Особливо ефективним є використання розглянутого методу у мережах, трафік котрих має яскраво викреслений пульсуючий характер із великими, але випадковими сплесками.

### **Основні шляхи реалізації механізмів адаптивного регулювання**

Звісні методи кондиціонування трафіку на портах комутуючого пристрою [1, 2] не можуть бути використані для вирішення задачі динамічного перерозподілу пропускної здатності комутатору між його портами. Труднощі полягають у тому, що сучасний пакетний комутатор (магістральний або крайовий) – це швидкодіюча система. Тому, для того щоб забезпечити можливість фіксації у реальному часі поточних значень його параметрів, що пов'язані із обробкою динамічних характеристик пульсацій пакетного трафіку, необхідно накопичувати та оброблювати значні обсяги даних. Це потребує значних витрат обчислювальних ресурсів. У даному випадку такими ресурсами є обсяг пам'яті у загальній довідковій службі мережі (*Directory Service*), де зберігаються різноманітні дані щодо поточного стану мережі (зокрема, дані служби *QoS*), і витрати часу на необхідну обробку цих даних. За умов прийнятних витрат вищезазначених ресурсів є сумнівним, щоб вдалося у реальному часі визначити усі необхідні для

кондиціонування трафіку параметри. Тому суттєвий інтерес являють методи швидкісної обробки трафіку, що дозволяють виконати профілювання та формування трафіку на відносно невеликих обсягах даних.

У даній роботі динамічне регулювання смуг пропускання портів комутатору пропонується виконувати на основі «проріджених» даних моніторингу характеристик потоків пакетів на його портах. Ці «проріджені» дані пропонується використати для побудови у реальному часі функціональних аналітичних залежностей, що апроксимують реальні залежності значень динамічних характеристик потоків від часу. Апроксимацію пропонується здійснювати шляхом сплайн-інтерполяції даних моніторингу трафіку (точніше, даних, що отримані як результат вимірювань динамічних характеристик потоків пакетів) на портах комутатору з використанням, наприклад, кусковополіноміальних сплайнів для неперіодичних функцій. Методи сплайн-інтерполяції детально викладені у багатьох публікаціях, що присвячені теорії функцій, зокрема у [4, 5].

### **Математична основа методу адаптивного регулювання**

Фізична природа пульсацій трафіка на портах комутатору носить випадковий характер і, на жаль, у багатьох випадках непередбачуваний характер, обумовлений нерегулярністю та непередбачуваністю генерування потоків даних на термінальних вузлах мережі [6]. Тим не менш, будь-яка комп'ютерна мережа – це фізична інерційна система. Тому при виборі методів передбачення „поведінки” потоків пакетів на портах комутатору існує можливість використати звичні методи вирішення задач прогнозування, що розроблені для фізичних систем із швидкоплинними випадковими процесами. Зокрема, в якості динамічної характеристики

(динамічної функції) випадкового процесу  $v(t)$ , «поведінку» котрого необхідно передбачити та відобразити в аналітичній формі, доцільно узяти кількість пакетів, що надходять до порту комутатору, як функції часу. Окрім цього, як буде показано далі, зручно прийняти до розгляду перші дві похідні від  $v(t)$ , тобто випадкову швидкість потоку  $b(t)=dv(t)/dt$  та випадкове прискорення потоку  $b^1(t)=d^2v(t)/dt^2$ .

Першим кроком у вирішенні задачі визначення та прогнозування „поведінки” потоку пакетів на якому-небудь із портів комутатору є апроксимація даних моніторингу значень  $v(t)$ . Таку апроксимацію пропонується виконати на основі сплайн-інтерполяції, а для інтерполяції узяти конструкцію поліноміальних сплайнів відносно неперіодичних функцій.

Як показано у [7], сплайн-підхід до задачі апроксимації у просторі  $L_2 [t_0, T_c]$  для сплайнів ступеню  $n$  та набору вузлів інтерполяції  $t_i \in [t_0, \dots, t_i, \dots, t_n]$ , де  $i = 1, 2, \dots, n$ , дає меншу похибку апроксимації у сенсі норми  $L_2 [t_0, T_c]$ , ніж розклад у ряд за багатьма іншими ортогональними базисами (Ерміта, Лагера, Чебишева і т. ін.).

Якщо б функцію  $v(t)$  було можливим безперервно диференціювати необмежену кількість разів, то у цьому випадку доцільно обрати сплайни тригонометричного виду. Проте аналіз характеру пульсацій трафіку дозволяє лише сподіватися, що  $v(t)$  можливо безперервно диференціювати не більше  $s$  разів, де значення  $s$  апіорі не є звисним і його доводиться обирати виходячи із конкретних умов застосування комутатору. У такій ситуації, як показано у [8], доцільно використовувати кусково-поліноміальні сплайни виду

$$\tilde{v}(t, s) = Q_{2s+1}(t, k), t \in [t_k, t_{k+1}], k = 0, \pm 1, \dots, K, \quad (1)$$

де  $Q_{2s+1}(t, k)$  – поліном ступеню не вище  $2s + 1$ , що визначається рівностями

$$\left. \frac{d^m Q_{2s+1}(t, k)}{dt^m} \right|_{t=t_k} = \left. \frac{d^m P_s(t, v_{t_{k_j}})}{dt^m} \right|_{t=t_k}, \quad \text{де } m=1, 2, \dots, K, \dots, s. \quad (2)$$

$$\left. \frac{d^m Q_{2s+1}(t, k)}{dt^m} \right|_{t=t_{k+1}} = \left. \frac{d^m P_s(t, v_{t_{k+1_j}})}{dt^m} \right|_{t=t_{k+1}}, \quad \text{де } m=1, 2, \dots, K, \dots, s. \quad (3)$$

У виразах (1) – (3) вважається, що сплайн має безперервні похідні ступеню  $s$ , задані вузли інтерполяції  $t_{\lambda}$  та значення функції  $v(t_{\lambda}) = v_{t_{\lambda}}$  у вузлах,  $j$  – натуральне число у діапазоні  $0 \leq j \leq s-1$ . Кожній точці  $t_{\lambda}$  надано інтерполяційний поліном  $P_s(t, v_{t_{\lambda}})$ , що побудовано за значеннями  $v(t_{\lambda_j})$ ,  $v(t_{\lambda_{j+1}})$ ,  $\dots$ ,  $v(t_{\lambda_{j+s}})$  у вузлах  $t_{\lambda_j}$ ,  $t_{\lambda_{j+1}}$ ,  $\dots$ ,  $t_{\lambda_{j+s}}$ .

Зазвичай поліном  $Q_{2s+1}(t, k)$  представляють у вигляді суми класичного інтерполяційного поліному  $P_s(t, v_{k_j})$  та поправки до нього  $R_{2s+1}(t, k)$ , тобто

$$Q_{2s+1}(t, k) = P_s(t, v_{k_j}) + R_{2s+1}(t, k). \quad (4)$$

Поправка згідно [8] представляється у вигляді

$$R_{2s+1}(t, k) = (t_{k+1} - t_k)^{s+1} v(t_{k-j}, t_{k-j+1}, \dots, t_{k-j+s+1}) q_{2s+1}\left(\frac{t-t_k}{t_{k+1}-t_k}, k\right), \quad (5)$$

де  $v(t_{k-j}, t_{k-j+1}, \dots, t_{k-j+s+1})$  – різнисне відношення порядку  $s+1$  та

$$q_{2s+1}(T, k) = \left(\frac{t_{k+s-j+1} - t_{k-j}}{t_{k+1} - t_k}\right) \sum_{r=0}^s \left\{ \left[ \prod_{i=1}^s \left( T - \frac{t_{k-j+i} - t_k}{t_{k+1} - t_k} \right) \right]_{T=1}^{(r)} \right\} \lambda_r(T), T = \frac{t-t_k}{t_{k+1}-t_k}, \quad (6)$$

$$\lambda_r(T) = \frac{T^{s+1} (T-1)^r}{r! s!} \sum_{m=0}^{s-r} (-1)^m \frac{(s+m)!}{m!} (T-1)^m, \quad (7)$$

$[K]_{T=1}^{(r)}$  означає похідну по  $T$  порядку  $r$ , що обчислена при  $T=1$ .

Якщо на часовому відрізку

$[t_j, t_{j+1}] \subset [t_0, T_c]$   $0 \leq j \leq N-1$  є звісними  $v(t)$  в  $(n+1)$   $i$ -й точці, а функція

$v(t) \in C^n [t_j, t_{j+1}]$ , то інтерполяційна формула представляється у вигляді поліному Лагранжа ступеню  $n$ .

$$[t_j, t_{j+1}] = [t] [t_j, t_{j+1}] = [t_{n-i}, t_{n-i+m+1}] \subset [t_0, T_c], \quad 0 \leq n \leq N-1, 0 \leq i \leq m.$$

І далі будемо вважати, що функція  $v(t)$  на цьому часовому відрізку має обмежену похідну порядку  $m+1$ . Тоді похибка похідних від  $n(t)$  на відрізках

Похибка інтерполяційної формули у  
 нями невязки  $R_n(t) = \|v(t) - \tilde{v}(t)\|$

а часовому відрізку  $[t_j, t_{j+1}]$  як

$$R_n(t) \leq \sup_{t \in [t_j, t_{j+1}]} \left| \frac{dv^{n+1}(t)}{dt^{n+1}} \right| \cdot \frac{|\omega_n(t)|}{(n+1)!}, \quad \text{де } \omega_n(t) = \prod_{i=0}^n (t-t_i). \quad (8)$$

Інтерес викликає також оцінка похибки похідних від динамічної характеристики потоку пакетів. Для цього, маючи на увазі [8], перепозначимо розглядаємий часовий відрізок наступним чином:

$[t_n, t_{n+1}] \subset [t_0, T_c]$  визначається наступним співвідношенням [9]:

$$\left| \frac{d^s}{dt^s} v(t) - \frac{d^s}{dt^s} \tilde{v}(t) \right| \leq \text{const} \frac{(t_{n-i+m+1} - t_{m-i})^{m+1}}{(t_{n+1} - t_n)^2} \times \max_{t_{n-i} \leq t \leq t_{n-i+m+1}} \left| \frac{d^{m+1}}{dt^{m+1}} v(t) \right|, \quad (9)$$

де  $s = 0, 1, K, m; 0 \leq i \leq m$ .

### Схема реалізації механізмів регулювання

З урахуванням вищенаведеного представляється наступна схема динамічного перерозподілу пропускної здатності комутуючого пристрою між його портами. Першим обов'язковим елементом процесу авторегулювання смуг пропускання портів комутатору є моніторинг потоків пакетів на

усіх його портах у межах спостережуваного часового відрізка  $[t_0, T_c]$ .

Моніторинг здійснюється щодо динамічної характеристики потоку пакетів на кожному із портів. Процес моніторингу, що відображений на верхньому рядку рис.1, являє собою ітеративну процедуру, що послідовно виконується у часі і складається із кінцевої кількості кроків.

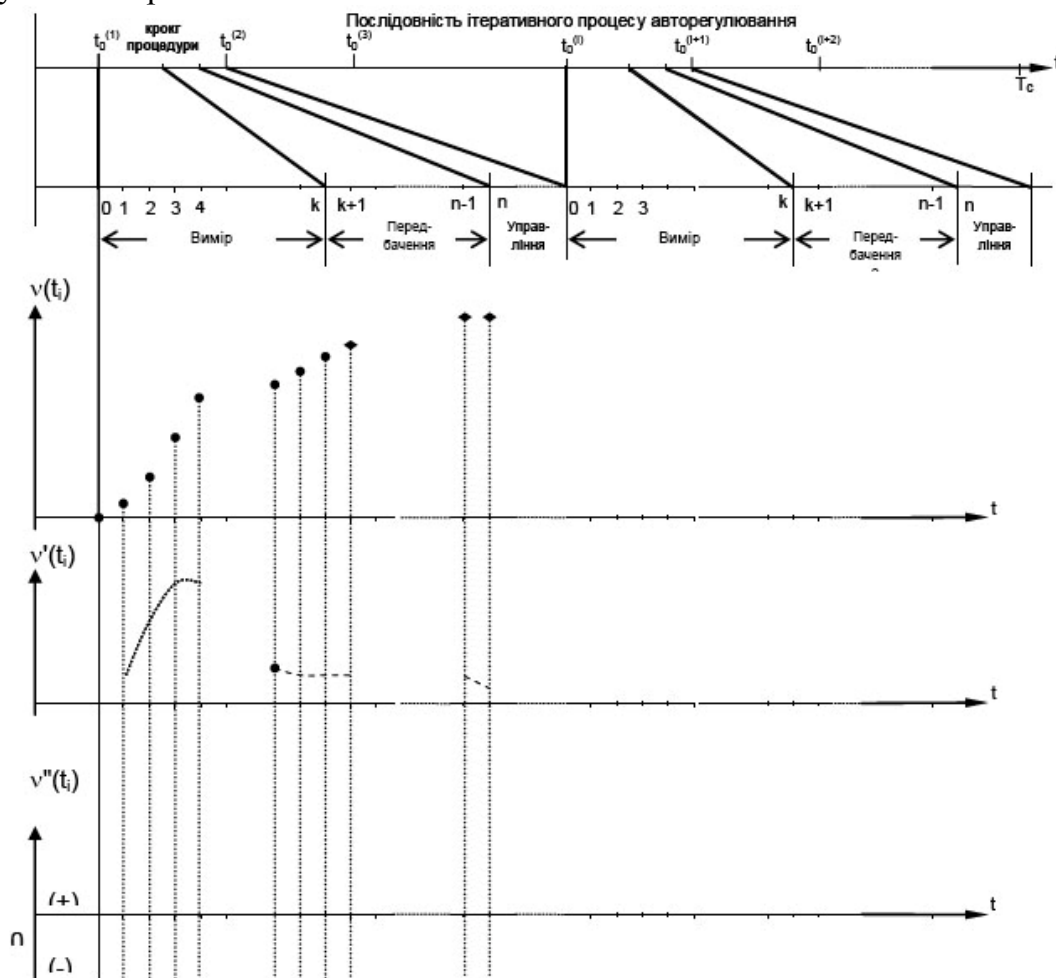


Рис.1. Ілюстрація процедури реалізації методу динамічного перерозподілу пропускної здатності комутатору між його портами

Перший крок процедури починається у момент  $t_0^{(1)}$ , другий крок – у момент  $t_0^{(2)}$ ,  $i$ -ий крок – у момент  $t_0^{(i)}$  і т.д. У свою чергу, з метою здійснення поліноміальної сплайн-інтерполяції тривалість кожного кроку процедури розбивається на ще більш менші часові інтервали  $1, 2, 3, \dots$ ,

$K, \dots, n$ , де  $K$  – кількість вимірювань функції  $v(t)$  на  $i$ -ому кроці, а  $n$  – загальна кількість вузлів інтерполяції (що співпадає із ступенем інтерполяційного поліному). Іншими словами, із певним вельми малим інтервалом часу на протязі тривалості кожного кроку ітеративної процедури,

вибір котрого виконується виходячи із вищерозглянутих умов, на кожному із портів комутатору послідовно у часі береться  $K$  відліків «миттєвих» значень динамічної характеристики потоку  $v(t)$  (див. другий рядок зверху на рис.1). І далі на базі отриманих вимірних даних виконується апроксимація випадкової функції  $v(t)$  розглянутим вище методом поліноміальної сплайн-інтерполяції. Береться поліном  $n$ -ого ступеню. Значення відліків для перших  $K$  вузлів інтерполяції вимірюються, а значення інших  $(n-K)$  вузлів передбачаються. Потім на другому кроці ітеративної процедури виконується апроксимація на наступних  $K$  вузлах інтерполяції із передбаченням «поведінки» потоку на  $(n-K)$  вузлах і т.д. аж до моменту часу  $T_c$ . Як бачимо із рис.1, на кожному кроці перші  $K$  часових проміжків пов'язані із отриманням даних щодо реальної «поведінки» функції  $v(t)$ , а наступні часові проміжки, що йдуть після  $K$ -го, у кількості  $(n-K)$  пов'язані із прогнозуванням «поведінки» функції  $v(t)$ . Після накопичення необхідних даних (тобто, після закінчення  $K$ -го відліку динамічної характеристики) на кожному кроці ітеративної процедури виконується поліноміальна апроксимація та передбачення розглянутим вище методом. Як ре-

зультат знаходиться у аналітичній формі прийнятне наближення до дійсної залежності динамічної характеристики кожного із потоків від поточного часу.

В якості критерію точності інтерполяції доцільно використати критерій  $\mathcal{E}_n$  – обмеженої нев'язки:

$$p[v(t), P_m(t)] \leq \mathcal{E}_n, \quad t \in [t_n, t_{n+1}], \quad (10)$$

де  $v(t)$  – значення динамічної характеристики потоку;  $P_m(t)$  – поліноміальний інтерполянт динамічної характеристики потоку;  $p[\cdot]$  – задана відстань у відповідному метричному просторі. Критерій  $\mathcal{E}_n$  – обмеженої нев'язки запишемо у вигляді

$$\sup_{t \in [t_n, t_{n+1}]} |v(t) - P_m(t)| \leq \mathcal{E}_n. \quad (11)$$

Інтерполяційний поліном  $P_m(t)$  обирається із мінімальним ступенем, тобто.  $m = m_{\min}$ . Вибір здійснюється за наступним критерієм:

$$m_{\min} = \arg \min P_n(t). \quad (12)$$

Увівши нове позначення

$$M_m = \sup_{t \in [t_n, t_{n+1}]} \left| \frac{d^m}{dt^m} v(t) \right|, \quad (13)$$

та використовуючи співвідношення (8) замість (11), критерій  $\mathcal{E}_n$  – обмеженої нев'язки записують у вигляді

$$\sup_{t \in [t_n, t_{n+1}]} |v(t) - P_m(t)| \leq \frac{M_{m+1}}{(m+1)!} \sup_{t \in [t_n, t_{n+1}]} |\omega_m(t)| \leq \mathcal{E}_n. \quad (14)$$

Задаючись значенням  $\mathcal{E}_n$  із (14) можливо шляхом обчислення підібрати такі значення  $m$  і  $M_{m+1}$ , за яких буде забезпечуватися потрібна точність інтерполяції. При цьому значення кроку  $t_{i+1} - t_i$ ,  $i=1, 2 \dots K$  оби-

рають таким чином, щоб зменшити значення похибки інтерполяції, а саме, щоб вузли інтерполяції співпадали із коренями багаточлена Чебишева. У цьому випадку

$$t_i = \frac{t_n + t_{n+1}}{2} - \frac{t_{n+1} - t_n}{2} \cos\left(\frac{2i-1}{2m} \pi\right), \quad i=1, 2, K, m, \quad (15)$$

і для оцінки зверху величини  $\omega_{m+1}(t)$  можливо скористатися наступною формулою:

$$\sup_t |\omega_m(t)| \leq 2 \left( \frac{t_{n+1} - t_n}{4} \right)^m. \quad (16)$$

Під час опрацювання у реальному часі швидкоплинних динамічних характеристик потоків доводиться фіксувати значні

обсяги даних, що може суттєво завантажити обчислювальні ресурси комутатору. Тому у процесі апроксимації доцільно використати запропонований у [10] спосіб прорідження даних, що дозволяє без погіршення точності інтерполяції суттєво скоротити обсяги необхідних вимірювань.

Розглянемо ситуацію, коли значення певної функції  $v(t)$  у моменти часу  $t_{r+s}$  фіксуються та запам'ятовуються, а проміжні  $v(t_{r+s})$ , відновлюються відповідно до якоїсь інтерполяційної формулі, причому  $r = 0, 1, \dots, R$ ,  $s = 0, 1, \dots, s_{\max}$ . Спочатку за  $(s_{\max} + 1)R + 1$  моментів часу  $R + 1$  значень функції фіксуються та запам'ятовуються, а потім  $s_{\max}R$  тах значень відновлюються наближено.

Сумарна похибка може бути визначена у рамках одної із двох можливих метрик

$$\varepsilon_{s1} = \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{s=0}^{s_{\max}} |P_m(t_{r+s}) - v(t_{r+s})|, \quad (17)$$

$$\varepsilon_{s2} = \left\{ \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{s=0}^{s_{\max}} |P_m(t_{r+s}) - v(t_{r+s})| \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (18)$$

Далі після знаходження апроксимуючої функції на кожному кроці ітеративної процедури знаходяться наближення в аналітичній формі для першої та другої похідних від отриманого аналітичного виразу, що апроксимує  $v(t)$ , тобто знаходяться наближені вирази для швидкості потоку пакетів  $b(t)$  та для прискорення потоку  $b'(t)$ . Значення цих похідних від функції  $v(t)$  у вузлах інтерполяції, що отримуються на кожному кроці ітераційної процедури, слід вважати вичерпною інформацією для управління регуляторами служби *QoS* (*Quality of Service*). Нижні три рядки на рис.1 відображають відповідно відліки випадкових функцій  $v(t)$ ,  $b(t)$  та  $b'(t)$  на першому кроці ітеративної процедури. Як коректно розпорядитися цією інформацією у цілях раціонального перерозподілу пропускної здатності комутатору між його портами? Які з цією метою синтезувати правила управління механізмами регулювання? Відповіді на ці запитання залежать від багатьох факторів, аналіз котрих вихо-

дить за межі цієї публікації. У принципі, знання про значення похідних від динамічних характеристик потоків пакетів у вузлах інтерполяції на кожному кроці ітеративної процедури і для кожного із портів комутатору дозволяє здійснити постановку та вирішення задачі синтезу оптимальної системи авторегулювання механізмом перерозподілу пропускної здатності комутатору, наприклад на основі методу динамічного програмування Р. Беллмана. Проте на практиці існує можливість задовольнитися більш простими, хоч і менш ефективними, правилами управління механізмами регулювання.

Оцінки похідних сплайнінтерполяції динамічної характеристики потоку  $v(t)$  згідно (9) у випадку постійного кроку  $t_{n+1} - t_n = (T_c - t_0) / N = h$  гарантують схо-

димість  $\frac{d^s}{dt^s} \tilde{v}(t)$  до  $\frac{d^s}{dt^s} v(t)$  з порядком  $h^{m+1+s}$ ,  $s = 0, 1, K, m$  [9].

Розповсюджуючи підхід на основі критерію  $\mathcal{E}_n$  – обмеженої нев'язки на похідні сплайн-інтерполяції можливо представити критерій точності у наступному вигляді:

$$h^{m+1+s} \leq \varepsilon_n^{[s]}, t \in [t_n, t_{n+1}], s = 0, 1, K, m. \quad (19)$$

Послідовно оцінюючи значення  $\varepsilon_n^{[s]}$  для обраних значень  $s$ , із (19) можливо шляхом обчислень підібрати таке значення  $h^{m+1+s}$ , при котрому буде забезпечуватися висока точність похідних сплайнінтерполяції. При цьому значення кроку  $t_{n+1} - t_n$  будемо обирати таким чином, щоб зменшити значення похибки похідних сплайн-інтерполяції, змінюючи, за необхідністю, представлення

часового інтервалу  $[t_0, t] = \bigcup_{n=0}^{N-1} [t_n, t_{n+1}]$ , та по-

вторюючи усю розглянуту вище послідовність дій. У підсумку можливо визначити поліноміальну сплайнінтерполяцію, якій буде притаманна висока точність апроксимації як самої динамічної характеристики  $v(t)$ , так і її похідних.

В якості прикладу відносно простої схеми регулювання, що використовує інформацію тільки про значення другої похідної від динамічної характеристики потоків на портах комутатору, але із використанням знань щодо «майбутньої поведінки» цих потоків, можливо запропонувати наступне. Щоб використати усю інформацію про прискорення потоку на  $i$ -ому порті, як виміряну так і прогнозовану, на  $i$ -ому кроці ітераційної процедури регулювання, проінтегруємо значення отриманого наближення для другої похідної від динамічної характеристики цього потоку у розрізі усіх  $n$  вузлів інтерполяції на розглянутому кроці ітерації:

$$I_r = \int_{t_i^{(i)}}^{t_{i+1}^{(i)}} v_r''(t_i) dt, \quad (20)$$

де  $t_i$  – вузли інтерполяції,  $t_i \in [t_0^{(i)}, t_1^{(i)}, t_2^{(i)}, \dots, t_k^{(i)}, \dots, t_n^{(i)}]$ ,  $r$  – номер порту комутатору,  $(i)$  – номер кроку ітераційної процедури.

Якщо виявиться, що  $I_r > 0$ , то можливо стверджувати, що на  $r$ -ому порті комутатору у середньому існує тенденція до збільшення інтенсивності потоку пакетів (при цьому враховуються як реально спостережена, так і прогнозована поведінка потоку). Якщо виявиться, що  $I_r < 0$ , то можливо стверджувати, що на  $r$ -ому порті комутатору у середньому існує тенденція до зменшення інтенсивності потоку пакетів. Якщо  $I_r = 0$ , то інтенсивність потоку у середньому не змінюється. З урахуванням вищевказаного можливо запропонувати наступне правило регулювання механізмом перерозподілу. Якщо на якомусь  $r$ -ому порті виявиться  $I_r < 0$ , а на цьому ж кроці ітераційного процесу на іншому, наприклад,  $p$ -ому порті виявиться  $I_p < 0$ , то напередодні обумовлена частка ширини смуги  $r$ -го порту віднімається від цього порту та добавляється до ширини смуги  $p$ -го порту. У будь-якому іншому випадку перерозподіл ресурсу комутатора не виконується. Звернемо увагу, що безпосередньо механізм перерозподілу виконується штатними засобами обладнання, яке реалізує пев-

ну телекомунікаційну технологію. Найбільш розвинутий цей механізм у технології АТМ [3].

Можливо запропонувати й інше правило регулювання. Якщо обчислене значення інтегралу від  $b^1(t)$  на одному із портів комутатору виявилось із позитивним знаком та досягло наперед визначеного порогового рівня за умов, коли на інших портах комутатору інтегральні значення прискорення потоків не претерпіли суттєвих змін, то у комутаторі активізується механізм перерозподілу пропускної здатності у напрямі збільшення смуги пропускання того порту, на котрому зафіксовано збільшення інтегрального значення другої похідної від динамічної характеристики потоку. Точніше, механізм перерозподілу активізується у момент досягнення визначеного для цієї похідної порогового рівня. Порогові рівні, у свою чергу, визначаються експериментальним шляхом у процесі функціонування комутатору з урахуванням реальних умов його експлуатації. У протилежному випадку, коли інтегральне значення другої похідної буде суттєво зростати, Але з мінусовим знаком, то механізм перерозподілу почне зменшувати ту частку пропускної здатності комутатору, котра тимчасово «закріплена» за даним портом, на користь інших портів.

Система управління комутатором на кожному кроці ітеративної процедури повинна встигати виконати, перш ніж почнеться наступний крок процедури, всі необхідні обчислення, пов'язані з побудовою необхідних аналітичних виразів, їх математичними перетвореннями і з генерацією сигналів дії на виконавчі механізми служби *QoS* відповідно до прийнятих правил адаптивного регулювання пропускної спроможності комутатора. Таке «вистигання» повинно досягатися за рахунок раціонального вибору необхідної точності апроксимації даних моніторингу потоків пакетів на портах комутатора, мірі інтерполянта і параметрів процедури проріджування даних.



### **Висновки**

Запропоновано метод динамічного перерозподілу потоків між портами пристрою пакетної комутації, що дозволяє збільшити припустиме завантаження мережного обладнання без суттєвого погіршення якості надання мережних послуг.

Метод засновано на поточній сплайнінтерполяції у реальному часі динамічних характеристик пульсацій трафіку на портах пакетного комутатора та на адаптивному авторегулюванні смуг пропускання портів комутатора в залежності від характеристики пульсацій трафіку. Обраний спосіб поліноміальної сплайнінтерполяції із використанням поліному ступеню  $n$  дозволяє шляхом цілеспрямованого вибору вузлів інтерполяції, варіюванням довжини часового інтервалу, на котрому формується інтерполяційний поліном, та ступенем інтерполянту отримати необхідну точність апроксимації реальних пульсацій трафіку. В якості критерію точності сплайн-інтерполяції пропонується використати критерій  $\varepsilon$  обмеженої нев'язки. Вибір управлінських впливів на виконавчі механізми системи авторегулювання базуються не тільки на апостеріорних знаннях „поведінки” потоків пакетів на портах комутатора, але і на результатах передбачення „поведінки” потоків у майбутньому. Для скорочення обсягу оброблюваних даних в процесі інтерполяції запропоновано використати звісні методи прорідження експериментально отриманих даних. Наведено приклади правил авторегулювання смугами пропускання портів комутатора, котрі можуть знайти застосування на практиці.

Впровадження запропонованого методу у практику керування трафіковими навантаженнями дозволить суттєво підвищити коефіцієнт використання мережного

обладнання без помітного погіршення якості обробки мережних навантажень та надання телекомунікаційних послуг.

### **Список літератури**

1. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 2-е изд. – Санкт-Петербург: Питер, 2003. – 864 с.
2. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Новые технологии и оборудование IP-сетей. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2001. – 512 с.
3. *Назаров А.Н., Симонов М.В.* АТМ: технология высокоскоростных сетей. – Москва: Эко-Трендз, 1997. – 232 с.
4. *Корнейчук Н.П.* Сплаины в теории приближений. – Москва: Наука, 1984. – 352 с.
5. *Алберг Дж.* Теория сплайнов и её приложения. – Москва: Мир, 1972. – 316 с.
6. *Корнышев Ю.Н., Пшеничников А.П., Харкевич А.Д.* Теория телетрафка: Учебник для вузов. – Москва: Радио и связь, 1996. – 272 с.
7. *Кашин Б.С., Саакян А.А.* Ортогональные ряды. – Москва: Наука, 1984. – 496 с.
8. *Рябенский В.С.* Введение в вычислительную математику: Учебное пособие для вузов. – Москва: Физматлит, 1994. – 336 с.
9. *Каханер Д., Моулер К., Нэш С.* Численные методы и математическое обеспечение. – Москва: Мир, 1998. – 575 с.
10. *Аджемов А.С., Синева И.С.* Метод аналогово-цифровых преобразований на основе сплайн-интерполяции. – Москва: Электросвязь, 1998. – №2. – С. 37–39.
11. *Клименко В.П.* Основные принципы кантиона // Кибернетика, 1990. – №2. – С. 49–56.