

Торошанко О. С. Державний університет телекомунікацій, Київ

### БАГАТОКРОКОВА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ВИЯВЛЕННЯ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ

**Анотація:** Запропонований алгоритм оптимального управління перевантаженнями телекомунікаційної мережі з використанням функції чутливості і динамічних нейронних моделей передбачення. Алгоритм базується на прогнозуванні і керуванні активністю джерел повідомлень. Розглянуто дві нейронні архітектури для прогнозування системного виходу: модель зі спільною та виокремленою обробкою трафіку з різною пріоритетністю.

**Ключові слова:** функція чутливості, перевантаження, активність джерел повідомлень, нейронна модель прогнозування, пріоритетність трафіку, кругова затримка

Toroshanko O. S. State University of Telecommunications, Kyiv

### MULTI-STEP MODEL FOR PROGNOSTICATION AND DETECTION OF TELECOMMUNICATION NETWORK OVERLOAD

**Annotation:** As a result of the conducted research, a scheme of multi-step prediction of the state of the queue is proposed and substantiated. The paper uses a general theory of sensitivity with indirect feedback. The results of this theory have been used to build an indirect feedback control system that saves channel and computing resources. Traditional approaches to solving the problem of congestion management are based on the control of the quantitative value of the queue length of the input and output flows of the network. The congestion identifier can only indicate that there is a congestion on the connection, but not the location or cause of the congestion. A simple increase in buffer capacity causes an increase in the number of packets destined for retransmission. This solution causes unacceptable increases in service delays.

The paper presents a new method of optimal control of congestion of a telecommunication network using the sensitivity function and dynamic neural prognostication models. The proposed algorithm is based on predicting and managing the activity of message sources. Prognostication models are designed to manage circular delays in the data transfer process. Two neural architectures are considered for predicting system output: a model with shared and separate processing of traffic with different priority. The models considered provide a further understanding of the possibilities and limitations of the proposed methods for managing neural prognostication. The proposed solutions are based on the use of advanced neural network architecture, so the important task is to develop algorithms for learning neural network for dynamic data transfer processes.

**Keywords:** sensitivity function, congestion, activity of message sources, neural prediction models, traffic priority, circular delay

Торошанко А. С. Государственный университет телекоммуникаций, Киев

### МНОГОШАГОВАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ВЫЯВЛЕНИЯ ПЕРЕГРУЗКИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

**Аннотация:** Предложен алгоритм оптимального управления перегрузками телекоммуникационной сети с использованием функции чувствительности и динамических нейронных моделей прогнозирования. Алгоритм базируется на прогнозировании и управлении активностью источников сообщений. Рассмотрены две нейронные архитектуры для предсказания системного выхода: модель с общей и выделенной обработкой трафика с разной приоритетности.

**Ключевые слова:** функция чувствительности, перегрузка, активность источников сообщений, нейронная модель предсказания, приоритетность трафика, круговая задержка

© Торошанко О. С. 2019

## 1. Вступ

Згідно визначенням, яке наводиться в [1–3] перевантаження – це втрата даних користувачем, спричинена збільшенням навантаження в мережі. Управління перевантаженням можна визначити як набір механізмів, що запобігають або зменшують таке погіршення. Перевантаження має значний вплив на ключові показники ефективності телекомунікаційної мережі і якість обслуговування користувачів.

Точність передбачення перевантаження та управління потоком даних на основі зворотного зв'язку у високошвидкісних комп'ютерних мережах в значній мірі залежить від затримок передачі даних між мережевими вузлами зв'язку. Внаслідок цього відповіді команд управління вступають в силу в межах мережі після деякої затримки, а керуюча інформація, отримана в джерелах даних чи мережових точках доступу, може виявитись застарілою [1].

Тому розробка ефективного механізму управління перевантаженнями є досить важливою і складною задачею, що обумовлює актуальність досліджень в даному напрямку.

## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В роботах [4, 5] для рішення задач управління перевантаженнями в телекомунікаційних мережах розглянуто використання математичного апарату аналізу чутливості складних систем. Рекомендації, отримані в цих роботах, мають здебільшого загальний характер. Їх використання потребує нових нетрадиційних підходів до розв'язання проблеми в цілому, оснований на застосуванні методів штучного інтелекту.

У фундаментальній роботі [6] визначена категорія чутливості складної системи, запропоновані логарифмічні функції та математичні показники чутливості. Викладені результати мають високий ступінь абстракції і строгості математичного аналізу, однак використання їх як інструментарію прикладного аналізу технічних систем досить ускладнене.

Одним із поширених способів запобігання перевантаженням шляхом є збільшення об'єму пам'яті вхідних буферів [7]. Як логічний наслідок збільшується кількість необроблених пакетів, а також час очікування їх обробки, перевищення допустимих норм тривалості тайм-ауту, що призводить до зниження корисної пропускну здатності мережі. Зазвичай, це може спричинити виникнення лавинного процесу: переповнення буфера призводить до втрати пакетів, які доведеться передавати повторно або навіть кілька разів. Обчислювальний вузол маршрутизатора-відправника отримує надлишкове паразитне завантаження, що може призвести до збільшення ризику перевантаження. Ця проблема в літературі відома як розбухання буферу (Bufferbloat) і в роботі [7] не розглядалась.

У роботі [8] запропонований алгоритм активного розподілу спроб одночасного доступу до слоту з рівномірним часовим розподілом. В сучасних телекомунікаційних мережах розподіли потоків заявок далекі від рівномірного, тому отримані в даній роботі асимптотичні оцінки можуть не відповідати дійсності і приводити до невиправдано оптимістичних висновків. Реалістичні оцінки можна отримати при застосуванні нейромережних моделей, які мають адаптуватися під стрибки навантаження та варіації імовірнісних розподілів потоків заявок. У даній роботі зроблено спробу розв'язання цих проблем.

## 3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є вдосконалення і розробка прогностичних багатокрокових методів контролю і запобігання перевантаження в телекомунікаційній мережі на основі систем штучного інтелекту і нейронних систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- дослідити моделі системи керуванням перевантаженнями зі спільною та виокремленою обробкою трафіку з різною пріоритетністю
- розробити і обґрунтувати схему багатокрокового передбачення стану черги і загрози перевантаження на основі нейронної моделі.

#### 4.1. Постановка задачі дослідження

Ефективним способом керування потоком даних і зменшення затримки інформації зворотного зв'язку є використання технології передбачення на основі нейронних мереж та функції чутливості ключових показників ефективності [9, 10].

Підхід керування виглядає наступним чином: рівень завантаження мережі контролюється через шляхом аналізу певних порогів вхідних і вихідних черг з об'єктом управління деякого порогу  $Q$ . На основі різниці між поточним (в момент часу  $t$ ) значенням довжини черги  $G(t)$  і  $Q$ , датчик перевантаження на основі результатів розрахунків періодично коригує швидкість прийому інформації вузлом-отримувачем. В свою чергу, джерела трафіку зменшують швидкість передачі даних до рівня, дозволеного контролером. Вибір встановленого значення порогу  $Q$  відображає компроміс між значенням затримки пакетів, втрати пакетів, втрати пропускної здатності джерел трафіку.

В нашому дослідженні пропонується розвиток багатокрокового методу передбачення, що використовується для керування станом мережевої черги, в якій передбачення робиться, з допомогою нейронних мереж. Аналізується можливість використання нейронних мереж і прогностичних методів для вирішення проблем управління перевантаженням на основі зворотного зв'язку.

Більшість схем керування перевантаженням на основі нейронних мереж, запропоновані в літературі, не враховують ефект затримки контуру управління в розробці алгоритмів керування, так як моделі стають занадто громіздкими і не піддатливими до розуміння. Часто такі моделі супроводжуються необхідністю вирішенням задач підвищеної обчислювальної складності, потребують суттєвих часових затрат, що призводить до значних, а часом і неприйнятних, затримок управляючої інформації [3, 10, 11].

#### 4.2 Моделі управління перевантаженнями

Розглянемо структури управління перевантаженнями при обслуговуванні трафіка з низьким пріоритетом на послуги в комп'ютерній мережі. Трафік з низьким пріоритетом буде використовувати доступну смугу пропускання, яка існує незалежно від смуги пропускання трафіка більш високого пріоритету. Для трафіка вищого пріоритету частина смуги пропускання використовується миттєво без очікування. Трафік з низьким пріоритетом має доступ до повної смуги пропускання тільки тоді, коли трафік більш високого пріоритету не чекає передачі. Такий підхід дозволяє покращити ефективність використання каналу, не впливаючи на якість обслуговування трафіку високого пріоритету. Джерела з низьким пріоритетом повинні постійно пристосовувати свої швидкості для зміни в часі пропускної здатності. Така схема управління перевантаженням забезпечує шляхи для динамічного оцінювання рівня доступних ресурсів, залишених невикористаними в мережі при наявності трафіку високого пріоритету. Функції оцінки та розподілу (або спільного використання ресурсів) для обчислення швидкості кожного окремого джерела засновані на використанні нейронної мережі для контролю рівня заповнення буферної пам'яті та черги трафіку з низьким пріоритетом. Буфер мережевого вузла, виділений для трафіка з низьким пріоритетом обслуговування, використовується для того, щоб отримати кращі статистичні дані обробки даних в мережі.

Розглянемо модель управління, де до мережевого вузла з різних напрямків надходить трафік з різними вимогами на обслуговування. Нехай ці вимоги відображені в наступних класах пріоритетності:  $P_0$ ,  $P_1$  і  $P_2$ , з яких клас  $P_0$  має найвищий пріоритет,  $P_2$  – найнижчий. Для цього прикладу, на мережевому вузлі організовані три черги, призначені вказаним трьома типам трафіка.

На рис. 1. показана модель системи керування перевантаженням зі спільною обробкою трафіку з різною пріоритетністю. Вертикальна пунктирна лінія відображає спільне керування

швидкістю надходження пакетів з урахуванням узагальненого значення порогу  $Q_{\Sigma}$  для всіх видів трафіку з класами пріоритетності:  $P_0$ ,  $P_1$  і  $P_2$ .

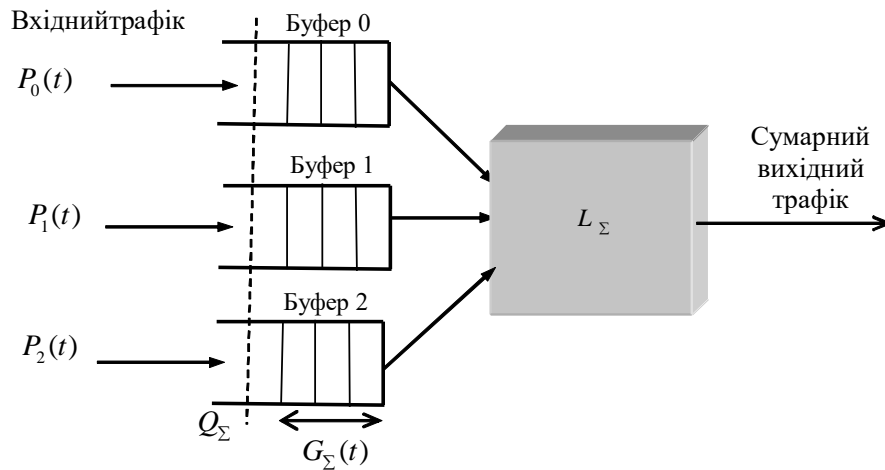


Рис. 1. Модель системи керуванням перевантаженням зі спільною обробкою трафіку з різною пріоритетністю

Для такої моделі сумарний вихідний трафік формується із умови аналізу і врахування загальної ємності  $L_{\Sigma}$  вихідної ланки вузла.

На рис. 2 показана модель системи керуванням перевантаженням з виокремленою обробкою трафіку з нижчою пріоритетністю.

Сервер направляє пакети в буфери (черги) відповідно до їх пріоритетів  $P_0$ ,  $P_1$  і  $P_2$ . Алгоритм управління швидкістю повинен обчислити доступну пропускну спроможність, залишену трафіками  $P_0$  і  $P_1$  (тобто, трафіками вищого пріоритету).

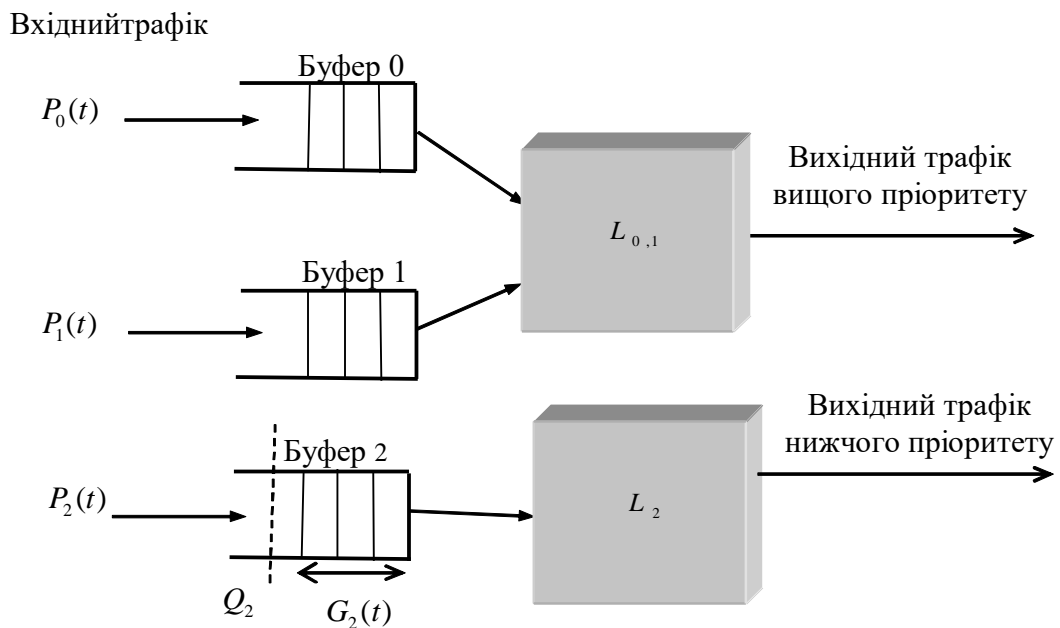


Рис. 2. Модель системи керуванням перевантаженням з виокремленою обробкою трафіку з нижчою пріоритетністю

Для управління перевантаженням даного мережевого вузла використовуються наступні параметри і змінні черги з пріоритетом  $P_2$ :

$G_2(t)$  – кількість пакетів з пріоритетом, очікуваних на видачу в час  $t$ ;

$Q_2(t)$  – поріг черги в час  $t$ , зазвичай  $Q_2(t) = Q_2 = \text{const}$ ;

$N_2(t)$  – кількість з'єднань низького пріоритету ( $P_2$ ), встановлених через вузол в час  $t$

$L_\Sigma$  – загальна ємність вихідної ланки вузла.

Вихідний трафік вищих класів пріоритетності використовує пропускну смугу вузла поза чергою, використовуючи ємність вихідної черги  $L_{0,1}$ . Управління і контроль перевантаженням здійснюється тільки для черги з нижчим пріоритетом (буфер 2) на основі аналізу порогу  $Q_2$  і довжини черги  $G_2(t)$  найнижчого пріоритету.

На рис. 3 представлена структурна схема системи прогнозування і виявлення перевантаження, побудована на основі нейронної мережі з використанням функції чутливості ключових параметрів ефективності – продуктивності (пропускну здатності) телекомунікаційної мережі.

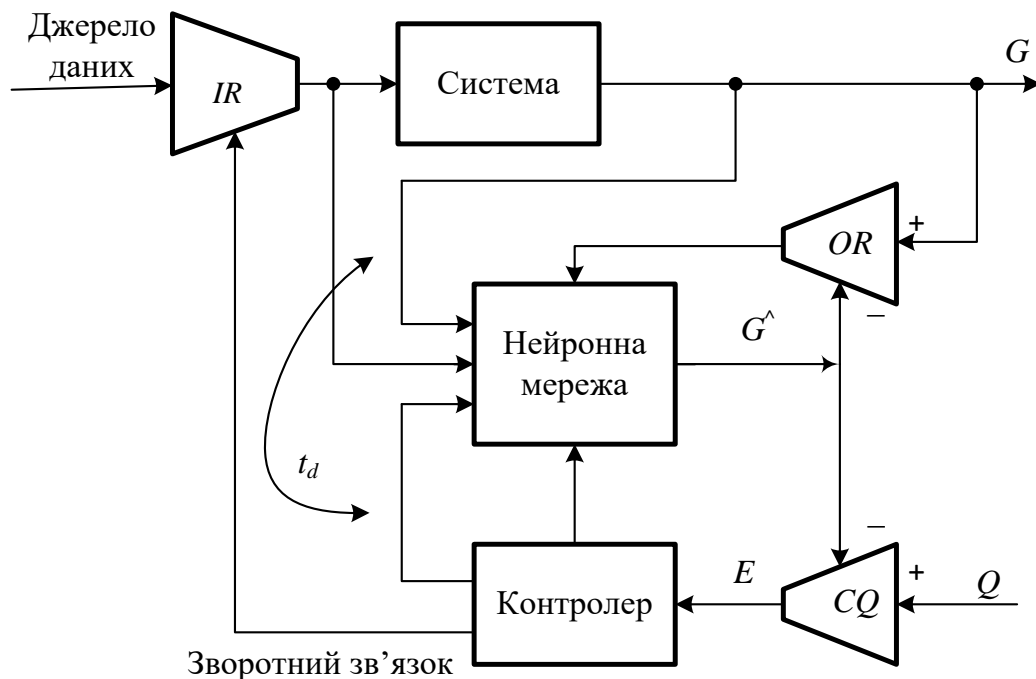


Рис. 3. Схема керування перевантаженням із замкненим круговим контуром

Система побудована по схемі із замкненим круговим контуром зворотного зв'язку [1, 12]. Регулювання швидкості вхідного потоку системи (швидкості заповнення вхідної черги) здійснюється на пристрої  $IR$  (Input Regulator). Регулювання і контроль довжини черги вихідного потоку здійснюється на пристрої  $OR$  (Output Regulator) із врахуванням поточної  $G$  і прогнозованої  $G^{\wedge}$  довжини вихідної черги.

Прогнозоване значення вихідної черги, як ключового показника ефективності, формується прогнозуючою схемою управління (рис. 4), яка реалізована на основі нейронної мережі і контролера із врахуванням поточного значення величини черги. Пристрій  $CQ$  (Control Queue) відслідковує величину  $E$  – відхилення поточного значення величини черги від її порогового (граничного) значення  $Q$ . Вхідний шар нейронної мережі здійснює обробку

параметрів вхідних і вихідних трафіків поточних і попередніх потоків, передбачуваного (прогнозованого) вхідного потоку з врахуванням відхилення від порогового значення  $Q$  вихідної черги.

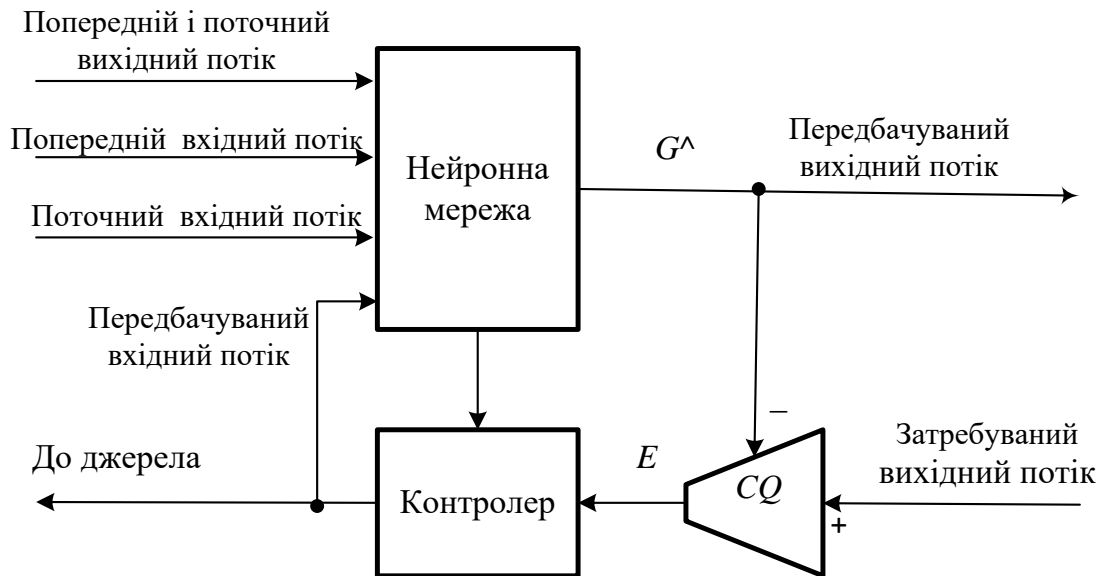


Рис. 4. Прогнозуюча схема управління

Для створення математичної моделі, яка б дозволяла представити цільову задачу прогнозування перевантаження в необхідній формі для застосування методів керування, спочатку розглянемо одне джерело передачі даних до мережевого буфера і фіксованої кругової затримки.

Керування перевантаженням можна розділити на 3 процеси:

- вимірювання загроз перевантаження в мережі на основі використання функції чутливості і передбачення нейронної мережі;
- обмін інформацією між вузлами (використовуючи пакети управління);
- заборона передачі пакетів в мережі шляхом регулювання швидкості джерела на основі допустимих значень довжини черг.

Прогнозуючі контролери, як правило, мають чотири головні характеристики:

- моделлю процесу необхідно управляти. В нашій задачі управління ця модель використовується, щоб передбачати вихідні дані процесу через горизонт передбачення;
- визначення критерія мінімізації для отримання оптимальної сукупності даних шляхом передбачення горизонту. Зазвичай, це квадратичний критерій, який відстежує помилки і іноді використовує вихідні дані контролера.
- наявність еталонної (розрахункової) траєкторії виходу процесу, тобто, передбачувані значення вихідних даних процесу.
- виконання процедури мінімізації.

Контролери з заданими характеристиками можуть бути розроблені з допомогою відповідного вибору цих характеристик. Позначимо через  $U(t)$  керуючу змінну, яка забезпечує швидкість, з якою джерело повинно передавати дані. Індекс продуктивності в загальному вигляді визначається як [3]

$$J = \int_{t_0}^f C(\underline{x}(t), \underline{x}^e(t), u(t)) dt, \quad (1)$$

де  $\underline{x}(t)$  – вектор змінних стану контрольованого процесу і  $\underline{x}^e(t)$  – бажаний стан.

Величина  $C$  позначає функцію витрат, і може бути визначена як відстань між дійсним станом системи  $\underline{x}(t)$  і бажаним станом  $\underline{x}^e(t)$ .

Мінімізація функції витрат  $C$  здійснюється на основі використання оптимального керування  $U^*(t)$ ,  $t_0 \leq t \leq t_f$ . Так як контрольований процес стохастичний, функцію  $C$  потрібно визначати як очікуване значення. Пряма процедура мінімізації  $C$  потребує багато обчислень в кожній ітерації. Звичайний шлях зменшити кількість обчислень за ітерацію – засновувати оновлення змінних управління на миттєвому індексі продуктивності

$$J = C(\underline{x}(t), \underline{x}^e(t), u(t)) . \quad (2)$$

Добре відомий приклад мінімізації процедури і алгоритму градієнтного спуску, для дискретного випадку, керуюча змінна оновлюється за наступним правилом

$$U(t+1) = U(t) - \eta \frac{\partial J}{\partial U(t)} , \quad (3)$$

де  $\eta > 0$  – розмір кроку управління.

Чутливість індексу продуктивності  $\Delta J(t) = \partial J / \partial U(t)$  аналітично оцінюються, використовуючи відому структуру нейронної мережі [9, 11].

Вирази (1), (2), (3) можуть бути використані при створенні систем керування перевантаженням на основі нейронних мереж з використанням функції чутливості продуктивності та інших ключових показників ефективності телекомунікаційних мереж.

## 5. Обговорення результатів дослідження

В роботі для прогнозування і виявлення перевантаження телекомунікаційної мережі використано нейронну систему, яка реалізує і відслідковує поточний характер функції чутливості ключових параметрів мережі. Використання оптимальних алгоритмів налаштування вагових коефіцієнтів нейронної мережі дає можливість підвищити точність визначення керуючих сигналів, зменшити затримки зворотного зв'язку і, як результат, мінімізувати середні витрати ресурсу.

Можна показати, що для системи прогнозування перевантаження алгоритм і процедура градієнтного спуску по вектору вагових коефіцієнтів  $i$ -го шару нейронної мережі представляється у вигляді прямокутної матриці. У той же час відомо, що найбільш простий вид градієнт приймає в разі квадратної матриці вагових коефіцієнтів. Асимптотичні оцінки обчислювальної складності запропонованого методу при реалізації прогноуючого контролера можуть бути отримані розрахунковим шляхом або шляхом комп'ютерного моделювання. Враховуючи, комп'ютерне моделювання потребує значних обчислювальних потужностей, цю проблему можна розв'язати у доволі потужному обчислювальному центрі, наприклад, в обчислювальному центрі провідного оператора зв'язку.

Використовувані рішення щодо керування перевантаженням телекомунікаційної мережі базуються на відомих положеннях теорії систем і адаптивного управління. Це дозволяє стверджувати, що підходи, основані на моделюванні нейронної мережі забезпечують концептуальні основи і процедури для нелінійного передбачення і управління систем передбачення перевантажень. Ці питання не були повністю вирішено в лінійній частині теорії адаптивного управління і потребують подальшого дослідження.

## 6. Висновки

1. Традиційні підходи до вирішення задачі керування перевантаженнями базуються на основі контролю кількісного значення довжини черги вхідного і вихідного потоків мережі. Ідентифікатор перевантаження може вказувати тільки на наявність перевантаження по

з'єднанню, але не місце розташування чи причини виникнення перевантаження. Просте збільшення ємності буферів призводить до збільшення кількості пакетів, призначених для повторної передачі, та неприпустимого зростання затримок обслуговування.

2. В результаті проведеного дослідження запропонована і обґрунтована схема багатокрокового передбачення стану черги, в якій використаний апарат загальної теорії чутливості з непрямим зворотним зв'язком. Результати цієї теорії використані для побудови системи керування з непрямим зворотним зв'язком, що дозволяє економити каналний та обчислювальний ресурси.

3. В роботі представлено новий метод і оптимального управління перевантаженнями телекомунікаційної мережі з використанням функції чутливості і динамічних нейронних моделей передбачення. Запропонований алгоритм базується на передбаченні і керуванні активності джерел повідомлень. Моделі передбачення розраховані для управління круговими затримками в процесі передачі даних. Розглянуто дві нейронні архітектури для передбачення системного виходу: модель зі спільною та виокремленою обробкою трафіку з різною пріоритетністю.

4. Розглянуті в дослідженні моделі надають подальше розуміння можливостей і обмежень запропонованих методів управління нейронним передбачення. Запропоновані рішення ґрунтуються на використанні розвинутої архітектури нейронної мережі, тому важливою задачею є розробка алгоритмів навчання нейронної мережі для динамічних процесів передачі даних.

#### Список використаної літератури

1. Kurose J. F. Computer Networking: A Top-Down Approach, 7th Ed / James F. Kurose, Keith W. Ross. – Pearson Education, Inc., 2017.– 864 p.
2. Keshav S. Congestion Control in Computer Networks / S. Keshav. – Ph.D. Thesis, University of California, 1991.
3. Göransson P. Software Defined Networks: A Comprehensive Approach, 2<sup>nd</sup> ed. / Paul Göransson, Chuck Black, Timothy Culver.– Morgan Kaufmann, US, 2017. – 409 p.
4. Shooman M.L. Reliability of Computer Systems and Networks – Fault Tolerance, Analysis and Design / M.L. Shooman. – John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002. – 546 p.
5. Торошанко Я. І. Управління надійністю телекомунікаційної мережі на основі аналізу чутливості складних систем / Я. І. Торошанко // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2016. – №3. – С. 31-36.
6. Томович Р. Общая теория чувствительности / Р. Томович Р., М. Вукобратович. – Москва: Советскоерадио, 1972. – 240 с.
7. Виноградов Н. А. Анализ нагрузки на сети передачи данных в системах критичного применения / Н. А. Виноградов, В. И. Дровозов, Н. Н. Лесная, А. С. Зембицкая // Зв'язок. – 2006. – № 1 (61). – С. 9-12.
8. Lu Z. Overload Control for Signaling Congestion of Machine Type Communications in 3GPP Networks / Zhaoming Lu, Qi Pan, Luhan Wang, Xiangming Wen // PLOS ONE. – December 9, 2016. – 11 p. DOI:10.1371/journal.pone.0167380.
9. Торошанко Я. І. Аналіз чутливості систем масового обслуговування на основі моделі адаптації і регулювання зовнішнього трафіка / Я. І. Торошанко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – №6(243). – С. 171-175.
10. Тархов Д. А. Нейросетевые модели и алгоритмы / Д. А. Тархов. – Москва: Издательство «Радиотехника», 2014. – 352 с.
11. Галушкин А. И. Нейронные сети: основы теории / А. И. Галушкин. Москва: Горячая линия – Телеком, 2010. – 496 с.



12. Stallings W. Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud / W. Stallings. – Pearson Education, Inc., Old Tappan, New Jersey, 2016. – 544 p.

### References

1. Kurose J. F., and Ross K. W. (2017). Computer Networking: A Top-Down Approach, 7th ed. Pearson Education, Inc., 864.
2. Keshav S. (1991). Congestion Control in Computer Networks / S. Keshav.– Ph.D. Thesis, University of California.
3. Göransson P., Black C., and Culver T. (2017). Software Defined Networks: A Comprehensive Approach, 2<sup>nd</sup> ed. Morgan Kaufmann, US, 409.
4. Shooman M. L. (2002). Reliability of Computer Systems and Networks – Fault Tolerance, Analysis and Design. JohnWiley&Sons, Inc., NewYork, 546.
5. Toroshanko Ya. I. (2016). Managing the Reliability of the Telecommunication Network Based on Analysis of the Complex Systems Sensitivity // Telekomunikatsiini ta Informatsiini Tekhnolohii, 3, 31–36.
6. Tomovich R., and Vukobratovych M. (1972). General Theory of Sensitivity. Moscow: Sovyetskoe Radio, 240.
7. Vinogradov N. A., Drovovozov V. I., Lesnaya N. N., and Zembitskaya A. S. (2006). Analysis of the Load on Data Networks in Critical Application Systems. Zviazok. 1 (61). 9–2.
8. Zhaoming Lu, Qi Pan, Luhan Wang, and Xiangming Wen (2016). Overload Control for Signaling Congestion of Machine Type Communications in 3GPP Networks. PLOS ONE, 11. DOI: 10.1371/journal.pone.0167380.
9. Toroshanko Ya. I. (2016). Analysis of Sensitivity of Mass Service Systems Based on the Model of Adaptation and Regulation of External Traffic. Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnoho Universytetu, 6(243), 171–175.
10. Tarhov D. A. (2014). Neural Network Models and Algorithms. Moscow: Radiotekhnika, 352.
11. Galushkin A. I. (2010). Neural Networks: Basic Theory. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 496.
12. Stallings W. (2016). Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud. Pearson Education, Inc., Old Tappan, New Jersey, 544.

### *Автор статті (Author of the article)*

**Торошанко Олександр Станіславович** – асистент кафедри комп'ютерної інженерії (Toroshanko Oleksandr Stanislavovich – Assistant Professor in Computer Engineering Department). Phone: +380 (93) 056 5775. E-mail: toroshanko@gmail.com.

Дата надходження  
в редакцію: 14.05.2019 р.

Рецензент:  
д.т.н., Сторчак К.П.  
*Державний університет телекомунікацій, Київ*