

Торошанко О. С., Захаржевський А.Г. Державний університет телекомунікацій, Київ

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ БЕЗПРОВОДОВОЇ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ

Розглядається керована безпроводова комунікаційна мережа з різномірним мережним обладнанням та неконтрольованими затримками інформації. Розглянуто характеристики системи керування параметрами мережею, власне мережі як об'єкту керування та затримок керуючої та сигнальної інформації. Показано, що усунення перевантажень безпосередньо пов'язане із задачею керування потоками трафіку даних. Обидві задачі спрямовані на однаковий кінцевий результат: мінімальні повторні передавання пакетів і зменшення величини затримок в мережі.

Розроблено математичну модель мережі на основі системи диференційно-різницевих рівнянь з аргументами, що запізнюються. Виведено вирази для затримок сигнальної та керуючої інформації у системі керування та у керованій комунікаційній мережі. Показано, що за умов випадкового запізнення аргументів стійкість розв'язків диференційно-різницевих рівнянь залежить не тільки від коефіцієнтів рівнянь, а й від порядку затримок сигнальної та керуючої інформації. Встановлено, що затримка сигнальної та управляючої інформації у корпоративній комп'ютерній мережі повинна мати однаковий порядок з часом реакції мережних комутаційних вузлів. Тоді система управління є стабільною та стійкою. Для забезпечення стійкості системи керування необхідно постійно проводити моніторинг та аналіз мережі. Визначені завдання моніторингу: вимірювання швидкості надходження пакетів до системи керування, вимірювання та обчислення поточної затримки доставки даних, обчислення варіацій затримки. Показано, що сукупність задач моніторингу й настроювання системи керування представляє собою задачу дуального керування Фельдбаума стосовно мережі із затриманим зворотним зв'язком.

Проведено комп'ютерне моделювання керованої безпроводової мережі з системою керування та отримані оцінки запасу стійкості системи в цілому.

Ключові слова: безпроводова мережа, система керування мережею, диференційно-різницева рівняння, області стійкості розв'язків, затримки сигнальної й управляючої інформації.

Toroshanko O. S., Zakharzhevskiy A.H. State University of Telecommunication, Kyiv

CONTROL SYSTEM PARAMETERS OF WIRELESS COMMUNICATION NETWORK

A controlled wireless communications network with heterogeneous network equipment and random information delays is being considered. The characteristics of the network parameter control system, the network itself as an object of control and delays of control and signal information are considered. It is shown, overload elimination to be directly related to the task of managing data traffic flows. Both tasks are aimed at the same end result: minimal packet retransmission and reducing of information delays.

A mathematical model of the network is developed on the basis of a system of differential-difference equations with delayed arguments. Expressions for delays in signalling and control information in the control system and the controlled communication network are derived. It is shown that, in the case of randomly delayed arguments, the stability of solutions of differential-difference equations depends not only on the coefficients of the equations, but also on the order of delays of signal and control information. It is established that the delay of signaling and control information in the corporate computer network should be in the same order with the response time of the network switching nodes. Then the control system is stable. To ensure the stability of the management system, it is necessary to constantly monitor and analyze the network. Monitoring tasks are defined: measurement of packet flow rate to the control system, measurement and calculation of current data delivery delay, calculation of delay variations. It has been shown that the set of monitoring and control tasks is a Feldbaum dual control task with respect to the delayed feedback network.

A computer simulation of a controlled wireless network with a control system was performed and estimates of the overall system stability margin were obtained.

Keywords: wireless network, control system of network, differential and difference equation, sustainability area, delay of signal and control data.

© Торошанко О. С., Захаржевський А.Г. 2020

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ БЕСПРОВОДНОЙ КОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

Рассматривается управляемая беспроводная коммуникационная сеть с разнородным сетевым оборудованием и неконтролируемыми задержками информации. Рассмотрены характеристики системы управления параметрами сетью, собственно сети как объекта управления и задержек управляющей и сигнальной информации. Показано, что устранение перегрузок непосредственно связано с задачей управления потоками трафика данных. Обе задачи направлены на одинаковый конечный результат: минимальные повторные передачи пакетов и уменьшение величины задержек информации в сети.

Разработана математическая модель сети на основе системы дифференциально-разностных уравнений с запаздывающими аргументами. Выведены выражения для задержек сигнальной и управляющей информации в системе управления и в управляемой коммуникационной сети. Показано, что в условиях случайного запаздывания аргументов устойчивость решений дифференциально-разностных уравнений зависит не только от коэффициентов уравнений, но и от порядка задержек сигнальной и управляющей информации. Установлено, что задержка сигнальной и управляющей информации в корпоративной компьютерной сети должна иметь одинаковый порядок со временем реакции сетевых коммутационных узлов. Тогда система управления является стабильной и устойчивой. Для обеспечения устойчивости системы управления необходимо постоянно проводить мониторинг и анализ сети. Определены задачи мониторинга: измерение скорости поступления пакетов в систему управления, измерение и вычисление текущей задержки доставки данных, вычисление вариаций задержки. Показано, что совокупность задач мониторинга и настройки системы управления представляет собой задачу дуального управления Фельдбаум относительно сети с задержанной обратной связью.

Проведено компьютерное моделирование управляемой беспроводной сети с системой управления и полученные оценки запаса устойчивости системы в целом.

Ключевые слова: *беспроводная сеть, система управления сетью, дифференциально-разностное уравнение, области устойчивости решений, задержки сигнальной и управляющей информации.*

Вступ. Беспроводні телекомунікаційні та комп'ютерні мережі широко застосовуються в інформаційно-комунікаційних та обчислювальних системах самого різного призначення. Зокрема, мережі усіх видів транспорту принципово не можуть функціонувати без використання безпроводових вузлів та сегментів. При цьому необхідно враховувати специфічні особливості обслуговування та організації обміну даними, притаманні тільки мережам з мобільними абонентами.

Як відмічено у роботі [1], для розвитку додаткових видів обслуговування (ДВО), орієнтованих на окремого клієнта, а також високотехнологічних телекомунікаційних послуг загального призначення необхідно розробляти й впроваджувати нові сервіси. При цьому процеси адаптації нових функцій, протоколів, інтерфейсів до функцій термінальних та комутаційних мережних вузлів є довгостроковими та трудомісткими, а забезпечення необхідної якості сервісу не гарантується. Зокрема, пропускна спроможність мережі, перевантаження та затримки доставки інформації від джерела до отримувача (через автономні мережні сегменти) зазнають раптових неконтрольованих змін.

Для подолання цих обмежень висунуто ідею інтелектуальної мережі [2], яка заключається у відокремленні функцій створення, підтримки, тестування й удосконалення нових телекомунікаційних послуг від основних функцій комутаційних вузлів. Функції безпосереднього надання послуг, які раніше були виключною прерогативою традиційних комутаційних вузлів та систем, еволюціонують у функції комп'ютерних платформ, не пов'язаних з комутаційними вузлами.

Тут потрібно також відзначити, що інтелектуальна мережа за своїм змістом і завданнями, що розв'язуються, не має нічого спільного з системами так званого штучного

інтелекту [2, 3]. По суті, це всього лише архітектурна концепція організації мереж зв'язку, найбільш пристосована для впровадження нових комплексних послуг і відділення їх від процесів комутації та доставляння даних від джерела до кінцевого отримувача. Крім того, нові послуги, як правило, являють собою процедури послідовного виконання атомарних операцій. Проблеми управління безпроводовою мережею з широким спектром основних та додаткових послуг мають свою специфіку, яка заключається у недостатніх гарантіях якості сервісу, у першу чергу, – у перевантаженні мережі та/або автономних мережних сегментів, затримках доставляння та втратах пакетів.

Телекомунікаційна мережа керується відповідною системою керування і складає з нею єдине ціле. Мережа, що розглядається, включає велику кількість різноманітних мережних комутаційних та термінальних вузлів. Вона за визначенням є складною розподіленою системою з неповною інформацією про параметри і стан. Наприклад, при фізичній відмові деякого мережного вузла може вийти з ладу окремий маршрут доставки даних або навіть автономний мережний сегмент. Крім того, в таких системах мають місце затримки сигнальної і керуючої інформації, що виникають при доставці даних по каналах зв'язку і при обробці в проміжних комутаційних вузлах. Тому необхідне постійне спостереження параметрів та стану мережі, результати якого використовуються для визначення вузлів, у яких сталася фізична відмова, перевантажених маршрутів та автономних мережних сегментів тощо.

Зараз розглянемо основні напрями досліджень проблеми керування характеристиками телекомунікаційних та інформаційно-обчислювальних мереж, отримані результати та невирішені завдання.

Постановка завдання та огляд попередніх робіт. Більшість проблем, що виникають у мережах, розглядаються саме з позицій теорії керування. Специфікою завдань керування характеристиками мереж є те, що будь-яка мережа представляє собою складну систему, тобто систему, керування якою принципово здійснюється за умов недостатньої апріорної інформації. Одним з методів подолання цього недоліку є так зване дуальне керування Фельдбаума [4]: поступове покращання якості керування при спостереженні за системою та використанні отриманої інформації як апріорної на наступних етапах керування.

Однією з найважливіших характеристик мережі є поточна завантаженість та ризик перевантаження [5]. При спостереженні стану мережі в цілому або її автономних сегментів про перевантаження можуть свідчити відсоток пакетів, що втрачаються із-за переповнення буферної пам'яті, зростання довжини черги у буферах та збільшення швидкості заповнення буферів тощо; відсоток повторних передавань пакетів із-за перевищення часу тайм-ауту та/або часу життя пакетів тощо; зростання часу затримки та варіацій затримки пакетів. Зростання цих параметрів свідчить про збільшення завантаження мережі аж до її критичного перевантаження.

З усуненням перевантажень безпосередньо пов'язане керування потоками трафіку даних. Як при усуненні перевантажень, так і при загальному керуванні трафіком використовується явний зворотний зв'язок у вигляді спеціальних команд притуплення (зменшення) надлишкової активності відправників. Тому між цими завданнями часто виникає плутанина. Однак незалежно від того, чи то відправник, чи то вся мережа (за різними причинами) не справляються з потоком даних, що передається (ця ситуація ілюструється рисунком 1), відповідальний термінальний вузол все одно має виконати команду на уповільнення передачі. На рис. 1,а показаний процес керування трафіком, коли "повільний" отримувач не справляється з прийомом трафіку високої інтенсивності; на рис. 1,б – боротьба з перевантаженням, коли "повільна" мережа не справляється з передаванням сумарного трафіку.

Значить, і боротьба з перевантаженнями, і керування трафіком спрямовані на однаковий кінцевий результат: мінімальні втрати та повторні передавання пакетів, мінімальні затримки.

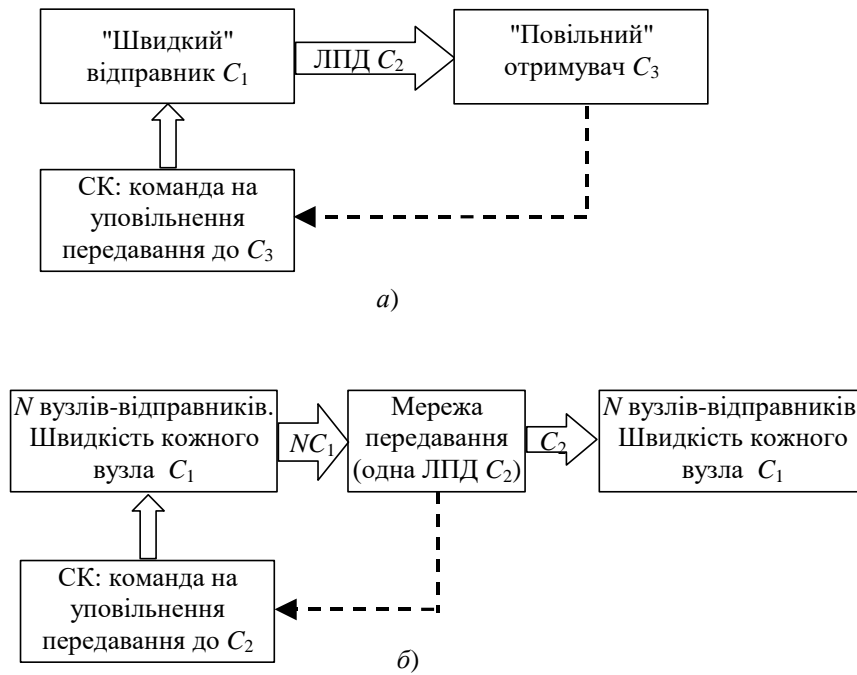


Рис. 1. а) керування трафіком: $C_1 > C_3$, $C_2 > C_1$;

б) боротьба з перевантаженням: $NC_1 \gg C_2$.

ЛПД – лінія передавання даних; СК – система керування;

C_1, C_2, C_3 – пропускі спроможності мережних вузлів, сегментів або термінальних вузлів

У роботі [5] приведений якісний опис проблеми настроювання часових параметрів системи керування. Показано, що при високій чутливості керованого елемента (мережного вузла) до збурень СК буде безперервно змінювати стани об'єкту керування; мережа може втратити стійкість. При низькій чутливості елемента керування СК буде реагувати занадто повільно й стане, по суті, марною. На жаль, узгодження кількісних характеристик СК та керованих об'єктів не розглянуто; лише відмічено, що правильний вибір часових характеристик є нетривіальною задачею.

У роботі [6] проблеми керування трафіком та боротьби з перевантаженнями розглянуті в основному в аспекті програмно-конфігурованих мереж та віртуалізованих мережних функцій. Ув'язування з апаратними компонентами мереж не досліджене.

У роботі [7] також дані чисто описові характеристики СК інформаційно-обчислювальними мережами без конкретизації для апаратних компонентів цифрових телекомунікаційних мереж з пакетною комутацією.

У фундаментальній роботі [8] дані теоретичні засади робастних систем керування, які не є адаптивними, але здатні успішно функціонувати при широких змінах статистичних характеристик збуджень завдяки малій чутливості до цих змін. На основі результатів розробки робастних СК у роботах [9-11] зроблено спроби розглянути задачі робастного керування мережами з апріорі невідомими затримками сигнальної та керуючої інформації. Однак у цих роботах розглядаються лише системи, які описуються лінійними диференціально-алгебраїчними рівняннями, тобто, за замовчуванням, системи з постійними параметрами. Такий підхід дещо звужує проблему керування мережами, у яких параметри (а іноді – і структура) змінюються у широких межах. Крім того, моделі вузлів керування потоками мережного трафіку за умов змінних затримок інформації, представлені у роботі [10], у значній мірі співпадають з моделями, опублікованими раніше [12].

Очевидно, для таких систем, як мережі, необхідно використовувати більш універсальні математичні моделі. Загальною метою роботи є аналіз затримок сигнальної та керуючої інформації та їх впливу на якість сервісу безпроводової телекомунікаційної мережі. Для розв'язання поставленого завдання спочатку необхідно обґрунтувати математичну модель

керованої мережі з підсистемою керування. Цьому завданню присвячений наступний розділ.

Математична модель безпроводової мережі з системою керування. У самому першому наближенні безпроводова мережа, як абстрактна керована система, представляє собою об'єкт керування та, відповідно, підсистему керування. Схему системи зображено на рис. 2.

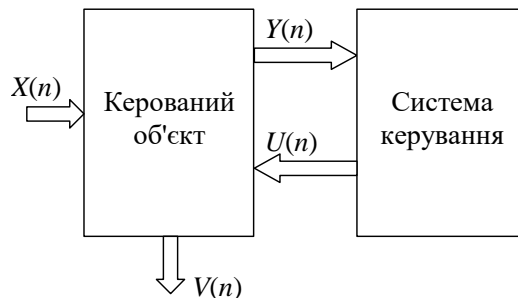


Рис. 2. Абстрактна керована система: $X(n)$ – вхідний сигнал (збурююча дія); $Y(n)$ – реакція на збурення; $U(n)$ – керуюча дія; $V(n)$ – вихідний сигнал керованої системи

Розглядається керована система з дискретним часом: $n = 0, 1, 2, \dots$. Під дією вхідного сигналу $X(n)$ стан керованого об'єкту змінюється, що виражається реакцією $Y(n)$ на вхідний (збурюючий) сигнал. Реакція на збурення аналізується у системі керування, внаслідок чого виробляється відповідна керуюча дія $U(n)$. Під її впливом об'єкт повертається до початкового (незбуреного) стану; формується вихідний сигнал $V(n)$ керованої системи.

Теоретично сигнал $V(n)$ матиме бажані властивості з похибкою, що асимптотично прагне до нуля. Але такий стан матиме місце лише для детермінованих систем з абсолютно точним аналізом збурень. По суті, має місце ідеальний випадок функціонування керованої системи. Реальні ж керовані системи, в тому числі безпроводові телекомунікаційні мережі є системами з випадковими змінами параметрів та стану, тобто стохастичними керованими системами. У таких системах сигнали $X(n)$, $Y(n)$, $V(n)$ представляють собою суттєво нестационарні випадкові процеси. Строго кажучи, й керуюча дія $U(n)$ із-за похибок керування також матиме випадкову складову. Відповідно, задача керування параметрами мережі стає задачею стохастичного керування. На рис. 3 зображено схему стохастичної керованої системи (без урахування випадкових затримок сигнальної та керуючої інформації).

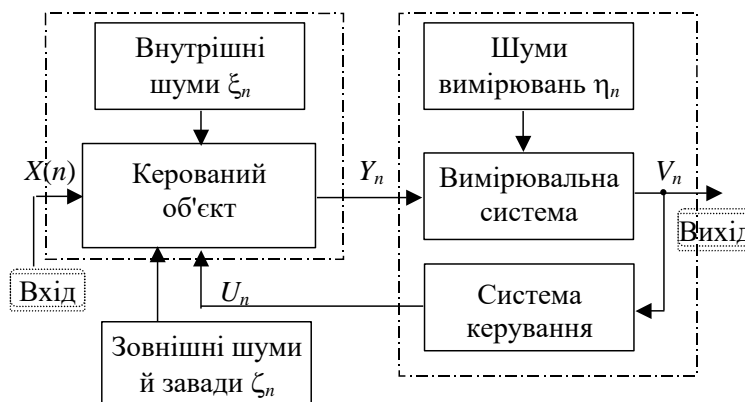


Рис. 3. Схема стохастичної керованої системи без урахування затримок сигнальної та керуючої інформації

Нарешті, з урахуванням випадкових затримок сигнальної та керуючої інформації модель стохастичної керованої системи приймає ще більш складний вид (рис. 4).

Вважається, що затримки на керування об'єктом та на вимірювання входять у відповідні результуючі затримки сигнальної та керуючої інформації. У загальному випадку $k \neq m$.

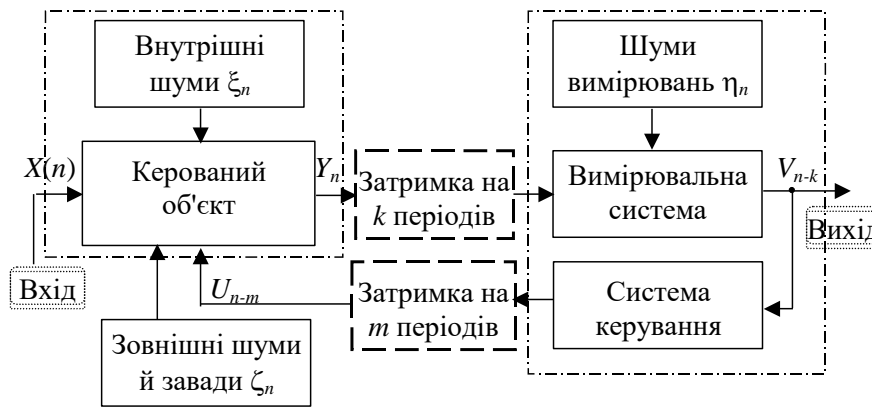


Рис. 4. Схема стохастичної керованої системи з урахуванням випадкових затримок сигнальної та керуючої інформації

Розглянемо вплив випадкових затримок сигнальної та керуючої інформації на ефективність керування безпроводовою телекомунікаційною мережею. Універсальною математичною моделлю системи з затримками інформації є диференціальні рівняння з аргументом, що відхиляється [13-15]. Мережа – це система, яка має бути фізично реалізованою, тому розглядаються лише аргументи, що запізнюються.

На відміну від лінійних диференціально-алгебраїчних рівнянь [11], диференціальні рівняння з аргументом, що запізнюється, дають необхідний інструментарій для дослідження систем з постійними або змінними (в тому числі випадковими) параметрами. Звичайно, запізнення аргументу навіть для класичного диференціального рівняння мінімального порядку з постійними коефіцієнтами формально приводить до довільно зростаючої варіації порядку вихідного рівняння. Це супроводжується втратами стійкості рішення.

Встановлено, що загального методу розв'язання таких рівнянь не існує. Для проведення якісного аналізу диференціальних рівнянь з аргументом, що запізнюється, найбільш прийнятною та такою, що дає результати у замкненій формі, являється апроксимація похідних кінцевими різницями, тобто перехід до різницевих рівнянь [14, 15]. У цифрових телекомунікаційних мережах з пакетною комутацією частота синхронізації набагато більше, ніж середня частота слідування пакетів [16], тому похибки заміни похідних кінцевими різницями є величинами другого порядку малості, й ними можна нехтувати.

Розглянемо задачу дослідження стійкості автономного мережного сегменту – елементу керованої мережі як складної динамічної системи з затримками інформації.

Області стійкості диференціально-різницевого рівняння з аргументом, що запізнюється.

У якості методу оцінювання параметрів та стану динамічної системи з запізненням, застосуємо регенеративний метод аналізу [17]. Розглянемо проблему дискретизації диференціального рівняння з аргументом, що запізнюється, та області стійкості рішень автономного мережного сегменту як об'єкту, що керується поєднаною з ним системою керування (див. рис. 1).

Почнемо з перехідної функції $H_{as}(t, \tau)$ автономного сегменту. Без будь-якої втрати узагальненості проблему стійкості системи та ефективності керування системою можна для спрощення аналізу розглянути на прикладі кола першого порядку. Коефіцієнт зворотного зв'язку b та затримку τ_k вихідного сигналу вважаємо постійними на інтервалі спостереження. Тоді неоднорідне диференціальне рівняння з постійними коефіцієнтами й аргументом, що запізнюється, прийме наступний вид:

$$\frac{dy_{as}(t)}{dt} = by_{as}(t, \tau_k) + x(t), \quad (1)$$

де $y_{as}(t)$ – вихідний сигнал; $x(t)$ – вхідний сигнал.

За умов порівняльної малості інтервалів тактової синхронізації цифрової мережі відносно змінювання її параметрів рівняння (1) апроксимується наступним чином:

$$y_{as}(n) \approx y_{as}(n-1) + by_{as}(n-k) + x(n). \quad (2)$$

Для аналізу системи у частотній області застосуємо z -перетворення до рівняння (2). Системна функція об'єкту, яка описується рівнянням (2), має наступний вид:

$$H(z) = \frac{z^{-m}}{1 - z^{-1} - bz^{-k}}, \quad (3)$$

характеристичний поліном якої набуває достатньо специфічного вигляду:

$$z^k - z^{k-1} - b = 0. \quad (4)$$

Системна функція (3) має нуль m -го порядку, який розташований у нескінченно віддаленій точці z -площини, й k коренів поліному (3) (поліосів), розташованих на однакових кутових відстанях $\Delta\varphi = 2\pi/k$ одне від одного. Модуль кожного полюса $|r_i|$, $i = \overline{1, k}$.

Аналогічний підхід застосуємо і для системи керування.

За результатами досліджень частотно-часових характеристик систем із затримками побудовані області стійкості системної функції виду (3). Теоретично область стійкості має точну верхню грань (*supremum*) [13], яка обмежується зверху нерівністю $|r_i| < 1$, $i = \overline{1, k}$. На рис. 5 наведено приклад такої області. Зокрема, при $k > 10 \dots 15$ стійкість системи має місце при $b_i \leq 0,02 \dots 0,04$ відповідно. По суті, система стає слабо керованою. Тому необхідно постійно контролювати затримки доставки інформації і приймати заходи по зменшенню затримок.

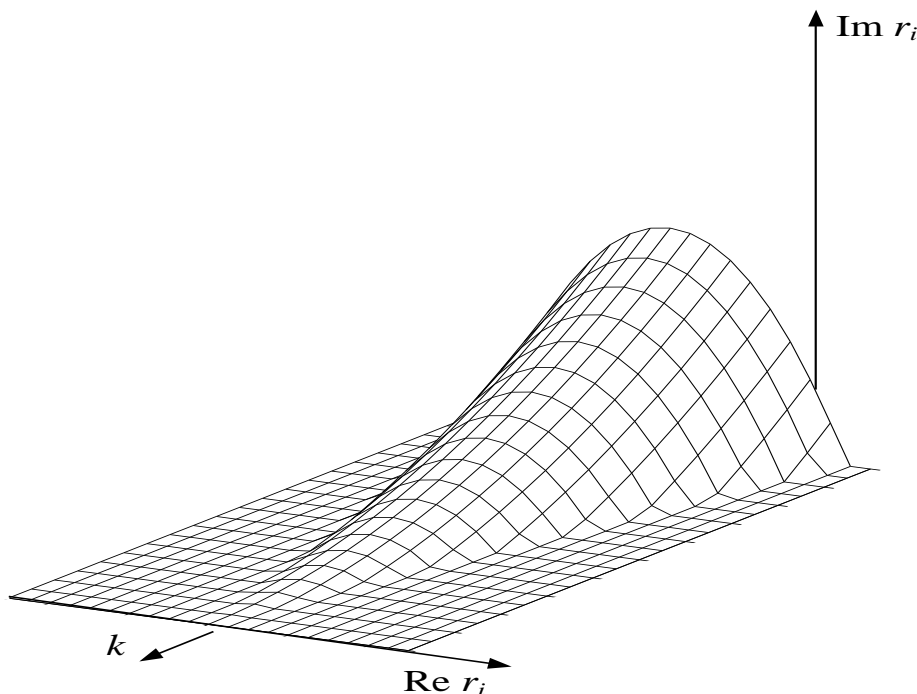


Рис. 5. Область стійкості досліджуваної системи (3).
Im r_i й Re r_i – уявна й дійсна частини кореню r_i відповідно

Принциповою особливістю функцій виду (3) стосовно прикладних задач керування мережею є те, що степінь полінома знаменника визначається затримкою τ_i . В реальній мережі затримка доставки даних є випадковою величиною з середньоквадратичним

відхиленням, яке змінюється у широких межах.

Можна стверджувати, що внаслідок нормалізації процесів у великих системах [3] розподіл затримок доставки даних з прийнятною для інженерних застосувань точністю описується гаусівським законом. З урахуванням наведених міркувань необхідно забезпечувати додатковий запас стійкості системи по модулю коефіцієнта зворотного зв'язку.

В [1] обчислені асимптотичні оцінки стійкості систем с характеристичним поліномом виду (4) й області стійкості. Показано, що для підтримки стійкості системи керування необхідно зменшувати абсолютну величину коефіцієнта зворотного зв'язку в контурі керування при збільшенні затримок сигналів керування. Однак проблема пошуку залежності між коефіцієнтом зворотного зв'язку й затримкою не має однозначного розв'язання у замкненій формі. Крім того, при неконтрольованих відхиленнях динамічних характеристик погіршується якість керування.

Рівняння (2) є найпростішим рівнянням контролю зосередженого об'єкту із затримками сигналів стану керованого об'єкту й керування ним. З використанням методу дискретизації диференціального рівняння з постійними коефіцієнтами й аргументом, що запізнюється, розроблено типову модель автономного мережного сегменту (АС) як об'єкту контролю, яка показана на рис. 6.

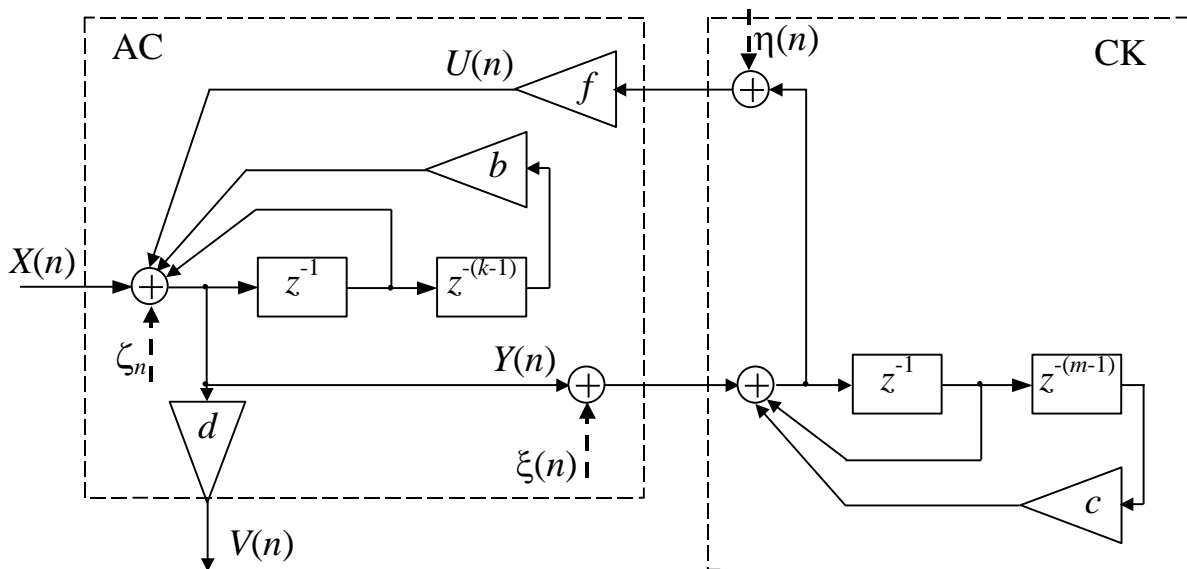


Рис. 6. Абстрактна структура системи контролю й керування мережним вузлом

Тут $X(n)$ – вхідний сигнал (збудження), що дає інформацію про стан об'єкту; $U(n)$ – сигнал керування; $Y(n)$ – реакція об'єкту на вхідне збудження; $V(n)$ – вихідний сигнал керованого об'єкту; z^{-k} , z^{-m} – елементи затримки, яка має місце при доставлянні та опрацювання інформації відповідно; у загальному випадку значення затримки інформації про стан висхідного та низхідного каналів обміну даними не співпадають ($k \neq m$); $\zeta(n)$ – зовнішні шуми та завади; $\xi(n)$ – внутрішні шуми об'єкту; $\eta(n)$ – шуми вимірювань системи керування.

Затримки реакції мережного вузла на варіації його стану додаються до елементів затримки доставки інформації, а затримки опрацювання даних у системі керування додаються до елементів затримки z^{-m} .

Фактично вузол мережі як об'єкт керування – це система зворотного зв'язку, яка дає відгук на варіації стану об'єкту, наприклад, загальні перевантаження, затори прийому, аномальне зростання черг у буферах, зменшення пропускної здатності, неналежне

функціонування, повну, частинну або плаваючу відмову тощо. Для коректної роботи систем керування час реакції необхідно налаштовувати вельми ретельно [5]. При дуже короткому часі реакції мережного вузла система керування буде отримувати послідовність випадкових інформаційних сигналів, що суперечать одне одному. Система може увійти в режим незатухаючих коливань, що призведе до втрати стабільного стану. З іншого боку, якщо час реакції буде занадто довгим, механізм керування станом буде постійно відставати й кінець кінцем взагалі стане марним. Щоб мати бажану якість процесу керування, потрібно узгоджувати часові параметри процесів доставляння даних та реакції мережних вузлів. Коректне та своєчасне узгодження постійних часу в системах доставляння та в системі керування – це далеко не тривіальне завдання. Розглянемо його шляхом комп'ютерного моделювання.

Результати моделювання. З використанням моделей керованої системи доставляння інформації згідно виразів (1)-(3) проведено цифрове моделювання системи керування телекомунікаційним мережним сегментом, який вмщує, як мінімум, один комутаційний вузол. Досліджені параметри системи керування мережного трафіку з різними характеристиками, зокрема., однорідного з пуасонівським розподілом інтенсивності та трафіку Triple/QuadroPlay з самоподібними (фрактальними) властивостями, з різними зовнішніми завадами та шумами. Для забезпечення загальної стійкості керованого об'єкту при змінах стану спеціально підстроювалися коефіцієнти зворотного зв'язку.

Головний результат моделювання – це дослідження варіацій довжини черги у буферній пам'яті при змінах часу реакції мережного вузла у порівнянні з затримками доставляння та опрацювання даних. Час реакції задавався як число тактів l паралізації мережного комутаційного вузла до видачі ним сигналу про перехід у неналежний стан. Число l порівнювалося числом тактів доставляння та опрацювання даних (m, k). Процес змін короткострокової інтенсивності трафіку моделювалися типовим процесом з так званими "важкими хвостами" [6] – розподілом Парето.

На рис. 7 та 8 представлені результати моделювання для значення відносної затримки реакції мережного вузла $l=5$ при повних затримках опрацювання та доставки даних $m+k=10$ (рис. 7,а і 8,а) й $m+k=5$ (рис. 7,б і 8,б). Тут $q(k)$ – перехідна характеристика системи керування з сумарною затримкою опрацювання інформаційного та керуючого сигналів.

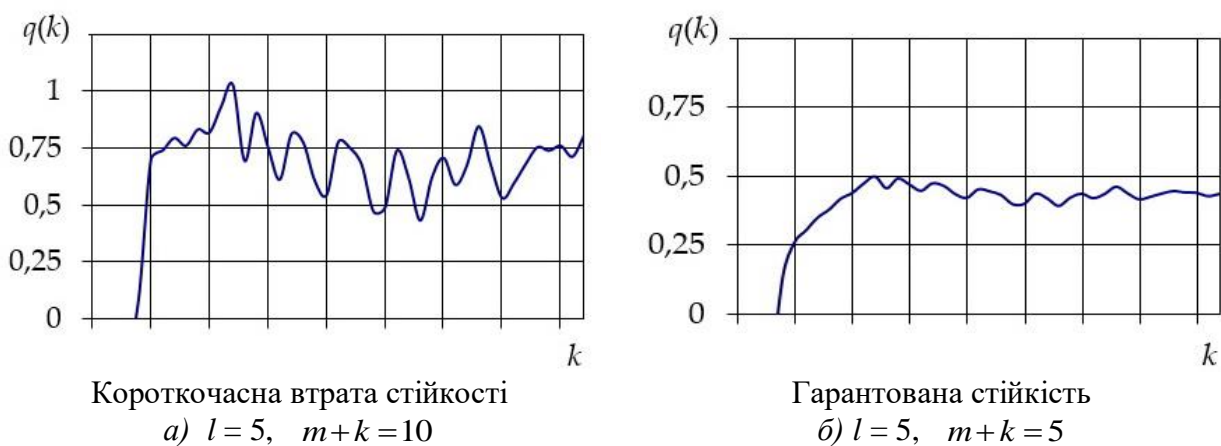


Рис. 7. Варіація нормалізованої поточної довжини черги у буфері мережного вузла. Пуасонівський трафік

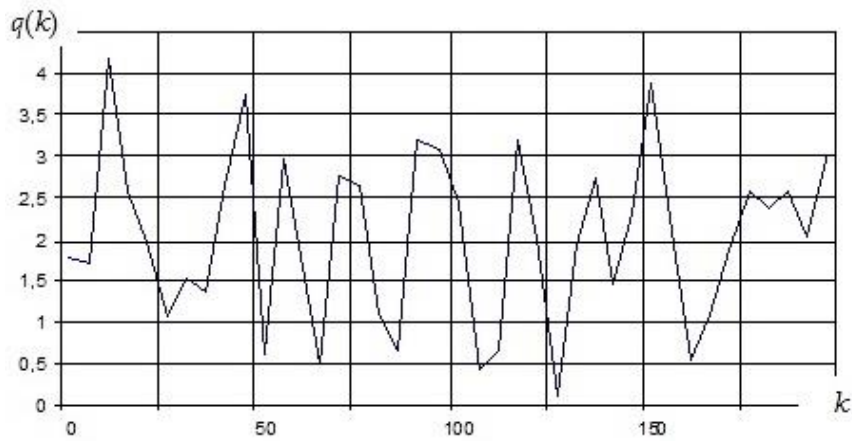
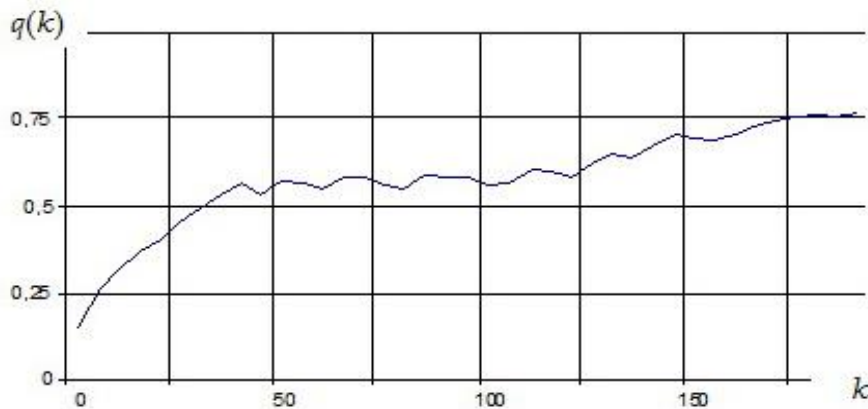
а) $l = 5$, $m+k = 10$. Довготривала втрата стійкостіб) $l = 5$, $m+k = 5$. Прийнятний запас стійкості

Рис. 8. Варіація нормалізованої поточної довжини черги у буфері мережного вузла. Самоподібний трафік

Як видно з рис. 7а та 8а, при значній різниці затримки реакції мережного вузла та повної затримки опрацювання й доставки даних має місце втрата стійкості системи керування по критерію перевантаження буфера. При сплесках мережної активності, обумовлених, наприклад, пачковістю самоподібного трафіку, зростає ризик перевантаження буфера, відкидання пакетів керуючого сигналу, і, як наслідок, втрати стійкості системи керування мережним сегментом. При узгодженні згаданих затримок достатній ресурс стійкості по критерію перевантаження буфера забезпечується навіть для самоподібного трафіку.

Для коректного вибору поточного часу реакції об'єкту контролю необхідно вимірювати затримки та підстроювати під них параметри комутаційних вузлів. Як свідчать результати моделювання, при обранні величини поточного часу затримки реакції об'єкту контролю, який є близьким до величини затримок сигнальної й керуючої інформації, можна запобігти втрати стійкості процесів керування.

Висновки. За результатами проведених досліджень встановлено, що затримка сигнальної та управляючої інформації у корпоративній комп'ютерній мережі повинна мати один порядок з часом реакції мережних комутаційних вузлів. Тоді система управління є стабільною та стійкою.

В даній роботі розроблені математичні моделі автономних мережних сегментів як об'єктів керування з урахуванням затримок інформації про параметри та стан конкретного вузла. За результатами комп'ютерного моделювання встановлено, що для забезпечення стійкості системи керування та стабільності передавання даних по телекомунікаційній мережі необхідно узгоджувати затримки керуючої інформації із затримками реакції мережних вузлів.

Для запобігання втрат стійкості системи керування необхідно постійно проводити моніторинг та аналіз мережі. Завдання моніторингу наступні:

- вимірювання швидкості надходження пакетів до системи керування;
- вимірювання поточної затримки доставки даних та обчислення поточної затримки;
- обчислення варіацій затримки.

За даними моніторингу визначаються початкові дані для аналізу й прогнозу параметрів та стану мережі та для настроювання системи керування.

По суті, сукупність задач моніторингу й настроювання системи керування представляє собою задачу дуального керування Фельдбаума стосовно мережі із затриманим зворотним зв'язком. Надалі планується розглянути задачу керування з непрямим зворотним зв'язком (за результатами статистичного аналізу збуджень параметрів мережних вузлів) та провести порівняльний аналіз ефективності прямих та непрямих методів керування.

Список використаної літератури

1. Торошанко Я. И. Ретроспективная идентификация информационных и управляющих сигналов в интеллектуальных сетях связи / Я. И. Торошанко, Л. И. Танцюра, Л. А. Дёмина. // Научные работы ОНАЗ им. О. С. Попова. – 2015. – №2. – С. 111-115.
2. Лесная Н. Н. Разработка алгоритма управления интеллектуальными мультисервисными сетями / Н. Н. Лесная // Проблемы підвищення ефективності інфраструктури: зб. наук. праць. – 2005. – Вип. 11. – С. 150-155.
3. Галушкин А. И. Нейронные сети: основы теории / А. И. Галушкин. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2010. – 496 с.
4. Фельдбаум А. А. Теоретические основы связи и управления / А. А. Фельдбаум, А. Д. Дудыкин, А. П. Мановцев, Н. Н. Миролюбов. – Москва: Физматгиз, 1963. – 932 с.
5. Tanenbaum A. S. Computer Networks / Andrew S. Tanenbaum, David J. Wetherall. – 5th ed. – Prentice Hall, Cloth, 2011. – 960 pp.
6. Stallings W. Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud / W. Stallings. – Pearson Education, Inc., Old Tappan, New Jersey, 2016. – 538 pp.
7. Kurose J. F. Computer Networking: A Top-Down Approach / James F. Kurose, Keith W. Ross. – 7th ed. – Pearson Education, Inc., 2017. – 864 pp.
8. Morari M. Robust Process Control / M. Morari, E. Zafiriou. – Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1989. – 488 pp.
9. Priscoli F. D. Leader-Following Coordination of Nonlinear Agents Under Time-Varying Communication Topologies / Francesco Delli Priscoli, Alberto Isidori, Lorenzo Marconi, Antonio Pietrabissa // IEEE Trans. on Control of Network Systems. – Dec. 2015. – Vol. 2, No. 4. – P. 393-405.
10. Pietrabissa A. A Robust Adaptive Congestion Control for Communication Networks with Time-Varying Delays / Antonio Pietrabissa, Francesco Delli Priscoli, Andrea Fiaschetti, Federico Di Paolo // 2006 IEEE Conference on Computer Aided Control System Design, 2006 IEEE International Conference on Control Applications, 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control. – P. 2093-2098.
11. Di Giorgio A. Robust Output Regulation for a Class of Linear Differential-Algebraic Systems / Alessandro Di Giorgio, Antonio Pietrabissa, Francesco Delli Priscoli, Alberto Isidori // IEEE Control Systems Letters. – 2018. – Vol. 2, No. 3. – P. 477-482.
12. Quet P.-F. Rate-Based Flow Controllers for Communication Networks in the Presence of Uncertain Time-Varying Multiple Time-Delays / Pierre-Francois Quet, Banu Ataslar, Altug Iftar, Hitay Ozbay, Shivkumar Kalyanaraman, Taesam Kang // Automatica. – 2002. – No. 38. – P. 917-928.
13. Эльсгольц Л. Э. Введение в теорию дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом / Л. Э. Эльсгольц, С. Б. Норкин. – Москва: Наука, 1971. – 296 с.
14. Bellman R. Differential-Difference Equations / R. Bellman, K. L. Cooke. – Academic Press, 1963. – 482 p.

15. Pinney E. Ordinary Difference-Differential Equations / E. Pinney. – University of California Press, 1958. – 262 p.
16. Бирюков Н. Л. Транспортные сети и системы электросвязи. Системы мультиплексирования // Н. Л. Бирюков, В. К. Стеклов; под ред. В. К. Стеклова. – Київ: Віпол, 2003. – 352 с.
17. Crane M. A. An Introduction to the Regenerative Method for Simulation Analysis / M. A. Crane, A. J. Lemoine. – Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York, 1977. – 113 p.

References

1. Toroshanko Ya. I., Tantsiura L. I., and Diomina L.O. (2015). Retrospective Identification of Signal and Control Data in Intelligent Telecommunication Networks. Proceeding of the O. S. Popov ONAT. No.2. 111-115.
2. Lesnaia N. N. (2005). Development of an Algorithm for Managing Intelligent Multiservice Networks. Problems in the Effectiveness of Infrastructure: collection of scientific works. No.11. 150-155.
3. Galushkin A. I. (2010). Neural Networks: the Basics of Theory. Moscow: Goryachaya Liniya-Telecom. 496.
4. Feldbaum A. A., Dudykin A. D., Manovtsev A. P., and Mirolyubov N. N. (1963). Theoretical Foundations of Communication and Management. Moscow: Fizmatgiz. 932.
5. Tanenbaum A. S., and Wetherall D. J. (2011). Computer Networks. 5th ed. – Prentice Hall, Cloth. 960.
6. Stallings W. (2016). Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud. Pearson Education, Inc., Old Tappan, New Jersey. 538.
7. Kurose J. F., and Keith W. Ross. (2017). Computer Networking: A Top-Down Approach. 7th ed. Pearson Education, Inc. 864.
8. Morari M., and Zafiriou E. (1989). Robust Process Control. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 488.
9. Priscoli F. D., Isidori A., Marconi L., Pietrabissa A. (2015). Leader-Following Coordination of Nonlinear Agents Under Time-Varying Communication Topologies. IEEE Trans. on Control of Network Systems. V.2, No.4. 393-405.
10. Pietrabissa, A., Priscoli, F.D., Fiaschetti, A., & Paolo, F.D. (2006). A robust adaptive congestion control for communication networks with time-varying delays. 2006 IEEE Conference on Computer Aided Control System Design, 2006 IEEE International Conference on Control Applications, 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control. 2093-2098.
11. Di Giorgio A., Pietrabissa A., Priscoli F. D., and Isidori A. (2018). Robust Output Regulation for a Class of Linear Differential-Algebraic Systems. V.2, No.3. 477-482.
12. Quet P.-F., Ataslar B., Iftar A., Ozbay H., Kalyanaraman S., and Kang T. (2002). Rate-Based Flow Controllers for Communication Networks in the Presence of Uncertain Time-Varying Multiple Time-Delays. Automatica. No.38. 917-928.
13. Elsgolts L. E., and Norkin S. B. (1971). Introduction to the Theory of Differential Equations with Deviating Argument. Moscow: Nauka. 296.
14. Bellman R., and Cooke K. L. (1963). Differential-Difference Equations. Academic Press. 482.
15. Pinney E. (1958). Ordinary Difference-Differential Equations. University of California Press. 262.
16. Biriukov N. L., and Steklov V. K. (ed.) (2003). Transport Networks and Telecommunication Systems. Multiplexing Systems Kyiv: VIP. 352.
17. Crane M. A., and Lemoine A. J. (1977). An Introduction to the Regenerative Method for Simulation Analysis. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York. 113.