

УДК 004.7

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МОДЕЛЮВАННЯ ВИПАДКОВИХ ЗАТРИМОК У МЕРЕЖЕВИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ

І.М. Чистик¹¹ Department of Automation and Telecommunications, Donetsk National Technical University, Drohobych, UkraineE-mail: ivan.chystyk@donntu.edu.ua

АНОТАЦІЯ

У цій роботі пропонується розглянути основні типи моделей затримок, що виникають і, що важливо, негативно впливають на показники ефективності і продуктивності роботи мережесистем управління, а здебільшого призводять до збоїв і навіть відмов у роботі. Як і для всіх інших видів систем управління, для мережесистем управління також дуже важливими є стабільність роботи, точність і швидкість виконання процесів і алгоритмів, високі показники безпеки, доступність і гнучкість та низка інших вимог. І все це досягається шляхом постійного вивчення і вдосконалення технологій, пошуком нових і нестандартних рішень і також постійними дослідженнями в галузі.

Як нам уже відомо, мережесистеми управління (Networked control system), виходячи навіть з назви, передбачають наявність мереж у своїх контурах управління, що своєю чергою призводить до появи низки проблем, які характерні мережесистемним технологіям. Таких проблем як, наприклад, випадкові затримки чи втрата пакетів або передача декількох пакетів за раз.

Слід зазначити, що зазвичай найбільше уваги під час дослідження цього питання приділяється саме проблемам, що спричинені випадковими затримками, тому що вони можуть за наявності привести також і до появи інших проблем, що були зазначені вище. Тому для зменшення негативного впливу цих випадкових затримок, які призводять до зменшення показників ефективності роботи мережесистем управління та нестабільності в їх роботі, з'являється потреба у встановленні математичної моделі випадкових затримок перед створенням компенсуючого елементу. І моделювання мережесистем управління у разі правильного підходу і вибору вдалих рішень і методів моделювання дає змогу вирішити питання наявності недосконалостей і проблем, що пов'язані з такою технологією.

Ключові слова: випадкові затримки, моделювання, мережесистеми управління, ланцюг Маркова, стохастична модель, прихована модель Маркова.

Вступ

Постійний розвиток і зростання використання технологій зв'язку й управління останнім часом призвели і до розвитку мережесистем управління. Як відомо, мережесистеми управління являють собою зазвичай розподілені системи управління із замкнутим контуром управління, який замикається за допомогою мережі зв'язку, поєднуючи датчики контролерів і виконавчі механізми. Якщо порівняти з більш традиційною системою управління, що працює за принципом з'єднання «точка-точка», то використання NCS дозволяють суттєво зменшити кількість

проводів, зменшити вартість системи, покращити процес діагностики, налагодження і обслуговування системи, збільшити її гнучкість і надійність [1]. Через усі ці переваги можна пояснити збільшення популярності використання мережесистем управління у різних середовищах.

Звичайно, не потрібно забувати і про наявні недоліки такої технології, що пов'язані з обмеженою пропускну здатністю в мережах зв'язку, що призводить до появи випадкових затримок. Інформація, що передається в мережі, може надходити до різних вузлів із різними затримками, що призводить до того,

що один пакет може надійти до пункту призначення раніше або пізніше, ніж це було заплановано. Загалом, втрати пакетів, передача мультипакетів, а також порушення порядку передачі пакетів [2] здебільшого зумовлені випадковими затримками, а вони залежать, наприклад, від перенавантаження мережі, конфлікту між вузлами та ін.

Можна виділити два основних типи випадкових затримок – затримку від датчика до контролера (затримка SC) у зворотному каналі мережі і затримку між контролером і виконавчим механізмом (затримка CA). І загалом було запропоновано використовувати чотири типи методів моделювання для випадкових затримок.

Матеріали та методи досліджень

У цій роботі було використано методи структурного і порівняльного аналізів. Було досліджено наукову і методичну літератури з використанням інформаційного та аналітичного підходів, також використано низку онлайн-ресурсів для отримання інформації з тематики дослідження.

Результати досліджень

Модель постійної затримки

Початкові дослідження мережевих систем управління пов'язані з моделюванням випадкових затримок як константи, оскільки на цьому етапі було важко отримувати характеристику розподілу затримок. У цьому випадку у вузлі контролера створюється буфер приймача, при цьому розмір самого буфера такий, як максимальна затримка SC (або CA) [3; 4], залежно від конфігурації. Таким чином, ми маємо можливість розглядати мережеві системи управління як детерміновану систему [5; 6], застосовуючи сюди методи детермінованого управління. Наприклад, ми можемо використовувати детермінований предиктор для компенсації затримки, який буде використовуватися для визначення вхідних станів налаштування, а спостерігач – для оцінки станів налаштування. І тоді ми використовуємо буфер «перший прийшов – першим вийшов» для збереження результатів попередніх вимірювань сигналу на виході, і інший такий буфер встановлюється вже для виконавчого механізму, щоб зберігати сигнали керування. Розміри буферів визначаються відповідно до максимального значення затримок. У такому випадку мережева система управління стає детермінованою, що значно полегшує процес управління.

У випадку наявності у системі комутованого Ethernet випадкові затримки мають невелику довжину і малу варіативність, тому доцільно її вважати як постійну, і використати детерміновані методи управління до мережевих систем управління, що замкнуті через комутований Ethernet як величину постійну.

Таким чином, використання цього підходу призводить до збільшення випадкової затримки штучним шляхом, у результаті чого страждає продуктивність, що призводить до нестабільності системи [7; 8]. Саме тому більш доцільним і привабливим зараз виглядає дослідження стохастичних методів управління.

Взаємозалежна стохастична модель затримки

З огляду на вплив великої кількості факторів, таких як навантаження на мережу, конфлікт вузлів мережі, її перенавантаження та ін., такі затримки мають тенденцію бути стохастичними. Можна виділити дві категорії стохастичних моделей затримки – модель із взаємонезалежними затримками і модель із імовірно залежними затримками. У випадках, коли відношення імовірностей невідоме, використовують першу категорію управління.

Стохастичне управління

Модель системи, в якій маємо незалежні стохастичні затримки, кожна така затримка є окремою стохастичною змінною, і її розподіл описується стохастичною функцією. У разі використання подібної моделі для дослідження мережевих систем управління використовуються оптимальні підходи управління. Попередні дослідження [9] містили у собі розробки LQG-оптимального контролера для мережевої системи управління із взаємонезалежними стохастичними затримками. Пізніше було змодельовано як стохастичну систему, де передбачався розподіл випадкових затримок, який був відомий заздалегідь. Потім таке припущення було поставлене під сумнів використанням середнього показника затримки в мережі для мережевої системи управління з невідомим розподілом затримок, а також покращенням оптимального показника LQG [10].

З урахуванням попередніх досліджень створюються стохастичні оптимальні контролери, що дають можливість отримати середньоквадратичну експоненціальну стабільність мережевої системи управління. Альтернативним рішенням можна вважати введення оптимального контролера за умови розв'язання рівняння Ріккати, введення нового методу управління, де максимально допустима межа дається на основі умов стохастичної стійкості. Випадкові затримки можуть бути змодельовані як лінійна функція стохастичної змінної, що задовольняє розподіл Бернуллі [11], і задана характеристика загасання збурень досягається шляхом проектування контролера на основі спостерігача, що гарантує стохастичну експоненціальну стабільність замкнутої системи.

Для MIMO-мережевих систем управління, що містять множинні незалежні стохастичні затримки стану, розробляється контролер оптимального лінійного квадратичного регулятора (LQR), що дає змогу компенсувати багаторазові тимчасові затримки [12].

Робастне, відмовостійке управління

Стохастична затримка може бути представлена як невизначеність або збурення мережевої системи управління, і після цього створюється контролер, що дозволить отримати надійну стійкість до відмов і забезпечить стабільну роботу NCS. Відмінність від стохастичного управління полягає в тому, що в цьому випадку немає потреби у характеристиках розподілу випадкових затримок. Випадкові затримки (SC або CA) розподіляються на дві частини. Перша частина виступає постійною затримкою, а друга – невизначена, і трактується як мультиплікативне збурення мережевої системи управління. В такому випадку необхідно створити робастний контролер безперервного часу із використанням μ -синтезу [13]. Нова модель системи дискретного часу перемикання для опису мережевої системи управління з випадковими затримками дає можливість отримати достатні умови для стабільної роботи і необхідних показників продуктивності NCS. Також ця умова дає можливість встановити залежність між тривалістю затримки і частотою зміни цієї затримки та продуктивністю системи.

Використовуючи функціональний метод Ляпунова-Красовського, можна провести аналіз продуктивності та дослідити проблему управління невизначених мережевих систем управління із затримками і втратами пакетів. Аналіз продуктивності виконується шляхом введення деяких змінних матриці згладжування і використовується інформація про нижню межу затримок. У такому випадку контролер розробляється шляхом розв'язання множини лінійних матричних нерівностей. Більш доцільним слід вважати рішення, також засноване на методі Ляпунова-Красовського, але в якому використовується інформація як про нижню, так і про верхню межі затримок [14]. Таке рішення менш консервативне і дозволяє уникнути використання методу перетворення моделі і обмежень для деяких перехресних термінів функції Ляпунова-Красовського і введення змінних матриці згладжування.

У випадку наявності хаотичної передачі пакетів у мережевій системі управління може бути використаний останній керуючий закон у разі отримання пакета. Мережева система може бути змодельована як дискретна система з невизначеними параметрами і багаторівневими затримками на основі матричної теорії і в результаті розробляється контролер стабілізації і розв'язується задача з мінімізації на основі лінійних матричних нерівностей.

Також стохастична затримка може бути розглянута як різновид невизначеності мережевої системи управління, розробляється контролер за допомогою μ -синтезу [15]. Якщо стохастична затримка невідома, обмежена і змінюється в часі, отримується межа надійної стійкості, метод розрахунку максимально

допустимої межі затримки. Детермінована інформація з поточної часової позначки і стохастична інформація з попередніх часових позначок використовуються для проєктування контролера. Залежно від мережевого трафіку за допомогою введення двох алгоритмів – алгоритму генерації шаблонів і алгоритму ідентифікації образів. Перший класифікує автономний мережевий трафік за деякими окремими шаблонами для отримання менш консервативної мережевої системи управління, а другий виконує пошук у реальному часі шаблону, що представляє нещодавній мережевий трафік для роботи цього контролера.

Управління з прогнозуванням

Одним із раціональних підходів для управління мережевими системами управління є управління з прогнозуванням. Він підходить для складних динамічних систем з невизначеними моделями і базується на багаторівневому тестуванні, процесі оптимізації ковання та контролі над налаштуваннями зворотного зв'язку. Загалом конфігурація мережевої системи управління з прогнозуванням має два ключові елементи – генератор прогнозування і компенсатор мережевої затримки. Далі майбутні прогнози керування відповідають необхідним показникам продуктивності системи завдяки використанню звичних методів керування, наприклад, PID чи LQG. У випадку використання останнього компенсується випадкова затримка шляхом вибору останнього контрольного значення із відомих послідовностей керування з прогнозуванням, що доступні на стороні встановлення. Таким чином, керування з прогнозуванням знайшло доволі широке застосування на практиці в мережевих системах Хаммерштейна [16] і мережевих системах Вінера [17].

Слід зазначити, що в реальних системах отримати контрольні дані складно через наявність затримок і використання відстрочених контрольних є не зовсім правильним рішенням. Тому можливе використання більш вдосконаленого контролера з прогнозуванням, що використовує дані уповільненого зондування, який легше реалізувати на практиці. Також у будь-який момент часу контролер не дає інформації про вхідний сигнал управління в майбутньому часі через стохастичність мережевих затримок. Використання оцінювального входу контролю майбутнього часу замість реального може викликати проблему, де похибка в оцінці вплине на точність предиктору і може викликати збій у роботі [18]. Тому можна виділити окремий підхід до проєктування мережевого управління з прогнозуванням шляхом інкапсуляції поточного входу прогнозуючого управління із входом історії прогнозування. Таким чином, продуктивність і стабільність не залежать від витрат установки.

Мережевий підхід до управління з прогнозуванням звичайної замкнутої системи в комутуванні,

стабільність якої гарантується виходячи з умови, що всі її підсистеми мають загальну функцію Ляпунова у разі випадкового перемикавання. Проте така умова занадто строга на практиці, оскільки деякі значення можуть бути недоречними з точки зору показників стабільності системи. Більш досконале рішення можна отримати за рахунок призначення підсистеми проектування сигналу перемикавання. Середній час затримки пропонується як ефективний інструмент для знаходження сигналу перемикавання, де загальна функція Ляпунова не є необхідною для стабільності всієї системи навіть за умови існування нестабільних підсистем. Є також можливість поєднати управління з прогнозуванням з технікою комутаційних функцій Ляпунова, де коефіцієнт посилення контролера змінюється разом з випадковою затримкою, щоб мати можливість отримати замкнуту систему, яка буде асимптотично стійка з межею H_{∞} норми. Також можлива схема управління з прогнозуванням [19], що заснована на багатошвидкісній фільтрації Калмана, що слугує для компенсації випадкових затримок і втрати пакетів у каналі зворотного зв'язку мережевої системи управління.

Модель ланцюга Маркова

Оскільки не завжди стохастичні затримки є взаємозалежними, то наявні імовірнісні залежності між затримками, наприклад, розподіл Бернуллі або ж ланцюг Маркова. І дослідженням з моделювання останнього було приділено дуже багато уваги та присвячено велику кількість робіт. Загалом, можна виділити два види затримок, як зазначалось у цій роботі раніше, – затримки SC і затримки CA, тому більшість методів також можна поділити на дві категорії. Перша категорія враховує затримки або затримки SC, або CA, а друга враховує обидві, і другу можна розділити на дві підкатегорії: перший варіант використовує один ланцюг Маркова для моделювання суми затримки SC і CA, а другий варіант використовує два ланцюги Маркова для імітації кожної із затримок.

Урахування затримок S-C затримок або C-A затримок

Мережева система управління на основі марковської моделі затримки може бути змодельована як дискретна в часі лінійна система стрибків, і для створення комутаційних і некомутаційних зворотних зв'язків можливе використання алгоритму ітерації [20]. Таким чином, марковські стани є повністю спостережувані, проте доступ до них може бути обмеженим, і в деяких ситуаціях може зробити недоступними для контролера. На практиці важко отримати точну матрицю імовірностей для переходу ланцюга затримки SC. Врахування політопної невизначеності в матриці імовірностей переходу ланцюга Маркова із розгляданням і затримки SC, і втрати пакетів дає змогу виправити зазначену вище проблему. Задача

надійного виявлення несправностей перетворюється на допоміжну задачу надійної фільтрації і дає змогу встановити достатню умову для існування фільтру виявлення несправностей в умовах лінійних нерівностей матриць. Під час дослідження затримки марковської моделі з урахуванням втрати пакетів і невизначеності мережевої системи управління втрати пакетів компенсуються, також ставиться умова для існування рівня загасання перешкод. Мережева система управління може бути змодельована як лінійна система скачків Маркова [21], а контролер робиться з використанням методів квантування затримки і вектора доповненого контролера.

Врахування затримок S-C затримок і C-A затримок

Зазвичай затримки обох типів існують разом у мережевих системах управління. Тому в низці досліджень вони об'єднуються в одну затримку. Розробляється контролер, що повинен задовольняти показники продуктивності. Може бути використаний метод розрахунку матриці переходу марковського контуру. Затримка від датчика до механізму, яка складається з двох відомих затримок, а також час обчислення в контролері дуже маленький, то моделюється у вигляді марковського ланцюга. Модель Такагі-Сугено (ТС) може використовуватись для представлення мережевої системи управління з усіма можливими затримками. Застосовуючи метод моделювання на основі ТС для виявлення недоліків NCS, можна створити підхід, що засновується на парності і підхід нечіткого спостерігача [22]. Модель перетворюється на форму зворотного зв'язку на виході, вводиться метод виявлення на основі спостерігача для нелінійних мережевих систем управління з марковськими затримками від датчика до виконавчого механізму.

Для того щоб система була асимптотично стабільна при послідовних стохастичних збуреннях, наприклад, при відмовах виконавчих органів, випадкових затримках, використовується вдосконалений ітераційний алгоритм. Для систем з множинними недоліками і затримками марковського ланцюга від датчика до виконавчого механізму створюється фільтр ізоляції недоліків із встановленими параметрами, що відповідають обмеженням на загасання збурень H_{∞} і призначення полюсів у межах лінійної системи скачків Маркова. В такому випадку зазвичай призначається матриця переходу фіксованого стану, але створений контролер може не виконати задачу зі стабілізації мережевої системи управління під час зміни затримок у періоди навантаження на мережу.

У деяких ситуаціях неможливо поєднати затримку в один єдиний ланцюг Маркова, тому виникає необхідність моделювати два ланцюги Маркова. Тому можна змодельувати ці два ланцюги і отримати замкнуту лінійну систему з двома модами.

Контролер, який залежить від режиму зі зворотним зв'язком зі станом з коефіцієнтом підсилення, також залежить від затримки SC і від попередньої затримки CA. Слід зазначити, що затримка CA не завжди доступна, затримка SC також впливає і на передачу значення цієї затримки під час передачі цього значення мережею.

У випадках, коли випадкові затримки мають марковські властивості, досягти управління з прогнозуванням мережевих систем управління можна шляхом отримання замкнутої системи, яка в підсумку перетворюється на ступінчасту лінійну систему з двома режимами і контролером з прогнозуванням з моделлю зворотного зв'язку для забезпечення стохастичної стабільності замкнутої системи.

Прихована модель Маркова

Як зазначалося на початку цієї роботи, затримки, що спричинені мережею, є випадковими через вплив різних стохастичних факторів. Усі ці фактори можна об'єднати в одну абстрактну і приховану зміну, що позначатиме стан мережі. В результаті стан мережі регулює розподіл затримок, стрибок режимів задовольняє властивостям Маркова, що дозволяє моделювати стан мережі як ланцюг Маркова. І це має бути прихований ланцюг Маркова, тому що сам стан мережі ми не можемо спостерігати безпосередньо, а можемо оцінити через спостереження за затримкою. Зв'язком між станом і затримкою є прихована модель Маркова, в ній стан мережі визначає стохастичний розподіл затримок, і затримки використовуються як зонди для висновку про модель і оцінку прихованих станів мережі [23].

На основі прихованої моделі Маркова мережева система управління може розглядатися як система лінійних стрибків, і для забезпечення стабільності необхідно використання оптимального контролера LQG. Затримки від датчика до механізму розглядаються як інтервальні змінні, що керуються ланцюгом Маркова. Заснований на інтервалах різних режимів такий об'єкт перетворюється на дискретну систему стрибків з нормалізованими невизначеностями, і контролер зворотного зв'язку для стану H_∞ створюється з використанням набору лінійних матричних нерівностей.

У тих випадках, коли затримки SC і CA обидві присутні у системі, використовуються дві приховані системи Маркова для моделювання стану мережі «датчик-контролер» і «контролер-виконавчий механізм» [24]. В результаті є дві приховані моделі Маркова – одна для залежності між SC і станом мережі «датчик-контролер», а інша для зв'язку затримки CA і мережі «контролер-виконавчий механізм».

З метою отримання менш консервативних результатів вводять матриці з вільною вагою з використанням формули Ньютона-Лейбніца

для уникнення оцінки деяких перехресних членів функції Ляпунова-Красовського. В загальному випадку алгоритм Баума-Велча (алгоритм максимізації очікування) можна використати для оцінки параметрів затримок прихованої моделі Маркова мережевою системою управління. В реальних системах затримки в деяких випадках рівномірно розподіляються по інтервалу затримки, тобто при квантуванні затримок деякі централізовані затримки мають бути визначені як одне і те ж значення спостереження.

Висновки

Мережеві системи управління є актуальною галуззю дослідження з різноманітними сферами застосування. Випадкові затримки можна назвати ключовою проблемою тематики мережевих систем управління. У цій роботі розглядаються підходи стосовно процесу моделювання випадкової затримки як константи, а компенсування цієї затримки базується здебільшого на детермінованих методах управління. З огляду на те, що затримка спричинена мережею, то часто змінною в часі чи випадковою, тому все більше уваги приділяється до прийняття стохастичної затримки без імовірних залежних відношень між затримками. Модель неімовірної затримки характеризується взаємозалежними стохастичними затримками і використовується як стохастичне керування, так і робастне керування з прогнозуванням і інші способи компенсації затримок. В тих випадках, коли стохастичні затримки викликані великою кількістю факторів у мережі, то ці фактори визначаються як стан мережі, і тоді вводиться поняття прихованої моделі Маркова для моделювання затримок. Незважаючи на всі переваги і бонуси прихованої моделі Маркова порівняно з іншими методами, наприклад, тої ж моделі ланцюга Маркова, не можна сказати, що цей спосіб є єдиним правильним і найкращим, оскільки це залежить від умов дослідження та необхідних показників продуктивності та ефективності роботи, яких необхідно досягти.

Конфлікт інтересів

Автор декларує, що не має конфлікту інтересів стосовно цього дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Yang T.C. Networked control system: a brief survey. *IEEE Proceedings: Control Theory and Applications*. (2006) 153, no. 4, 403–412, 2-s2.0-33646891790. DOI: 10.1049/ip-cta:20050178.
- [2] Zhang L.X., Gao H.J., and Kaynak O. Network-induced constraints in networked control systems – a survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. (2013) 9, no. 1, 403–416. [Онлайн]. URL: <https://surl.li/xlambv>. Дата звернення: 10.02.2025.
- [3] Luck R. and Ray A. Delay compensation in integrated communication and control systems-I: conceptual development and analysis. *Proceedings of American Control Conference (ACC'90)*, May 1990, San Diego, Calif, USA, 2045–2050, 2-s2.0-0025556268.
- [4] Luck R. and Ray A. Delay compensation in integrated communication and control systems-II: implementation and verification. *Proceedings of American Control Conference (ACC'90)*, May 1990, San Diego, Calif, USA, 2051–2055, 2-s2.0-0025564524.
- [5] Luck R. and Ray A. An observer-based compensator for distributed delays. *Automatica*. (1990) 26, no. 5, 903–908, 2-s2.0-0025494613. DOI: 10.1016/0005-1098(90)90007-5.
- [6] Luck R. and Ray A. Experimental verification of a delay compensation algorithm for integrated communication and control systems. *International Journal of Control*. (1994) 59, no. 6, 1357–1372.
- [7] Yorke J.A. Asymptotic stability for one dimensional differential-delay equations. *Journal of Differential Equations*. (1970) 7, no. 1, 189–202, 2-s2.0-0000602617.
- [8] Hirai K. and Satoh Y. Stability of a system with variable time delay. *IEEE Transactions on Automatic Control*. (1980) AC-25, no. 3, 552–554, 2-s2.0-0019031734.
- [9] Nilsson J., Bernhardsson B., and Wittenmark B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays. *Automatica*. (1998) 34, no. 1, 57–64, 2-s2.0-0031675114.
- [10] Wei Z., Li C.-H., and Xie J.-Y. Improved control scheme with online delay evaluation for networked control systems. *Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA'02)*, June 2002, Shanghai, China, 1319–1323, 2-s2.0-0036945895. [Онлайн]. URL: <https://surl.li/vmzlsn>. Дата звернення: 10.02.2025.
- [11] Yang F., Wang Z., Hung Y.S., and Gani M. H_∞ control for networked systems with random communication delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*. (2006) 51, no. 3, 511–518, 2-s2.0-33645015936. DOI: 10.1109/TAC.2005.864207.
- [12] Lian F.-L., Moyne J., and Tilbury D. Modelling and optimal controller design of networked control systems with multiple delays. *International Journal of Control*. (2003) 76, no. 6, 591–606, 2-s2.0-0142168437. DOI: 10.1080/0020717031000098426.
- [13] Kim D.K., Park P., and Ko J.W. Output-feedback $\mathcal{H}_\infty$ control of systems over communication networks using a deterministic switching system approach. *Automatica*. (2004) 40, no. 7, 1205–1212, 2-s2.0-2442478196. DOI: 10.1016/j.automatica.2004.01.024.
- [14] Jiang X., Han Q.-L., Liu S., and Xue A. A new H_∞ stabilization criterion for networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. (2008) 53, no. 4, 1025–1032, 2-s2.0-44849095399. DOI: 10.1109/TAC.2008.919547.
- [15] Dritsas L. and Tzes A. Robust stability bounds for networked controlled systems with unknown, bounded and varying delays. *IET Control Theory and Applications*. (2009) 3, no. 3, 270–280, 2-s2.0-61849153843. DOI: 10.1049/iet-cta:20070384.
- [16] Zhao Y.-B., Liu G.-P., and Rees D. A predictive control-based approach to networked hammerstein systems: design and stability analysis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. Part B. (2008) 38, no. 3, 700–708, 2-s2.0-44849095836. DOI: 10.1109/TSMCB.2008.918572.
- [17] Zhao Y.-B., Liu G.-P., and Rees D. A predictive control based approach to networked wiener systems. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. (2008) 4, no. 11, 2793–2802, 2-s2.0-63549146576. [Онлайн]. URL: <https://surl.li/aknhph>. Дата звернення: 10.02.2025.
- [18] Liu G.-P., Xia Y., Chen J., Rees D., and Hu W. Networked predictive control of systems with random network delays in both forward and feedback channels. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. (2007) 54, no. 3, 1282–1297, 2-s2.0-37549072558. DOI: 10.1109/TIE.2007.893073.
- [19] Liu B., Xia Y., Mahmoud M. S., Wu H., and Cui S. New predictive control scheme for networked control systems. *Circuits, Systems, and Signal Processing*. (2012) 31, no. 3, 945–960, 2-s2.0-84860626769. DOI: 10.1007/s00034-011-9359-9.
- [20] Xiao L., Hassibi A., and How J.P. Control with random communication delays via a discrete-time jump system approach. *Proceedings of American Control Conference (ACC'00)*, June 2000, Chicago, Ill, USA, 2199–2204, 2-s2.0-0034540045.
- [21] Liu L., Shan L., and Tong C. Delay-quantization and augmented controller vector method of networked control systems modeling. *Proceedings of the 1st International Workshop on Education Technology and Computer Science (ETCS'09)*, March 2009, Wuhan, China, 278–282, 2-s2.0-69749103871. [Онлайн]. URL: <https://surl.li/tluwsz>. Дата звернення: 10.02.2025. DOI: 10.1109/ETCS.2009.589.
- [22] Mao Z., Jiang B., and Shi P. Fault detection for a class of nonlinear networked control systems. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. (2010) 24, no. 7, 610–622, 2-s2.0-77954279006. DOI: 10.1002/acs.1161
- [23] Wei W., Wang B., and Towsley D. Continuous-time hidden Markov models for network performance evaluation. *Performance Evaluation*. (2002) 49, no. 1-4, 129–146, 2-s2.0-1642378633. DOI: 10.1016/S0166-5316(02)00122-0
- [24] Huang D. and Nguang S.K. State feedback control of uncertain networked control systems with random time delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*. (2008) 53, no. 3, 829–834, 2-s2.0-42649108401. [Онлайн]. URL: <https://surl.li/omslbs>. Дата звернення: 10.02.2025. DOI: 10.1109/TAC.2008.919571.

RESEARCH INTO THE PROCESS OF MODELING RANDOM DELAYS IN NETWORKED CONTROL SYSTEMS

Ivan Chystyk

This paper proposes to consider the main types of delay models that arise and, importantly, negatively affect the efficiency and productivity of networked control systems, and in some cases lead to failures and even failures in operation. As for all other types of control systems, for networked control systems, stability of operation, accuracy and speed of execution of processes and algorithms, high security indicators, availability and flexibility and a number of other requirements are also very important. And all this is achieved through constant study and improvement of technologies, search for new and non-standard solutions and also constant research in the industry.

As we already know, networked control systems (NCS) based on even the name assume the presence of networks in their control circuits, which in turn leads to the emergence of a number of problems that are characteristic of network technologies. Such problems as, for example, random delays or packet loss, or transmission of several packets at a time.

It should be noted that usually the most attention when studying this issue is paid to the problems caused by random delays, because if they are present, they can also lead to the emergence of other problems that were mentioned above. Therefore, to reduce the negative impact of these random delays, which lead to a decrease in the efficiency of networked control systems and instability in their operation, there is a need to establish a mathematical model of random delays before creating a compensating element. And modeling of networked control systems with the right approach and the choice of successful solutions and modeling methods makes it possible to solve the issue of the presence of imperfections and problems associated with this technology.

Keywords: random delays, modeling, networked control systems, Markov chain, stochastic model, hidden Markov model.

REFERENCES

- [1] Yang T.C., Networked control system: a brief survey. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*. (2006) 153, no. 4, 403–412, 2-s2.0-33646891790. DOI: 10.1049/ip-cta:20050178.
- [2] Zhang L.X., Gao H.J., and Kaynak O. Network-induced constraints in networked control systems – a survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. (2013) 9, no. 1, 403–416. [Online]. URL: <https://surl.li/lambda>. Accessed: 10.02.2025.
- [3] Luck R. and Ray A. Delay compensation in integrated communication and control systems-I: conceptual development and analysis. *Proceedings of American Control Conference (ACC'90)*, May 1990, San Diego, Calif, USA, 2045–2050, 2-s2.0-0025556268.
- [4] Luck R. and Ray A. Delay compensation in integrated communication and control systems-II: implementation and verification. *Proceedings of American Control Conference (ACC'90)*, May 1990, San Diego, Calif, USA, 2051–2055, 2-s2.0-0025564524.
- [5] Luck R. and Ray A. An observer-based compensator for distributed delays. *Automatica*. (1990) 26, no. 5, 903–908, 2-s2.0-0025494613. DOI: 10.1016/0005-1098(90)90007-5.
- [6] Luck R. and Ray A. Experimental verification of a delay compensation algorithm for integrated communication and control systems. *International Journal of Control*. (1994) 59, no. 6, 1357–1372.
- [7] Yorke J.A. Asymptotic stability for one dimensional differential-delay equations. *Journal of Differential Equations*. (1970) 7, no. 1, 189–202, 2-s2.0-0000602617.
- [8] Hirai K. and Satoh Y. Stability of a system with variable time delay. *IEEE Transactions on Automatic Control*. (1980) AC-25, no. 3, 552–554, 2-s2.0-0019031734.
- [9] Nilsson J., Bernhardsson B., and Wittenmark B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays. *Automatica*. (1998) 34, no. 1, 57–64, 2-s2.0-0031675114.
- [10] Wei Z., Li C.-H., and Xie J.-Y. Improved control scheme with online delay evaluation for networked control systems. *Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA'02)*, June 2002, Shanghai, China, 1319–1323, 2-s2.0-0036945895. [Online]. URL: <https://surl.li/vmzlsn>. Accessed: 10.02.2025.
- [11] Yang F., Wang Z., Hung Y. S., and Gani M. H_∞ control for networked systems with random communication delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*. (2006) 51, no. 3, 511–518, 2-s2.0-33645015936. DOI: 10.1109/TAC.2005.864207.
- [12] Lian F.-L., Moyne J., and Tilbury D. Modelling and optimal controller design of networked control systems with multiple delays. *International Journal of Control*. (2003) 76, no. 6, 591–606, 2-s2.0-0142168437. DOI: 10.1080/0020717031000098426.
- [13] Kim D.K., Park P., and Ko J.W. Output-feedback $\mathcal{H}_\infty$ control of systems over communication networks using a deterministic switching system approach. *Automatica*. (2004) 40, no. 7, 1205–1212, 2-s2.0-2442478196. DOI: 10.1016/j.automatica.2004.01.024.
- [14] Jiang X., Han Q.-L., Liu S., and Xue A. A new H_∞ stabilization criterion for networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. (2008) 53, no. 4, 1025–1032, 2-s2.0-44849095399. DOI: 10.1109/TAC.2008.919547.
- [15] Drietas L. and Tzes A. Robust stability bounds for networked controlled systems with unknown, bounded and varying delays. *IET Control Theory and Applications*. (2009) 3, no. 3, 270–280, 2-s2.0-61849153843. DOI: 10.1049/iet-cta:20070384.
- [16] Zhao Y.-B., Liu G.-P., and Rees D. A predictive control-based approach to networked hammerstein systems: design and stability analysis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. Part B. (2008) 38, no. 3, 700–708, 2-s2.0-44849095836. DOI: 10.1109/TSMCB.2008.918572.

- [17] Zhao Y.-B., Liu G.-P., and Rees D. A predictive control based approach to networked wiener systems. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. (2008) 4, no. 11, 2793–2802, 2-s2.0-63549146576. [Online]. URL: <https://surl.li/aknhph>. Accessed: 10.02.2025.
- [18] Liu G.-P., Xia Y., Chen J., Rees D., and Hu W. Networked predictive control of systems with random network delays in both forward and feedback channels. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. (2007) 54, no. 3, 1282–1297, 2-s2.0-37549072558. DOI: 10.1109/TIE.2007.893073.
- [19] Liu B., Xia Y., Mahmoud M.S., Wu H., and Cui S. New predictive control scheme for networked control systems. *Circuits, Systems, and Signal Processing*. (2012) 31, no. 3, 945–960, 2-s2.0-84860626769. DOI: 10.1007/s00034-011-9359-9.
- [20] Xiao L., Hassibi A., and How J.P. Control with random communication delays via a discrete-time jump system approach. *Proceedings of American Control Conference (ACC'00)*, June 2000, Chicago, Ill, USA, 2199–2204, 2-s2.0-0034540045.
- [21] Liu L., Shan L., and Tong C. Delay-quantization and augmented controller vector method of networked control systems modeling. *Proceedings of the 1st International Workshop on Education Technology and Computer Science (ETCS'09)*, March 2009, Wuhan, China, 278–282, 2-s2.0-69749103871. [Online]. URL: <https://surl.li/tluwsz>. Accessed: 10.02.2025. DOI: 10.1109/ETCS.2009.589.
- [22] Mao Z., Jiang B., and Shi P. Fault detection for a class of nonlinear networked control systems. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. (2010) 24, no. 7, 610–622, 2-s2.0-77954279006. DOI: 10.1002/acs.1161.
- [23] Wei W., Wang B., and Towsley D. Continuous-time hidden Markov models for network performance evaluation. *Performance Evaluation*. (2002) 49, no. 1-4, 129–146, 2-s2.0-1642378633. DOI: 10.1016/S0166-5316(02)00122-0.
- [24] Huang D. and Nguang S.K. State feedback control of uncertain networked control systems with random time delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*. (2008) 53, no. 3, 829–834, 2-s2.0-42649108401. [Online]. URL: <https://surl.li/omslbs>. Accessed: 10.02.2025. DOI: 10.1109/TAC.2008.919571.