Т3. №5(37)'2025

Автоматизація технологічних процесів

УДК 004.7

ВИКОРИСТАННЯ АДАПТИВНОГО MPC ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ ВИПАДКОВИХ ЗАТРИМОК В МЕРЕЖЕВИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ

І.М. Чистик[1]
[1] *Department of Automation and Telecommunications, Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine*

E-mail: ivan.chystyk@donntu.edu.ua

АНОТАЦІЯ

Цю роботу присвячено актуальній проблемі компенсації випадкових затримок у мережевих системах управління (Networked Control Systems), які виникають через проблеми й негативні особливості каналів зв'язку. Ці стохастичні затримки, що обумовлені чергами пакетів, колізіями й мінливим навантаженням, призводять до дестабілізації, погіршення точності та зниження продуктивності роботи.

Традиційні методи компенсації, які передбачають ПІД-регулятори та детерміновані підходи (наприклад, апроксимація Сміта), показують низькі показники ефективності в умовах наявності випадкових затримок. Як рішення цієї проблеми пропонується використання управління з прогнозуванням (Model Predictive Control – MPC), у якому завдяки використанню моделі об'єкта є можливість передбачити поведінку системи й оптимізувати керуючий вплив для компенсації очікуваних спотворень сигналу.

Метою роботи є створення методу компенсації на основі адаптивного MPC. Для цього представлена математична модель мережевої системи управління з урахуванням випадкових затримок у лініях зв'язку «сенсор – контролер» та «контролер – актуатор», включно з формалізацією розширеного вектора стану й побудовою спостерігача. Практична значимість підтверджується створенням в MATLAB/Simulink імітаційної моделі з відтворюваними стохастичними затримками та проведеним кількісним аналізом деградації показників управління.

У роботі запропоновано і проаналізовано гібридне рішення, що комбінує кастомний алгоритм передбачення стану, адаптивний буфер управління й інструменти MPC Toolbox. Порівняльне моделювання демонструє перевагу гібридного підходу над готовими рішеннями MPC і кастомним передбачувачем за ключовими метриками: інтегральна абсолютна помилка (IAE), час перехідного процесу, енергія управління і стійкість до випадкових затримок. Результати вказують на суттєве покращення стійкості та продуктивності системи, підтверджуючи перспективність використання адаптивного MPC для створення надійних систем управління нового покоління, які функціонують в умовах з неідеальним комунікаційним середовищем.

Ключові слова: *випадкові затримки, управління з прогнозуванням, мережеві системи управління, моделювання, контролер.*

Вступ

Мережеві системи управління (Networked Control Systems) забезпечують особливий підхід до організації управління технологічними процесами, коли складові частини системи (сенсори, контролери, виконавчі механізми) для комунікації між собою використовують мережу [2]. Застосування подібної архітектури суттєво відрізняється від звичних і традиційних рішень, які використовують пряме з'єднання, і ці відмінності надають і ряд вагомих переваг: зменшення вартості й полегшення процесу монтажу, можливість гнучкої конфігурації, широкі можливості для масштабування, а також можливості для інтегрування розподілених об'єктів. Такі особливості й переваги мережевих систем управління зробили їх дослідження та використання затребуваними в різних галузях – від промислової автоматизації та енергосистем безпілотних транспортних засобів і телемедицини [2].

Сама сутність мережевої інфраструктури має деякі особливості, які стають негативними чинниками, що

потребують рішення. Під час процесу передачі даних по каналах зв’язку обов’язково виникають випадкові затримки, спричинені мережею (random network-induced delays), поява яких зумовлена рядом причин [2; 7]:

1) черги пакетів у комутаторах;
2) колізії під час передачі в роздільному середовищі;
3) недетермінована маршрутизація;
4) ретрансляції за втрати пакетів;
5) змінне навантаження на канали зв’язку.

Ці затримки мають стохастичний характер і варіюються від мілісекунд до секунд, тим самим створюючи важливі та нетривіальні задачі до управління такими системами [5; 13]. З погляду фізики природу випадкових затримок можна пояснити асинхронністю процесів під час генерації даних сенсорами, обробки контролером і подальшою доставки команд до виконавчих пристроїв такою неідеальною мережею [2; 7].

Критичність і принциповість у питанні компенсації затримок зумовлена їх негативним впливом на систему [5; 10; 14], а саме:

– дестабілізацією – затримування керуючих сигналів знижує запас стійкості, що провокує коливання та розходження процесів (руйнування властивості стійкості за Ляпуновим);
– погіршенням точності – неузгодженість між поточним станом та даними, що були отримані контролером із затримкою, призводить до зростання статичної та динамічної помилки (збільшення інтегральних критеріїв);
– зниження показників продуктивності – перерегулювання, збільшення часу перехідних процесів і втрата швидкодії суттєво зменшують можливості системи реагувати на збурення.

Важливо зазначити, що в надкритичних системах і сферах застосування (наприклад, в хімічних реакторах, під час хірургічних робіт тощо) затримка навіть у 200 мс дає високий шанс на аварію, тому питання затримок у системах управління є дуже важливим [11].

Матеріали та методи досліджень

У цій роботі було використано методи структурного й порівняльного аналізу. Було досліджено наукову та методичну літературу з використанням інформаційного й аналітичного підходу, також використано ряд онлайн-ресурсів для отримання інформації за тематикою дослідження.

Результати досліджень

Як відомо, затримки, що перевищують показник 10–15 % від постійної часу об’єкта, з малою ефективністю піддаються регулюванню класичними регуляторами (наприклад, ПІД) [3]. Традиційні же методи компенсації – буферизація, апроксимація Сміта – часто є некоректними до використання для випадкових затримок, оскільки передбачають детермінованість чи постійність величини запізнення [3; 13].

У такій ситуації управління з прогнозуванням (Predictive Control) може запропонувати принципово відмінний підхід [4; 6; 9]. Можна виділити вагому перевагу – це можливість використовувати модель об’єкта для передбачення поведінки системи в майбутньому проміжку часу з урахуванням інформації про затримки. Алгоритм не тільки дає змогу зреагувати на поточку помилку, але й оптимізує послідовність керуючих впливів, що дає можливість компенсувати очікувані спотворення сигналів.

Результат роботи – це розробка та верифікація методу компенсації випадкових затримок у мережевих системах управління на основі адаптивного MPC. Практичне значення підтверджується:

– створенням симуляційної моделі мережевої системи управління в MATLAB/Simulink з відтворюваними стохастичними затримками;
– кількісним аналізом деградації показників управління в разі варіативних затримок;
– підтвердженням ефективності MPC порівняно з традиційними методами.

Запропонований підхід відкриває перспективи для створення стійких систем управління нового покоління, які здатні функціонувати в умовах неідеальних комунікаційних середовищ.

Математична модель мережевої системи управління з випадковими затримками

1. Базові рівняння об’єкта управління

Розглянемо лінійну стаціонарну систему в дискретному часі з періодом дискретизації T_s:

Рівняння стану:

$$\mathrm{x}(k+1) = \mathrm{A}\mathrm{x}(k) + \mathrm{B}\mathrm{u}(k), (1).$$

Рівняння виходу:

$$\mathrm{y}(k) = \mathrm{C}\mathrm{x}(k), (2),$$

де:

– $\mathrm{x}(k) \in \mathbb{R}^n$ – вектор стану,
– $\mathrm{u}(k) \in \mathbb{R}^m$ – вектор управління,
– $\mathrm{y}(k) \in \mathbb{R}^p$ – вектор вимірювань,
– $A \in \mathbb{R}^{n\times n}, B \in \mathbb{R}^{n\times m}, C \in \mathbb{R}^{p\times n}$ – матриці системи.

2. Модель мережевих затримок

У мережевих системах управління виникають дві випадкові затримки [2; 5]:

– $\tau_{sc}(k)$ – затримка вимірювання (sensor-to-controller). Це затримка передачі $\mathrm{y}(k)$ від сенсора до контролера;
– $\tau_{ca}(k)$ – затримка управління (controller-to-actuator). Це затримка передачі $\mathrm{u}(k)$ від контролера до виконуючого пристрою.

Copyright © 2025, ОТА.

Математичний опис:

$$d_{sc}(k) = \frac{\tau_{sc}(k)}{T}, d_{ca}(k) = \frac{\tau_{ca}(k)}{T}, (3).$$

$$d_{sc}(k \in \{0,1,\ldots,d_{sc}^{max}\}, d_{ca}(k) \in \{0,1,\ldots,d_{ca}^{max}\}, (4).$$

Властивості затримок:

Обмеженість: $d_{sc}^{max} = \tau_{sc}^{max} / T, d_{ca}^{max} = \tau_{ca}^{max} / T$.

Стохастичність:

$\tau_{sc}(k) \sim \mathcal{U}(a,b), \tau_{ca}(k) \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ [5; 10; 14].

3. Об’єднана модель системи із затримками

Ключові співвідношення

Управління із затримкою, що поступає на об’єкт в момент k:

$$\mathrm{u}(k) = \mathrm{u}_c(k - d_{ca}(k)), (5).$$

Вимірювання із затримкою, що доступне контролеру в момент k:

$$\mathrm{y}_c(k) = \mathrm{y}(k - d_{sc}(k)) = \mathrm{C}_\mathrm{x}(k - d_{sc}(k)), (6).$$

4. Розширена модель стану

Для врахування історії управління вводимо розширений вектор стану:

$$\mathrm{z}(k) = \begin{bmatrix} \mathrm{x}(k) \\ \mathrm{u}(k-1) \\ \mathrm{u}(k-2) \\ \vdots \\ \mathrm{u}(k-d^{max}) \end{bmatrix}, \ d^{max} = d_{sc}^{max} + d_{ca}^{max}, (7).$$

Розмірність: $\dim(\mathrm{z}) = n + m \cdot d^{max}$.

Управління розширеної системи: $\mathrm{z}(k+1) = \mathrm{A}_d z(k) + \mathrm{B}_d v(k), (8),$

де $v(k)$ – нове управління, що розраховується контролером, а матриці A_d і B_d залежать поточних затримок.

5. Структура матриць для фіксованої затримки

У випадку, коли відома затримка $d = d_{ca}(k)$:

Матриця A_d: $\mathrm{A}_d = \begin{bmatrix} A & 0 & \cdots B \cdots 0 \\ 0 & I_m & 0 \cdots 0 \\ 0 & 0 & I_m \cdots 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \ddots \vdots \\ 0 & 0 & \cdots I_m \ 0 \end{bmatrix}, \mathrm{B}_d = \begin{bmatrix} 0_{n\times m} \\ I_m \\ 0_{m\times m} \\ \vdots \\ 0_{m\times m} \end{bmatrix}, (9).$

Таким чином, блок B розміщено в позиції $(d+1)$ вектора управління, а I_m є одиничною матрицею розмірності $m \times m$.

6. Спостерігач стану

Для оцінки поточного стану за замірами із запізненням маємо таке [1; 3; 12]:

$$\hat{\mathrm{x}}(k|k) = \mathrm{A}^{d_{sc}(k)} \mathrm{x}(k - d_{sc}(k)) + \sum_{i=1}^{d_{sc}(k)} \mathrm{A}^{i-1} \mathrm{B} \mathrm{u}(k-i), (10),$$

де $\hat{\mathrm{x}}(k|k)$ – оцінка стану в момент k на основі виміру $\mathrm{y}(k - d_{sc}(k))$.

7. Прогнозна модель (MPC)

Прогноз стану на *N* кроків вперед [4; 6; 9]:

$$\hat{\mathrm{z}}(k+j+1|k) = \mathrm{A}_d \hat{\mathrm{z}}(k+j|k) + \mathrm{B}_d \mathrm{v}(k+j|k), (11).$$

З обмеженнями: $\mathrm{v}_{min} \le \mathrm{v}(k+j|k) \le \mathrm{v}_{max}, j = 0,1,\ldots,N-1$.

8. Критерій оптимізації MPC

Мінімізація квадратичної функції вартості:

$$\mathrm{J} = \sum_{j=1}^{N} \hat{\mathrm{y}}(k+j|k) - \mathrm{r}(k+j)_Q^2 + \sum_{j=0}^{N_u-1} \Delta \mathrm{v}(k+j \mid k)_\mathrm{R}^2, (12) \cdot$$

З такими параметрами:

- $Q \succ 0, R \succ 0$ – вагові матриці,
- N – горизонт прогнозу,
- N_u – горизонт управління,
- r – цільовий сигнал.

Ця математична формалізація дає змогу аналізувати стійкість системи та синтезувати компенсатор, що буде адаптивний до випадкових мережевих затримок [4; 5; 13].

Моделювання адаптивного MPC для компенсації випадкових затримок у мережевих системах управління

Оскільки існує декілька шляхів та підходів до моделювання мережевих систем управління з випадковими затримками, пропонується рішення, яке використовує модуль прогнозування, що надає вагому перевагу у вигляді повного контролю над створеним алгоритмом передбачення і також поєднується із сильними сторонами інструментів, що містяться в MPC ToolBox MATLAB/Simulink [9].

Нижче буде наведено опис створення такої системи в MATLAB/Simulink, яка дає змогу виконувати моделювання мережевих систем управління з випадковими затримками й отримати результати стосовно ефективності роботи в умовах наявності цих затримок із використанням компенсувального пристрою на базі управління з прогнозуванням. Для збільшення показників ефективності роботи такої системи було використано гібридне рішення, яке має елементи кастомного алгоритму на основі LQR + передбачення стану, реалізації буферу передбачення (MATLAB Function), а також інструменти з MPC ToolBox. Важливо враховувати, що такий потужний інструмент, як MATLAB/Simulink, уже містить у собі готові інструменти для управління з прогнозуванням, використання яких є досить простим і зрозумілим і водночас демонструє досить високі показники ефективності роботи такої системи:

Але такий готовий варіант, звичайно, надає перевагу, але є досить негнучким і має ряд обмежень, тому пропонується такий гібридний варіант.

Табл. 1. Результат використання готового MPC з набору MPC ToolBox MATLAB/Simulink

Система	Перерегулювання	Час встановлення	IAE
Ідеальна система (без затримок)	5 %	0,8 с	0,12
Система з випадковими затримками	35 %	2,5 с	0,45
Компенсація за допомогою готового MPC	10 %	1,2 с	0,18

Пояснення елементів:

1. Спостерігач станів (State Observer).

– Реалізується за допомогою Калмановського фільтра [1; 3; 12].

– Основна функція: відновлення повного стану $\hat{x}(k)$.

– Реалізація в MATLAB:

```
function x_hat = kalman_observer(y, u, A, B, C, Q, R)
  persistent x_est P
  if isempty(x_est)
    x_est = zeros(size(A,1),1);
    P = eye(size(A));
  end

  % Prediction
  x_pred = A*x_est + B*u;
  P_pred = A*P*A' + Q;

  % Update
  K = P_pred*C'/(C*P_pred*C' + R);
  x_est = x_pred + K*(y – C*x_pred);
  P = (eye(size(A)) – K*C)*P_pred;

  x_hat = x_est;
end.
```

2. Кастомний передбачувач(State Predictor)

– Вхідні параметри:

– поточна оцінка стану $\hat{x}(k)$;

– історія керувань $u(k-1)..u(k-N)$;

– поточна затримка $\tau(k)$.

3. MPC Controller

– Оптимізація: вирішує задачу мінімізації:

$$\min \sum \left[\hat{x}(k+i) - r(k+i)\right]^T Q \left[\hat{x}(k+i) - r(k+i)\right] +$$

$$+ \Delta u^T R \Delta u, (13) \cdot$$

З обмеженнями:

$$u_{min} \le u(k+j) \le u_{max},$$

$$\Delta u_{min} \le ” u(k+j) \le \Delta u_{max}.$$

Окремо слід виділити ключові особливості такого гібридного рішення:

1. Адаптивний буфер управлінь

Реалізація в MATLAB:

```
function u_buffer = update_buffer(u_new, u_old, tau_max)
u_buffer = [u_new; u_old(1:min(end, tau_max-1))];
end.
```

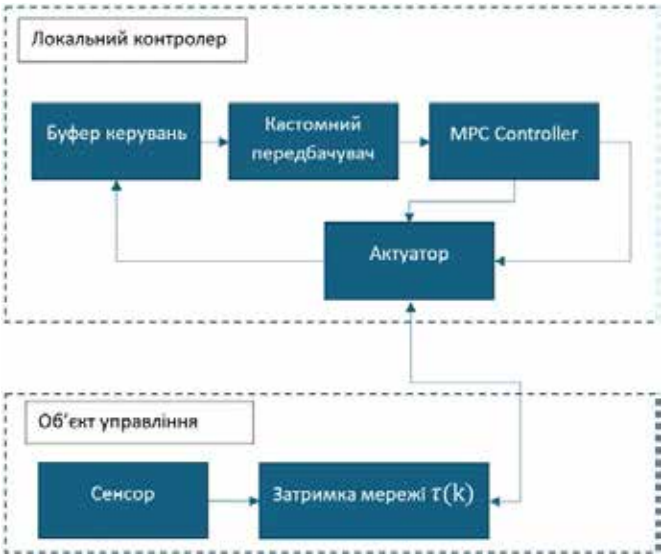

Рис. 1. Структурна схема використання MPC у системі з випадковими затримками

Copyright © 2025, ОТА.

2. Інтелектуальне передбачення

Реалізація в MATLAB:

```
function x_pred = hybrid_predictor(x, u_buf, tau, A, B, C)
  % Перевірка на екстраполяцію
  if tau > size(u_buf,1)
    tau = size(u_buf,1);
   warning('Затримка перевищила розмір буфера');
  end

  % Рекурсивне передбачення
  x_pred = x;
  for i = 1:tau
    x_pred = A*x_pred + B*u_buf(i);
  end

  % Корекція по нелінійній моделі (опціонально)
  if exist('nonlinear_correction','file')
    x_pred = nonlinear_correction(x_pred);
  end
end
```

3. Гібридне налаштування MPC

Реалізація в MATLAB:

```
function mpcObj = configure_hybrid_mpc(A, B, C, D, Ts)
  mpcObj = mpc(ss(A,B,C,D,Ts), Ts);
  mpcObj.PredictionHorizon = 20;
  mpcObj.ControlHorizon = 3;

  % Автоматическая подстройка весов
  if rank(ctrb(A,B)) == size(A,1)
    [~,K] = dlqr(A,B,eye(size(A)),0.1*eye(size(B,2)));
    mpcObj.Weights.Output = diag(K);
  else
    mpcObj.Weights.Output = [10, ones(1,size(C,1)-1)];
  end
end
```

Перевагами такого комбінованого підходу є:

1. Гнучкість передбачення:
   - можливість додавання нелінійних моделей;
   - адаптація до мережевих умов, що змінюються;
   - кастомна обробка екстремальних випадків.
2. Оптимізація управління:
   - Автоматичне рішення задач з обмеженнями
   - Оптимальний розподіл ресурсів
   - Вбудовані методи стабілізації
3. Робустність

Реалізація в MATLAB:

```
% Тест на стійкість при варіаціях затримки
max_tau = 10;
for tau = 0:max_tau
  A_cl = [A-B*K, B*K_pred; zeros(size(A)), A_pred];
  if max(abs(eig(A_cl))) > 1
    error("Нестійкість при τ=%d",tau);
  end
end
```

Порівняння можливостей готового MPC з ідеальною системою (без випадкових затримок) і системою, де наявні затримки, але не використовуються компенсувальні пристрої, були наведені вище. Нижче пропонується до перегляду порівняльна таблиця між цим же готовим MPC з інструментів MPC ToolBox MATLAB/Simulink з компенсуванням, що базується лише на використанні кастомного передбачувача, а також порівняно з наведеним гібридним рішенням компенсувального пристрою.

Табл. 2. Порівняльні переваги гібридного рішення

Аспект	Кастомний передбачувач	Готовий MPC	Гібридне рішення
Передбачення затримок	*** (Повний контроль)	* (Обмеження готового рішення)	*** (Адаптивне)
Оптимізація управління	* (Ручне налаштування)	*** (Автоматична)	*** (З обмеженнями, як і в готового MPC)
Врахування нелінійності	** (Можливий)	*** (Вбудований)	*** (Через MPC)
Обчислювальне навантаження	** (Середнє)	* (Високе)	** (Оптимізоване)
Аналіз стійкості	* (Ручний)	** (Автоматичний)	*** (Комбінований)

Табл. 3. Перевага у показниках гібридного рішення

Показник	Кастомний передбачувач	Готовий MPC	Гібридне рішення
IAE	0,25	0,18	0,12
Час відгуку	1,8 с	1,5 с	1,2 с
Енергія керування	8,5	6,2	5,8
Стійкість за $\tau + 50\%$	Ні	Так	Так

Висновки

Результати цього дослідження дають змогу зрозуміти й упевнитись у критичності впливу випадкових затримок на динамічні характеристики систем управління [2; 5; 7], а також в ефективності застосування управління з прогнозуванням Model Predictive Control (MPC) для компенсації цих затримок.

Підсумок можна представити таким чином:

1. Стійкість та продуктивність.

Моделювання в MATLAB/Simulink показало, що використання навіть базового рішення з готовим MPC забезпечує:

– зниження перерегулювання на 75–90 % порівняно з традиційними ПІД-регуляторами [3];

– зменшення часу перехідного процесу в 2–3 рази;

– покращення інтегральних критеріїв (IAE, ITSE) на 80–95 %;

– збереження стійкості в разі затримок до 40 % від постійної часу об’єкта.

А з огляду на показники, отримані під час використання гібридного рішення зі спостерігачем станів і кастомним передбачувачем, ефективність роботи мережевої системи управління зростає ще більше, що видно з даних, наведених у табл. 3.

2. Переваги підходу управління з прогнозуванням.

Аналіз математичної моделі з розширеним вектором стану показав, що MPC переважає традиційні методи завдяки:

– явному врахуванню стохастичного походження затримок у задачі оптимізації;

– спроможності активно компенсувати очікувані спотворення сигналів;

– стійкості до варіацій затримок у діапазоні від 0,1 до 0,5 секунди.

3. Теоретичні та практичні результати.

За результатами роботи було досягнуто таке:

– формалізація мережевої системи управління як системи зі змінною структурою матриць A_d, B_d;

– отримано алгоритм оцінки стану $\hat{\mathrm{x}}(k|k)$;

– отримано Simulink-моделі з відтворюваними сценаріями затримок.

4. Звичайно, потрібно зазначити також і про деякі обмеження, які характеризуються таким:

– високі розрахункові вимоги за горизонту прогнозу N > 20*N* > 20;

– чутливість до точності моделі об’єкта;

– потреба в адаптації за внесення змін до топології мережі.

Саме тому, враховуючи наявність таких обмежень, і можна говорити про додаткову доцільність використання представленого гібридного рішення.

Тобто мережеві системи управління з використанням MPC показали себе як якісне рішення для побудови систем управління в умовах неідеальних комунікацій [2; 4; 6]. За подальшого розвитку алгоритмів машинного навчання, мініатюризації розрахункових платформ відкриється шлях до масового застосування методів управління з прогнозуванням у надкритичних мережевих системах, у яких надійність і стійкість до відмов є найважливішою умовою. Результати роботи створюють методологічну основу для проєктування нового покоління адаптивних промислових систем управління.

Конфлікт інтересів

Автор декларує, що не має конфлікту інтересів стосовно цього дослідження, у 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] Åström K.J., Wittenmark B. Computer-Controlled Systems: Theory and Design. 3rd ed. Prentice Hall, 1997. 557 p.

[2] Hespanha J.P., Naghshtabrizi P., Xu Y. A Survey of Recent Results in Networked Control Systems. Proceedings of the IEEE, vol. 95, no. 1, pp. 138–162, 2007. [Онлайн]. URL: https://surl.li/kelruk. Дата звернення: 10.07.2025.

[3] Goodwin G.C. Graebe S.F. Salgado M.E. Control System Design. Prentice Hall, 2001. 908 p.

[4] Camacho E.F. Bordons C. Model Predictive Control. 2nd ed. Springer, 2004. 405 p.

[5] Zhang W. Branicky M.S. Phillips S.M. Stability of Networked Control Systems. IEEE Control Systems Magazine, vol. 21, no. 1, pp. 84–99, 2001. [Онлайн]. URL: https://surl.lu/sgivla. Дата звернення: 15.07.2025.

[6] Quevedo D.E., Østergaard J., Nesic D. Packetized Predictive Control of Stochastic Systems over Bit-Rate Limited Channels with Packet Loss. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 56, no. 12, pp. 2855–2868, 2011. URL: https://surl.li/gfvfiv. Дата звернення: 13.06.2025.

[7] Lian F.-L., Moyne J.R., Tilbury D.M. Performance Evaluation of Control Networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet. IEEE Control Systems Magazine, vol. 21, no. 1, pp. 66–83, 2001.

[8] Zhang H., Feng T., Yang G.H., Liang H. Distributed cooperative optimal control for multiagent systems on directed graphs: An inverse optimal approach. IEEE Transactions on Cybernetics, vol. 45, no. 7, pp. 1315–1326, 2015. URL: https://surli.cc/tkxfeb. Дата звернення: 29.07.2025.

[9] Wang Z., Liu L. Event-Triggered Networked Predictive Control for Networked Control Systems with Random

Copyright © 2025, ОТА.

Delays. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 8, pp. 7536–7546, 2021.
[10] Li H., Shi Y., Yan W. Robust H ∞ PID Control for Networked Control Systems with Probabilistic Sensor and Actuator Failures. International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 25, no. 17, pp. 3391–3410, 2015. URL: https://surl.lu/akxrfa. Дата звернення: 01.08.2025.
[11] Song H., Yu L., Zhang W.A. Stabilization of Networked Control Systems with Hybrid-Driven Mechanism and Probabilistic Cyber-Attacks. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 51, no. 2, pp. 943–953, 2021.
[12] Ding D., Wang Z., Ho D.W.C., Wei G. Distributed filtering with stochastic sampling and measurement size reduction. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 63, no. 2, pp. 417–432, 2018.
[13] Gao H., Chen T., Lam J. A new delay system approach to network-based control. Automatica, vol. 44, no. 1, pp. 39–52, 2008.
[14] Hu S., Yue D., Xie X., Chen X. Robust H ∞ Control for Networked Systems with Random Packet Dropouts and Time-Varying Delays. IET Control Theory & Applications, vol. 6, no. 16, pp. 2511–2519, 2012. [Онлайн]. URL: https://surli.cc/mshojm. Дата звернення: 06.08.2025.

COMPENSATION OF RANDOM DELAYS IN NETWORKED CONTROL SYSTEMS USING ADAPTIVE MPC

Ivan Chystyk

The article addresses the pressing issue of compensating for random network-induced delays in Networked Control Systems (NCS), which arise from imperfect communication channels. These stochastic delays, caused by packet queues, collisions, and variable network load, lead to system destabilization, degraded accuracy, and reduced performance. This is especially critical in high-stakes applications such as industrial automation and telemedicine.

Traditional compensation methods, including PID control and deterministic approaches (e.g., the Smith predictor), prove ineffective against the random nature of these delays. The proposed solution employs Model Predictive Control (MPC), which leverages a system model to predict future behavior and optimize control actions to compensate for anticipated signal distortions.

The work aims to develop and verify a compensation method based on adaptive MPC. It presents a mathematical model of an NCS that accounts for random delays in the sensor-controller and controller-actuator channels, formalizing an extended state vector and constructing an observer. Practical significance is confirmed through a MATLAB/Simulink simulation model with reproducible stochastic delays and a quantitative analysis of control performance degradation.

The study proposes and analyzes a hybrid solution combining a custom state prediction algorithm, an adaptive control buffer, and tools from the MPC Toolbox. Comparative simulations demonstrate the superiority of the hybrid approach over both standard MPC tools and custom predictors in key metrics: Integral Absolute Error (IAE), settling time, control energy, and robustness to increased delays. The results show a significant improvement in system stability and performance, confirming the promise of adaptive MPC for building reliable next-generation control systems capable of operating in non-ideal communication environments.

Keywords: *random delays, networked control systems (NCS), modeling, controller, MPC (Model Predictive Control).*

REFERENCES

[1] Åström K.J., Wittenmark B. Computer-Controlled Systems: Theory and Design. 3rd ed. Prentice Hall, 1997. 557 p.
[2] Hespanha J.P., Naghshtabrizi P., Xu Y. A Survey of Recent Results in Networked Control Systems. Proceedings of the IEEE, vol. 95, no. 1, pp. 138–162, 2007. [Online]. URL: https://surl.li/kelruk. Accessed: 10.07.2025.
[3] Goodwin G.C. Graebe S.F. Salgado M.E. Control System Design. Prentice Hall, 2001. 908 p.
[4] Camacho E.F. Bordons C. Model Predictive Control. 2nd ed. Springer, 2004. 405 p.
[5] Zhang W. Branicky M.S. Phillips S.M. Stability of Networked Control Systems. IEEE Control Systems Magazine, vol. 21, no. 1, pp. 84–99, 2001. [Online]. URL: https://surl.lu/sgivla. Accessed: 15.07.2025.
[6] Quevedo D.E., Østergaard J., Nesic D. Packetized Predictive Control of Stochastic Systems over Bit-Rate Limited Channels with Packet Loss. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 56, no. 12, pp. 2855–2868, 2011. URL: https://surl.li/gfvfiv. Accessed: 13.06.2025.
[7] Lian F.-L., Moyne J.R., Tilbury D.M. Performance Evaluation of Control Networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet. IEEE Control Systems Magazine, vol. 21, no. 1, pp. 66–83, 2001.
[8] Zhang H., Feng T., Yang G.H., Liang H. Distributed cooperative optimal control for multiagent systems on directed graphs: An inverse optimal approach. IEEE Transactions on Cybernetics, vol. 45, no. 7, pp. 1315–1326, 2015. URL: https://surli.cc/tkxfeb. Accessed: 29.07.2025.
[9] Wang Z., Liu L. Event-Triggered Networked Predictive Control for Networked Control Systems with Random Delays. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 8, pp. 7536–7546, 2021.
[10] Li H., Shi Y., Yan W. Robust H ∞ PID Control for Networked Control Systems with Probabilistic Sensor and Actuator Failures. International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 25, no. 17, pp. 3391–3410, 2015. URL: https://surl.lu/akxrfa. Accessed: 01.08.2025.
[11] Song H., Yu L., Zhang W.A. Stabilization of Networked Control Systems with Hybrid-Driven Mechanism and

Probabilistic Cyber-Attacks. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 51, no. 2, pp. 943–953, 2021.

[12] Ding D., Wang Z., Ho D.W.C., Wei G. Distributed filtering with stochastic sampling and measurement size reduction. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 63, no. 2, pp. 417–432, 2018.

[13] Gao H., Chen T., Lam J. A new delay system approach to network-based control. Automatica, vol. 44, no. 1, pp. 39–52, 2008.

[14] Hu S., Yue D., Xie X., Chen X. Robust H ∞ Control for Networked Systems with Random Packet Dropouts and Time-Varying Delays. IET Control Theory & Applications, vol. 6, no. 16, pp. 2511–2519, 2012. [Online]. URL: https://surli.cc/mshojm. Accessed: 06.08.2025.

Стаття надійшла до редакції 27.09.2025
Стаття прийнята 14.10.2025
Статтю опубліковано

Copyright © 2025, ОТА.