

УПРАВЛІННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

DOI: 10.20998/2079-0023.2023.01.03

УДК 681.515

О. А. ЖУЧЕНКО, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: azhuch@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5611-6529>

А. П. КОРОТИНСЬКИЙ, кандидат технічних наук (PhD), старший викладач, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: ihfantkor@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6309-5970>

А. О. АБРАМОВА, кандидат технічних наук (PhD), доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: alla_abramova@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3475-8584>

Д. Є. ЧЕПОВ, студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: pyroducttail@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5458-8214>

РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИПАРНИМ АПАРАТОМ У ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА ОЦТОВОЇ КИСЛОТИ НА БАЗІ MPC-РЕГУЛЯТОРА

У більшості випадків очищення вихідного продукту процесу виробництва оцтової кислоти здійснюється шляхом ректифікації. Оскільки процес ректифікації полягає в розділенні сумішей на фази по температурі кипіння, то стає зрозуміло, що досить важливим технологічним параметром є температура та концентрація суміші, що обробляється. Зазвичай, дані технологічні параметри задаються кип'ятильником при ректифікаційній колоні, який ще зветься кубом колони. Саме тому існує потреба у якісному та ефективному керуванні кип'ятильником, як одним із важливих технологічних об'єктів. У роботі розроблена та проаналізована система керування кип'ятильником на базі MPC-регулятора. Робота MPC-регулятора базується на визначенні поведінки об'єкта та прогнозування майбутньої поведінки, після чого за рахунок оптимізації керування на певному проміжку часу здійснюється виведення його на бажану траєкторію. Проміжок часу на якому здійснюється розрахунок оптимальної траєкторії ще називається горизонтом. Визначення горизонту впливає на характер здійснюваного керування, тому його вибір повинен бути обраний виходячи з характеру динамічних властивостей об'єкту керування. Саме тому при розробці даних регуляторів потрібно досліджувати характер впливу даних параметрів на перебіг процесу. В результаті дослідження було отримано стратегії керування для різних значень горизонтів прогнозування та керування. Проаналізувавши результати роботи регулятора при різних налаштуваннях горизонтів прогнозування та керування можна дійти висновку, що при збільшенні горизонту прогнозування збільшується час перехідної характеристика, але також зменшується перерегулювання. Тому при виборі оптимального значення потрібно керуватися впливом перерегулювань на процес.

Ключові слова: система керування, горизонт, MPC-регулятор, ректифікація, керування, перехідна характеристика

Вступ. Оцтова кислота є дуже широко використовуваним продуктом в промисловості, проте у побуті її розчин використовують не рідше. Сфери застосування у неї надзвичайно широкі. В промисловості її застосовують починаючи з виробництва полімерів та закінчуючи харчовою галуззю. В побуті ж вона найчастіше використовується в якості харчової добавки чи розчинника. Тому нагальною стала потреба її виробництва у промислових масштабах. Для виробництва використовують цілий ряд технологічних схем. Виробництвом оцтової кислоти займалися ще у давнину, але тоді процес був досить тривіальним, і був представлений звичайною ферментацією продуктів виноробства. Таким методом користувались досить

довго, аж до початку активного розвитку промисловості, який прийшовся на XIX – XX ст., саме в той період почались дослідження стосовно того, які можливості збільшення обсягів виробництва та якості вихідного продукту можливо застосувати. Також це пов'язано з різноманіттям доступної в той час сировини, чого раніше не було. Саме завдяки цьому ми маємо зараз таке різноманіття технологій виробництва.

Разом з розвитком обчислювальної техніки з'являється можливість автоматизації в промисловості загалом та зокрема для виробництва оцтової кислоти. Це дозволило підвищити ефективність вже існуючих схем виробництва та впровадити нові вимогливі до чіткого підтримання параметрів виробництва. З моменту впровадження автоматизації децю змінилась

© Жученко О. А., Коротинский А. П., Абрамова А. О., Чепов Д. Є., 2023



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Конфлікт інтересів: Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



конструкція приладів, що її реалізують, але загальний принцип не зазнав значних змін. Сучасні мікроконтролери дозволяють впроваджувати більш комплексні закони керування, що засновані на сучасних методах, а також окрім цього, з'явилась можливість впровадження SCADA-систем для цілих виробничих ліній.

Завдяки значному зростанню обчислювальної потужності комп'ютерів, є змога досить складного моделювання технологічних об'єктів. Це дозволяє заощаджувати чималі кошти на розробленні нових технологічних апаратів, так як є можливість провести дослідження роботи апарату на комп'ютерній моделі, не витрачаючи кошти на виготовлення реального апарату.

Отже, розроблення автоматизованих систем керування та дослідження ефективності їх роботи на виробництві оцтової кислоти є актуальним напрямком дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У процесі виробництва оцтової кислоти важливу роль відіграє якість вихідного продукту, що у великій мірі залежить від ефективності процесу очищення (ректифікації). Ефективність процесу очищення від таких технологічних параметрів як температура та концентрація суміші, що задаються кип'ятильником при RECTИФІКАЦІЙНІЙ колоні. Виходячи із вищесказаного, є потреба у якісному та ефективному керуванні кип'ятильником, як одним із важливих технологічних об'єктів у виробництві оцтової кислоти. Це підтверджено у роботах авторів [1–2], а також розглянуто особливості, які потрібно врахувати для покращення параметрів процесу RECTИФІКАЦІЇ. У праці [3] досліджено роботу системи при наявності в ній нелінійних елементів та розподіленого характеру параметрів протікання процесу, що використовується при побудові регулятора об'єкту.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка та дослідження ефективності автоматизованої системи керування на базі MPC-регулятора процесу виробництва оцтової кислоти та порівняння з класичним ПІД-регулятором. Дослідження проводяться у вигляді порівняльного аналізу роботи ПІД-, MPC-регуляторів.

Матеріали та результати дослідження. Для проведення порівняльної характеристики MPC-регулятора, пропонується реалізувати умовний базовий

рівень точності та ефективності роботи автоматизованої системи керування. Вирішення даної задачі базується на синтезі класичного ПІД-регулятора. *Синтез системи керування на базі ПІД-регулятора.* Найпростішим варіантом для налаштування регулятора є схема одноканального ПІД-регулятора [4]. В якості каналу керування використаємо витрату нагріваючої пари – температура парів оцтової кислоти на виході з апарату. Для налаштування будемо використовувати Matlab Simulink [5–7]. Для початку необхідно зібрати схему в програмному середовищі Matlab Simulink. Схему системи керування представлено на рис. 1. Для налаштування параметрів регулятора буде використано утиліту PID Tuner [8, 9]. Вікно налаштування контролера наведено на рис. 2. В результаті налаштування отримали наступні параметри регулятора: $P = 0.02319$, $I = 0.00878$, $D = -0.145037$, $N = 0.15989$.

Синтез системи керування на базі MPC-регулятора. Робота MPC регулятора базується на визначенні поведінки об'єкта та прогнозування майбутньої поведінки, після чого за рахунок оптимізації керування на певному проміжку часу здійснюється виведення його на бажану траєкторію. В основі алгоритму керування знаходиться задача мінімізації функції вартості. Зазвичай використовується лінійно-квадратичний функціонал якості [10]. Важливою особливістю даного методу керування є те, що розрахунок відбувається не одразу для всієї траєкторії, а лише для заданого проміжку часу. Ця особливість відрізняє MPC від LQR регулятора. Завдяки цьому LQR має кращу глобальну продуктивність, а MPC в свою чергу краще досягає локальних оптимумів. Проміжок часу на якому здійснюється розрахунок оптимальної траєкторії ще називається горизонтом. Визначення горизонту впливає на характер здійснюваного керування, тому його вибір повинен бути обраний виходячи з характеру динамічних властивостей об'єкту керування [11, 12].

Для синтезу MPC-регулятора будемо використовувати Matlab MPC Designer [5–7]. Для початку було зібрано систему керування в середовищі Simulink. Схема системи керування з використанням MPC регулятора в середовищі Simulink представлена на рис. 3. Для подальшого налаштування контролера необхідно задати його структуру. Для цього необхідно відкрити вікно MPC Structure. Вікно налаштування структури MPC контролера представлено на рис. 4.

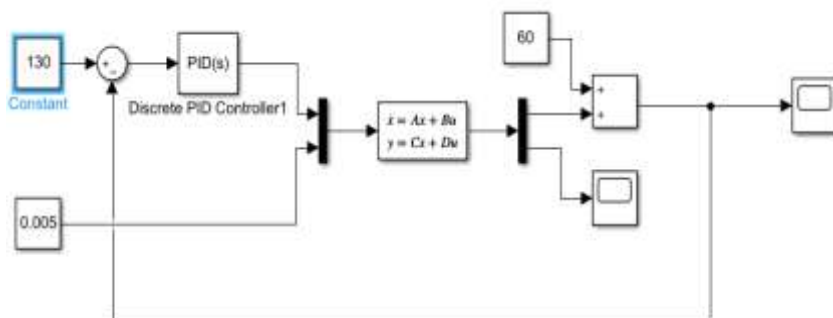


Рис. 1. Схема системи керування на основі ПІД-регулятора

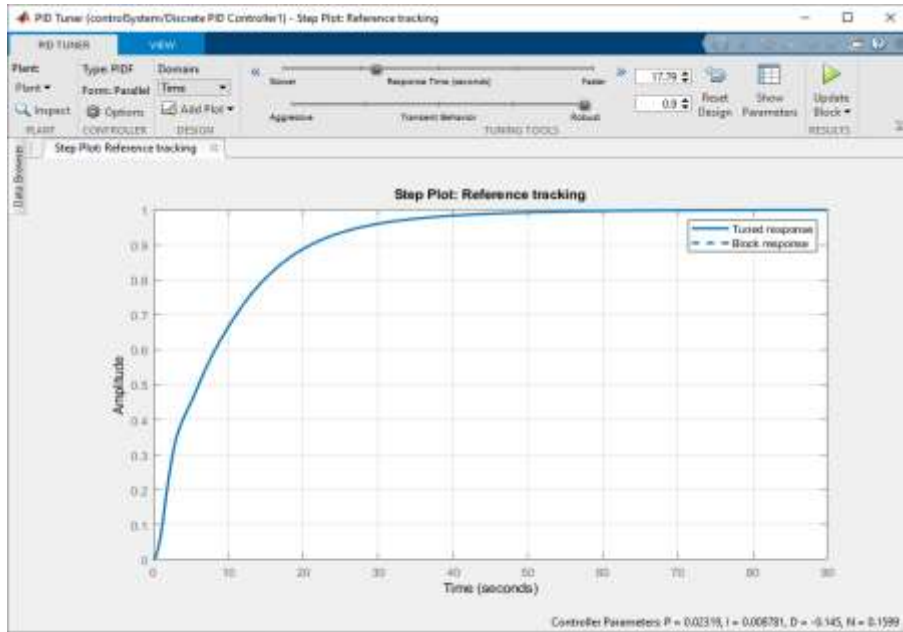


Рис. 2. Налаштування контролера

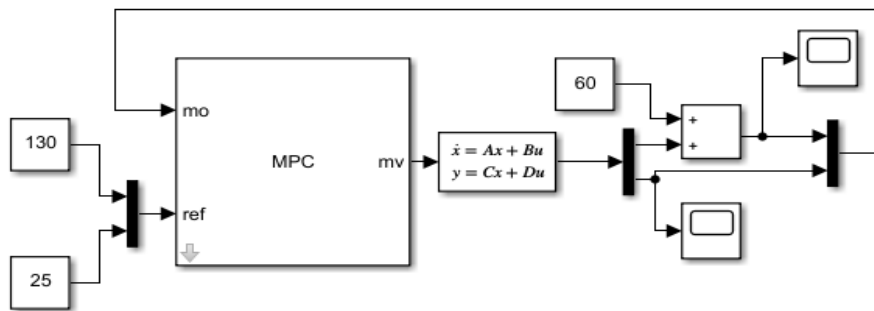


Рис. 3. Схема системи керування в Matlab Simulink

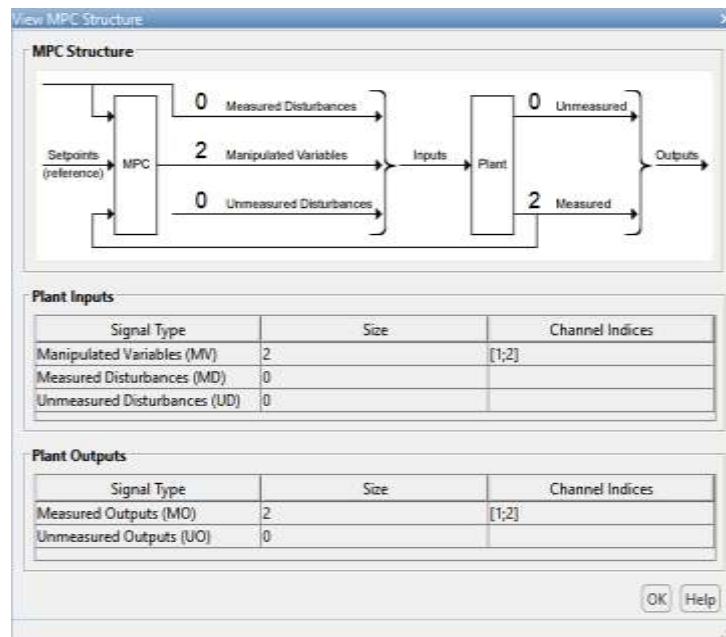


Рис. 4. Вікно налаштування структури регулятора

Налаштувавши структуру системи керування необхідно провести налаштування контролера. Параметрами, які впливають на роботу контролера, є горизонт управління, який визначає кількість кроків розрахунку оптимального керування, горизонт прогнозування, який визначає кількість кроків для розрахунку майбутньої поведінки.

Дослідження впливу горизонту прогнозування MPC-регулятора. Основною особливістю MPC-регулятора є розрахунок майбутньої поведінки на певному

горизонті прогнозування, тому його визначення сильно впливає на поведінку контролера, і правильний вибір горизонту прогнозування – важлива частина налаштування регулятора [12]. Для вибору буде використано експериментальний метод, тобто проведемо дослідження при різних налаштуваннях горизонту та оберемо найбільш відповідний нашому об'єкту варіант. Почнемо з горизонту прогнозування в 15 кроків, результат цього налаштування представлено на рис. 5. Наступ-

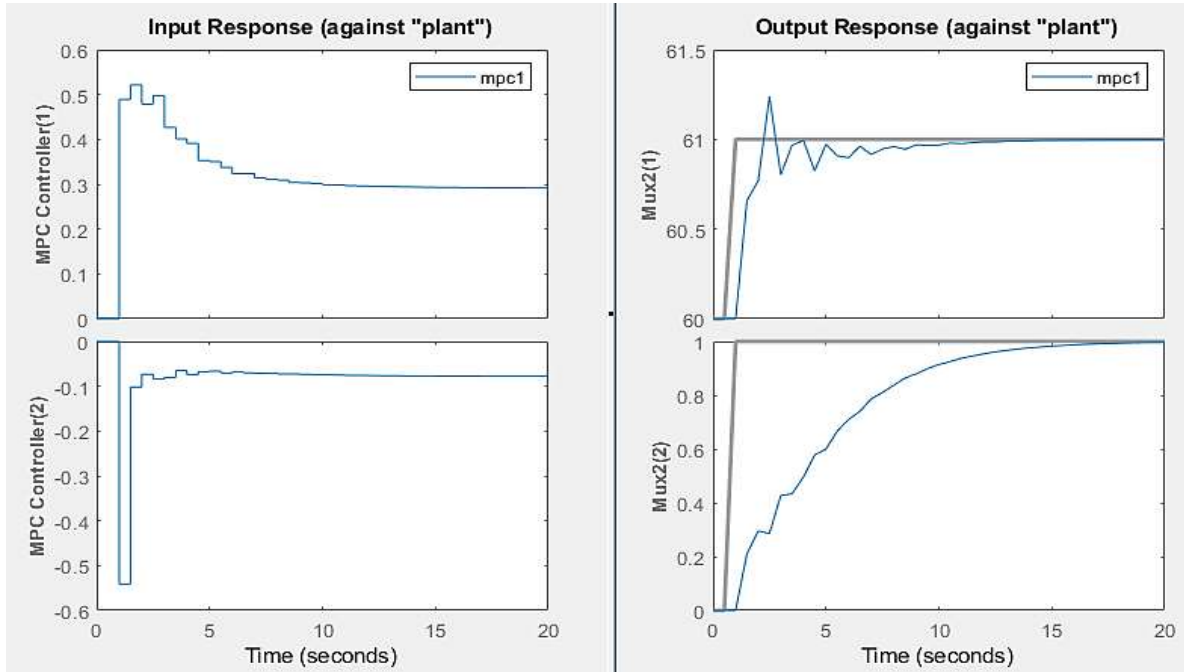


Рис. 5. Робота регулятора при горизонті прогнозування 15 кроків

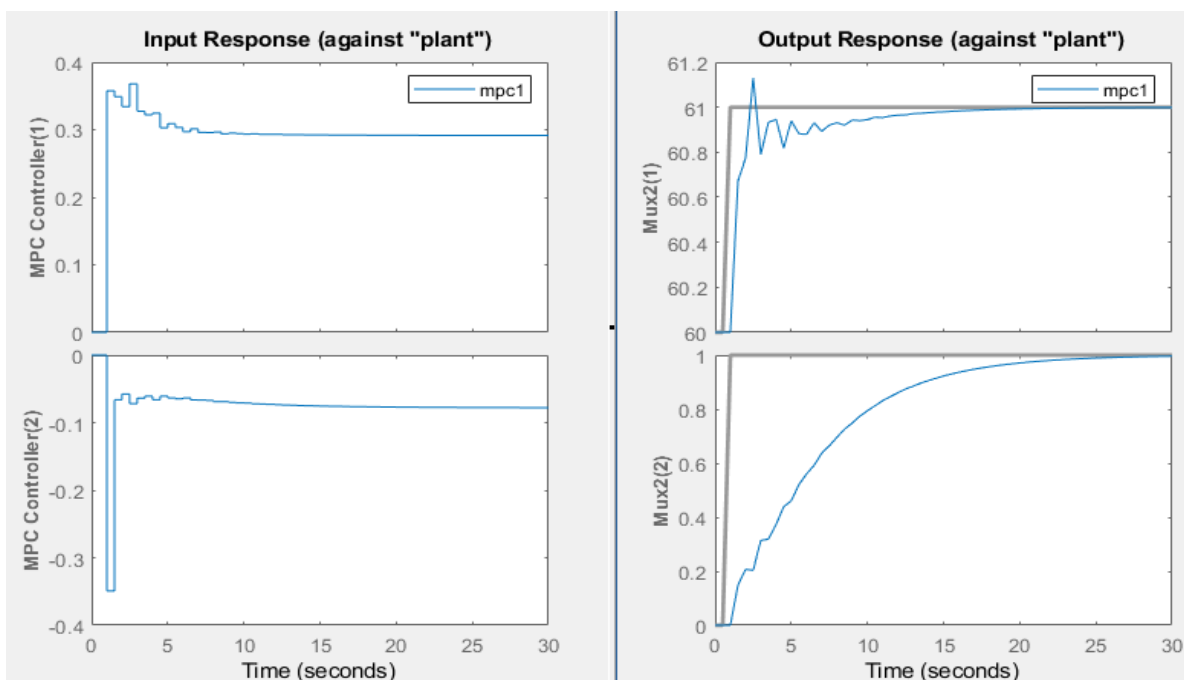


Рис. 6. Робота регулятора при горизонті прогнозування 25 кроків

ним значенням буде 25 кроків – рис. 6. Проаналізувавши результати роботи регулятора при різних налаштуваннях горизонту прогнозування можна дійти висновку, що при збільшенні горизонту прогнозування збільшується час перехідної характеристики, але також зменшується перерегулювання. Тому при виборі оптимального значення потрібно керуватися впливом перерегулювань на процес. У нашому випадку перерегулювання не є занадто критичними в певних межах, тому оптимальним для досліджуваного об'єкта буде

значення горизонту прогнозування 15 кроків.

Дослідження впливу горизонту управління MPC-регулятора. Ще одним параметром значення якого необхідно налаштувати у відповідності з необхідною поведінкою для технологічного об'єкта є горизонт управління. Горизонт управління визначає кількість кроків для розрахунку оптимального керування [12].

Для вибору цього параметру скористаємось також експериментальним методом. Проаналізуємо поведінку системи керування при різних налаштуваннях

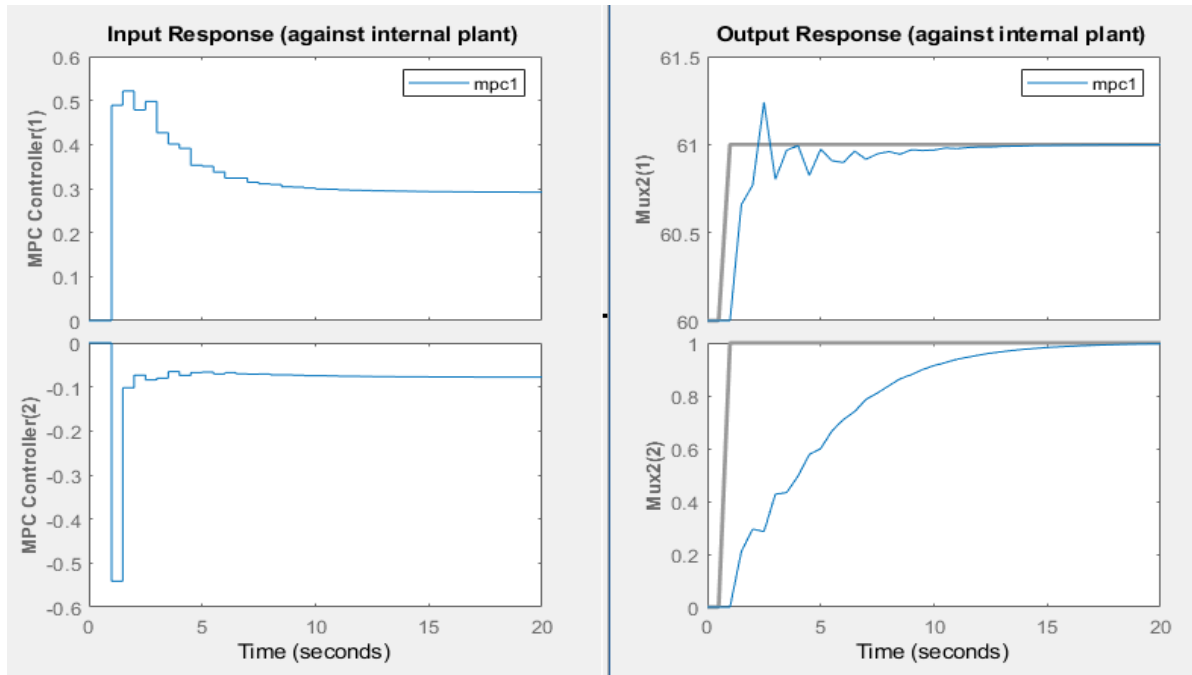


Рис. 7. Робота регулятора при горизонті управління 2 кроки

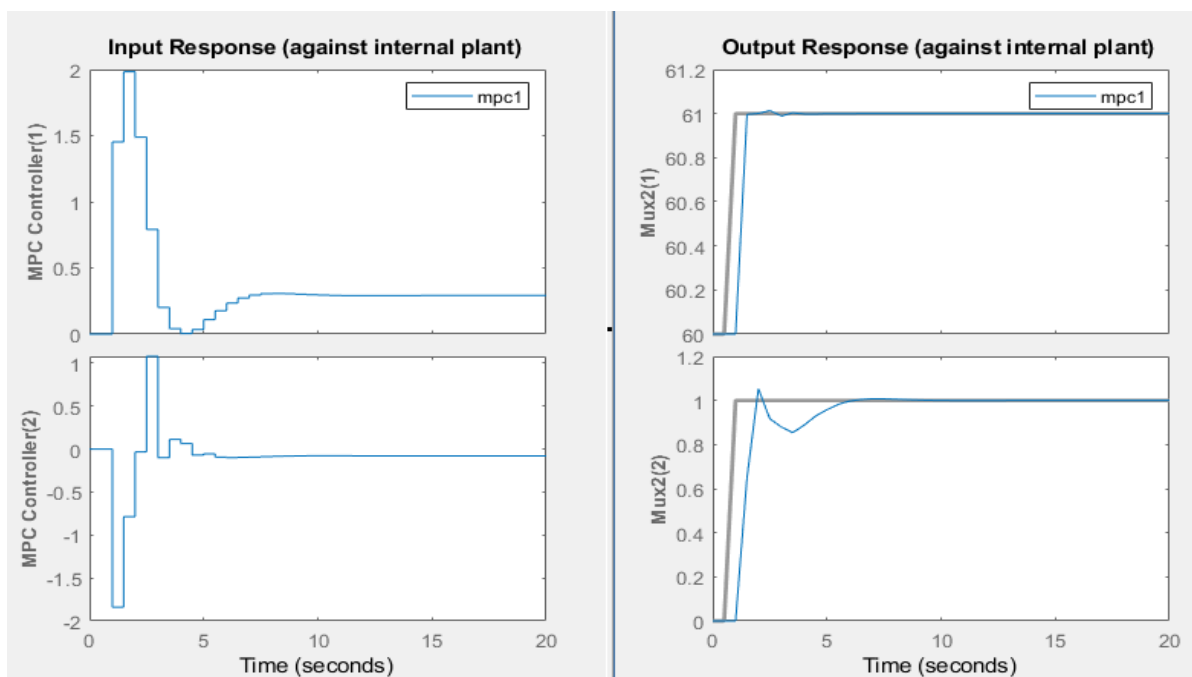


Рис. 8. Робота регулятора при горизонті управління 5 кроків

даного параметра і оберемо значення, що найкраще відповідає характеру нашого процесу.

Мінімальним значенням горизонту управління було обрано 2, поведінку контролера при цьому значенні представлено на рис. 7. Результат роботи системи при горизонті управління 5 кроків представлено на рис. 8. На рис. 9 наведено результати керування при горизонті управління 8 кроків. Максимальним значенням горизонту управління було обрано 10 кроків, поведінка системи при даному значенні зображена

на рис. 10.

Проаналізувавши отримані результати можна дійти висновку, що поведінка при значенні горизонту управління 8 кроків є найбільш прийнятною, так як дає найбільшу швидкість перехідного процесу та найменше значення перерегулювання.

Дослідження ефективності системи керування з MPC-регулятором. Порівняльна характеристика ПД-та MPC-регуляторів представлена на рис. 11.

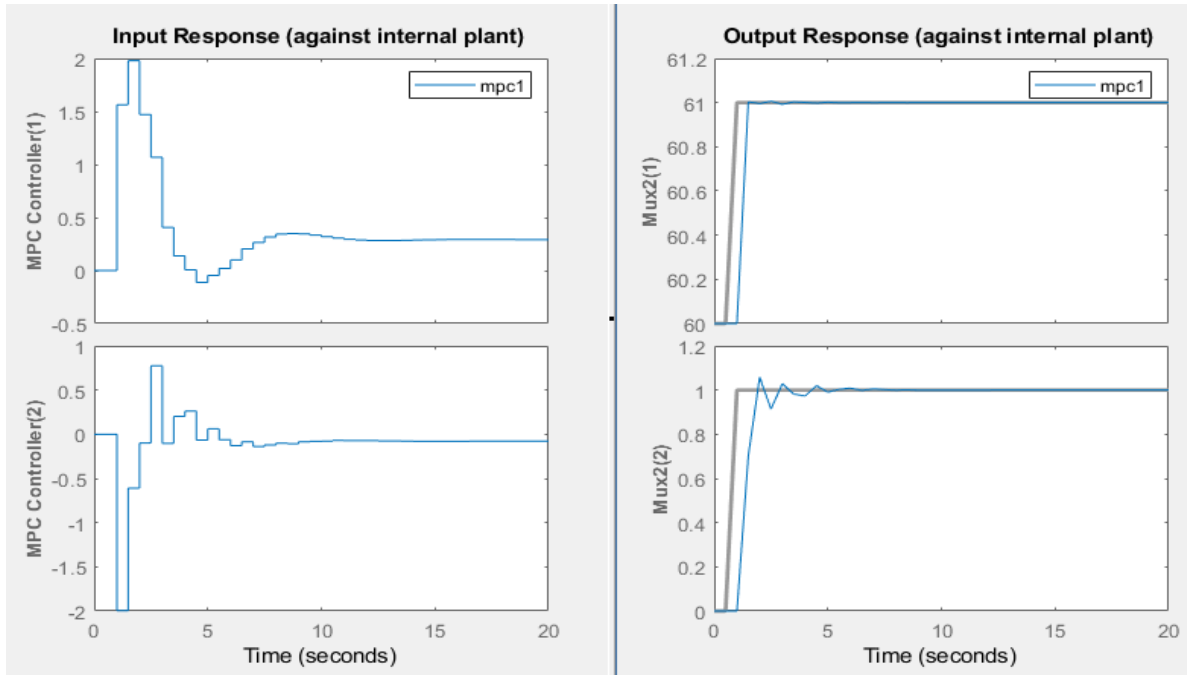


Рис. 9. Робота регулятора при горизонті управління 8 кроків

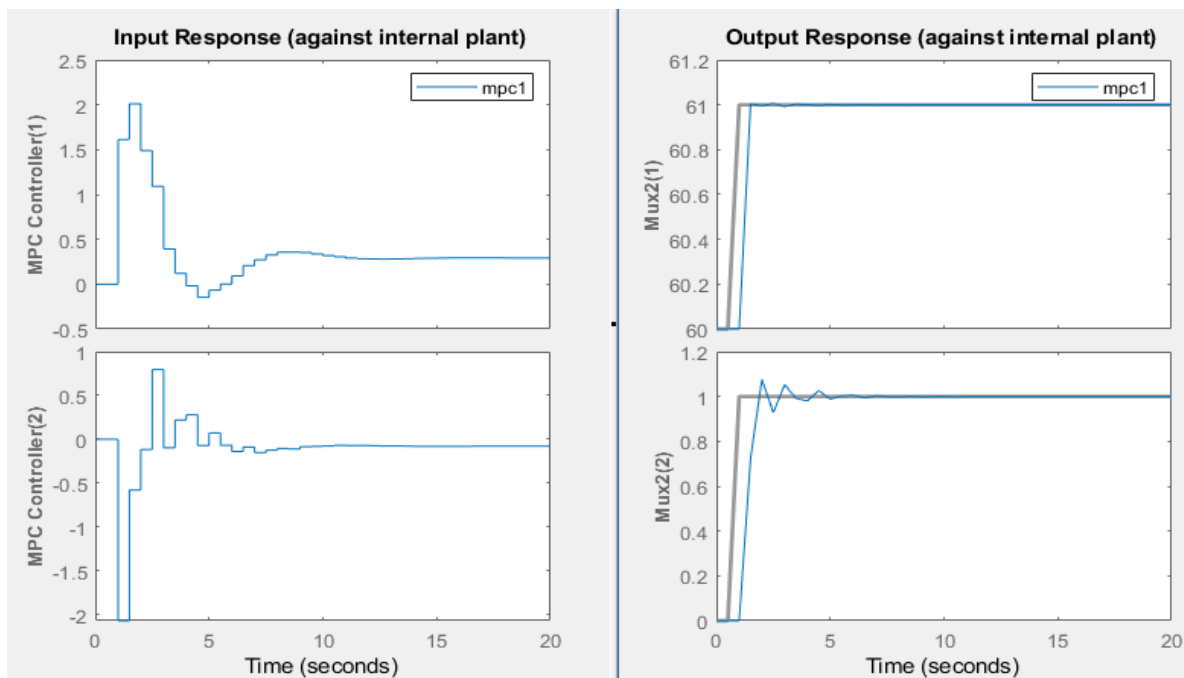


Рис. 10. Робота регулятора при горизонті управління 10 кроків

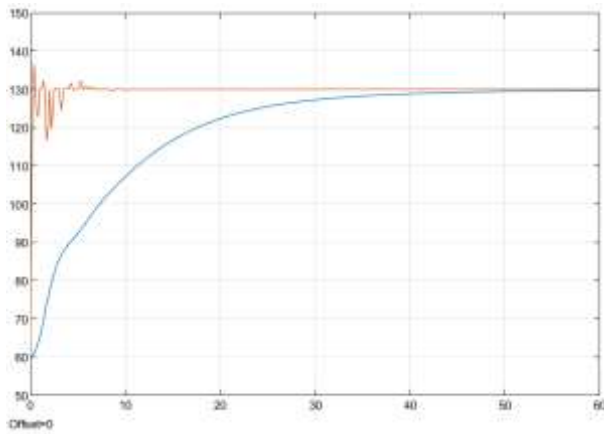


Рис. 11. Порівняльна характеристика регуляторів

За порівняльною характеристикою можна побачити, що MPC-регулятор дає на порядок швидше перехідний процес та з перерегулюванням, але перерегулювання становить менше 10%, тому воно не вплине на якість технологічного процесу. Отже для нашого апарату MPC-регулятор дає значно кращий результат.

Висновки.

Проведено налаштування параметрів одноканального ПІД-регулятора, отримано перехідні характеристики температури та витрати парів оцтової кислоти у виробництві оцтової кислоти.

Проведено дослідження впливу горизонту прогнозування MPC-регулятора. Особливістю такого регулятора є вплив горизонту прогнозування та горизонту управління на налаштування. Для правильного вибору горизонту прогнозування та управління використано експериментальний метод дослідження (кроки горизонту прогнозування 5, 10, 15, 20, 25, кроки горизонту управління 2, 5, 8, 10).

Проведено порівняльний аналіз ефективності керування заданими технологічними параметрами на основі ПІД- та MPC-регуляторів. Отримані результати підтверджують, що ефективнішим регулятором для керування необхідними технологічними параметрами у виробництві оцтової кислоти є MPC-регулятор. В результаті роботи було продемонстровано характер впливу горизонтів керування та прогнозування на характер керування технологічним об'єктом.

Список використаної літератури

1. Дударенко В. О. Система керування процесом ректифікації спирту. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/81324/1/Dudarenko%20V.O..pdf;jsessionid=0424F64A8EB9CC97B860E30C99DF9830> (дата звернення: 20.12.2022).
2. Jun-Li Gao *Research on Boiler Water Supply Control System Based on AT89C55 and Fractional order PID Algorithm* URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919307951> (дата звернення: 01.11.2022).
3. Lung Chien I. *Design and control of acetic acid dehydration system via heterogeneous azeotropic distillation* URL: https://www.researchgate.net/publication/244117428_Design_and_control_of_acetic_acid_dehydration_system_via_heterogeneous_azeotropic_distillation (дата звернення: 05.10.2022).
4. Гаєв Є. О., Нестеренко Б. М. Універсальний математичний пакет MATLAB і типові задачі обчислювальної математики. Навчальний посібник. Київ: НАУ, 2004. 176 с.

5. Гераймчук М. Д., Лазарев Ю. Ф., Толочко Т. О. *Модельовання систем у середовищі MATLAB-SIMULINK*. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30394> (дата звернення: 20.03.2023).
6. Qin S. J., Badgwell T. A. A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*. 2003. Vol. 11, iss. 7. P. 733–764.
7. Parisio A, Rikos E, Glielmo L. Stochastic model predictive control for economic/environmental operation management of microgrids: An experimental case study [J]. *Journal of Process Control*. 2016. Vol. 43. P. 24–37.
8. Ricker N. L., Lee J. H. Nonlinear Model Predictive Control of the Tennessee Eastman Challenge Process, «*Computers & Chemical Engineering*», Vol. 19, no. 9, 2005. P. 961–981.
9. Alberto Bemporad, Manfred Morari, N. Lawrence Ricker Model Predictive Control Toolbox For Use with MATLAB. *The MathWorks Inc.* 3 Apple Hill Drive Natick, MA 01760-2098. 128 p.
10. Мовчан А. П., Степанець О. В. *Методи статичної оптимізації*. Навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2012. 138 с.
11. Zhuchenko O., Korotynskyi A. Investigation influence of predict horizon of MPC-regulator for control of the baking process. *Slovak international scientific journal*. 2020. Vol.2, no. 37., pp. 29–34.
12. Жученко О. А., Коротинський А. П. Дослідження впливу горизонту прогнозування MPC-регулятора при синтезі системи керування процесом випалювання. *Матеріали VI Міжнародної науково-технічної Інтернет-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 20 листопада 2019*. Київ: НУХТ, 2019. С. 44–45.

References (transliterated)

1. Dudarenko V. A. Sistema upravleniya protsessom rektifikatsii spirta. [System for controlling the alcohol rectification process] Available at: <https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/81324/1/Dudarenko%20V.O..pdf;jsessionid=0424F64A8EB9CC97B860E30C99DF9830> (accessed 20.12.2022).
2. Jun-Li Gao *Research on Boiler Water Supply Control System Based on AT89C55 and Fractional order PID Algorithm*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919307951> (accessed 01.11.2022).
3. Lung Chien I. *Design and control of acetic acid dehydration system via heterogeneous azeotropic distillation* Available at: https://www.researchgate.net/publication/244117428_Design_and_control_of_acetic_acid_dehydration_system_via_heterogeneous_azeotropic_distillation (accessed 05.10.2022).
4. Hayev E. O., Nesterenko B. M. *Universalnyy matematichnyy paket MATLAB i tipovi zadachi obchyslyvalnoyi matematyky*. [Universal mathematical package MATLAB and typical problems of computational mathematics]. Navchalnyy posibnyk. Kyiv, NAU Publ., 2004. 176 p.
5. Herayimchuk M. D., Lazaryev Y. F., Tolochko T. O. Modelyuvannya system u seredovyschi MATLAB-SIMULINK Available at: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30394> (accessed 20.03.2023).
6. Qin S. J., Badgwell T. A. A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*. 2003, vol. 11, iss. 7, pp. 733–764.
7. Parisio A, Rikos E, Glielmo L. Stochastic model predictive control for economic/environmental operation management of microgrids: An experimental case study [J]. *Journal of Process Control*. 2016, vol. 43, pp. 24–37.
8. Ricker N. L., Lee J. H. Nonlinear Model Predictive Control of the Tennessee Eastman Challenge Process, «*Computers & Chemical Engineering*». 2005, vol. 19, no. 9, pp. 961–981.
9. Alberto Bemporad, Manfred Morari, N. Lawrence Ricker Model Predictive Control Toolbox For Use with MATLAB. *The MathWorks Inc.* 3 Apple Hill Drive Natick, MA 01760-2098. 128 p.
10. Movchan A. P., Stepanets O. V. *Metody statychnoyi optymizatsiyi*. Navchalnyy posibnyk. [Methods of static optimization]. Kyiv, NTUU «КПІ» Publ., 2012. 138 p.
11. Zhuchenko O., Korotynskyi A. Investigation influence of predict horizon of MPC-regulator for control of the baking process. *Slovak international scientific journal*. 2020, vol. 2, no. 37, pp. 29–34.
12. Zhuchenko O. A., Korotynskyi A. P. Doslidzhennya vplyvu horyzontu prohnozuvannya MPC-rehulyatora pry syntezi systemy

keruvannya protsesom vypalyuvannya. [Study of the influence of the prediction horizon of the MPC controller in the synthesis of the firing process control system] *Materialy VI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi Internet-konferentsiyi «Suchasni metody, informatsiynе, prohramne ta tekhnichne zabezpechennya system keruvannya*

orhanizatsiyno-tekhnichnymy ta tekhnolohichnymy kompleksamy», 20 lystopada 2019. Kyiv, NUKHT, 2019, pp. 44–45.

Надійшла (received) 02.05.2023

UDC 681.515

O. A. ZHUCHENKO, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”; Kyiv, Ukraine, e-mail: azhuch@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5611-6529>

A. P. KOROTYNSKYI, Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Lecture, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”; Kyiv, Ukraine, e-mail: ihfantkor@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6309-5970>

A. O. ABRAMOVA, Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”; Kyiv, Ukraine, e-mail: alla_abramova@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3475-8584>

D. E. CHEPOV, student, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”; Kyiv, Ukraine, e-mail: pyroducktail@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5458-8214>

DEVELOPMENT OF THE EVAPORATOR CONTROL SYSTEM IN THE ACETIC ACID PRODUCTION PROCESS BASED ON THE MPC-REGULATOR

In most cases, the initial product of the acetic acid production process is purified by rectification. Since the rectification process consists in separating the mixtures into phases based on the boiling point, it becomes clear that the temperature and concentration of the processed mixture are quite important technological parameters. Usually, these technological parameters are set by the boiler at the distillation column, which is also called the cube of the column. That is why there is a need for high-quality and effective management of the boiler as one of the important technological objects. A boiler control system based on the MPC regulator was developed and analyzed in this work. The operation of the MPC regulator is based on determining the behavior of the object and predicting its future behavior, after which it is brought to the desired trajectory by optimizing the control over a certain period of time. The period of time during which the calculation of the optimal trajectory is carried out is also called the horizon. The definition of the horizon affects the nature of the control performed, so its choice should be based on the nature of the dynamic properties of the control object. That is why, when developing these regulators, it is necessary to study the nature of the influence of these parameters on the course of the process. As a result of the study, management strategies were obtained for different values of forecasting horizons. Having analyzed the results of the controller at different settings of the forecasting horizon, it can be concluded that when the forecasting horizon is increased, the time of the transient characteristic increases, but overregulation also decreases. Therefore, when choosing the optimal value, it is necessary to be guided by the impact of adjustments on the process.

Keywords: control system, horizon, MPC regulator, rectification, control, transient characteristic.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Жученко Олексій Анатолійович, Zhuchenko Oleksii Anatoliyovich

Автор 2 / Author 2: Коротинський Антон Петрович, Korotynskyi Anton Petrovych

Автор 3 / Author 3: Абрамова Алла Олександрівна, Abramova Alla Oleksandrivna

Автор 4 / Author 4: Чепов Дмитро Євгенійович, Chepov Dmytro Evgeniyovych