

*А. О. БОБУХ*, канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПІ",  
*Е. Є. ГЕРМАН*, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ",  
*О. О. БОЛОТИНСЬКА*, асп., НТУ "ХПІ",  
*А. М. ПЕРЕВЕРЗЄВА*, асп., НТУ "ХПІ"

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ГІДРОКАРБОНАТНОЇ СУСПЕНЗІЇ ВИРОБНИЦТВА КАЛЬЦИНОВАНОЇ СОДИ

При дослідженні перехідних процесів управління температурою гідрокарбонатної суспензії виробництва кальцинованої соди за аміачним способом зміною витрат холодної води було отримано оптимальні параметри ПІД-регулятора за методом інтегральних критеріїв оцінки якості. Для оцінки використано сімейство вказаних критеріїв в залежності від ступеню похибки. Це дало можливість змінювати витрати холодної води, не впливаючи на оптимальні параметри температури гідрокарбонатної суспензії. Іл.: 2. Бібліогр.: 10 назв.

**Ключові слова:** перехідні процеси; гідрокарбонатна суспензія; виробництво кальцинованої соди; ПІД-регулятор; інтегральний критерій.

**Постановка проблеми.** Головною метою управління кожного виробництва є отримання якісного кінцевого продукту при мінімальних енергетичних та матеріальних затратах. Значні труднощі при управлінні процесами виробництва кальцинованої соди за аміачним способом (ВКС) завдають неконтрольовані зміни значень параметрів технологічних процесів, які викликані старінням обладнання, нестабільністю характеристик сировини тощо. Отримання гідрокарбонатної суспензії (ГС) є одним із основних та досить складним процесом у ВКС, тому що від цього процесу залежить функціонування інших процесів та техніко-економічні показники роботи ВКС в цілому. Одним із головних параметрів процесу отримання ГС є її температура (від цього параметру залежить якість ГС). Оптимальне управління температурою ГС забезпечується зміною витрати холодної води [1].

Для оптимізації управління температурою ГС необхідно проводити розрахунок оптимальних параметрів настроювань регуляторів, при яких система, будучи в достатній мірі стійкою, задовольняє прийнятним показниками якості перехідного процесу. Від якості налаштування регулятора залежить ефективність функціонування системи управління. Вибір оптимальних параметрів налаштування регуляторів є одним з найбільш важливих і складних етапів проектування системи управління. При цьому оптимальними налаштуваннями любого типу регуляторів називаються налаштування, які відповідають мінімуму (або максимуму)

якого-небудь показника якості [2 – 4].

**Аналіз літератури.** Вибір любого типу регулятора або необхідного закону управління для конкретного процесу (об'єкту) управління – завдання не з простих. На цей вибір впливає кілька чинників: вид передавальної функції процесу; або якщо об'єкт з запізненням, то вплив робить відношення загального запізнення об'єкта до постійної часу тощо. Вибір типу регулятора також залежить від вимог до якості роботи системи управління, що проектується [2 – 4].

Близько 90 – 95% регуляторів, що знаходяться в даний час в експлуатації, використовують ПД – закон управління. ПД – регулятор відноситься до найбільш поширеного типу регуляторів. Причинами такої високої популярності є простота побудови, ясність функціонування, придатність для вирішення більшості практичних завдань та низька вартість. Використання ПД – закону управління в ВКС веде до підвищення якості готової продукції [3, 4].

**Мета статті.** Дослідження перехідних процесів управління температурою гідрокарбонатної суспензії виробництва кальцинованої соди зміною витрат холодної води для отримання оптимальних параметрів ПД-регулятора за методом інтегральних критеріїв оцінки якості.

**Матеріали та результати аналізу.** Метод інтегральних критеріїв оцінки якості є узагальненими методом, що дозволяє за перехідною динамічною складовою помилки системи досліджувати характер протікання перехідного процесу (ступінь його коливальності, коефіцієнт згасання, оптимальні параметри регулятора). Для використання методу інтегральних критеріїв оцінки якості необхідно на попередньому етапі отримати початкові значення для параметрів ПД-регулятора. Найпростішим способом отримання таких налаштувань є метод незатухаючих коливань Зіглера-Нікольса [4 – 7].

Алгоритм початкового налаштування ПД-регулятора методом Зіглера-Нікольса включає наступні кроки [7]:

*Крок 1.* Коефіцієнти посилення ПД-регулятора  $K_{\Pi}$  встановлюються рівними нулю.

*Крок 2.* Після цього поступово збільшуємо пропорційний коефіцієнт посилення  $K_{\Pi}$  до тих пір, доки в контурі управління розпочнуться автоколивання з коефіцієнтом автоколивального посилення  $K_{АП}$  ПД-регулятора.

*Крок 3.* Далі здійснюється реєстрація коефіцієнтів автоколивального посилення  $K_{АП}$  ПД-регулятора, де  $K_{АП} = K_{\Pi}$  за періодом коливань  $P_{АК}$ .

Параметри ПІД-регулятора є оптимальними, якщо вони обрані таким чином, що оцінка їх якості приймає екстремальне значення. Щоб оцінка якості мала реальний сенс, вона повинна являти собою число, яке завжди позитивне або дорівнює нулю. Тоді найкращими оптимальними параметрами ПІД-регулятора будуть ті, в яких ця оцінка якості має мінімальне значення [4 – 10].

Для знаходження оптимальних параметрів ПІД-регулятора було використано сімейство зважених інтегральних критеріїв оцінки якості в залежності від ступеню похибки ( $J$ ):

$$J = \min \int_0^T t |e(t)|^k dt, \quad (1)$$

де  $T$  – верхня межа інтегрування;  $t$  – час за який змінюється температура ГС, що вимірюється в секундах;  $e(t)$  – похибка;  $k$  – оптимальні значення ступеня похибки для ПІД-регулятора від 0.1, 0.2, 0.3,..., до 4.

Відповідно до сімейства зважених інтегральних критеріїв оцінки якості було отримано параметри ПІД-регулятора та побудовані криві перехідного процесу зміни температури ГС за часом (рис. 1), де  $t$  – час, що вимірюється в секундах, а  $T$  – температура у градусах Цельсія. Позначення на рис. 1 відповідають стандартному вигляду пакету програм MATLAB.

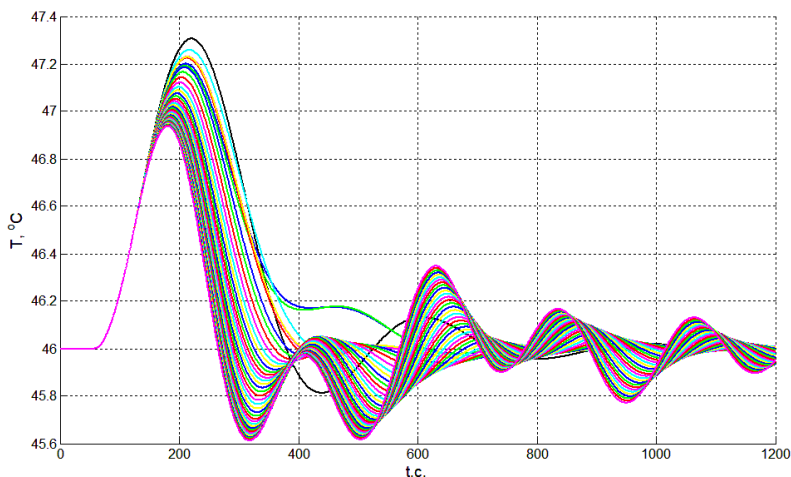


Рис. 1. Перехідні процеси відповідно до інтегральних критеріїв

Для наочності та розуміння, як ступінь похибки у даному випадку впливає на оптимальні параметри ПІД-регулятору досліджуваного

процесу, були побудовані поверхні перехідних процесів в залежності від ступеню похибки ( $k$ ) (рис. 2), де  $t$  – час, що вимірюється в секундах,  $T$  – температура у градусах Цельсія, а також на рисунку відображено параметр  $k$ , який показує оптимальні значення ступеню похибки для ПІД-регулятора, налаштування якого застосовувалися для дослідження нашого процесу.

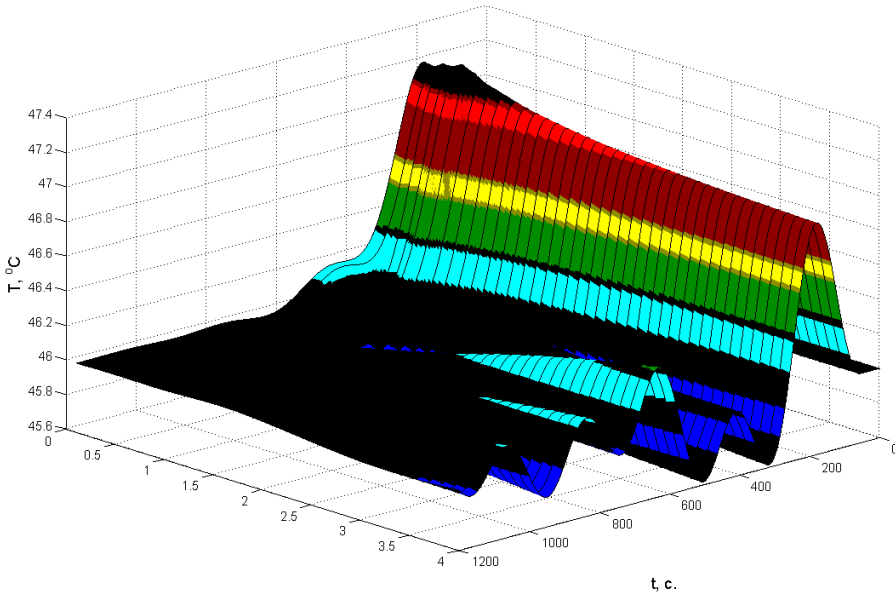


Рис. 2. Поверхня перехідних процесів

**Висновок.** Розроблено модель процесу управління температурою гідрокарбонатної суспензії ВКС за часом при зменшенні витрат холодної води. Для цього отримано попередні параметри управління, як початкові умови для використання сімейства інтегральних критеріїв та розраховано оптимальні параметри ПІД-регулятора. В результаті моделювання було отримано сімейство перехідних процесів та зроблено висновок, що за умов зменшення витрат холодної води, управління температурою гідрокарбонатної суспензії є оптимальним для задовільної роботи ВКС та високої якості кальцинованої соди.

#### Список літератури:

1. Dorf Richard. C. Modern Control Systems / C. Dorf Richard, H. Bishop Robert. – Pearson India, 2014. – 1048 p.
2. Болотинська О.О. Вибір методу математичного моделювання комп'ютерно-інтегрованої технології отримання суспензії гідрокарбонату натрію виробництва кальцинованої соди [Електронний ресурс] / О.О. Болотинська, А.О. Бобух // Сучасні

методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами: матеріали 5-ї Міжнар. наук.-техн. Internet-конф., 22 листопада 2018 р. – Київ: НУХТ, 2018. – С. 21. – Режим доступу: <https://drive.google.com/file/d/1JVwhxgpb0Kh0TfuO4W31FF4JOJzJHxos/view>, вільний.

3. Герман Е.Є. Методичні вказівки до виконання індивідуального домашнього завдання з курсу "КІТ". Частина I. Визначення параметрів регулятора за методом Зіглера-Нікольса з використанням Simulink для студентів напряму підготовки 050202 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" денної форми навчання / Уклад. Герман Е.Є., Подустов М.О., Шутинський О.Г., Лисаченко І.Г., Лобойко В.О., Деменкова С.Д. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – 24 с.

4. Горлач Б.А. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация / Б.А. Горлач, В.Г. Шахов. – М.: Лань, 2016. – 292 с.

5. Алпатов Ю.Н. Математическое моделирование производственных процессов / Ю.Н. Алпатов. – М.: Лань, 2016. – 136 с.

6. Герман Е.Є. Використання нечіткого регулятора в системі управління карбонізації у содовому виробництві / Е.Є. Герман, О.Г. Шутинський, О.М. Маковоз // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – 2016. – № 35. – С. 70-79. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpixx\\_2016\\_35\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpixx_2016_35_13).

7. Astrom K.J. Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control / K.J. Astrom, T. Hagglund // Journal of Process Control. – 2004. – № 4. – P. 635-650.

8. Д'яконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6® в математиці та моделюванні / В.П. Д'яконов. – Серія "Бібліотека професіоналу". – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.

9. Amos Gilat. MATLAB An Introduction with Applications / Gilat Amos. – Wiley, inc., 2017. – 411 p.

10. Справочные материалы по ПИД-регулятору в среде Simulink. Mathworks Inc. 2015. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www.mathworks.com/help/simulink/slref/pidcontroller.tml>

#### **References:**

1. Dorf, Richard C., and Robert H., Bishop (2014), *Modern Control Systems*, Pearson India, 1048 p.

2. Bolotinska, O.O., and Bobuh, A.O. (2018), "Choice of the method of mathematical modeling of computer-integrated technology for obtaining a suspension of sodium bicarbonate from soda ash production", *Such methods, information, software and technical security systems for the management of organizational and technical and technological complexes: materials of 5-Yi Mlzhnar. Scientific and Technical Internet Conference*, 22 november 2018, Kyiv : NUHT, 2018, P. 21.

3. German, E.E., Podustov M.O., Shutinsky, O.G., Lisachenko, I.G., Loboyko, V.O., and Demenkova, S.D. (2015), *Guidelines for the completion of individual homework from the course "KIT". Part I. Determination of controller parameters by the Siegler-Nichols method using Simulink for students of the direction of preparation 050202 "Automation and computer integrated technologies" full-time education*, Kharkov, NTU "KHPI", 24 p.

4. Horlatch, B.A., and Shahov, V.G. (2016), *Mathematical modeling. Modeling and numerical implementation*, Moscow, Fallow deer, 292 p.

5. Alpatov, Yu.N. (2016), *Mathematical modeling of production processes*, Moscow, Fallow deer, 136 p.

6. German, E.E., Shutinskiy, O.G., and Makovoz, O.M. (2016), "Use of fuzzy controller in the system of carbonization management in soda production", *Visnik NTU "HPI". Seriya: Himiya, himichna tehnologiya ta ekologiya*, No. 35, pp. 70-79.
7. Astrom, K.J., and Hagglund, T. (2004), "Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control", *Journal of Process Control*, No. 4, pp. 635-650.
8. D'yakov, V.P. (2005), *"ATLAB 6.5 SP1/7 Simulink 5/6® in mathematics and simulation. Series "Professional Library"*, Moskow, SOLON-Press, 576 p.
9. Amos, Gilat (2017), *"MATLAB An Introduction with Applications"*, Wiley, inc., 411 p.
10. Reference materials on the PID controller in the Citylink environment. Mathworks Inc. 2015. [Electronic resource]. Access mode: URL: <http://www.mathworks.com/help/simulink/slref/pidcontroller.tml>.

*Статтю представив д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПІ" Подустов М.О.*

*Поступила (received) 19.04.2019*

*Повторно 14.05.2019*

Bobukh Anatoly, PhD Tech.,  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002  
Tel: +38 (096) 233-47-96, e-mail: aabobukh@ukr.net  
ORCID ID: 0000-0002-3405-386X

German Eduard, PhD Tech.,  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002  
Tel: +38 (050) 301-26-62, e-mail: german.khpi@ukr.net  
ORCID ID: 0000-0002-8221-033X

Bolotynska Oleksandra, postgraduate,  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002  
Tel: +38 (066) 088-40-03, e-mail: oleksandra.bolotynska@gmail.com  
ORCID ID: 0000-0003-4236-696X

Pereverzieva Alevtyna, postgraduate,  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002  
Tel: +38 (095) 253-12-63, e-mail: pereverzieva\_alya@ukr.net  
ORCID ID: 0000-0003-2072-2521

УДК 681.511.4:661.333(075)

**Дослідження перехідних процесів управління температурою гідрокарбонатної суспензії виробництва кальцинованої соди / Бобух А.О., Герман Е.Є., Болотинська О.О., Переверзева А.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 86 – 92.**

При дослідженні перехідних процесів управління температурою гідрокарбонатної суспензії виробництва кальцинованої соди за аміачним способом зміною витрат холодної води було отримано оптимальні параметри ПІД-регулятора за методом інтегральних критеріїв оцінки якості. Для оцінки використано сімейство вказаних критеріїв в залежності від ступеню похибки. Це дало можливість змінювати витрати холодної води, не впливаючи на оптимальні параметри температури гідрокарбонатної суспензії. Іл.: 2. Бібліогр.: 10 назв.

**Ключові слова:** перехідні процеси; гідрокарбонатна суспензія; виробництво кальцинованої соди; ПІД-регулятор; інтегральний критерій.

УДК 681.511.4:661.333(075)

**Исследование переходных процессов управления температурой гидрокарбонатной суспензии производства кальцинированной соды / Бобух А.А., Герман Э.Е., Болотинская А.А., Переверзева А.М. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 86 – 92.**

При исследовании переходных процессов управления температурой гидрокарбонатной суспензии производства кальцинированной соды по аммиачному способу изменением расхода холодной воды были получены оптимальные параметры ПИД-регулятора по методу интегральных критериев оценки качества. Для оценки использовано семейство указанных критериев в зависимости от степени погрешности. Это дало возможность изменять расход холодной воды, не влияя на оптимальные параметры температуры гидрокарбонатной суспензии. Ил.: 2. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** переходные процессы; гидрокарбонатная суспензия; производство кальцинированной соды; ПИД-регулятор; интегральный критерий.

UDC 681.511.4:661.333(075)

**Study transition temperature control processes hydrocarbonate suspension soda ash / Bobukh A.O., German E.E., Bolotynska O.O., Pereverzeva A.M. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – №.13 (1338). – P. 86 – 92.**

In the study of transient temperature control hydrocarbonate suspension soda ash production method for changing the ammonia flow rate of cold water optimum PID controller parameters according to the method of integral quality criteria for evaluation was obtained. For evaluation, a family of specified criteria was used depending on the degree of error. This made it possible to change the flow rate of cold water without affecting the optimal temperature parameters of the hydrocarbonate suspension. Figs.: 2. Refs.: 10 titles.

**Keywords:** transients; hydrocarbonate suspension; soda ash production; PID controller; integral criterion.