

УДК 658.52:681.521

ЖУЧЕНКО А. І., ПІРГАЧ М. С., ЖУРАКОВСЬКИЙ Я. Ю.*, САДОВНИЧИЙ Р. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АЛГОРИТМ КООРДИНОВАНОГО КЕРУВАННЯ НАПІРНИМ ЯЩИКОМ ВІДКРИТОГО ТИПУ

Система керування напірним ящиком відкритого типу має високу складність, що пов'язано із необхідністю не тільки стабілізувати параметри об'єкта, але й здійснювати координоване керування ним у випадку автоматичного переведення папероробної машини з одного виду продукції на інший за мінімальний час.

Розроблено математичну модель напірного ящика відкритого типу як об'єкта керування рівнем маси. У моделі вихідною змінною об'єкта керування є рівень маси у напускній камері, а керувальним діянням є витрата маси, що подається до напускної камери. В моделі враховано збурювальне діяння – площу випускальної щілини. На основі розробленої моделі розглядається два варіанти побудови алгоритму керування напірним ящиком під час переведення його із одного режиму у інший. Розроблено структуру алгоритму координованого керування напірним ящиком. Наведено ілюстративний приклад застосування розробленого алгоритму. Здійснено розрахунки оптимального перехідного процесу в об'єкті які підтверджують ефективність розробленого алгоритму керування. Алгоритм координованого керування застосовано для стандартного напірного ящика ЯНО-180. Продемонстровано розробку алгоритму переведення напірного ящика з робочої (0,485 м) на максимальну (0,575 м) висоту рівня маси у напірному ящику за час 180 с. Результати розрахунків показують, що алгоритм координованого керування забезпечує переведення рівня маси на максимальну висоту за заданий час.

Розроблений на основі отриманої математичної моделі алгоритм дозволяє здійснювати керування рівнем маси у такому складному об'єкті, як напірний ящик відкритого типу при переведенні папероробної машини з одного режиму роботи на інший за час, вказаний системою координованого керування.

Ключові слова: папероробна машина, напірний ящик, система керування, виробництво паперу.

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2022.269773

*Corresponding author: y.zhurakovsky@kpi.ua

Received 27 September 2022; Accepted 9 December 2022

Постановка проблеми. Сучасні автоматизовані системи керування технологічним процесом виробництва паперу складаються із трьох рівнів: стабілізації, координації та оптимізації [1].

На рівні стабілізації здійснюється стабілізація основних технологічних змінних за допомогою систем автоматичного регулювання (САР). Найважливішими САР на тихохідній папероробній машині (ПРМ) є: САР витрати маси високої концентрації, що подається до змішувального насоса; САР рівня маси у напірному ящику; САР тиску пари у ведучій сушильній групі та САР швидкості машини.

Метою рівня координації є координація роботи САР, які знаходяться на рівні стабілізації. При цьому вирішуються питання компенсації взаємозв'язку між змінними, які негативно впливають на точність і якість стабілізації окремих керованих змінних. Крім цього, на цьому рівні здійснюється корегування завдань регуляторам, які розміщено на рівні стабілізації. Найголовнішою автоматичною системою, у якій необхідно мати рівень координації є система автоматичного керування (САК) напірним ящиком. Ця система повинна не тільки керувати напірним ящиком під час виробництва певного виду продукції, але й здійснювати координоване керування ним у випадку автоматичного переведення ПРМ з одного виду продукції на інший за мінімальний час.

На рівні оптимізації передбачається визначення оптимальних завдань системам нижчих рівнів з метою мінімізації об'єму продукції, яка виходить за межі відповідної нормативної документації.

Метою статті є створення алгоритму координованого керування напірним ящиком, який забезпечує переведення цього об'єкта керування з режиму на режим за час, вказаний системою координації.

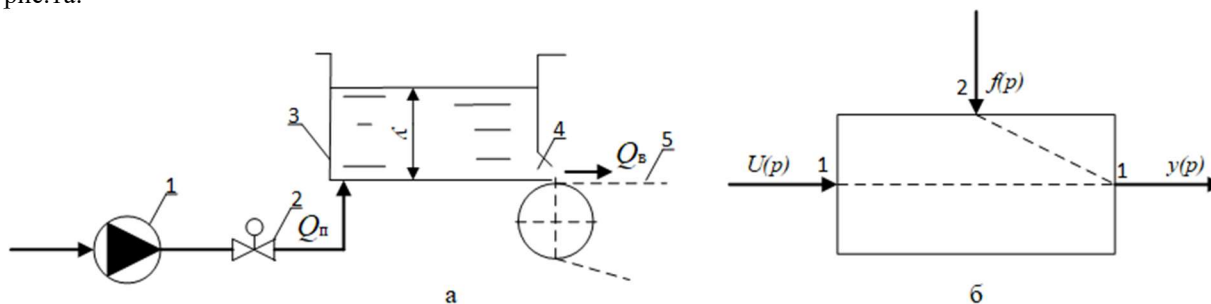
Аналіз попередніх досліджень. Аналіз досліджень моделювання та керування об'єктом, який розглядається в статті виявив такі типи моделей та алгоритмів що застосовуються. Роботи [2-4] присвячено застосуванню Fuzzy регуляторів для керування напірним ящиком. Робастне керування папероробною

машиною запропоноване у [5, 6]. В статті [7] розглянуто ряд сучасних технологій керування напірним ящиком, однак зроблено висновок, що загальною науковою проблемою є те що для ефективного керування таким складним об'єктом як напірний ящик необхідна якісна математична модель в якій враховується велика кількість змінних. У зв'язку із цим розробка ефективної стратегії керування залишається невирішеною частиною наукової проблеми. Дана стаття присвячена розробці ефективної стратегії керування напірним ящиком відкритого типу на рівні підсистеми координації.

Виклад основного матеріалу

1. Математична модель об'єкта керування

Принципову схему напірного ящика відкритого типу, як об'єкта керування рівнем маси наведено на рис.1а:



а – принципова схема; б – структурна схема:

1 – змішувальний насос; 2 – регулювальний орган; 3 – напускна камера; 4 – випускальна щілина; 5 – сітка.

Рис. 1 – Напірний ящик відкритого типу

Волокнинна суспензія (далі паперова маса (маса)) змішувальним насосом 1 крізь регулювальний орган 2 подається у напускну камеру 3, а з неї крізь випускальну щілину 4 витікає на сітку 5. У такому об'єкті керування рівень маси h у напускній камері – це вихідна змінна об'єкта керування, витрата маси Q_n , що подається до напускної камери – керувальне діяння. У якості збурювального діяння приймаємо площу випускальної щілини; оскільки довжина випускальної щілини (необрізана ширина паперового полотна), є стала величина, то витрату маси Q_v крізь напускальну щілину можна змінювати шляхом зміни висоти напускальної щілини.

В перехідному режимі роботи цього об'єкта керування [8].

$$\frac{dV}{dt} = Q_n - Q_v, \quad (1)$$

де Q_n і Q_v – витрата маси, що підводиться до напускної камери і відводиться із неї.

Об'єм маси у напускальній камері.

$$V = Fh, F \neq \varphi(h), \quad (2)$$

де F – площа поверхні маси у напускальній камері.

Витрата маси, що відводиться із напускальної камери

$$Q_v = fV\sqrt{2gh}, \quad (3)$$

де f – площа напускальної щілини; g – прискорення сили тяжіння.

Підставимо вирази (2) і (3) у диференціальне рівняння (1). Тоді

$$F \frac{dh}{dt} + fV\sqrt{2gh} = Q_n. \quad (4)$$

Диференціальне рівняння (4) є нелінійним, його не можна використати для розв'язання поставленої проблеми, а тому лінеаризуємо його. Відхилення (приріст) поточних значень вхідних Q_n і Q_v і вихідної h змінних від їхніх ustalених значень Q_n^0 , Q_v^0 і h^0 дозволяє подати диференційне рівняння (1) так:

$$\frac{\partial \Delta V}{\partial t} = \Delta Q_{\text{п}} - \Delta Q_{\text{в}}, \quad (5)$$

де

$$\begin{aligned} \Delta V &= F \Delta h; \\ \Delta Q_{\text{в}} &= \left(\frac{\partial Q_{\text{в}}}{\partial h} \right)^o \Delta h + \left(\frac{\partial Q_{\text{в}}}{\partial f} \right)^o \Delta f; \\ \frac{\partial Q_{\text{в}}}{\partial h} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_{\text{в}}^o}{h^o}; \\ \left(\frac{\partial Q_{\text{в}}}{\partial f} \right)^o &= \frac{Q_{\text{в}}^o}{f^o}; \end{aligned}$$

Таким чином

$$F \frac{\partial \Delta V}{\partial t} + \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_{\text{в}}^o}{h^o} \Delta h(t) = \Delta Q_{\text{п}}(t) - \frac{Q_{\text{в}}^o}{h^o} \Delta f(t). \quad (6)$$

У стандартній формі лінійне диференціальне рівняння (6) має вигляд:

$$T_0 \frac{\partial y}{\partial t} + y(t) = k_{11} u(t) - k_{12} f(t), \quad (7)$$

де

$$y(t) \sim \Delta h(t);$$

$$u(t) \sim \Delta Q_{\text{п}}(t);$$

$$f(t) \sim \Delta f(t);$$

$T_0 = 2 \frac{V^o}{Q_{\text{в}}^o}$ – стала часу об'єкта керування,

$k_{11} = 2 \frac{h^o}{Q_{\text{в}}^o}$ – коефіцієнт підсилення каналу керування k_{11} ,

$k_{12} = 2 \frac{h^o}{f^o}$ – коефіцієнт підсилення каналу збурення k_{12} .

В операційній формі диференціальне рівняння (7) подамо так:

$$(T_0 p + 1) y(p) = k_{11} U(p) - k_{12} f(p), \quad (8)$$

де $y(p)$, $u(p)$, $f(p)$ – зображення за Лапласом вихідної змінної об'єкта керування, керувального та збурювального діянь; p – оператор Лапласа.

Відповідно до операційного рівняння (8) зображено структурну схему об'єкта керування, рис. 1,б.

Аналіз наведеної структурної схеми свідчить, що керувати напірним ящиком під час переведення його з одного режиму роботи в інший можна або шляхом зміни витрати маси, що подається у напускну камеру, або шляхом зміни площі випускальної щілини. Розглянемо перший випадок.

2. Розробка алгоритму керування

Розглянемо випадок коли $f(t) = 0$. У такому випадку математична модель об'єкта керування має вигляд:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = b_1 u(t) - a_{11} y(t), \quad (9)$$

де

$$a_{11} = \frac{1}{T_0};$$

$$b_1 = \frac{k_{11}}{T_0}.$$

Прийmemo критерій оптимальності:

$$J = \int_0^T u^2 dt \rightarrow \min, \quad (10)$$

де T – час переведення об'єкта керування з першого режиму роботи на другий режим.

Будемо вважати, що:

а) у разі подачі задавального діяння при $t=0, y(t)=0$, а при $t=T, y(t)=y(T)$;

б) у разі подачі збурювального діяння при $t=0, y(t)=0$, а при $t=T, y(t)=y(T)=0$.

Складемо функцію Лагранжа у такому вигляді:

$$F = u^2 + \lambda(b_1 u - a_{11} y - y^o), \quad (11)$$

де λ – невизначений множник Лагранжа.

Умовою оптимальності системи переведення напірного ящика з одного режиму роботи на інший режим повинно бути задоволення рівняння Ейлера:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial u} - \frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial F}{\partial U^o} = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial F}{\partial y^o} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Визначимо частинні похідні по u, y і λ і створимо систему рівнянь.

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial U} = 2U + b_1 \lambda; \\ \frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial F}{\partial U^o} = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial y} = a_{11} \lambda; \\ \frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial F}{\partial y^o} = -\lambda_0. \end{cases} \quad (13)$$

Підставивши рівняння системи рівнянь (13) у рівняння системи рівнянь (12) одержимо:

$$\begin{cases} 2u + \lambda_1 b_1 = 0; \\ -a_{11} \lambda + \lambda^o = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Із першого рівняння випливає, що

$$U = -\frac{b_1}{2} \cdot \lambda. \quad (15)$$

Нехай

$$\lambda = \lambda_0 e^{a_{11} t}. \quad (16)$$

Тоді

$$u = \frac{b_1}{2} \lambda_0 e^{a_{11} t}, \quad (17)$$

де λ_0 – початкове значення невизначеного множника Лагранжа.

З метою визначення початкового значення цього множника підставимо вираз (17) у вираз (9). Тоді

$$\frac{dy}{dt} + a_{11} y(t) = -\frac{b_1^2}{2} \lambda_0 e^{a_{11} t}. \quad (18)$$

Розв'яжемо диференціальне рівняння (18), записавши спочатку його так:

$$dy(t) = -a_{11} y(t) dy - \frac{b_1^2}{2} \lambda_0 e^{a_{11} t} \cdot dt. \quad (19)$$

Проінтегрувавши диференціальне рівняння (19) маємо:

$$y(t) = a_{11} \int_0^t y(t) \cdot dt - \frac{b_1}{2} \lambda_0 \int_0^t e^{a_{11}t'} \cdot dt', \quad (20)$$

При $t^0=0$, $y(t)=y(0)=0$, а тому

$$y(t) = -\frac{b_1^2}{2} \lambda_0 \int_0^t e^{a_{11}t'} \cdot dt' + C, \quad (21)$$

де C – стала інтегрування.

Після інтегрування виразу (21) маємо:

$$y(t) = -\frac{b_1^2}{4a_{11}} \lambda_0 e^{a_{11}t} + C e^{-a_{11}t}. \quad (22)$$

З метою визначення сталої інтегрування C і початкового значення невизначеного множника Лагранжа λ_0 розглянемо початкові умови:

1. При $t=0$ $y(t)=y(0)=0$. Тоді

$$0 = -\frac{b_1^2}{4a_{11}} \lambda_0 + C.$$

Звідси випливає, що

$$C = \frac{b_1^2}{4a_{11}} \lambda_0. \quad (23)$$

Підставивши вираз (23) у вираз (22) маємо:

$$y(t) = -\frac{b_1^2}{4a_{11}} \lambda_0 (e^{-a_{11}t} - e^{a_{11}t}). \quad (24)$$

При $t=T$, $y(t)=y(T)$. Отже

$$y(T) = -\frac{b_1^2}{4a_{11}} \lambda_0 (e^{-a_{11}T} - e^{a_{11}T}).$$

Звідси випливає, що

$$\lambda_0 = \frac{4a_{11}}{b_1^2 (e^{-a_{11}T} - e^{a_{11}T})} y(T). \quad (25)$$

Підставивши вираз (25) у вираз (24) маємо шуканий алгоритм координованого керування напірним ящиком:

$$y(t) = \frac{(e^{-a_{11}t} - e^{a_{11}t})}{(e^{-a_{11}T} - e^{a_{11}T})} y(T). \quad (26)$$

3. Розробка структури алгоритму координованого керування

Із виразу (17) випливає, що

$$e^{a_{11}t} = -\frac{2}{b_1 \lambda_0} u(t), \quad (27)$$

Отже,

$$e^{-a_{11}t} = -\frac{b_1}{2u(t)} \lambda_0. \quad (28)$$

Підставимо вирази (27) і (28) у вираз (26). Тоді

$$y(t) = \frac{4u^2(t) - b_1^2 \lambda_0^2}{8a_{11}u(t)} b_1.$$

Звідси випливає, що

$$8a_{11}u(t) y(t) = [4u^2(t) - b_1^2 \lambda_0^2] b_1$$

або

$$u^2(t) - 2a_{11}^* y(t) u(t) - \frac{b_1^2 \lambda_0^2}{4} = 0, \quad (29)$$

де

$$a_{11}^* = \frac{a_{11}}{b_1}.$$

Розв'язок рівняння (29) такий:

$$u(t) = a_{11}^* y(t) \pm \sqrt{a_{11}^{*2} \cdot y^2(t) + \frac{b_1^2}{4} \lambda_0^2}, \quad (30)$$

або

$$u(t) = a_{11}^* y(t) \pm D,$$

де $D = \sqrt{a_{11}^{*2} \cdot y^2(t) + \frac{b_1^2}{4} \lambda_0^2}.$

У відповідності з виразом (30) наведено структурну схему алгоритму координованого керування напірним ящиком, рис. 2

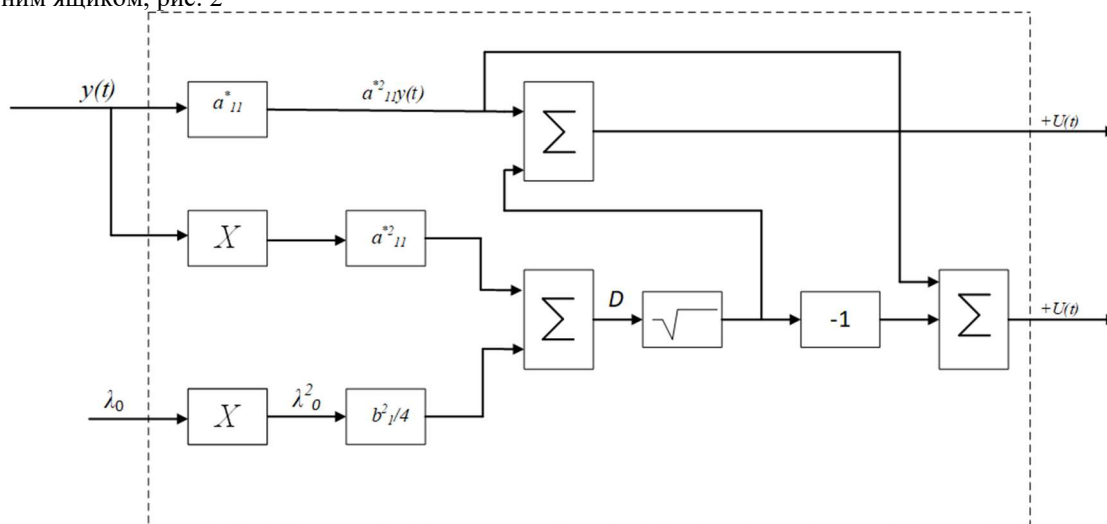


Рис. 2 – Структурна схема алгоритму координованого керування напірним ящиком відкритого типу

4. Ілюстративний приклад

Розглянемо стандартний напірний ящик ЯНО-180, який має такі технічні характеристики [1]:

- При робочій швидкості папероробної машини $V_1=195$ м/хв (3,25 м/с) робоча висота рівня маси у напірному ящику $y_2(t)=0,485$ м вод.ст.
- При максимальній швидкості машини $V_2=225$ м/хв (3,75 м/с) максимальна висота рівня маси у напірному ящику $y_2(t)=0,575$ м вод.ст.
- Стала часу напірного ящика $T_0=34,1$ с.

- Коефіцієнти підсилення каналу керування $k_{11}=10,43$ м/м³/с.

Потрібно розробити алгоритм переведення напірного ящика з робочої на максимальну висоту рівня маси у напірному ящику за час $T=180$ с.

Крок 1. Визначити значення коефіцієнта a_{11}

$$a_{11} = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{34,1} = 0,029 \text{ с}^{-1}.$$

Крок 2. Визначити значення коефіцієнта b_1

$$b_1 = \frac{k_{11}}{T_0} = \frac{10,43}{34,1} = 0,305 \text{ м/м}^3\text{/с/с/}.$$

Крок 3. Перемножити коефіцієнти a_{11} і T

$$a_{11}T = 0,029 \cdot 180 = 5,22.$$

Крок 4. Визначити значення експоненти $e^{-a_{11}T}$

$$\exp(-a_{11}T) = \exp(-5,22) = 0,0054.$$

Крок 5. Визначити значення експоненти $e^{a_{11}T}$

$$\exp(a_{11}T) = \exp(5,22) = 184,93.$$

Крок 6. Визначити значення різниці коефіцієнтів $\exp(-a_{11}T) - \exp(a_{11}T)$ А

$$\exp(-a_{11}T) - \exp(a_{11}T) = 0,0054 - 184,93 = -184,92.$$

Крок 7. Визначити приріст заданого значення рівня маси $\Delta y(T)$

$$\Delta y(T) = y_2(t) - y_1(t) = 0,575 - 0,485 = 0,09 \text{ м вод. ст.}$$

Крок 8. Визначити значення виразу $\Delta y(T)/A$

$$\frac{\Delta y(T)}{A} = \frac{0,09}{-184,92} = -4,86 \cdot 10^{-4} \text{ м вод. ст.}$$

Крок 9. Записати перехідну функцію $\Delta y(t)$

$$\Delta y(t) = -4,86 \cdot 10^{-4} [\exp(-a_{11}t) - \exp(a_{11}t)]. \quad (31)$$

Результати розрахунків згідно із виразом (31) зведено до табл.1.

Таблиця 1 – Результати розрахунків оптимального перехідного процесу $\Delta y(t)$ при зміні заданого значення рівня маси на 0,09 м вод.ст.

$t, \text{с}$	$a_{11}t$	$\exp(-a_{11}t)$	$\exp(a_{11}t)$	$\Delta y(t)$
0	0	1	1	0,000
20	0,58	0,559	1,786	$5,96 \cdot 10^{-4}$
40	1,16	0,313	3,189	$13,98 \cdot 10^{-4}$
60	1,74	0,175	5,697	$26,83 \cdot 10^{-4}$
80	2,32	0,098	10,175	$48,97 \cdot 10^{-4}$
100	2,90	0,055	18,174	$88,05 \cdot 10^{-4}$
120	3,48	0,030	32,459	$157,60 \cdot 10^{-4}$
140	4,06	0,017	57,97	$281,67 \cdot 10^{-4}$
160	4,64	0,009	103,54	$503,18 \cdot 10^{-4}$
180	5,22	0,0054	184,93	$898,75 \cdot 10^{-4}$

У відповідності з табл.1 побудовано графік приросту рівня маси у разі стрибкоподібної зміни заданого значення рівня маси на 0,09 м вод.ст., рис.3.

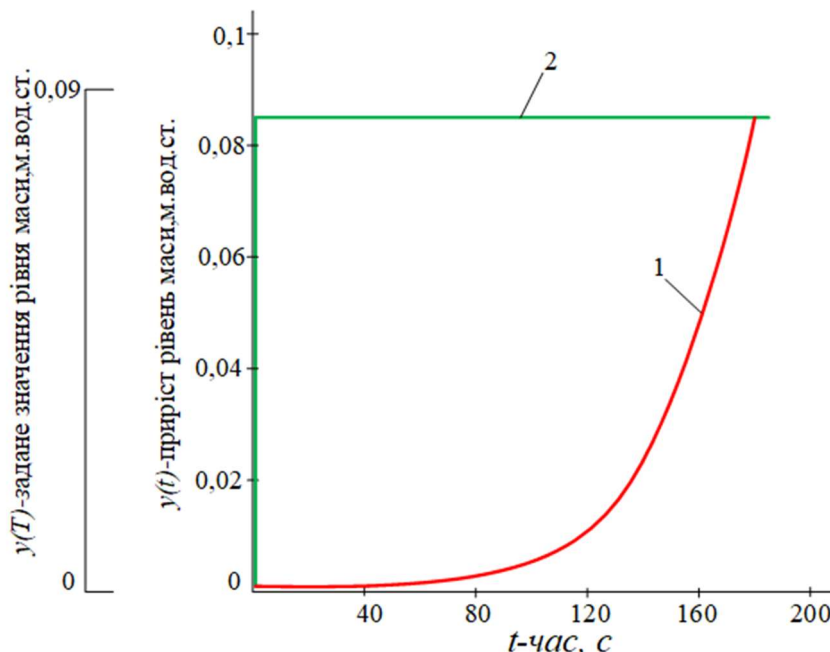


Рис. 3 – Приріст рівня маси (графік 1) на стрибкоподібну зміну заданого значення рівня маси (графік 2)

Після досягнення нового заданого значення рівня маси алгоритм координованого керування напірним ящиком відключається і починає працювати система автоматичного регулювання рівня маси в режимі стабілізації.

Висновки. Напірний ящик відкритого типу як об'єкт керування рівнем маси, керований відповідною системою автоматичного керування, що входить до складу автоматизованої системи керування технологічним процесом (АСКТП) виробництва паперу можна перевести з одного режиму роботи папероробної машини на інший за допомогою алгоритму координованого керування, розміщеного на рівні координації багаторівневої АСКТП виробництва паперу.

Для його реалізації необхідно знати динамічні характеристики напірного ящика (сталу часу напірного ящика, коефіцієнт підсилення каналу керування та час, потрібний для переведення напірного ящика з одного режиму роботи на інший).

Перспективи подальших досліджень. Для використання розробленого алгоритму керування на рівні координації багаторівневої системи керування технологічним процесом виробництва паперу передбачено розробка відповідного програмного забезпечення. Подальші дослідження передбачають аналіз можливості комбінування різних стратегій керування для підвищення ефективності виробництва паперу.

Список використаної літератури

1. Жученко А.І., Піргач М.С., Кваско М.З. Автоматичне керування напірними ящиками паперо- і картоноробних машин: монографія / К.: Бізнес Медія Консалтинг, 2014. 232с.
2. Sharma D., Kumar R., Verma V. Fuzzy tuned proportional integral derivative control of paper machine headbox // 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON), New Delhi. 2015. P. 1–4.
3. Kumar R., Moudgil M. Multiple-Input Multiple-Output Paper Machine System Control Using Fuzzy-PID Tuned Controller // Proceedings of Fifth International Conference on Soft Computing for Problem Solving Volume 437 of the series Advances in Intelligent Systems and Computing. 2016. P. 145–155.
4. Parashar D., Chandel A., Sharma G., Parashar D. Modeling and Control of MIMO Headbox System Using Fuzzy Logic // International Journal of Engineering Research and Applications. 2014. 12(4) (Part 3). P.118-123.
5. Kumar R., Guleria M. Robust control of Non Linear Parameters of Paper machine Headbox // International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAEM). 2013. 6(2). P. 259 – 264.

6. Dhaka P., Kumar R. Design & Development of Robust Control for Paper Making Headbox System // *International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering*. 2014. 5(3). P. 432–438.
 7. Saini P., Kumar R. Brief Review and Mathematical Modelling of Air Cushioned Pressurized Paper Machine Headbox // *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. 7(3.4). P. 57–65.
 8. Жученко А.І., Піргач М.С., Жураковський Я.Ю. Неперервні форми представлення напірних ящиків з повітряною подушкою // *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2016. №1(15). С.123–127.
-

Anatolii Zhuchenko, Mykola Pirhach, Yaroslav Zhurakovskiy, Roman Sadovnychiy

ALGORITHM OF COORDINATED CONTROL OF AN OPEN-TYPE HEADBOX

The control system of an open-type headbox has a high complexity, which is associated with the need not only to stabilize the parameters of the object, but also to carry out coordinated control of it in the case of automatic transfer of a paper machine from one type of product to another for a minimum time.

A mathematical model of an open-type headbox as an object of mass level control has been developed. In the model, the output variable of the control object is the level of mass in the injection chamber, and the control action is the mass flow rate supplied to the injection chamber. The model takes into account the disturbing action - the area of the discharge slot. On the basis of the developed model, two options for constructing an algorithm for controlling the pressure box during its transfer from one mode to another are considered. The structure of the algorithm for coordinated control of the pressure box is developed. An illustrative example of application of the developed algorithm is given. The calculations of the optimal transient process in the object confirm the effectiveness of the developed control algorithm. The algorithm of coordinated control is applied to the standard pressure box YANO-180. The development of the algorithm for transferring the pressure box from the working (0.485 m) to the maximum (0.575 m) height of the mass level in the pressure box for 180 seconds is demonstrated. The calculation results show that the coordinated control algorithm provides the transfer of the mass level to the maximum height for a given time. The algorithm developed on the basis of the obtained mathematical model allows to control the level of mass in such a complex object as an open-type headbox when transferring a paper machine from one mode of operation to another for the time specified by the coordinated control system.

Keywords: *paper machine, headbox, control system, paper production*

References

1. Zhuchenko A.I., Pirgach M.S., Kvasko M.Z. (2014), *Avtomatychne keruvannia napirnyimi yashchykami papero-i kartonorobnykh mashyn* [Automatic control of headboxes of paper and cardboard machines], Kyiv, Ukraine.
2. Sharma D., Kumar R., Verma V. (2015), "Fuzzy tuned proportional integral derivative control of paper machine headbox", 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON), New Delhi, pp. 1-4.
3. Kumar R., Moudgil M. (2016), "Multiple-Input Multiple-Output Paper Machine System Control Using Fuzzy-PID Tuned Controller", Proceedings of Fifth International Conference on Soft Computing for Problem Solving Volume 437 of the series Advances in Intelligent Systems and Computing, pp. 145-155.
4. Parashar D., Chandel A., Sharma G., Parashar D. (2014), "Modeling and Control of MIMO Headbox System Using Fuzzy Logic", *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 4, no. (12) (Part 3), pp.118-123.
5. Kumar R., Guleria M. (2013), "Robust control of Non Linear Parameters of Paper machine Headbox", *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)*, vol. 2, no. (6), pp. 259 – 264.
6. Dhaka P., Kumar R. (2014), "Design & Development of Robust Control for Paper Making Headbox System", *International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering*, vol. 3, no. (5), pp. 432–438.
7. Saini P., Kumar R. (2018), "Brief Review and Mathematical Modelling of Air Cushioned Pressurized Paper Machine Headbox", *International Journal of Engineering & Technology*, no. 7(3.4). pp. 57–65.
8. Zhuchenko A.I., Pirgach M.S., Zhurakovskiy Y.Y. (2016), *Neperervni formy matematychnykh opysiv napirnykh yashchykiv iz povitrianoi podushkoiu* [Continuous forms of presentation of head boxes with air cushion] // *Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut imeni Igoria Sikorskogo"; Himichna inzheneriia, ekologiia ta resursozberezhennia*, no 1(15), pp. 123–128. doi: 10.20535/2306-1626.1.2016.78220.