

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 66.041

ЖУЧЕНКО А. І., д.т.н., проф., ПІРГАЧ М. С., к.т.н., с.н.с., доц., ЖУРАКОВСЬКИЙ Я. Ю., стар. викл. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НАПІРНИМ ЯЩИКОМ З ПОВІТРЯНОЮ ПОДУШКОЮ, РЕАЛІЗОВАНОЇ НА БАЗІ РЕГУЛЯТОРА ХОРНБОСТЕЛА

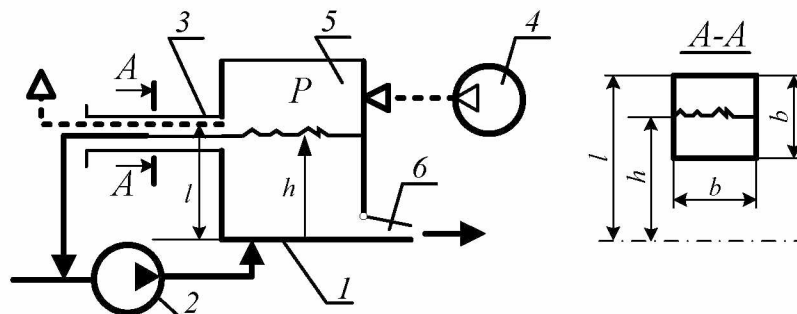
Досліджено систему автоматичного керування напірним ящиком з повітряною подушкою папероробної машини, реалізовану на базі регулятора Хорнбостела. Показано, що за допомогою даної системи можна регулювати тільки рівень волокниної суспензії (далі – маси) у напускній камері цього ящика.

**Ключові слова:** папероробна машина, напірний ящик з повітряною подушкою, система автоматичного керування, регулятор Хорнбостела.

DOI: 10.20535/2306-1626.1.2018.143400

© Жученко А. І., Піргач М. С., Жураковський Я. Ю., 2018

**Постановка задачі.** Відомо [1], система автоматичного керування (САК) напірним ящиком з повітряною подушкою (НЯ з ПП), реалізована на базі регулятора Хорнбостела, досить проста і надійна, а тому вона використовується на багатьох папероробних і картоноробних машинах (ПРМ і КРМ). Принципи роботи такої системи можна пояснити так (рис. 1).



1 – напускна камера; 2 – змішувальний насос; 3 – переливна труба (регулятор Хорнбостела); 4 – компресор; 5 – повітряна подушка; 6 – випускальна щілина

**Рис. 1 – Принципова схема системи автоматичного керування напірним ящиком з повітряною подушкою, реалізованої на базі регулятора Хорнбостела**

Усе повітря із повітряної подушки (ПП) 5, куди його подає компресор 4, відводиться з неї крізь переливну трубу 3, яку називають регулятором Хорнбостела. Цю трубу розміщено так, щоб гранична поверхня поділу маси і повітря у напірному ящику проходила через центр вхідного отвору труби. Крізь неї відводиться приблизно 10 % маси, яка подається змішувальним насосом 2 у напускну камеру 1. Якщо через порушення усталеного режиму подачі маси чи повітря у цей об'єкт керування (ОК) зміниться рівень маси  $h$ , то гранична поверхня поділу маси й повітря зміститься відносно осі вхідного отвору труби. Так, у разі збільшення рівня маси у вказаній трубі, буде зменшуватися її площа поперечного перерізу для виходу повітря із повітряної подушки, що призведе до збільшення тиску повітря у ній. Збільшення тиску повітряної подушки зумовить зменшення рівня маси, а отже, і збільшення площі поперечного перерізу труби крізь яку повітря витікає із ПП. Відповідно, якщо рівень маси зменшиться, то прохід для виходу повітря крізь переливну трубу збільшиться, а отже тиск повітря у ПП зменшиться. Саме тому витрата маси, що подається у напускну камеру, збільшиться, а це призведе до збільшення рівня маси у ній.

Метою статті є дослідження статичних і динамічних характеристик системи, що розглядається і розробка пропозицій щодо поліпшення якості роботи САК НЯ з ПП.

**1. Математична модель напірного ящика з повітряною подушкою як об'єкта керування рівнем маси у напускній камері і тиском повітряної подушки**

Відомо [2], що НЯ з ПП можна представити наступною системою операційних рівнянь:

$$\begin{cases} (T_{11}p + 1)y_1(p) = k_{11}u_1(p) - k_{12}y_2(p); \\ (T_{22}p + 1)y_2(p) = k_{21}py_1(p) + k_{22}u_2(p), \end{cases} \quad (1)$$

де  $y_1(p)$  і  $y_2(p)$  – зображення за Лапласом рівня маси у напускній камері і тиску повітря у ПП;  $u_1(p)$  і  $u_2(p)$  – зображення за Лапласом витрати маси, що подається до напускної камери і витрати повітря, що підводиться до ПП;  $T_{11}$  і  $T_{22}$  – сталі часу напускної камери і ПП;  $k_{11}$ ,  $k_{12}$ ,  $k_{21}$  і  $k_{22}$  – коефіцієнти підсилення каналів 11, 12, 21 і 22;  $p$  – оператор Лапласа.

**2. Розробка математичної моделі регулятора Хорнбостела**

З метою одержання передавальної функції регулятора Хорнбостела розглянемо залежність витрати повітря, яке виходить із ПП. Нехай переливна труба має вихідний отвір у формі квадрата. Тоді площа поперечного перерізу цієї труби (рис. 1)

$$f_e = b(l - h), \quad (2)$$

де  $b$  – сторона квадрата;  $h$  – поточне значення рівня маси у напускній камері;  $l$  – конструктивний параметр.

Витрата повітря крізь вихідний отвір переливної труби

$$g_e = f_e \sqrt{\frac{kg}{3R\theta}} P, \quad (3)$$

де  $\theta$  – температура повітря у ПП;  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $R$  – універсальна газова стала;  $k$  – коефіцієнт політропи.

Відхилення поточного значення витрати повітря  $g_e$  від його усталеного значення  $g_e^0$

$$\Delta g_e = f_e \sqrt{\frac{kg}{3R\theta}} P_0 \Delta f_b = \frac{g_e^0}{f_e^0} \Delta f_e, \quad (4)$$

де  $f_e^0$  – усталене значення площі поперечного перерізу переливної труби;  $\Delta f_e$  – відхилення поточного значення площі поперечного перерізу переливної труби від її усталеного значення  $f_e^0$ .

Згідно виразу (2)

$$\Delta f_e = -b \Delta h, \quad (5)$$

де  $\Delta h$  – відхилення поточного значення рівня маси у напускній камері від його заданого значення  $h^0$ .

Таким чином,

$$\Delta g_e = -k_p^x \Delta h, \quad (6)$$

де

$$k_p^x = b \frac{g_e^0}{f_e^0} -$$

коефіцієнт підсилення регулятора Хорнбостела.

Оскільки  $f_e^0 = b^2$ , то

$$k_p^x = \frac{g_e^0}{b}.$$

Якщо допустити, що  $b = d$ , де  $d$  – діаметр переливної труби, а  $g_e = g_{\Pi}$ , де  $g_{\Pi}$  – витрата повітря, що подається у ПП, то

$$k_p^x = \frac{g_{\Pi}^0}{d}. \quad (7)$$

Будемо вважати, що

$$u_2(p) \square g_{\Pi}(p), \text{ а } y_1(p) \square \Delta h(p).$$

Тоді передавальну функцію регулятора Хорнбостела (6) можна подати так:

$$g_p^x(p) = -k_p^x. \quad (8)$$

### 3. Розробка структурної схеми напірного ящика з повітряною подушкою

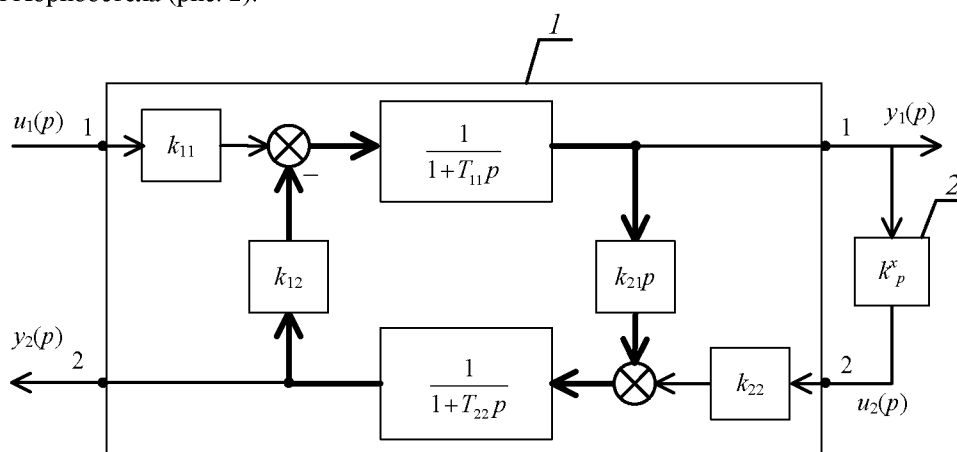
Використовуючи систему операційних рівнянь (1) можна показати, що передавальна функція напірного ящика за каналом «витрата маси  $Q_{\pi} \rightarrow$  рівень маси  $h$ » (канал 11)

$$g_{11}(p) = \frac{y_1(p)}{u_1(p)} = \frac{k_{11}(1+T_{22}p)}{(1+T_{11}p)(1+T_{22}p) + k_{12}k_{21}p}. \quad (9)$$

Передавальна функція напірного ящика за каналом «витрата повітря  $g_{\pi} \rightarrow$  рівень маси  $h$ » (канал 21)

$$g_{12}(p) = \frac{y_1(p)}{u_2(p)} = -\frac{k_{12}k_{22}}{(1+T_{11}p)(1+T_{22}p) + k_{12}k_{21}p}. \quad (10)$$

На підставі передавальних функцій (8) – (10) побудовано структурну схему САР рівня маси у НЯ з ПП з регулятором Хорнбостела (рис. 2).



1 – напірний ящик; 2 – регулятор Хорнбостела

Рис. 2 – Структурна схема системи автоматичного регулювання рівня маси у напірному ящику з регулятором Хорнбостела

Аналіз наведеної структурної схеми свідчить, що якщо немає автоматичного регулятора рівня, тобто якщо  $k_p^x = 0$ , то передавальна функція розімкненої системи відносно збурення  $u_1(t)$

$$\Phi_{u_1}(p) = g_{11}(p) = \frac{B(p)}{A(p)}, \quad (11)$$

де  $A(p) = (1+T_{11}p)(1+T_{22}p) + k_{12}k_{21}p$ ;  $B(p) = k_{11}(1+T_{22}p)$ .

Отже, у разі дії на розімкнуту систему одиничного стрибкоподібного збурювального діяння  $u_1(t) \equiv 1$  усталена похибка рівня маси у напірному ящику, що не обладнаний регулятором рівня

$$y_{1\text{ст}}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} p \frac{k_{11}(1+T_{22}p)}{(1+T_{11}p)(1+T_{22}p) + k_{12}k_{21}p} \cdot \frac{1}{p} = k_{11}. \quad (12)$$

Якщо регулятор рівня підключено до напірного ящика, то передавальна функція замкнутої системи відносно збурення  $u_1(t)$

$$\Phi_{u_1}(p) = \frac{g_{11}(p)}{1 + g_{12}(p)g_{11}(p)g_p^x(p)}. \quad (13)$$

Передавальну функцію (10) подаємо так:

$$g_{12}(p) = -\frac{C(p)}{A(p)}, \quad (14)$$

де  $C(p) = k_{12}k_{22}$ .

Підставляючи вирази (8), (9) і (14) у вираз (13) маємо:

$$\Phi_{in}(p) = \frac{A(p)B(p)}{A^2(p) + B(p)C(p)k_p^x(p)}. \quad (15)$$

Якщо  $k_p^x = 0$ , то вираз (15) співпадає з виразом (11). Якщо  $k_p^x \neq 0$ , то у разі дії на замкнуту систему одиничного збурювального діяння  $u_1(t) \equiv 1$  усталена похибка рівня маси у напускній камері

$$y_{1\text{уст}}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} p \cdot \frac{A(p)B(p)}{A^2(p) + B(p)C(p)k_p^x(p)} \cdot \frac{1}{p} = \frac{k_{11}}{1 + k_{12}k_{22}k_p^x}. \quad (16)$$

Порівнюючи вирази (12) і (16) бачимо, усталена похибка рівня маси обернено пропорційна коефіцієнту підсилення регулятора Хорнбостела  $k_p^x$ , позаяк коефіцієнти підсилення  $k_{11}$ ,  $k_{12}$  і  $k_{22}$  є сталими величинами. Аналіз виразу (2) свідчить, що збільшити цей коефіцієнт можна або шляхом збільшення витрати повітря, що подається у ПП, або шляхом зменшення діаметра переливної труби. На діючих напірних ящиках цього типу витрата повітря подається компресором і складає  $3,6 \text{ м}^3/\text{хв}$  чи  $5,2 \text{ м}^3/\text{хв}$ . Діаметр переливної труби дорівнює 35 чи 50 мм.

Залежність коефіцієнта підсилення регулятора Хорнбостела від цих величин, наведено на рис. 3.

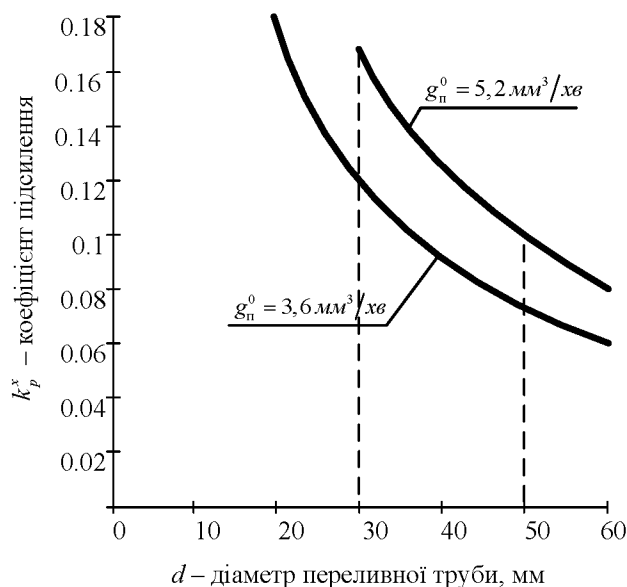


Рис. 3 – Залежність коефіцієнта підсилення регулятора Хорнбостела від діаметра переливної труби і витрати повітря, що подається у повітряну подушку

#### Висновки.

1. У системі автоматичного керування напірним ящиком з повітряною подушкою, реалізованої на базі регулятора Хорнбостела, регулюється тільки рівень маси у напускній камері. Коефіцієнт підсилення цього регулятора фіксований конструктивними параметрами напірного ящика і має досить незначний діапазон.

2. Сумарний напір маси у системі автоматичного керування цим типом напірного ящика, реалізованої на базі регулятора Хорнбостела, не регулюється. Отже, коливання цього параметра призводять до коливання маси  $1 \text{ м}^2$  паперового полотна на накаті машини і як наслідок – до зниження якості продукції, яка виробляється на машині.

**Перспективи подальших досліджень.** Подальші дослідження мають бути скеровані на розробку передавальної функції напірного ящика за каналом керування «витрата маси, що подається у напірний ящик – напір маси у випускальній щілині». На підставі цієї передавальної функції можна буде розробити систему автоматичного керування напором маси, яку слід реалізовувати на базі сучасного мікроконтролера.

**Список використаної літератури**

1. Жученко, А. І. Автоматичне керування напірними ящиками паперо- і картоноробних машин [Текст]: монографія / А. І. Жученко, М. С. Піргач, М. З. Кваско. – К.: Бізнес Медіа Консалтинг, 2014. – 232 с. Бібліогр.: С. 215-229. – 200 пр. – ISBN 978-966-2425-34-5.
2. Жученко, А. І. Неперервні форми представлення напірних ящиків з повітряною подушкою [Текст] // А. І. Жученко, М. С. Піргач, Я. Ю. Жураковський. – Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження», 2016. № 1 (15), – С. 123 – 127. : іл. – Бібліогр.: С. 126.

Надійшла до редакції 21.05.2018

---

*Zhuchenko A. I., Pirhach M. S., Zhurakovskiy Y. Y.*

**A STUDY ON AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF A AIR-PADDED HEADBOX IMPLEMENTED ON HORNPOSTEL CONTROLLER BASIS**

*As it is known, in the headbox it is necessary to control two output variables: the mass level and the mass head inside the headbox. In the past, it was thought that it was sufficient to control the mass level. This is achieved by using a conventional pneumatic controller under PI-control law or Hornpostel controller. The mass level can be measured by a conventional differential pressure gauge, and its control can be carried out by moving the control members that measure air flow through the air cushion.*

*Such a control system was easy to install and configure. However, it suffered from serious disadvantages. Firstly, the mass level control is achieved due to stabilization of the total mass head. This, of course, was a serious drawback, since keeping the mass pressure in the headbox is important for normal operation of the papermaking machine. Secondly, this approach and problem solution did not ensure the coordination of the movements of the upper slice lip and the control mass member when it is necessary to change either the speed of the papermaking machine or the mass flow through the slice. The necessity of such changes inevitably arises at change of the produced paper grade. Consequently, the approach inability to cope with it is also a serious drawback.*

*Simultaneously with the progress of regulation technology, some better automation tools were developed, design and calculation methods were improved. As a result, some steps can now be taken to eliminate the shortcomings of the old approach to the headbox control. For example, it is now possible to control the mass level, the mass head and the mass flow through the slice, changing the positions of the air and mass control members accordingly and upper slice lip position.*

*To solve this problem, it is necessary to have three controllers and they must be designed for narrow tolerances if we want to obtain satisfactory characteristics. As a result, although the use of such a system improves the quality of control processes, however, it is not without flaws, since controls is virtually impossible without carrying out a certain procedure to solve the problem. Fortunately, the process identification and controls methods have been developed just as applicable to similar systems. The description of some methods suitable for this problem solution is the main content of this article.*

**Keywords:** *paper machine, air-padded headbox, control system.*

**References**

1. Zhuchenko, A. I. Pirhach, M. S. and Kvasko, M. Z. (2014). *Avtomatichne keruvannya napirnimi yaschikami papero- i kortonobnih mashin* [Automatic control of headbox of paper and cardboard machines], *Biznes Media Konsalting*, Kyiv, Ukraine.
2. Zhuchenko, A. I. Pirhach, M. S. and Zhurakovskiy, Y. Y. (2016). “Continuous forms of mathematical representation of air-padded headbox”, *Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia*, vol. 15, no 1, pp. 123–127.