

5. Гудвин, Г. К. Проектирование систем управления [Текст] / Г. К. Гудвин, С. Ф. Гребе, М. Э. Сальгадо ; пер. с англ. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний. – 2004. – 911 с.

*The solution to the problem optimal control of process contact membrane distillation under conditions of uncertainty, which is designed to isolate the toxic components of heterogeneous liquid system, is proposed. The control system with a suboptimal  $\mu$ -controller and an analysis the robustness of the closed-loop system is developed.*

**Keywords:** optimal control, suboptimal  $\mu$ -controller, contact membrane distillation.

Надійшла до редакції 22.03.2012

УДК 65.012.122

КВАСКО М. З., к.т.н., проф.; ЖУРАКОВСЬКИЙ Я. Ю., ст.викл.;  
ЧЕГРИНЕЦЬ К. І., магістрант; НОСОВ А. О., студент  
Національний технічний інститут України «Київський політехнічний інститут»

## РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДВОКОНТУРНОЇ ДИСКРЕТНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИПАРНОЮ УСТАНОВКОЮ

*Розроблено методику розрахунку програмуючої функції для реалізації дискретної системи керування випарюванням у протитечійній багатокорпусній випарній установці.*

**Ключові слова:** система керування випарюванням, протитечійна багатокорпусна випарна установка.

### Постановка проблеми

На основі аналізу процесу випарювання та схем його автоматизації зроблено висновок, що ефективною системою керування має бути не одно-, а двоконтурна з використанням прямого показника якості випарюваного продукту – його концентрації й непрямого – температурної депресії.

**Метою** статті є розрахунок програмуючої функції контурів температури й концентрації.

### Виклад основного матеріалу

Попередні дослідження свідчать, що перехідні процеси за каналом зміна подачі пари – зміна температури випарювання відбуваються на один-два порядки швидше, ніж за каналом зміна подачі пари – зміна концентрації випарюваного продукту.

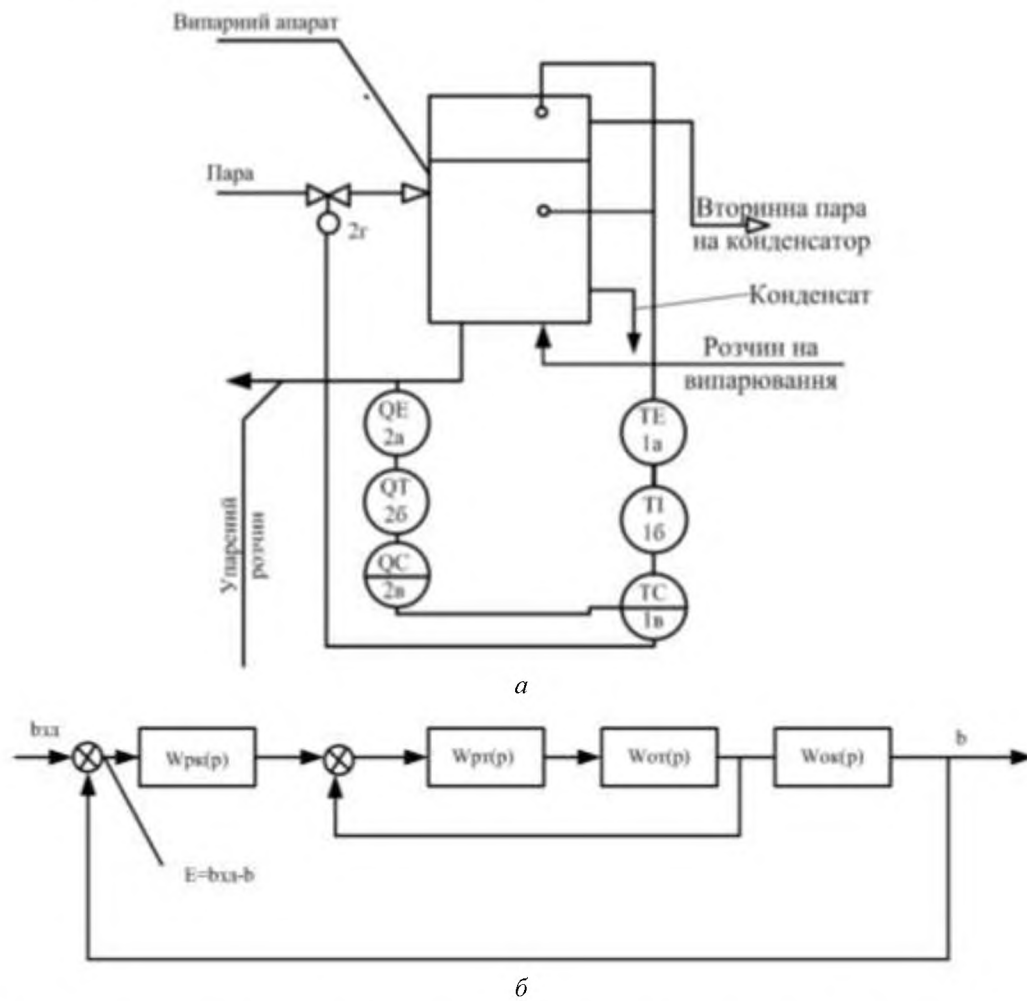
Спроба керувати концентрацією, використовуючи лише температурний канал, спричинює значні похибки. Використання ж каналу концентрації є надто інерційним. Більш досконалою є двоконтурна система автоматизації (рис. 1).

У протитечійній багатокорпусній випарній установці (БВУ) на концентрацію й температуру розчину в основному впливають показники першого за ходом пари та останнього за ходом розчину корпусу. Розраховуючи систему керування концентрацією, будемо брати до уваги динамічні властивості першого за ходом пари корпусу, що легко визначити аналітично чи експериментально.

На відміну від аналогової, реалізація дискретної системи керування БВУ надасть можливість застосувати мікропроцесорну техніку, вирішивши питання статичної й динамічної точності.

Розглянемо два контури цифрової системи, що взаємодіють: внутрішній (температури) і зовнішній (концентрації) (рис. 2). Тут  $D_1(z)$ ,  $D_2(z)$  – регулятори температури й концентрації;  $W_{от}(p)$  і  $W_{ок}(p)$  – передатні функції об'єктів температури і концентрації;  $Y^\circ$  і  $X^\circ$  – завдання основному регулятору (концентрації) і регулятору температури;  $Y$ ,  $X$  – концентрація й температура; ЕНП<sub>1</sub>, ЕНП<sub>2</sub> – екстраполятори нульового порядку;  $\Delta Y = Y^\circ - Y$ ,  $\Delta X = X^\circ - X$  – відхилення заданих концентрації й температури від плинних значень;  $U$  – керівний вплив (зміна подачі пари);  $f_1$  і  $f_2$  – зовнішні збурення;  $T_1$  і  $T_2$  – періоди дискретизації системи за внутрішнім і зовнішнім контуром.

© Кваско М. З., Жураковський Я. Ю., Чегринець К. І., Носов А. О., 2012



1a – датчик температури, 1b – перетворювач, 2a – датчик концентрації, 2b – перетворювач, 2в – регулятор концентрації, 2г – виконавчий механізм;  $W_{pm}(p)$  і  $W_{pk}(p)$  – передатні функції регуляторів, а  $W_{om}(p)$ ;  $W_{ok}(p)$  – об'єктів температури й концентрації

Рис. 1 – Схема автоматизації (а) і структурна схема (б) системи керування протічнійною випарною установкою, побудована на аналогових засобах

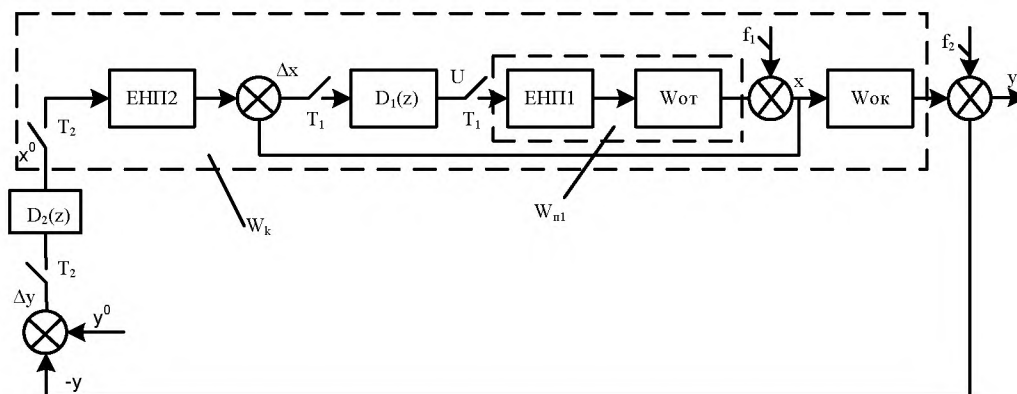


Рис. 2 – Структурна схема двоконтурної цифрової системи регулювання концентрації

Розрахуємо внутрішній контур. Динамічні властивості об'єкта апроксимуємо аперіодичною ланкою першого порядку з запізненням:

$$W_{от}(p) = \frac{K_{01} \exp(-T_{01}p)}{T_{01}p + 1},$$

де  $K_{01}$ ,  $\tau_{01}$ ,  $T_{01}$  – коефіцієнт передачі, час запізнення і стала часу об'єкта. Перехідний процес у внутрішньому контурі має закінчитися протягом часу, що дорівнює двом періодам дискретизації  $T_1$  і  $T_2$  після подачі на  $D_1(z)$  одиничного завдання. Період дискретизації  $T_1 = 0,1T_{01}$ .

Перехідний процес  $T_{31}$  у внутрішньому контурі може закінчитися через  $2T_1 = 0,2T_{01}$ . Це дає змогу вважати, що інерційність внутрішнього контуру матиме короточасний і незначний вплив на зовнішній контур.

Екстраполятор нульового порядку (ЕНП<sub>1</sub>) із передатною функцією  $W_{ЕНП1}(p) = (1 - \exp(-T_1p))/p$ . Імпульсна передатна функція (ППФ) у Z-формі  $W_{П1}(z) = (z-1)/z \cdot Z\{W_{от}(p)/p\}$ . Щоб розрахувати  $Z\{W_{от}(p)/p\}$ , скористаємося модифікованим Z-перетворенням:

$$W_{П1}(z) = \frac{K_{01}(C_1 + C_2z^{-1})z^{-(k+1)}}{1 - C_3z^{-1}},$$

де  $C_1 = 1 - \exp(-aT_1/T_{01})$ ;  $C_2 = \exp(-aT_1/T_{01}) - \exp(-T_1/T_{01})$ ;  $C_3 = \exp(-T_1/T_{01})$ ;  $a = 1 - (\tau_{01} - K_1T_1)/T_1$ ;  $K_1 = \text{int}(\tau_{01}/T_1)$ ;  $K_1T_1 < \tau_{01} \leq (K_1 + 1)T_1$ .

Використовуючи методику синтезу цифрових регуляторів за методом Калмана, ППФ

$$D_1(z) = \frac{U(z)}{\Delta x(z)} = K_{p1} \left[ 1 + \frac{T_1}{T_h} \frac{1}{(1-z^{-1})} \right],$$

де  $K_{p1} = \frac{1}{K_{01}(\exp(T_1/T_{01}) - 1)(K + 2 - x_1)}$ ;  $T_h = \frac{T_1}{\exp(T_1/T_{01}) - 1}$ ;  $x_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{1 - \exp(-aT_1/T_{01})}{1 - \exp(-T_1/T_{01})}$ .

Програмуюча функція для регулятора внутрішнього контуру

$$U[nT_1] = U[(n-1)T_1] + R_1 \Delta x[nT_1] + R_2 \Delta x[(n-1)T_1],$$

де  $R_1 = K_{p1}(1 + T_1/T_h)$ ;  $R_2 = -K_{p1}$ .

Розрахуємо зовнішній контур. Динамічні властивості об'єкта  $W_{ок}$  за каналом  $X(p) - Y(p)$  із достатньою точністю можна апроксимувати передатною функцією

$$W_{ок}(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K_{02} \exp(-p\tau_{02})}{T_{02}p + 1},$$

де  $K_{02}$ ,  $\tau_{02}$ ,  $T_{02}$  – коефіцієнт передачі, час запізнення і стала часу об'єкта.

За потреби  $W_{ок}(p)$  можна апроксимувати іншим виразом.

Передатна функція з урахуванням ЕНП<sub>2</sub>:

$$W_K(p) = \frac{Y(p)}{X^0(p)} = \frac{\exp(-p\tau_{01}) K_{02} \exp(-p\tau_{02}) (1 - \exp(-p\tau_{02}))}{T_{31}p + 1 \quad T_{02}p + 1 \quad p},$$

або, у Z-формі,  $W_K(z) = \frac{K_{02}(\alpha + \beta z^{-1})z^{-(k'+1)}}{(1 - a_{p1}z^{-1})(1 - a_{p2}z^{-1})}$ , де  $a_{p1} = \exp(-T_2/T_{31})$ ;  $a_{p2} = \exp(-T_2/T_{02})$ ;

$\alpha = 1 - (a_{p1}T_{31} - a_{p2}T_{02})/(T_{31} - T_{02})$ ;  $\beta = a_{p1}a_{p2} - (a_{p2}T_{31} - a_{p1}T_{02})/(T_{31} - T_{02})$ ,  $K_1 = \text{int}[(\tau_{01} + \tau_{02})/T_2]$ .

При цьому період дискретизації для зовнішнього контуру  $T_2 = 0,1T_{02}$ .

Задаємося бажаним перехідним процесом у замкнутій системі:

$$\Phi_2(p) = \frac{Y(p)}{Y^0(p)} = \frac{\exp[-p(\tau_{01} + \tau_{02})]}{T_{32}p + 1},$$

де  $T_{32}$  – стала часу замкненої системи, або, у  $Z$ -формі  $\Phi_2(z) = \frac{Y(z)}{Y^0(z)} = \frac{1-a_{31}}{1-a_{31}z^{-1}} z^{-(k+1)}$ ,  $a_{31} = \exp(-T_2/T_{31})$ .

ПФ коригувального регулятора в зовнішньому контурі:

$$D_2(z) = \frac{X^0(z)}{\Delta Y(z)} = \frac{\Phi_2(z)}{1-\Phi_2(z)} [W_k(z)]^{-1}, \text{ або } D_2(z) = \frac{(1-a_{31})(1-a_{p1}z^{-1})(1-a_{p2}z^{-1})}{K_{02}(\alpha+\beta z^{-1})[1-a_{31}z^{-1}-(1-a_{31})z^{-(k+1)}]}$$

Цей регулятор забезпечує аперіодичний перехідний процес в замкнутій системі, однак з урахуванням значень коефіцієнтів слід перевірити полюси знаменника.

Можна припустити, що в одержаному виразі присутні корені  $z_i = -1$ , що є небажаними для виконавчого механізму. Множник  $\alpha + \beta z^{-1}$  дає полюс  $z = -\beta/\alpha$ . Інший спільний множник:

$$1 - a_{31}z^{-1} - (1 - a_{31})z^{-(k+1)} = (1 - z^{-1})[1 + (1 - a_{31})z^{-1} + (1 - a_{31})z^{-2} + \dots + (1 - a_{31})z^{-k}].$$

Спільний множник  $1 - z^{-1}$  залишимо без змін, а, щоб гарантувати усунення небажаних коренів, підставимо замість  $Z$  одиницю:

$$D_2(z) = \frac{X^0(z)}{\Delta Y(z)} = \frac{(1 - a_{p1}z^{-1})(1 - a_{p2}z^{-1})}{1 - z^{-1}}.$$

Виконавши обернене  $Z$ -перетворення, визначимо програмуючу функцію для цифрового регулятора зовнішнього контуру:

$$X^0[nT_2] = X_0[(n-1)T_2] + A_1Y[nT_2] + A_2Y[(n-1)T_2] + A_3Y[(n-2)T_2],$$

$$\text{де } A_1 = \frac{1 - a_{31}}{(\alpha + \beta)[1 - K'(1 - a_{31})]}; \quad A_2 = A_1(a_{p1} + a_{p2}); \quad A_3 = A_1 a_{p1} a_{p2}.$$

Для запропонованого прямого розрахунку програмуючих функцій достатньо знати параметри об'єкта управління.

Слід зазначити, що значення  $T_1$  і  $T_2$  є наближеними. Щоб уточнити  $T_2$ , можна застосувати теорему А. Котельникова. Для цього необхідно визначити модуль амплітудно-частотної характеристики за каналом завдання – вихід:  $|\Phi_2(i\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(T_{32}\omega)^2 + 1}}$ . Беручи достатньо мале  $|\Phi_2(i\omega)| = 0,01 \dots 0,03 = \varepsilon$ , за одини-

$$\text{чної вхідної дії } \frac{1}{\sqrt{(T_{32}\omega)^2 + 1}} = \varepsilon. \text{ За частоти зрізу } \omega_{32}: \omega_{32} = \frac{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}{\Delta T_{32}}, \text{ звідки } T_2 = \frac{\pi}{\omega_{32}}.$$

Наведений алгоритм легко реалізувати, одержані функції не важко коригувати під час експлуатації обладнання.

#### Висновки

Розроблено методику розрахунку програмуючої функції для реалізації дискретної системи керування випарюванням у протитечійній багатокорпусній випарній установці.

Методику можна розглядати як типову.

*The design procedure of programming the functions in the implementation of a discrete process control system of evaporation in the multicase counter streams installation, targeted for implementation by means of microprocessor technology.*

**Keywords:** discrete process control system, the multicase counter streams installation of evaporation.

Надійшла до редакції 12.03.2012