

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ І САМОСТІЙНИХ РОБІТ
З ДИСЦИПЛІНИ "ТЕОРІЯ АДАПТИВНИХ І ОПТИМАЛЬНИХ СИСТЕМ"
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ДЕННОЇ І ЗАОЧНОЇ ФОРМ НАВЧАННЯ
СПЕЦІАЛЬНОСТІ 151 – «АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-
ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ»

Затверджено на засіданні
кафедри комп'ютерно-
інтегрованих технологій та
метрології
Протокол № 3 від 13.10.2017

Методичні вказівки до виконання практичних і самостійних робіт з дисципліни "Теорія адаптивних і оптимальних систем" для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Укл.: В.Я. Тришкін, А.Р. Шейкус. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2018. – 35 с.

Укладачі: В.Я. Тришкін, канд. техн. наук
А.Р. Шейкус

Відповідальний за випуск Ю.К. Тараненко, д-р. техн. наук

Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання практичних і самостійних робіт з дисципліни "Теорія адаптивних і оптимальних систем" для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Укладачі: ТРИШКІН Владислав Якович
ШЕЙКУС Антон Романович

Технічний редактор Л.Я. Гоцуцова
Комп'ютерна верстка Л.Я. Гоцуцова

Підписано до друку 25.04.18. Формат 60×84/16. Папір ксерокс. Друк різнограф. Умов. друк. арк. 1,51. Облік.-вид. арк. 1,54. Тираж 100 прим. Зам. № 522. Свідоцтво ДК № 5026 від 16.12.2015.

ДВНЗ УДХТУ, 49005, м. Дніпро-5, просп. Гагаріна, 8.

Редакційно-видавничий відділ

ЗМІСТ

Практична робота № 1 Цифрове імітаційне моделювання роботи автоматичних систем керування	4
Практична робота № 2 Розрахунок оптимальних параметрів налаштування ПІ-регуляторів при обмеженні на кореневий показник коливальної. Оптимізація АСР	8
Практична робота № 3 Адаптація в системах управління за перехідною характеристикою. Розрахунок параметрів налаштувальної моделі	13
Практична робота № 4 Адаптація в системах управління за перехідною характеристикою. Розрахунок оптимальних параметрів налаштування регулятора	18
Практична робота № 5 Моделювання і статична оптимізація процесу ректифікації з використанням неперервних рухливих керуючих дій	21
Список літератури	35

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

Цифрове імітаційне моделювання роботи автоматичних систем керування

Оптимізація автоматичних систем регулювання полягає в пошуку оптимальних параметрів налаштувань регуляторів. Метою завдання оптимізації є підбір таких значень параметрів регулятора, при яких для конкретного об'єкта регулювання при заданому запасі стійкості відхилення регульованої величини від заданого значення були б мінімальними.

Для налаштування лінійних регуляторів існує велике число аналітичних методів, які не вимагають прямого обчислення критерію якості. Він враховується в прийнятих формулах або алгоритмах обчислень. Проте, достовірність результатів аналітичних обчислень може бути перевірена тільки прямим розрахунком перехідного процесу.

Нині широко впроваджуються чисельні методи налаштування, що передбачають пряме обчислення перехідних процесів і критеріїв якості для заданих параметрів регуляторів. Такий прийом дослідження динамічних систем дістав назву імітаційного моделювання. Метод імітаційного моделювання привабливий тим, що в його результатах міститься інформація про роботу усіх елементів системи регулювання.

Особливості методу імітаційного моделювання полягають у наступному. По-перше, при імітаційному моделюванні можна використати комплексні критерії якості регулювання, тобто, можна ставити завдання мінімізації одного з інтегральних критеріїв якості разом з іншими, аналітично не формалізованими показниками, наприклад, з мінімізацією числа включень виконавчого механізму в релейно-імпульсному регуляторі. По-друге, цим методом можна налаштовувати регулятори на декілька збурень, які вносяться в різні точки АСР. Таке налаштування буде компромісним, і регулятор з мінімальними втратами якості буде здатний компенсувати будь-яке з цих збурень.

Ідея побудови таких моделей полягає в заміні диференціальних рівнянь на різницеві, причому вибір структури різницевого рівняння робиться так, щоб при прагненні інтервалу квантування в різницевому рівнянні до нуля воно прагнуло до початкового диференціального рівняння. Для цього досить замінити функції безперервного часу функціями дискретного часу, співпадаючими з початковими безперервними функціями в дискретні моменти часу. Як приклад розглянемо аперіодичну ланку першого порядку з диференціальним рівнянням:

$$T \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k \cdot x(t).$$

Замінімо диференціали в цьому рівнянні на різниці:

$$T \cdot \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta t} + y_i = k \cdot x_i$$

і перепишемо отримане різницеве рівняння у вигляді рекурентної формули:

$$y_{i+1} = \frac{k \cdot \Delta t}{T} \cdot x_i + \left(1 - \frac{\Delta t}{T}\right) \cdot y_i.$$

Задавши початкове значення y_0 , можна потім, послідовно задаючи $i = 0, 1, 2, 3, \dots$, обчислювати необхідне число значень виходу.

Дуже просто моделюється транспортне запізнення: для цього необхідно змістити вихідну величину на ціле число інтервалів дискретності, укладених на інтервалі запізнення.

Швидкодія сучасних комп'ютерів і об'єм їх пам'яті роблять розрахунки за такими моделями цілком доступними для вирішення будь-яких як лінійних, так і нелінійних систем рівнянь, які можуть виникнути в практиці дослідження САР.

Приклад

Розглянемо систему управління, яка зображена на рис. 1.

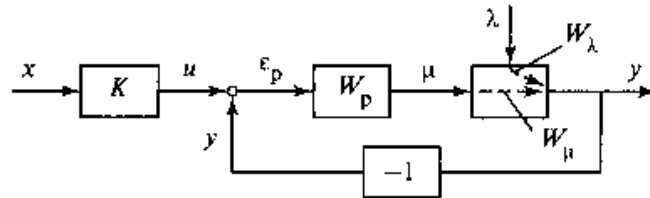


Рис. 1 – Структурна схема модельованої системи управління

Об'єкт складається з трьох послідовно включених аперіодичних ланок і ланки запізнення. Його передатна функція:

$$W_{mod}(s) = \frac{0,45}{(1,9 \cdot s + 1)^3} \cdot e^{-0,52 \cdot s}.$$

На вхід першої ланки, окрім збурення, подається з негативним знаком регулююча дія μ . Вхідною дією для другої ланки є вихідна величина першої, вхідною дією третьої ланки є вихідна величина другої. Вихідна величина третьої ланки об'єкта подається на модель ПД-регулятора, що складається з паралельно включених статичної, інтегруючої і диференціюючої ланок.

Програма цифрової моделі для одиничного ступінчастого збурення, прикладеного до об'єкта з боку регулюючого органу, наведена на рис. 2.

Дискретна структурна модель системи з ПІД-регулятором

Введення параметрів об'єкта і регулятора:

$$k_{\mu} := .45 \quad T_{\mu} := 1.9 \quad \tau_{\mu} := .52 \quad k_p := 1.843 \quad T_i := 3.024 \quad T_d := 0 \quad \text{ORIGIN} := -1$$

Введення діапазону часу, числа точок: $t_{\text{end}} := 50 \quad n := 2500$

Розрахунок інтервалу дискретності і дискретного запізнення: $\Delta t := \frac{t_{\text{end}}}{n} \quad d := \text{floor}\left(\frac{\tau_{\mu}}{\Delta t}\right)$

Початкові умови: $y1_d := 0 \quad y2_0 := 0 \quad y_0 := 0 \quad \mu_0 := 0 \quad \mu_i_0 := 0 \quad \mu d_0 := 0 \quad \mu p_0 := 0 \quad y_{-1} := 0$

$$a := \frac{\Delta t}{T_{\mu}} \quad b := 1 - \frac{\Delta t}{T_{\mu}} \quad i := 0..n \quad t_i := i \cdot \Delta t$$

$$\begin{pmatrix} y1_{i+1+d} \\ y2_{i+1} \\ y_{i+1} \\ \mu_{i+1} \\ \mu d_{i+1} \\ \mu p_{i+1} \\ \mu_{i+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \cdot k_{\mu} \cdot (1 - \mu_i) + b \cdot y1_{i+d} \\ a \cdot y1_i + b \cdot y2_i \\ a \cdot y2_i + b \cdot y_i \\ k_p \cdot \frac{\Delta t}{T_i} \cdot y_i + \mu_i \\ \frac{k_p \cdot T_d}{\Delta t} \cdot (y_i - y_{i-1}) \\ k_p \cdot y_i \\ \mu p_i + \mu_i + \mu d_i \end{pmatrix}$$

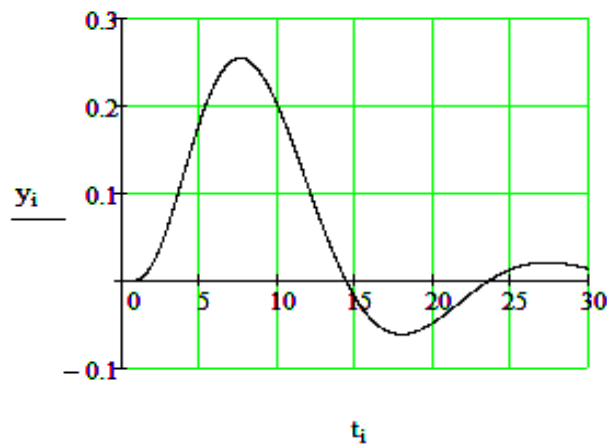


Рис. 2 – MathCAD-документ

Хід роботи:

1. Отримати різницеві рівняння елементарних ланок першого і другого порядків.

2. Скласти цифрову модель системи управління та отримати графік перехідного процесу. Структурну схему модельованої АСР вибрати згідно з варіантом.

3. Скласти програму для ступінчатого збурення, яке прикладене до об'єкта з боку завдання.

Завдання:

1) Дві А-ланки і одна І-ланка, з'єднані послідовно

	Варіант				
	1	2	3	4	5
k_0	3,5	2	1,5	3	4
T_{ao}, c	3,5	10	5	2	8
T_{io}, c	2	1,2	0,25	1,25	2,5
τ, c	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7

2) А-ланка, І-ланка, Д-ланка, з'єднані послідовно

	Варіант				
	6	7	8	9	10
k_0	2	1,5	3	4	3,5
T_{ao}, c	2	8	3,5	10	5
T_{io}, c	0,25	1,25	2,5	2	1,2
T_{do}, c	1,1	1,5	0,5	2	0,1
τ, c	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3

3) Дві А-ланки, з'єднані паралельно, і А-ланка – послідовно до них

	Варіант				
	11	12	13	14	15
k_0	2,5	2	0,5	4	5
T_{ao}, c	10	5	2	8	3,5
τ, c	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7

4) Чотири А-ланки, з'єднані послідовно

	Варіант				
	16	17	18	19	20
k_0	3,5	2	1,5	1,75	2,25
T_{ao}, c	5	2	15	3	10
τ, c	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3

5) А-ланка, І-ланка, з'єднані паралельно, і А-ланка – послідовно до них

	Варіант				
	21	22	23	24	25
k_0	4,5	3	2,5	4	5
T_{ao}, c	4,5	12	7	4	10
T_{io}, c	10	5,25	2,5	6	4,5
τ, c	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2

Розрахунок оптимальних параметрів налаштування ПІ-регуляторів при обмеженні на кореневий показник коливальної. Оптимізація АСР

Під налаштуванням системи регулювання розуміється перелік розрахункових і експериментальних робіт, спрямованих на пошук налаштувальних параметрів регулятора, що забезпечують задану якість регулювання, організацію і проведення натурних випробувань на діючому виробництві або розрахункових експериментів для підтвердження оптимальності вибраних параметрів. Доказом оптимальності повинні слугувати результати роботи регулятора для декількох значень налаштувальних параметрів, серед яких існують оптимальні.

До результатів налаштування можуть бути пред'явлені наступні вимоги, які можна віднести до категорії достатніх:

1) забезпечення працездатності системи регулювання (можливість включення регулятора);

2) забезпечення роботи регулятора при заданому запасі стійкості (гарантія стійкої роботи);

3) забезпечення оптимальних параметрів, що гарантують мінімум вибраного критерію якості. Наведений перелік достатніх вимог є списком етапів виконання налагоджувальних робіт, які необхідно виконати для досягнення максимальної якості роботи системи регулювання.

2.1 Кореневий показник запасу стійкості

Реально працюючі системи управління мають бути не лише стійкими, але і мати певний запас стійкості, тобто, перехідні процеси, що виникають у них, повинні не просто затухати, а затухати досить інтенсивно. Інтенсивність загасання коливальної компоненти чисельно може бути оцінена зменшенням кожної чергової амплітуди коливань A_{i+1} у порівнянні з попередньою A_i , які спрямовані в один бік (рис. 3).

Отриманий таким чином показник названий ступенем загасання коливання ϕ :

$$\phi = \frac{A_i - A_{i+1}}{A_i}.$$

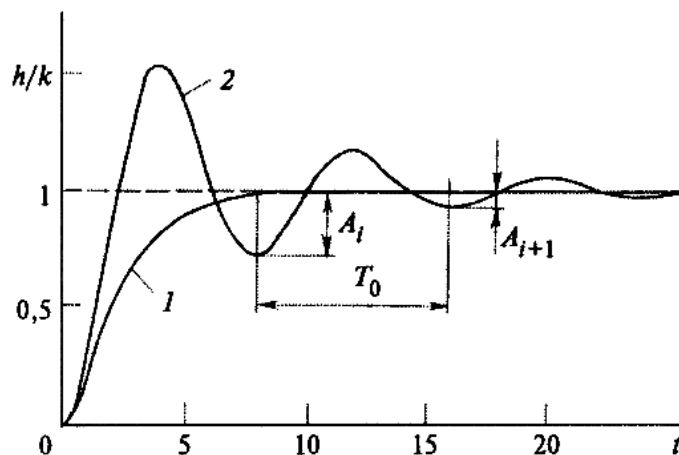


Рис. 3 – Графік перехідного процесу

Ступінь загасання пов'язана з відповідною парою комплексних коренів характеристичного рівняння співвідношенням:

$$\phi = 1 - e^{-\alpha \cdot T} = 1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot m},$$

де $m = \frac{\alpha}{\omega}$ — коефіцієнт, названий кореневим показником коливальності.

Він дорівнює відношенню позитивного значення дійсної частини коренів α до їх уявної частини ω .

Для того, щоб у складі компонент перехідного процесу довільної системи була компонента, що має задане значення кореневого показника коливальності, слід у характеристичне рівняння системи підставити

$$s = -m \cdot \omega + j \cdot \omega.$$

2.2 Розрахунок межі області допустимого запасу стійкості в просторі параметрів налаштування ПІ-регулятора

Передатна функція системи регулювання, структурна схема якої надана на рис. 1, по каналу «командна дія – регульована величина» має вигляд:

$$\Phi_{yu}(s) = \frac{W_{p.c.}(s)}{1 + W_{p.c.}(s)}.$$

Характеристичне рівняння системи регулювання з негативним зворотним зв'язком виходить шляхом прирівнювання знаменника її передатної функції до нуля:

$$1 + W_{p.c.}(s) = 0.$$

З отриманого рівняння можливо визначити співвідношення між параметрами системи, при яких виконуватиметься вказана вимога на запас стійкості:

$$W_{p.c.}(-m\omega + j\omega) = -1.$$

Враховуючи передатну функцію ПІ-регулятора, умову межі необхідного запасу стійкості для системи з таким регулятором конкретизуємо таким чином:

$$W_{\mu}(m, j\omega) \cdot k_n \cdot \left(1 + \frac{1}{T_u(-m\omega + j\omega)} \right) = -1,$$

або, позначивши $k_u = \frac{k_n}{T_u}$

$$k_n + k_u \frac{1}{-m\omega + j\omega} = -\frac{1}{W_{\mu}(-m, j\omega)}.$$

Це комплексне рівняння можливо надати у вигляді двох звичайних рівнянь для дійсної та уявної частин:

$$\begin{cases} k_n + k_u \cdot \operatorname{Re}\left(\frac{1}{-m\omega + j\omega}\right) = -\operatorname{Re}\left(\frac{1}{W_\mu(m, j\omega)}\right); \\ k_u \cdot \operatorname{Im}\left(\frac{1}{-m\omega + j\omega}\right) = -\operatorname{Im}\left(\frac{1}{W_\mu(m, j\omega)}\right). \end{cases}$$

Друге рівняння дозволяє записати залежність коефіцієнта при інтегральній складовій від частоти:

$$k_u(\omega) = -\frac{\operatorname{Im}\left(\frac{1}{W_\mu(m, j\omega)}\right)}{\operatorname{Im}\left(\frac{1}{-m\omega + j\omega}\right)}.$$

Задавшись деяким значенням частоти, можна за цією формулою визначити $k_n(\omega)$, після чого з першої формули знаходиться значення коефіцієнта передачі регулятора

$$k_n(\omega) = -k_u(\omega) \cdot \operatorname{Re}\left(\frac{1}{-m\omega + j\omega}\right) - \operatorname{Re}\left(\frac{1}{W_\mu(m, j\omega)}\right),$$

а з формули $T_u(\omega) = \frac{k_n(\omega)}{k_u(\omega)}$ – значення постійної інтеграції. Зробивши подібні розрахунки для досить великого числа частот, можна в площині параметрів налаштування регулятора побудувати межу області допустимого запасу стійкості.

2.3 Розрахунок оптимальних налаштувань ПІ-регулятора

Наступним етапом оптимізації АСР є визначення на межі області допустимого запасу стійкості точки, в якій мінімізується вибраний критерій оптимальності. Як критерії якості роботи АСР можливо використати наступні показники:

- величину максимального відхилення регульованої величини;
- величину залишкового відхилення усталеної регульованої величини;
- значення часу процесу регулювання, впродовж якого відхилення регульованої величини від значення, що встановилося, досягає деякої наперед заданої величини і надалі її не перевищує.

Окрім перерахованих показників якості роботи регуляторів, широке поширення отримали непрямі інтегральні показники якості. Оцінка якості в цьому випадку здійснюється за площею під графіками перехідних процесів при поданні по каналу регулюючого органу ступінчастої вхідної дії. Ці оцінки називаються інтегральними критеріями якості роботи АСР.

Найбільш простим з них є лінійний інтегральний критерій:

$$I_{\text{лин}} = \int_0^{\infty} y(t) dt.$$

Проте лінійний інтегральний критерій має істотний недолік. Він спотворює показник при негативних відхиленнях регульованої величини від заданого значення, і може застосовуватись лише для слабо коливальних процесів.

Вказаного недоліку позбавлений квадратичний інтегральний критерій:

$$I_{\text{кв}} = \int_0^{\infty} y^2(t) dt.$$

Значення інтегралів можуть бути визначені аналітично. Для систем з І-регулятором лінійний інтегральний критерій складає:

$$I_{\text{лин}} = \frac{k_{\lambda}}{k_{\mu} \cdot k_u};$$

для систем з ПІ- і ПІД-регуляторами:

$$I_{\text{лин}} = \frac{k_{\lambda} \cdot T_u}{k_{\mu} \cdot k_n}.$$

З цього виходить, що для мінімізації лінійного інтегрального показника точності слід прагнути до як можна більшого значення коефіцієнта передачі І-регулятора або до як можна більшого відношення k_n/T_n для ПІ- і ПІД-регуляторів.

Існує одна важлива позитивна властивість лінійного інтегрального показника – інваріантність відносно вибору збурень, по каналах дії яких він мінімізується. Виконання умов гарантує мінімізацію показника відносно кожного діючого на об'єкт збурення як контрольованого, так і неконтрольованого. Звертає на себе увагу також виняткова простота розрахунків.

Приклад

На рис. 4 надано розрахунок оптимуму налаштування ПІ-регулятора в системі з об'єктом з практичного завдання 1 за лінійним інтегральним критерієм при обмеженні на запас стійкості за кореневим показником коливальності $m = 0,366$.

Розрахунок налаштувань ПІ-регулятора за лінійним інтегральним критерієм

Введення параметрів об'єкта і кореневого показника $k_{\mu} := .45$ $T_{\mu} := 1.9$ $\tau_{\mu} := .52$

$$m := .366$$

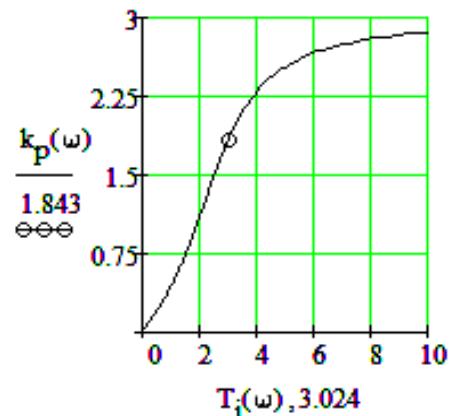
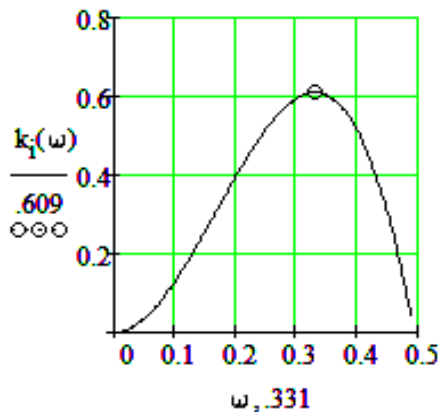
Розширена КЧХ об'єкта: $s_{\mu}(w) := -m \cdot w + w \cdot j$ $W_{\mu}(w) := \frac{k_{\mu} \cdot e^{-T_{\mu} \cdot s(w)}}{(T_{\mu} \cdot s(w) + 1)^3}$

Введення діапазону частот і числа точок:

$$w_{end} := .49 \quad n := 200$$

$$\Delta w := \frac{w_{end}}{n} \quad w := \Delta w, 2 \cdot \Delta w, \dots, w_{end}$$

$$k_p(w) := \operatorname{Re}\left(\frac{-1}{W_{\mu}(w)}\right) - \operatorname{Re}\left(\frac{k_i(w)}{s(w)}\right) \quad T_i(w) := \frac{k_p(w)}{k_i(w)} \quad k_i(w) := \frac{-\left(\operatorname{Im}\left(\frac{1}{W_{\mu}(w)}\right)\right)}{\operatorname{Im}\left(\frac{1}{s(w)}\right)}$$



Налаштування за лінійним критерієм:

$$w := .35 \quad \text{Given } w > .3 \quad w < .4$$

$$w_{max} := \operatorname{Maximize}(k_i, w) \quad w_{max} = 0.331 \quad k_i(w_{max}) = 0.609$$

$$k_p(w_{max}) = 1.843 \quad T_i(w_{max}) = 3.024$$

Рис. 4 – MathCAD-документ

Хід роботи

1. Згідно з варіантом для об'єкта з практичного заняття 1 визначити оптимальні налаштування ПІ-регулятора.

2. Виконати побудову графіків перехідних процесів і розрахувати прямі показники якості управління.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3

Адаптація в системах управління за перехідною характеристикою. Розрахунок параметрів налаштувальної моделі

Через низку обставин результат синтезу САУ недетермінованими об'єктами на стадії проектування рідко задовольняє практику, тому що чисельні значення параметрів контролерів виявляються далекими від дійсно оптимальних їх значень. Він швидше потрібний для попередньої перевірки працездатності пропонованих структур систем і алгоритмів, а також порівняння альтернативних варіантів. Завершальний етап синтезу доводиться переносити на стадію введення системи в дію на реальний об'єкт; виконувани на цьому етапі дії носять назву адаптації. Часто модель об'єкта перед проектуванням САУ взагалі не вдається отримати і в цьому випадку адаптація є єдиним шляхом рішення задачі побудови системи управління.

У цьому випадку налаштування повинне виконуватися відповідно до схеми, наданої на рис. 5.

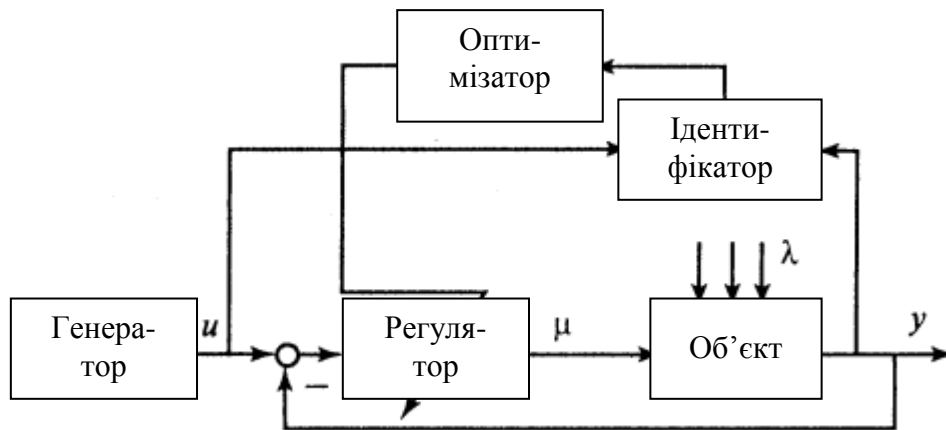


Рис. 5 – Структурна схема адаптивної системи управління

Вона складається з ідентифікатора, що оцінює модель об'єкта, і оптимізатора, в якому робиться розрахунок налаштування регулятора на черговому кроці руху до оптимуму і відповідна його установка в регуляторі. Під час процедури адаптації на вхід регулятора від генератора подається дія у вигляді ступінчастої функції часу і реєструється зміна регульованої величини. Робота системи відбувається наступним чином.

При довільному налаштуванні (але, звичайно, такому, що забезпечує стійку роботу системи регулювання) регулятор включається в роботу, після чого на його вхід подається ступінчаста зовнішня ідентифікуюча дія. Реакція на цю дію (зміна за часом регульованої величини) з точністю до амплітуди вхідної дії буде відповідною перехідною характеристикою замкнутої системи. З неї при відомому алгоритмі функціонування регулятора може бути отримана передатна функція або КЧХ об'єкта. Маючи ж у розпорядженні таку математичну модель об'єкта, можна звичайним порядком зробити розрахунок оптимальних параметрів налаштування регулятора.

Слід зазначити, що оцінка перехідної характеристики замкнутого контуру в реальних умовах роботи систем регулювання зазвичай має відносно нестабільний характер, тобто, якщо експеримент повторювати кілька разів, то виходитимуть результати, що досить сильно різняться. Проте, якщо характеристика має коливальний характер, то за нею досить надійно оцінюється ступінь загасання коливань і їх період. У зв'язку з цим нижче буде розглянутий варіант адаптації, при якому динаміка контуру оцінюватиметься саме цими параметрами перехідної характеристики. Аналогічний підхід використовується у багатьох адаптивних мікроконтролерах різних фірм.

За експериментальною характеристикою визначається період коливань і значення двох послідовно спрямованих в один бік амплітуд. Це дозволяє визначити період і ступінь загасання коливань. Якщо припустити, що отриманий коливальний процес формується в основному парою найближчих до уявної осі зв'язано-комплексних домінуючих коренів характеристичного рівняння системи, то може бути знайдене значення кореневого показника коливальності. Відповідно умова існування отриманого процесу визначається рівнянням:

$$W_{mod}(-m\omega + j\omega) \cdot W_{рег}(-m\omega + j\omega) = -1.$$

Структурою передатної функції моделі об'єкта необхідно задатися; аналогічно надамо і передатну функцію ПІ-регулятора:

$$\begin{cases} W_{mod}(s) = k_{mod} \cdot V(s) \cdot \exp(-\tau \cdot s); \\ W_p(s) = k_n \cdot R(s). \end{cases}$$

Тоді отримуємо

$$k_{mod} \cdot k_n \cdot V(-m\omega + j\omega) \cdot R(-m\omega + j\omega) \cdot e^{m\omega\tau} \cdot e^{-j\omega\tau} = -1.$$

що можливо надати у вигляді двох рівнянь для аргументів і модулів:

$$\begin{cases} \arg[V(-m\omega + j\omega)] - \tau\omega + \arg[R(-m\omega + j\omega)] + \pi = 0; \\ k_{mod} \cdot k_n \cdot |V(-m\omega + j\omega)| \cdot |R(-m\omega + j\omega)| \cdot e^{m\omega\tau} - 1 = 0. \end{cases}$$

Перше рівняння не залежить від коефіцієнтів передачі. Таким чином, за отриманими з експерименту значеннями m і ω шляхом рішення першого рівняння знаходиться запізнення τ , після чого друга формула дозволяє визначити значення коефіцієнта передачі моделі k_{mod} .

Модель об'єкта, параметри якої знаходяться з наведених рівнянь, носить назву налаштувальної, оскільки з її допомогою робиться оперативне налаштування регулятора. Очевидно, що чисельні значення параметрів налаштувальної моделі можуть мінятися в процесі руху до оптимуму налаштування регулятора; вони перестають мінятися і встановлюються на деякому стабільному значенні після закінчення цієї процедури.

При налаштуванні систем, об'єкти яких або взагалі позбавлені самовирівнювання, або воно виражене відносно слабо, прийнятною налаштувальною моделлю, яка має два коефіцієнти, є інтегруюча ланка із запізненням. Передатна функція такої моделі:

$$W_{\text{мод}}(s) = \frac{k_{\text{мод}}}{s} \cdot e^{-\tau s}.$$

У цьому випадку:

$$V(s) = \frac{1}{s};$$

$$|V(-m\omega + j\omega)| = \frac{1}{\omega \cdot \sqrt{1+m^2}};$$

$$\arg[V(-m\omega + j\omega)] = \text{arctg}\left(\frac{1}{m}\right) - \pi;$$

$$R(s) = 1 + \frac{1}{T_u \cdot s}.$$

$$|R(-m\omega + j\omega)| = \frac{1}{T_u \cdot \omega \cdot (1+m^2)} \cdot \sqrt{1 + [T_u \cdot \omega \cdot (1+m^2) - m]^2};$$

$$\arg[R(-m\omega + j\omega)] = \text{arctg}\left(\frac{-1}{T_u \cdot \omega \cdot (1+m^2) - m}\right);$$

Остаточні вирази для розрахунків параметрів налаштувальної моделі:

$$\begin{cases} \tau = \frac{1}{\omega} \cdot \left(\text{arctg} \frac{1}{m} + \arg[R(-m\omega + j\omega)] \right); \\ k_{\text{мод}} = \frac{\omega}{|R(-m\omega + j\omega)|} \cdot \sqrt{1+m^2} \cdot e^{-m\omega\tau}. \end{cases}$$

Знання коефіцієнтів налаштувальної моделі об'єкта дозволяє за допомогою методу, який розглянутий у практичному занятті 2, знайти оптимальні параметри налаштування регулятора. Потім вони встановлюються в регуляторі, і робиться повторний експеримент за оцінкою перехідної характеристики

системи і визначенням з неї нових значень ступеня загасання і періоду коливань. Це дозволяє уточнити оптимальні параметри налаштування регулятора, зробити відповідну їх зміну в регуляторі і знову повернутися до оцінки параметрів перехідної характеристики. Таким чином, утворюється ітераційна багатокрокова процедура руху до оптимуму налаштування, який очевидно буде досягнутий тоді, коли черговий результат розрахунку оптимального налаштування мало відрізнятиметься від попереднього.

Така процедура адаптації, що містить ідентифікацію об'єкта управління з використанням налаштовувальної моделі і розрахунок оптимальних налаштувань регулятора, носить назву процедури ідентифікації-оптимізації. Розглянемо процедуру ідентифікації об'єкта.

Приклад

Розглянемо процедуру адаптації ПІ-регулятора, причому невідома для системи адаптації передатна функція об'єкта визначається формулою з практичного заняття 1. Вимагатимемо, щоб при оптимальному налаштуванні ступінь загасання перехідної характеристики дорівнював 0,9.

Виберемо початкове значення постійної інтегрування регулятора досить великим, наприклад, рівним 10 хв; а коефіцієнт передачі досить малим (можна, взагалі, розпочати з нульового його значення), включимо регулятор у роботу і поступовим збільшенням його коефіцієнта передачі досягнемо, щоб перехідна характеристика контуру стала коливальною. Так, якщо зупинитися на значенні цього коефіцієнта, рівному 7, отримаємо графік, який наданий на рис. 6. З цього графіка впливають значення ступеня загасання 0,228 і періоду коливання 10,36 хв. Оскільки ступінь загасання не відповідає потрібному, почнемо процедуру адаптації.

На рис. 6 надано вирішення задачі знаходження параметрів налаштовувальної моделі – запізнення і коефіцієнта передачі.

Хід роботи

1. Скласти програму для розрахунку параметрів налаштовувальної моделі, що складається з І-ланки із запізненням. Об'єкт визначається передатною функцією з практичного заняття 1 згідно з варіантом.

Побудова перехідної характеристики контуру при початковому налаштуванні регулятора, розрахунок параметрів настроюючої моделі

Параметри об'єкту: $k_{\mu} := .45$ $T_{\mu} := 1.9$ $\tau := .52$

Діапазон часу, кількість точок: $t_{\text{end}} := 30$ $n := 3000$

Інтервал дискретності: $\Delta t := \frac{t_{\text{end}}}{n}$ Запізнення: $\tau_d := \text{floor}\left(\frac{\tau}{\Delta t}\right)$ $a := \frac{\Delta t}{T_{\mu}}$ $b := 1 - a$

Початкові умови: $y1_{\tau_d} := 0$ $y2_0 := 0$ $y_0 := 0$ $u_0 := 0$ $ui_0 := 0$ $up_0 := 0$
 $i := 0..n$ $t_i := i \cdot \Delta t$

Параметри регулятора: $k_p := 7$ $T_i := 10$

$$\begin{pmatrix} y1_{i+1+\tau_d} \\ y2_{i+1} \\ y_{i+1} \\ ui_{i+1} \\ up_{i+1} \\ u_{i+1} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a \cdot k_{\mu} \cdot (1 - u_i) + b \cdot y1_{i+\tau_d} \\ a \cdot y1_i + b \cdot y2_i \\ a \cdot y2_i + b \cdot y_i \\ k_p \cdot \frac{\Delta t}{T_i} \cdot y_i + ui_i \\ k_p \cdot y_i \\ up_i + ui_i \end{bmatrix}$$

Оцінка параметрів коливань:

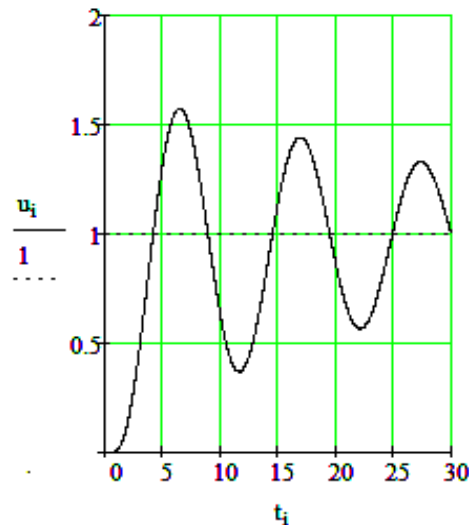
$$t_1 := 6.55 \quad A_1 := .589$$

$$t_2 := 16.91 \quad A_2 := .455$$

$$\frac{T}{\omega_{\omega}} := t_2 - t_1 \quad T = 10.36$$

$$\psi := 1 - \frac{A_2}{A_1} \quad \psi = 0.228$$

$$\frac{T}{T_i} = 1.036$$



Розрахунок запізнювання і коефіцієнта передачі:

$$\omega := \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad m := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{1}{1 - \psi}\right) \quad \omega_{\omega} := 0.606$$

$$s_{\omega} := -m \cdot \omega + j \cdot \omega \quad V := \frac{1}{s} \quad R := 1 + \frac{1}{T_i \cdot s}$$

$$\tau_{\text{mod}} := \frac{1}{\omega} \cdot (\arg(V) + \arg(R) + \pi) \quad \tau_{\text{mod}} = 2.253$$

$$k_{\text{mod}} := \frac{1}{|R| \cdot |V| \cdot k_p \cdot \exp(m \cdot \omega \cdot \tau_{\text{mod}})} \quad k_{\text{mod}} = 0.081$$

Рис. 6 – MathCAD-документ

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4

Адаптація в системах управління за перехідною характеристикою. Розрахунок оптимальних параметрів налаштування регулятора

Другим етапом процедури адаптації, що йде за ідентифікацією об'єкта і розрахунком параметрів налаштувальної моделі, є процедура оптимізації.

Розрахунок оптимальних параметрів регулятора в процесі адаптації можна істотно спростити, якщо перейти до безрозмірних параметрів налаштування. Так, передатна функція розімкненого контуру системи з ПІ-регулятором і моделлю об'єкта

$$W_{p.c.}(s) = \frac{k_{mod}}{s} \cdot e^{-\tau s} \cdot k_n \cdot \left(1 + \frac{1}{T_u s}\right)$$

може бути за допомогою переходу до безрозмірної змінної

$$S = \tau \omega$$

надана таким чином:

$$W(s) = K \cdot \left(1 + \frac{1}{IS}\right) \cdot \frac{1}{S} \cdot e^{-s},$$

де

$$K = k_n \cdot k_{mod} \cdot \tau;$$

$$I = \frac{T_u}{\tau}$$

Отже, завдання зводиться до визначення оптимальних безрозмірних параметрів ПІ-регулятора (в якому роль постійної інтегрування відіграє безрозмірний коефіцієнт I, а роль коефіцієнта передачі – коефіцієнт K) для об'єкта з безрозмірною передатною функцією

$$W_{mod}(s) = \frac{1}{S} \cdot e^{-s};$$

крім того, слід зафіксувати і безрозмірну домінуючу частоту при оптимумі налаштування:

$$\Omega_{дом} = \tau \omega_{дом}.$$

Таким чином, розрахунок оптимальних параметрів налаштування регулятора та очікуваної частоти власних коливань на наступному кроці процедури пошуку можна виконати за формулами

$$T_{i,opt} = I_{opt} \cdot \tau,$$

$$k_{n,opt} = \frac{K_{opt}}{k_{mod} \tau},$$

$$\omega_{dom} = \frac{\Omega_{dom}}{\tau}.$$

Приклад

Проведений розрахунок безрозмірних і реальних параметрів налаштування регулятора (рис. 7) для об'єкта і налаштувальної моделі з практичного заняття 3.

Далі моделюється робота системи управління і з отриманого графіка перехідного процесу, аналогічно рис. 6 і рис. 7, визначаються нові значення налаштувань моделі об'єкта і регулятора.

На рис. 8 наведений графік перехідного процесу при оптимальному налаштуванні ПІ-регулятора. Окрім цього, штрихами показані також перехідні характеристики системи регулювання при збуреннях, що діють на об'єкт з боку регулюючої дії (в цілях зручності їх розгляду ординати збільшені в 5 разів). Це дозволяє оцінити якість роботи системи регулювання з точки зору її основного завдання – подавлення збурень, що діють на об'єкт.

Хід роботи

1. Розрахувати оптимальні налаштування ПІ-регулятора. Об'єкт визначається передатною функцією з практичного заняття 1 згідно з варіантом. Налаштувальна модель складається з І-ланки із запізненням.

2. Порівняти графіки перехідних процесів оптимальної (практичне заняття 2) та адаптивної систем управління. Розрахувати показники якості системи адаптивного управління.

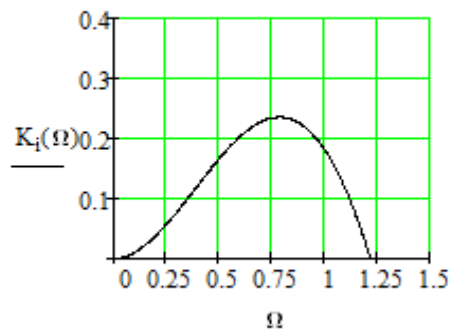
Розрахунок оптимальних налаштувань ПІ-регулятора для настроюючої моделі об'єкту у вигляді інтегруючої ланки із запізненням

Введення кореневого показника коливальності, безрозмірної передатної функції об'єкту:

$$m := .366 \quad S(\Omega) := -m \cdot \Omega + \Omega \cdot j \quad W(\Omega) := \frac{e^{-S(\Omega)}}{S(\Omega)}$$

Діапазон частот і число точок: $\Omega_{end} := 1.5 \quad n := 500 \quad \Delta\Omega := \frac{\Omega_{end}}{n}$
 $\Omega := \Delta\Omega, 2 \cdot \Delta\Omega, \dots, \Omega_{end}$

$$K_i(\Omega) := \frac{-\text{Im}\left(\frac{1}{W(\Omega)}\right)}{\text{Im}\left(\frac{1}{S(\Omega)}\right)}$$



Визначення максимуму $K_i(W)$:

$$\Omega := .8 \quad \text{Given} \quad \Omega > .5 \quad \Omega < 1$$

$$\Omega_{dom} := \text{Maximize}(K_i, \Omega)$$

$$\Omega_{dom} = 0.788 \quad K_i(\Omega_{dom}) = 0.235$$

Оптимальні безрозмірні параметри регулятора

$$K_{opt} := \text{Re}\left(\frac{-1}{W(\Omega_{dom})}\right) - \text{Re}\left(\frac{K_i(\Omega_{dom})}{S(\Omega_{dom})}\right) \quad K_{opt} = 0.668 \quad I_{opt} := \frac{K_{opt}}{K_i(\Omega_{dom})} \quad I_{opt} = 2.838$$

Оптимальні реальні параметри регулятора:

$$k_{mod} := 0.081 \quad \tau_{mod} := 2.251$$

$$k_{p,opt} := \frac{K_{opt}}{k_{mod} \cdot \tau_{mod}} \quad T_{i,opt} := I_{opt} \cdot \tau_{mod} \quad k_{p,opt} = 3.662 \quad T_{i,opt} = 6.389$$

Рис. 7 – MathCAD-документ

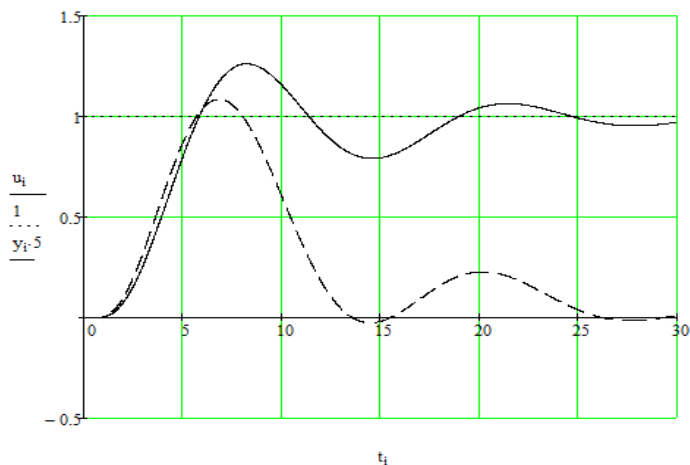


Рис. 8 – Графіки перехідних процесів

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5

Моделювання і статична оптимізація процесу ректифікації з використанням неперервних рухливих керуючих дій

5.1 Аналіз ректифікаційної колони як об'єкта керування

Масообмінні процеси, в яких суміші речовин поділяються за рахунок дифузії речовини, отримали широке застосування в хімічній, нафтовій, харчовій, фармацевтичній та інших галузях промисловості. Одним з таких процесів є ректифікація – процес поділу бінарних чи багатокомпонентних рідких однорідних сумішей на складові компоненти. Даний процес являє собою складну перегонку, яка супроводжується багаторазовою взаємодією пари, що підіймається, з рідиною, яка стікає їй назустріч, на контактних пристроях спеціального апарата, що носить назву ректифікаційної колони.

Сутність простої ректифікації (рис. 9) полягає в поділі потоку сировини F , що надходить у колону 1, склад якого \bar{x}_f і температура t_f , на два продукти. Дистиллят D , що відбирається зверху колони, містить переважно низькокиплячі фракції і компоненти \bar{x}_d . Кубовий залишок W , що відводиться знизу колони, багатий висококиплячими складовими сировини \bar{x}_w . Секція колони, яка розташована вище введення сировини, називається зміцнюючою; секція, що розташована нижче, – вичерпною.

Поділ у ректифікаційних колонах забезпечується багаторазовими випаровуваннями рідини і конденсаціями пари по висоті колони при протічній русі фаз. При цьому рідина збагачується важкокиплячими компонентами, а пара, що піднімається вгору, – легкокиплячими. Тому необхідною умовою ведення процесу є організація рідинного L і парового V потоків, за допомогою яких на кожному контактному пристрої ректифікаційної колони j відбувається процес масообміну за рахунок рушійних сил, викликаних прагненням досягнення термодинамічної і дифузійної рівноваги взаємодіючими фазами.

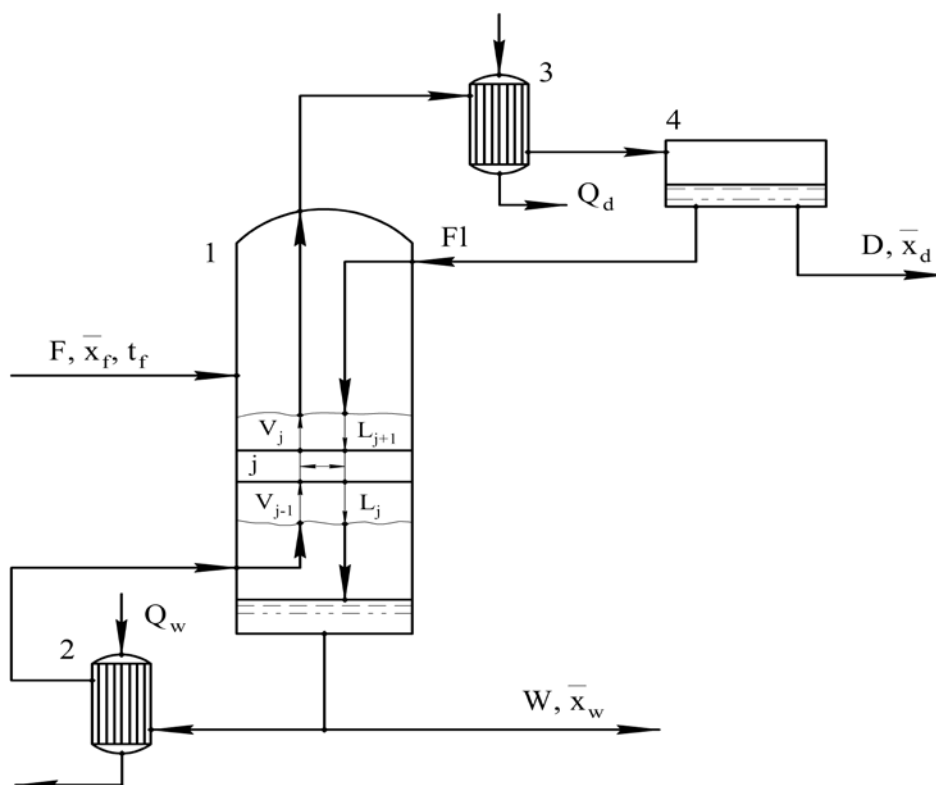


Рис. 9 – Процес простої ректифікації

Паровий потік, що піднімається по колоні, підтримується випаровуванням частини кубового продукту у виносному кип'ятильнику 2 з тепловими витратами Q_w . Паровий потік, досягаючи верха колони, конденсується в дефлегматорі 3 продуктивністю Q_d . Отриманий таким чином верхній продукт надходить до збірника дистиляту 4. Частина конденсату, що носить назву зрошування або флегми F1, повертається в колону, чим забезпечується протитечійний фазовий контакт по висоті колони і процес поділу.

5.2 Статична оптимізація процесу ректифікації з використанням неперервних рухливих впливів

Під статичними режимами маються на увазі усталені в часі робочі стани ректифікаційних колон, при яких відсутні зміни вхідних і вихідних координат, коли їх похідні дорівнюють нулю.

Традиційно керуючі впливи на процес наносяться шляхом зміни матеріальних або енергетичних потоків, що надходять у колону. Так, класично прийняті зміни витрати зрошування по колоні і витрати теплоносія у випарник куба. Однак дані дії прикладені до кінців колони в той час, як підвищення якості поділу пов'язане з необхідністю забезпечення необхідного тепло- і масообміну на кожному контактному пристрої апарата.

При оптимізації статичних режимів такого істотно розподіленого об'єкта, як ректифікаційна колона, необхідне використання розподілених або рухливих по висоті апарата керуючих впливів.

Можливість вибору закону руху за часом джерел речовини та енергії розширює клас керуючих дій, забезпечуючи перехід від «звичайних» (нерухливих) сигналів $w(x, t)$, що залежать від двох змінних – часу t і просторової координати x , до рухливих $w(x, t, x - s(t))$, що описуються функціями вже трьох аргументів:

$$w(x, t, x - s(t)) = u(x, t) \cdot \psi(x - s(t), \sigma(t), t).$$

де u – інтенсивність (потужність джерела); ψ – функція, що описує форму просторового розподілу джерела та її зміну за часом; s – закон руху джерела; σ – закон зміни параметрів форми джерела, що визначають ступінь просторової концентрації його впливу.

Залежно від вибору конкретного варіанта з одним або більше керуючим впливом і характеру їх зміни за часом і простором існує цілий ряд способів реалізації рухливих впливів. Джерела можуть мати просторово-дискретну або просторово-неперервну форму з неперервним або дискретним одноцикловим, багатоцикловим (періодичним) або комплексним характером руху.

Неперервні рухливі керуючі впливи на процес ректифікації полягають у перерозподілі потоку живлення між контактними пристроями колони.

5.3 Математичне моделювання процесу ректифікації з врахуванням неперервних рухливих керуючих впливів

Під статичною нелінійною моделлю процесу ректифікації мається на увазі математичний опис, що виходить з фізико-хімічної сутності процесу і містить нелінійні описи фазової рівноваги на контактних пристроях апарата, теплової взаємодії потоків і т. д. Оперуючи такою моделлю можливо формувати різні критерії ефективності, а також вирішувати багатокритеріальні задачі статичної оптимізації процесів ректифікації. З врахуванням високої інерційності ректифікаційних колон використання таких моделей при керуванні процесом ректифікації дає той же ефект, як і при використанні моделі динаміки.

Математичний опис ректифікаційної колони складається з математичних описів контактного пристрою, тарілки живлення, конденсатора, кип'ятильника куба колони, а також з рівнянь зв'язку і граничних умов. Модель містить наступні припущення:

- тиск на контактному пристрої, що моделюється, постійний;
- рідина знаходиться при температурі кипіння, пара – при температурі точки роси;
- суміші, які поділяються, близькі до ідеальних;
- фізико-хімічні властивості компонентів постійні на даному контактному пристрої та усереднені у можливому діапазоні зміни концентрацій;
- потоки рідини і пара постійні;
- рідинна фаза ідеально перемішана;
- у паровій фазі ідеальне витіснення;
- масопередача по фазах незалежна, дифузійні опори адитивні, тобто загальний коефіцієнт масопередачі може бути розкладений на часткові;
- коефіцієнти масопередачі постійні;
- винесення рідини постійне і дорівнює нулю.

Математична модель контактного пристрою ректифікаційної колони з врахуванням припущень і неперервних рухливих керуючих дій складається з наступних рівнянь

$$\begin{aligned}
 & V_i = V_{i-1}, \\
 & L_i = \begin{cases} V_{i-1} + U + W, & i \leq N_{f2} \\ V_{i-1} + U + W + (q-1)F, & N_{f2} < i \leq N_{f1} \\ V_{i-1} + U - D, & i > N_{f1} \end{cases} \\
 & x_i = \begin{cases} \frac{V_{i-1} \cdot y_{i-1} + U \cdot x_{i-1} + W \cdot x_0}{V_{i-1} + U + W}, & i \leq N_{f2} \\ \frac{V_{i-1} \cdot y_{i-1} + U \cdot x_{i-1} + W \cdot x_0 + (q-1) \cdot F \cdot x_f}{V_{i-1} + U + W + (q-1)F}, & N_{f2} < i \leq N_{f1} \\ \frac{V_{i-1} \cdot y_{i-1} + U \cdot x_{i-1} + W \cdot x_0 - F \cdot x_f}{V_{i-1} + U - D}, & i > N_{f1} \end{cases} \\
 & y_i^* = y^*(x_i), \\
 & y_i = y_{i-1} + (y_i^* - y_{i-1}) \cdot \eta_i,
 \end{aligned}$$

$$\eta_i = 1 - \exp\left(\frac{-Ky_i}{V_{i-1}}\right),$$

$$Ky_i = \frac{S_i}{\frac{1}{\beta y_i} + \frac{m_i}{\beta x_i}},$$

$$m_i = \left(\frac{\partial y^*}{\partial x}\right)_{x=x_i},$$

де x_f – склад живлення колони в мольних частках легколеткого компонента в рідкій фазі;

x_{N+1} , x_d – склад дистилляту в мольних частках легколеткого компонента;

x_0 , x_w – склад кубового залишку в мольних частках легколеткого компонента;

F – витрата живильної суміші, кмоль/год;

V – витрата пари в колоні, кмоль/год;

x_i – склад рідкої фази на i -ій тарілці в мольних частках легколеткого компонента;

y_i – склад парової фази на i -ій тарілці в мольних частках легколеткого компонента;

η – коефіцієнт Мерфі, характеризує ефективну дію тарілки за паровою фазою;

K_y – коефіцієнт масопередачі;

m – значення першої похідної від функції кривої рівноваги;

S – ефективна площа тарілки, м²;

β_x – налаштувальний параметр моделі, коефіцієнт масовіддачі по рідкій фазі, кмоль/(м²·год·(кмоль/кмоль));

β_y – налаштувальний параметр моделі, коефіцієнт масовіддачі по паровій фазі, кмоль/(м²·год·(кмоль/кмоль));

D – величина відбору дистилляту, кмоль/год;

N – кількість тарілок;

N_{f1} – номер верхньої тарілки живлення,

N_{f2} – номер нижньої тарілки живлення,

q – коефіцієнт перерозподілу, вказує, яка частка усього потоку сировини подається на верхню тарілку живлення.

W – величина відбору кубового залишку, кмоль/год;

L – витрата флегми, кмоль/год;

U – величина, що характеризує унесення рідини з тарілки, кмоль/год;

$y^*(x)$ – концентрація легколеткого компонента в парі, рівноважному з рідиною складу x .

Математична модель контактної пристрою може бути використана для опису тарілки живлення тільки з врахуванням специфіки енергетичного стану сировини, яка подається в колону. Прийняте припущення, що потік живильної суміші містить тільки рідинну фазу і нагрітий до температури кипіння при даній концентрації, дозволяє математично описати тарілку живлення як контактний пристрій вичерпної частини ректифікаційної колони.

В якості вхідних змінних, які мають характер збурень, виступають:

- витрата F сировини;
- склад x_f сировини.

В якості керуючих впливів:

- витрата парового потоку всередині колони V ;
- витрата дистилляту D або кубового продукту W ;
- коефіцієнт перерозподілу q – неперервний рухливий керуючий вплив.

Математична модель колони містить два налаштовувальні параметри – β_x та β_y . Їх коригування дозволяє забезпечити адекватність математичної моделі при дії інших неврахованих збурень.

Загальна схема розрахунку полягає в наступному: задання x_0 , D , V , q дозволяє за рекурентними співвідношеннями розрахувати послідовно концентрації на всіх тарілках до N -ої включно і знайти склад дистилляту x_{N+1} .

Потарілчастий розрахунок програмно реалізується підпрограмою `ConcXY`. Алгоритм розрахунку наведений на рис. 10.

Значення складу дистилляту x_{N+1} є функцією від складу кубового продукту x_0 . Задля однозначного визначення концентраційного профілю ректифікаційної колони при вимірних збуреннях F і x_f , необхідній продуктивності процесу D і нанесених при цьому керуючих впливах V і q необхідно додатково врахувати матеріальні баланси всієї ректифікаційної колони:

$$F = W + D,$$

$$F \cdot x_f = W \cdot x_0 + D \cdot x_{N+1},$$

$$L_{N+1} = V_N - D.$$

На рис. 11 надана геометрична інтерпретація вирішення отриманої системи рівнянь. Рішенням є точка перетину S -подібної кривої $\Phi(V, D, q, x_0)$, яка відповідає потарілчастому розрахунку, і прямої, що задовольняє рівнянню матеріального балансу $L(F, x_f, D, x_0)$.

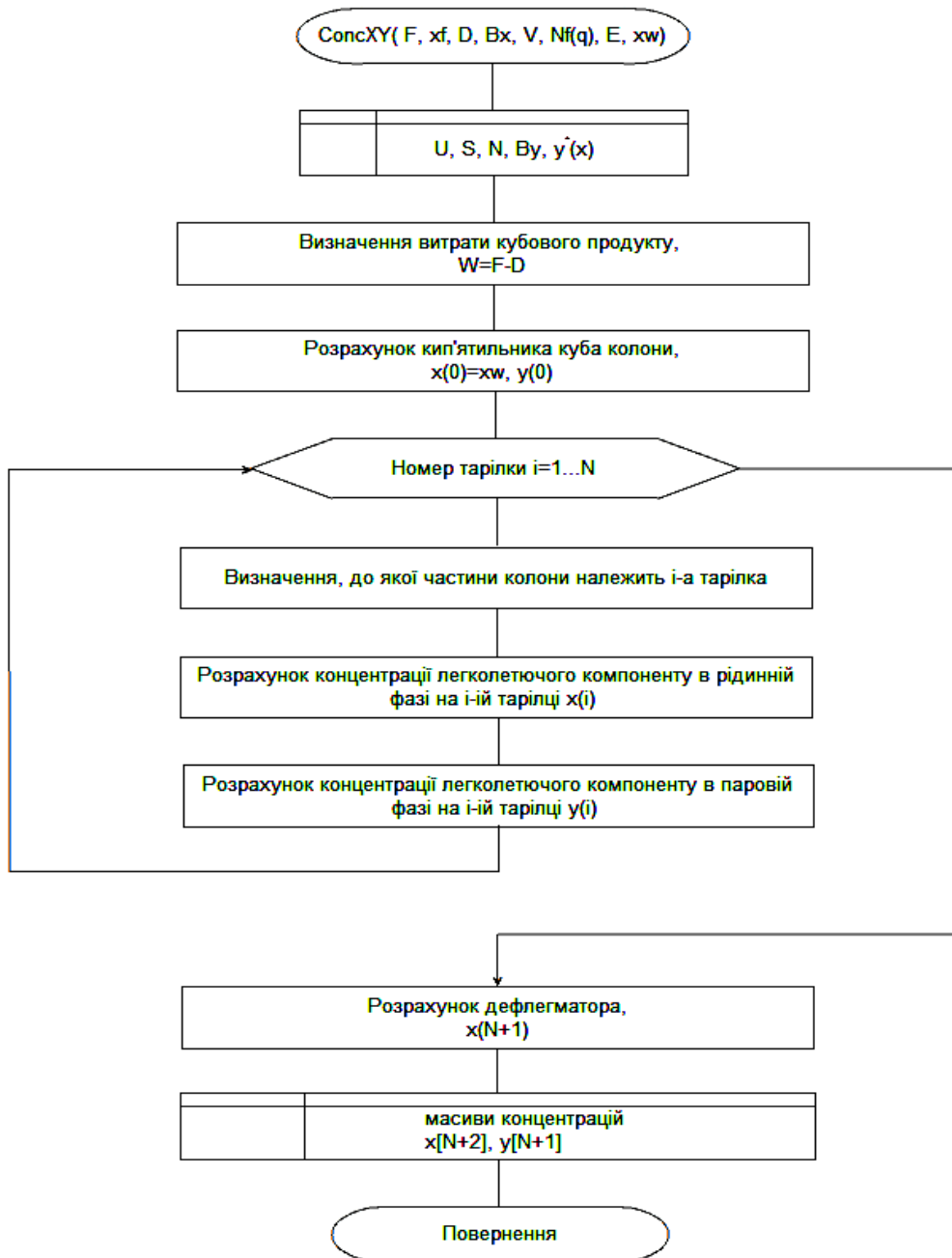


Рис. 10 – Алгоритм розрахунку концентрацій цільового компонента в рідинній і паровій фазах на тарілках ректифікаційної колони

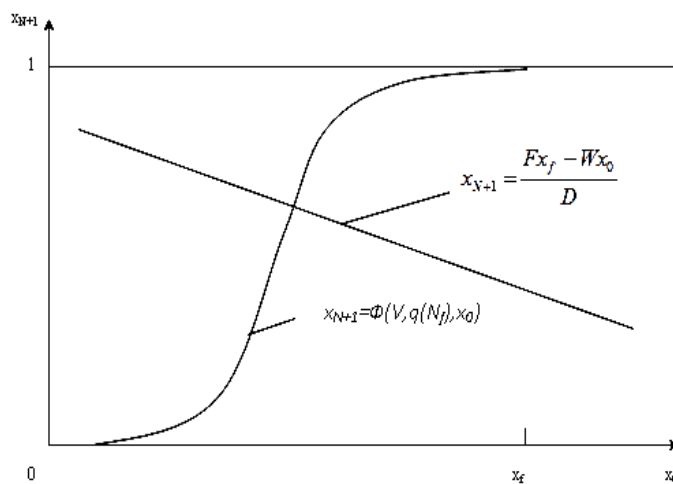


Рис. 11 – Геометрична інтерпретація розрахунку статичних характеристик ректифікаційної колони

Для визначення координат точки перетину застосовний метод поділу первісного інтервалу $a \leq x_0 \leq b$, що містить корінь, навпіл. Інтервал (a, b) ділиться навпіл, при x'_0 обчислюють різницю Δ між Φ та L . Залежно від знаку Δ в точку x'_0 зсувається ліва або права межа інтервалу. Цей процес повторюється до тих пір, поки інтервал Δ не стане менше деякої заздалегідь заданої точності обчислення ε . Даний алгоритм розрахунку статичних характеристик ректифікаційної колони програмно реалізується підпрограмою stat (рис. 12).

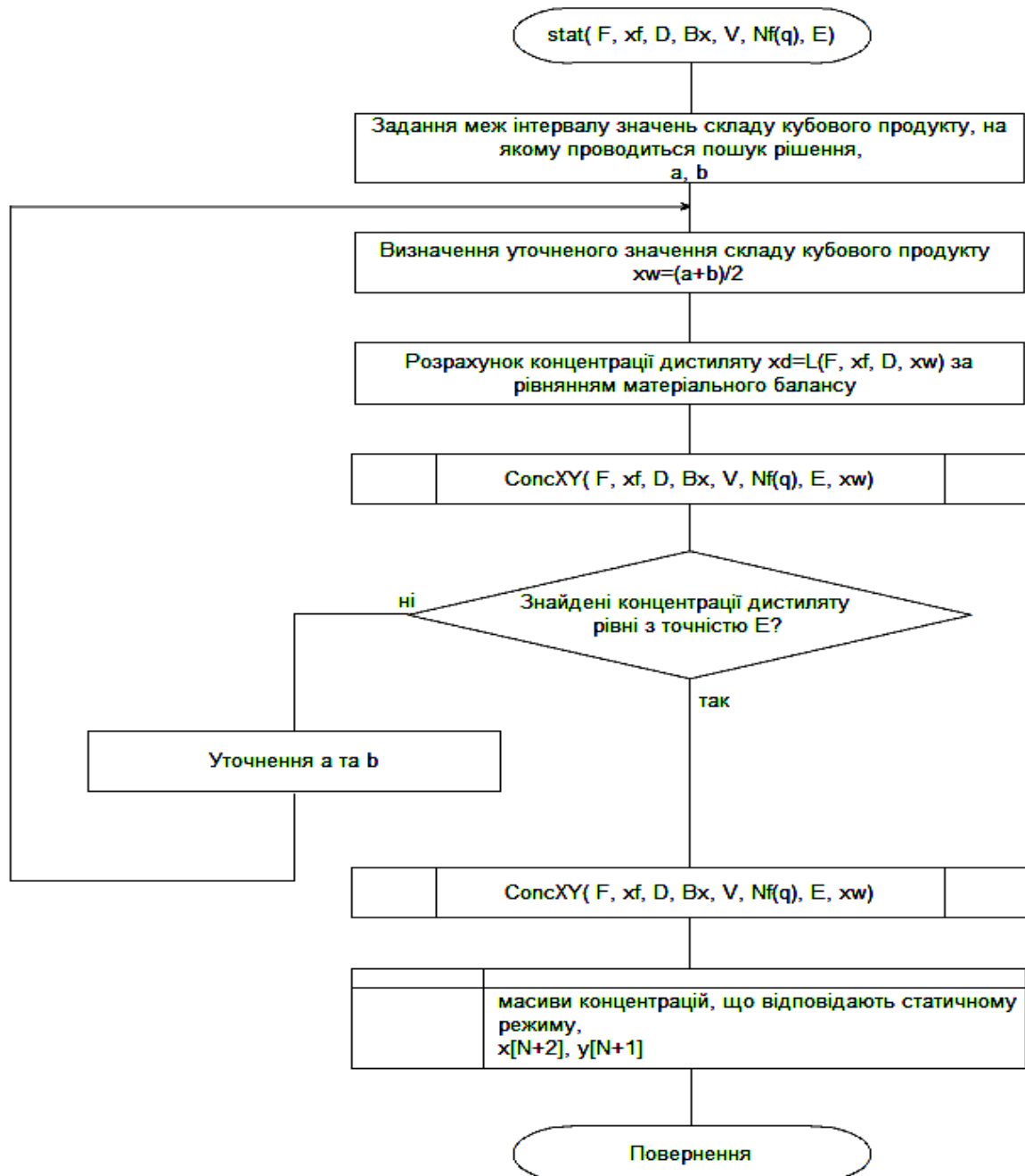


Рис. 12 – Алгоритм розрахунку статичних характеристик ректифікаційної колони

5.4 Статична оптимізація процесу ректифікації з використанням неперервних рухливих керуючих дій

Таким чином, за допомогою описаної процедури для кожної сукупності значень F , x_f , D , V , q можуть бути визначені концентрації легколеткого компонента в дистилляті x_{N+1} та кубовому залишку x_0 , а також на проміжних тарілках x_i та y_i .

Задача оптимізації статичних режимів може бути сформульована в такій формі: необхідно визначити такі значення традиційного і рухливого керуючих впливів V і q , які максимізують якість кінцевих продуктів при заданій продуктивності, собівартості та дотриманні обмежень за якістю продукції, гідродинамічною обстановкою на контактних пристроях і умовами фізичної реалізованості.

Як критерій оптимізації обрано максимізацію розділової здатності колони

$$x_{N+1} \rightarrow \max.$$

Процедура статичної оптимізації зводиться до розрахунків оптимальної витрати пари та одержуваного при цьому максимального значення складу дистилляту для кожного значення коефіцієнта перерозподілу q , а потім з отриманого масиву значень концентрацій x_D знаходиться найбільше (x_D^{opt}). Значення керуючих впливів, за яких було одержано x_D^{opt} , є оптимальними (V^{opt} і q^{opt}).

Підпрограма $\text{Max}V$ призначена для розрахунків оптимального значення витрати пари для даних коефіцієнта перерозподілу, витрат сировини і дистилляту, складу сировини, та екстремального значення концентрації дистилляту, яке при цьому забезпечується.

Задача знаходження точки екстремуму вирішується наступним чином: в якості початкового значення витрати пари береться мінімально можливе значення V_{min} . Значення прирощення береться свідомо менше тієї величини, при якому на першому кроці станеться переступання через шукану точку.

Далі за допомогою підпрограми stat для знаходження статичних режимів роботи ректифікаційної колони визначаються концентрації дистилляту, які відповідають мінімальному і збільшеному значенням витрати пари всередині колони. Якщо $x_{D1} > x_{D2}$, то відбулося переступання через точку екстремуму і необхідно повернутися до попереднього значення витрати пари і зменшити крок прирощення в два рази. Алгоритм даного розрахунку наведений на рис. 13.

Знаходження оптимальної величини неперервного керуючого впливу і складу дистилляту здійснюється за допомогою підпрограми Opt . Її робота полягає у розрахунку за допомогою підпрограми $\text{Max}V$ максимально можливих концентрацій x_D для кожного значення коефіцієнту перерозподілу. Далі шляхом порівняння знаходиться оптимальні керуючі впливи V і q , а також максимально можлива при цьому якість дистилляту. Алгоритм наведений на рис. 14.

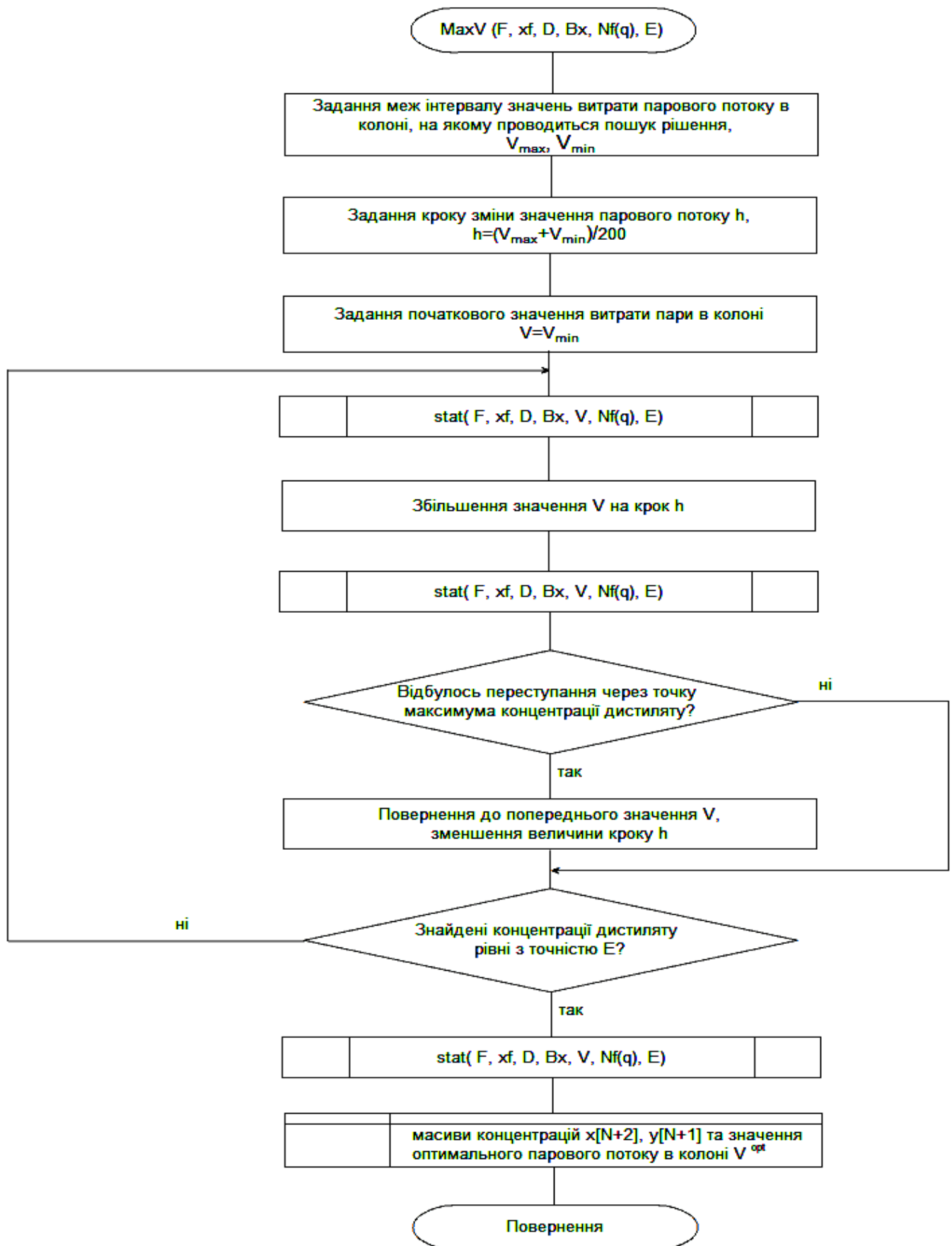


Рис. 13 – Алгоритм знаходження витрати пари в колоні, яка максимізує концентрацію дистилляту

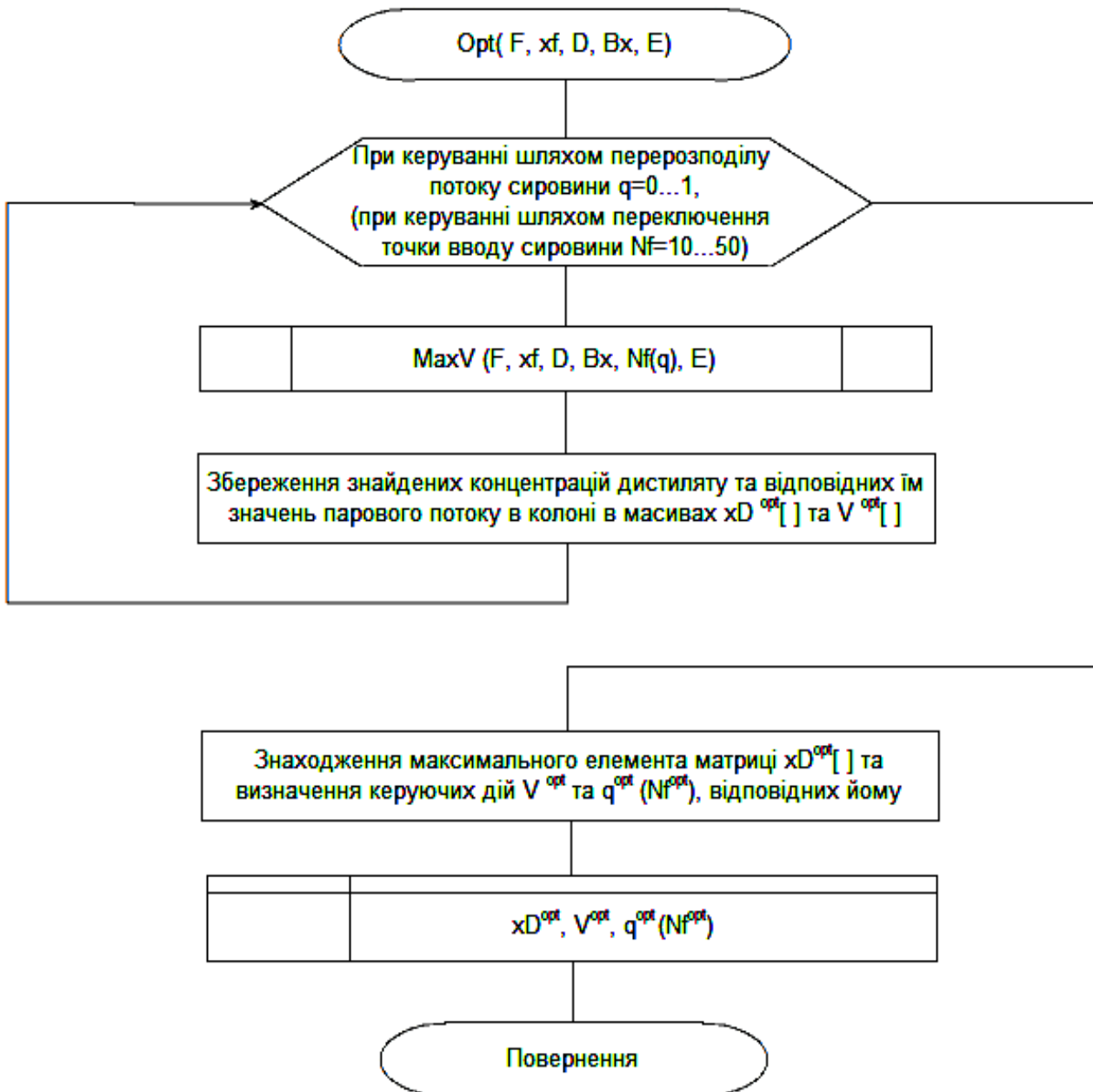


Рис. 14 – Алгоритм статичної оптимізації процесу ректифікації з використанням рухливих керуючих дій

Приклад

Задача статичної оптимізації процесу ректифікації вирішувалася на прикладі багатотарілчастої ректифікаційної колони з сітчастими тарілками для розділення бінарної суміші ароматичних вуглеводнів бензол-толуол. Висота тарілчастої ректифікаційної колони складає 40,543 метри, діаметр – 2,31 м. Колона містить 57 тарілок, процес проводиться при атмосферному тиску.

Значення основних режимних величин колони при нормальних умовах роботи та їх умовні позначення наведені в табл. 1.

Табл. 1 – Основні режимні показники колони

Позначення	Пояснення	Значення
F	Витрата сировини, кмоль/год	100
x_f	Склад сировини в мольних частках легкокиплячого компонента в рідкій фазі	0,76
D	Величина відбору дистилляту, кмоль/год	68
V	Витрата пари в колоні, кмоль/год	225
N	Кількість тарілок	57
N_f	Номер тарілки живлення при однопоточному введенні сировини	22
N_{f1} і N_{f2}	Номери тарілок живлення при двохпоточному введенні сировини	18 і 30
q	Коефіцієнт перерозподілу потоку сировини між двома тарілками живлення	0,5
S	Ефективна площа тарілки, м ²	2,31
U	Величина, що характеризує унесення рідини з тарілки, кмоль/год	0
β_y	Коефіцієнт масовіддачі по паровій фазі, кмоль/(м ² ·год·(кмоль/кмоль))	168,8

Крива рівноваги рідкої і парової фаз для суміші бензол-толуол зображена на рис. 10. $y^*(x)$ – концентрація легкокиплячого компонента в парі, рівноважній рідині складу x .

Для подальшого використання кривої рівноваги у розрахунках було проведено її поліноміальну апроксимацію кривою п'ятого порядку. Також знайдено рівняння першої похідної від одержаної функції кривої рівноваги. Відповідні коефіцієнти наведені в табл. 2.

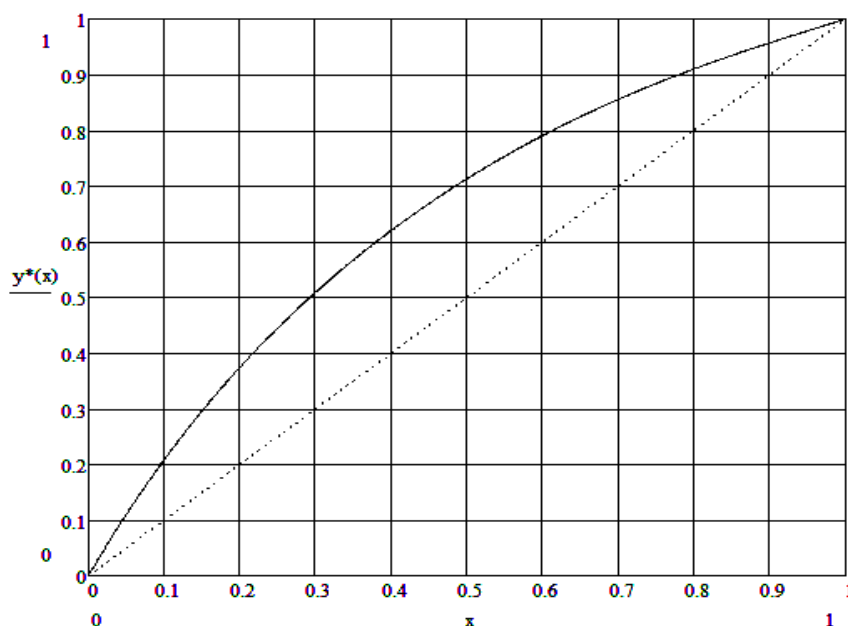


Рис. 10 – Крива рівноваги рідкої і парової фаз для суміші бензол-толуол

Табл. 2 – Коефіцієнти апроксимуючого рівняння кривої рівноваги і рівняння його першої похідної

Ступінь аргументу x	Коефіцієнти рівняння кривої рівноваги	Коефіцієнти рівняння першої похідної від функції кривої рівноваги
0	0,0004	2,3412
1	2,3412	-5,697
2	-2,8485	8,6181
3	2,8727	-7,9672
4	-1,9918	3,1305
5	0,6261	-

Базовим засобом розробки програмного комплексу є мова програмування C++. Нижче наведено лістинг розробленого програмного забезпечення статичної оптимізації процесу ректифікації з використанням рухливих керуючих дій.

```
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <cmath>
const int N=57, Nf1=30, Nf2=18;
const double E=0.00001;
const double By=168.8;

void ConcXY (double xw,double V,double D,double F,double xf,double
Bx,double q,double concX[],double concY[])
{
    double m[N+1],Ky[N+1],Eta[N+1],yr[N+1],W,S=2.31; int U=0;
    concX[0]=xw; concY[0]=xw;
    W=F-D;
    for (int i=1; i<=N; i++)
    {
        if (i<=Nf2)
            concX[i]=(V*concY[i-1]+U*concX[i-1]+W*xw)/(V+U+W);
        else
            if (i>Nf1)
                concX[i]=(V*concY[i-1]+U*concX[i-1]-(F*xf-
W*xw))/(V+U-(F-W));
            else
                concX[i]=(V*concY[i-1]+U*concX[i-1]+(q-
1)*F*xf+W*xw)/(V+U+(q-1)*F+W);
            m[i]=2.3412-2*2.8485*concX[i]+3*2.8727*pow(concX[i],2)-
4*1.9918*pow(concX[i],3)+5*0.6261*pow(concX[i],4);
            Ky[i]=S/(1/By+m[i]/Bx);
            Eta[i]=1-exp(-Ky[i]/V);
            yr[i]=0.6261*pow(concX[i],5)-
1.9918*pow(concX[i],4)+2.8727*pow(concX[i],3)-
2.8485*pow(concX[i],2)+2.3412*concX[i]+0.0004;
            concY[i]=concY[i-1]+(yr[i]-concY[i-1])*Eta[i];
        }
    concX[N+1]=concY[N];
}
```



```

void stat(void (ConcXY)(double xw,double V,double D,double
F,double xf,double Bx,double q,double concX[],double
concY[]),double V,double D,double F,double xf,double Bx,double
q,double concX[],double concY[])
{
    double r=xf,l=0,xn=2*E,xl=0,xw;
    while ((abs(xn-xl))>E)
    {
        xw=(l+r)/2;
        xl=(F*xf-(F-D)*xw)/D;
        ConcXY(xw,V,D,F,xf,Bx,q,concX,concY);
        xn=concX[N+1];
        if (xl<xn)
            r=xw;
        else
            l=xw;
    }
    ConcXY(xw,V,D,F,xf,Bx,q,concX,concY);
}

```

```

void MaxV(void (stat)(void (ConcXY)(double xw,double V,double
D,double F,double xf,double Bx,double q,double concX[],double
concY[]),double V,double D,double F,double xf,double Bx,double
q,double concX[],double concY[]),double D,double F,double
xf,double Bx,double q,double concX[],double concY[],double &V1)
{
    double V,h,concX1[N+2],concY1[N+1],Vmin=100,Vmax=300;
    h=(Vmin+Vmax)/200;
    V=Vmin;
    do
    {
        stat(ConcXY,V,D,F,xf,Bx,q,concX,concY);
        V=V+h;
        stat(ConcXY,V,D,F,xf,Bx,q,concX1,concY1);
        if (concX[N+1]>concX1[N+1])
        {
            V=V-h;
            h=h/100;
        }
    }
    while (abs(concX[N+1]-concX1[N+1])>E);
    stat(ConcXY,V,D,F,xf,Bx,q,concX,concY);
    V1=V;
}

```

```

void Opt(void (MaxV)(void (stat)(void (ConcXY)(double xw,double
V,double D,double F,double xf,double Bx,double q,double
concX[],double concY[]),double V,double D,double F,double
xf,double Bx,double q,double concX[],double concY[]),double
D,double F,double xf,double Bx,double q,double concX[],double
concY[],double &V1),double D,double F,double xf,double Bx,double
concX[],double concY[],double &qopt,double &V)
{

```

```

double Vopt[101], xd[101],xdopt;
for (int i=0; i<101; i++)
{
    MaxV(stat,D,F,xf,Bx,qopt,concX,concY,Vopt[i]);
    xd[i]=concX[N+1];
    qopt=qopt+0.01;
}
xdopt=xd[0];
V=Vopt[0];
qopt=0;
for (int i=1; i<=100; i++)
{
    if (xd[i]>xdopt)
    {
        xdopt=xd[i];
        V=Vopt[i];
        qopt=0.01*i;
    }
}
}
int main()
{
    setlocale(LC_ALL, "Russian");
    double V,q,D,F,xf,Bx,concentrationX[N+2],concentrationY[N+1];
    std::cout << "Витрата дистилляту D\t"; std::cin >> D;
    std::cout << "Витрата живлення F\t"; std::cin >> F;
    std::cout << "Склад живлення xf\t"; std::cin >> xf;
    BetaX(stat,concentrationX,concentrationY,Bx=0,D,F,xf);
    std::cout << "Bx= " << Bx << "\n";
    Opt(MaxV,D,F,xf,Bx,concentrationX,concentrationY,q=0,V=0);
    std::cout << "Оптимальне значення витрати пари в колоні V
opt= " << V << "\n";
    std::cout << "Оптимальне значення коефіцієнта перерозподілу
qopt= " << q << "\n";
    std::cout << "Оптимальна якість дистилляту Xd opt= " <<
concentrationX[N+1] << "\n";
    std::fstream a ("Xd.xls", std::ios::app);
    a << concentrationX[N+1] << std::endl;
    std::fstream b ("X0.xls", std::ios::app);
    b << concentrationX[0] << std::endl;
    std::fstream c ("Vopt.xls", std::ios::app);
    c << V << std::endl;
    std::fstream d ("qopt.xls", std::ios::app);
    d << q << std::endl;
    system("pause");
return 0;
}

```

Хід роботи

1. На прикладі процесу ректифікації суміші бензол-толуол отримати і дослідити особливості статичних характеристик колони при нанесенні неперервних рухливих керуючих впливів.

2. Розрахувати оптимальні статичні режими роботи колони за умови використання неперервних рухливих керуючих впливів на процес і за умови

використання тільки традиційних керуючих дій. Порівняти досягнуті економічні показники процесу, зробити висновок щодо ефективності застосування рухливих керуючих впливів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ротач В. Я. Теория автоматического регулирования [Текст]: учеб., 5-е изд., перераб. и доп. / В. Я. Ротач. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 396 с., ил.
2. Андрюшин А. В. Управление и инноватика в теплоэнергетике; учебное пособие [Текст] / А. В. Андрюшин, В. Р. Сабанин, Н. И. Смирнов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 392 с., ил.
3. Панько М. А. Расчет и моделирование автоматических систем регулирования в среде Mathcad: учебное пособие: [Текст] / М. А. Панько. — М.: Издательство МЭИ, 2004. — 112 с.
4. Анисимов И. В. Математическое моделирование и оптимизация ректификационных установок [Текст] / И. В. Анисимов, В. И. Бодров, В. Б. Покровский. — М.: Химия, 1975. — 216 с.
5. Кафаров В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств [Текст]: учеб. пособие для вузов / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. — М.: Высш. шк., 1991. — 400 с.: ил.

