

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИТЯГУВАННЯ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА ЗІ СКЛАДНОЮ СТРУКТУРОЮ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ

Вступ

Нині розвиток технології виробництва оптичних волокон розвивається за двома напрямками: виготовлення стандартних оптичних волокон та розробка та виготовлення волокон спеціального призначення. Ведуться інтенсивні роботи з створення нових типів оптичних волокон, які за рахунок ускладнення структури поперечного перерізу волокна набувають особливих експлуатаційних властивостей. У свою чергу, забезпечення складної структури поперечного перерізу оптичного волокна у процесі його виготовлення вимагає удосконалення системи керування.

При побудові сучасної автоматизованої системи керування технологічним процесом особливим етапом є математичне та програмне моделювання, що базується на математичних моделях та розроблених алгоритмах керування. Тому задача удосконалення математичної моделі технологічного процесу витягування оптичного волокна зі складною структурою поперечного перерізу є актуальною.

Постановка задачі

Математичний опис системи виконують на основі опису всіх вхідних у неї елементів. Ретельний аналіз технологічного процесу та устаткування для витягування відповідних структур [1] дозволяють сформулювати та відокремити елементи технологічного процесу за функціональними особливостями.

У загальному вигляді ТП витягування оптичного волокна (ОВ) зі складною структурою поперечного перерізу як об'єкту керування можна представити у вигляді моделі «темної скрині», оскільки модель такого типу є початковою під час побудови моделі складної системи, особливо коли увага акцентується на дослідженні взаємодії системи із зовнішнім середовищем. Побудова моделі типу «темна скриня» зводиться до опису границь системи, входів і виходів системи, а також зовнішніх дій. Кожну дію можна представити у вигляді векторів – набору параметрів

$$\begin{aligned} U &= \{U_1, U_2, \dots, U_r\}; \\ Y &= \{Y_1, Y_2, \dots, Y_p\}; \\ H &= \{H_1, H_2, \dots, H_m\}, \end{aligned} \quad (1)$$

де U – дії, що керують; Y – дії, що реєструються; H – дії збурення; r – кількість керованих величин; m – кількість зовнішніх дій збурення на систему; p – кількість датчиків, що реєструють параметри ТП.

Задача полягає в аналізі та удосконаленні існуючої моделі ТП витягування стандартних оптичних волокон. Для процесу витягування стандартних ОВ складові векторів, зазначених у системі (1), необхідно проаналізувати існуючий підхід керування ТП витягування.

Як показали дослідження [1, 2], оптико-фізичні властивості стандартних ОВ значною мірою залежать від точності підтримки його зовнішнього діаметру в заданому діапазоні відхилень.

Існуючий підхід до керування параметрами ТП витягування ОВ базується на стабілізації діаметру стандартного ОВ та здійснюється шляхом регулювання швидкості витягування за умови постійних значень швидкості потоку інертного газу, температури, швидкості подачі заготовки.

У свою чергу досліди зі створення ОВ із подібним регулюванням ТП дали незадовільні результати [3] та не забезпечують потрібну якість керування процесом формоутворення ОВ.

Так, на рис. 1 побудовано емпіричні графіки змін геометричних параметрів структури ОВ зі складною структурою поперечного перерізу (мікроструктурованого ОВ з системою внутрішніх повітряних капілярів). Як бачимо, за умови дотримання зовнішнього діаметру у рамках допустимих значень, внутрішня структура значно змінюється.

При стабілізації зовнішнього діаметру волокна (рис. 1) діаметри повітряних отворів внутрішніх шарів оболонки та діаметр серцевини не стабілізуються, а з часом і зовсім не задовольняють потрібним параметрам якості.

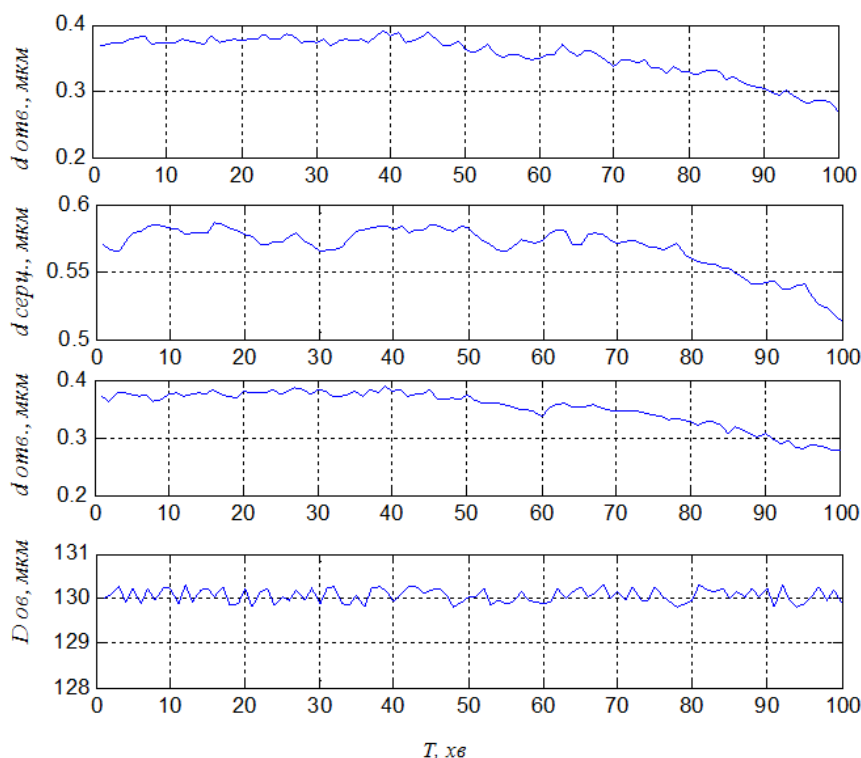


Рис. 1

Крім того, встановлено [3, 4], що у випадку з ОВ зі складною структурою поперечного перерізу найкраще керування ТП витягування можливо під час регулювання параметра температури печі та стабілізації параметра тиску інертного газу в повітряних отворах волокна.

Удосконалення моделі

Запропоновано змінити підхід до керування ТП витягування волокна та здійснювати керування процесом формоутворення ОВ зі складною структурою поперечного перерізу за рахунок регулювання температурного режиму витягування на базі аналізу складової, що відображатиме зміни геометричних параметрів внутрішньої структури ОВ. Це дозволить підвищити якість керування та забезпечити формоутворення структури ОВ з урахуванням допусків на геометричні параметри перерізу впродовж всього неперервного процесу витягування волокна.

Крім того, зазначимо, що керування необхідно проводити на підставі інформації про структуру волокна безпосередньо після зони формоутворення, що можливо з використанням розглянутого оптичного методу контролю.

Таким чином, до множини вихідних параметрів (реєстрованих дій) системи необхідно додати нову інформаційну складову – розподіл інтенсивності оптичного поля, що є результатом взаємодії тестового випромінювання з контрольованою структурою ОВ.

Отже, на підставі проведеного аналізу визначені складові кожного з параметрів моделі (1): вектор параметрів U (табл.1), вектор параметрів Y (табл.2), вектор параметрів H (табл.3).

Таблиця 1

Складова	Підоб'єкт ТП, яким керують	Параметр, яким керують
U_1	Блок подачі заготовки	$U(t)$ – напруга, що підводиться до двигуна
U_2	Блок подачі інертного газу	$P_H(t)$ – тиск інертного газу в отворах структури, що знаходиться у діапазоні ± 1 кПа
U_3	Блок нагріву заготовки	$T_{II}(t)$ – температура в печі (1930-1960°C)
U_4	Пристрій охолодження	$T_{Ox}(t)$ – температура охолодження
U_5	Блок контролю геометрії перерізу	$\tau_1(t)$ – частота реєстрації $I(m, n, t)$
U_6	Блок нанесення первинного покриття	$\tau_2(t)$ – частота реєстрації $d_{ia}(t)$
U_7	Блок приймального пристрою	$U(t)$ – напруга, що підводиться до двигуна лебідки

Вектор дій, що реєструють, складається відповідно з семи складових, що є елементами відповідних блоків устаткування для витягування МОВ.

Реєстрація відбувається за допомогою відповідних давачів та перетворювачів інформації, що обрані для відповідних задач та застосувань у технологічному устаткуванні.

Таблиця 2

Складова	Підоб'єкт ТП	Параметр, що реєструють
Y_1	Блок подачі заготовки	$V_{II}(t)$ – швидкість подачі заготовки
Y_2	Блок подачі інертного газу	$P(t)$ – тиск інертного газу в отворах структури
Y_3	Блок нагріву заготовки	$T_{II}(t)$ – температура в печі
Y_4	Пристрій охолодження	$T_{Ox}(t)$ – температура охолодження
Y_5	Блок контролю геометрії перерізу	$d(t)$ – зовнішній діаметр волокна $I(m, n, t)$ – масив розподілу інтенсивності оптичного поля
Y_6	Блок нанесення первинного покриття	$d_{ov}(t)$ – зовнішній діаметр волокна після нанесення первинного покриття
Y_7	Блок приймального пристрою	$V_B(t)$ – швидкість обертання шпильастої лебідки

До змінних станів ТП (дій збурення) відносяться параметри, що визначають оптико-фізичні та структурні властивості МОВ, які відносяться до внутрішніх змінних станів об'єкта (табл. 2.4).

Таблиця 3

Складова	Параметр
H_1	конвективні теплові потоки усередині печі
H_2	температурні градієнти в зоні формування МОВ
H_3	поля швидкостей, температур
H_4	концентричність і еліптичність МОВ
H_5	незмінність структури оболонки МОВ
H_6	розподіл коефіцієнта заломлення матеріалу МОВ

Отже, запропоновано до вектору параметрів ТП витягування МОВ, який по відношенню до системи керування є вектором реєстрованих дій, включити нову інформаційну складову – інтенсивність оптичного поля $I(m, n, t)$

$$Y(t) = \{V_{\Pi}(t), P(t), T_{\Pi}(t), T_{Ox}(t), d(t), I(m, n, t), d_{об}(t), V_B(t)\},$$

де $V_{\Pi}(t)$ – швидкість подачі заготовки; $P(t)$ – тиск інертного газу в отворах структури; $T_{\Pi}(t)$ – температура в печі; $T_{Ox}(t)$ – температура охолодження; $d(t)$ – зовнішній діаметр волокна; $I(m, n, t)$ – масив розподілу інтенсивності оптичного поля; $d_{об}(t)$ – зовнішній діаметр волокна після нанесення первинного покриття; $V_B(t)$ – швидкість обертання шпильастої лебідки.

Використаємо набір даних про вхідні та вихідні параметри технологічного процесу та встановимо залежності між величинами.

Проведений апріорний аналіз переліку вхідних змінних з метою включення у склад моделі пріоритетних, найбільш впливовіших на вихідну змінну.

Формоутворюючим елементом у випадку витягування волокна є елемент нагрівання заготовки – піч. Враховуючи особливості процесу витягування ОВ у якості регулюючого параметру обрана температура в печі – $T_{\Pi}(t)$.

За рахунок зміни $T_{\Pi}(t)$ виконується формотворення структури перерізу ОВ, та змінюються геометричні параметри перерізу волокна, а отже і формуються оптичні властивості МОВ.

Введемо умову, що швидкість подачі заготовки є постійною. Технічно це можливо забезпечити ПІД-регулюванням стабільної швидкості обертання лебідки, на яку ведеться намотування покритого у захисний шар волокна.

Вплив керованих параметрів $V_B(t)$ і $T_{\Pi}(t)$ на параметри $d(t)$ та $I(m, n, t)$ визначено з часових діаграм відповідних сигналів, що надходять у систему керування та заноситься до протоколу ТП витягування у певний діапазон часу (рис. 2). Аналіз часового ряду має декілька етапів та починається з побудови і вивчення його графіка.

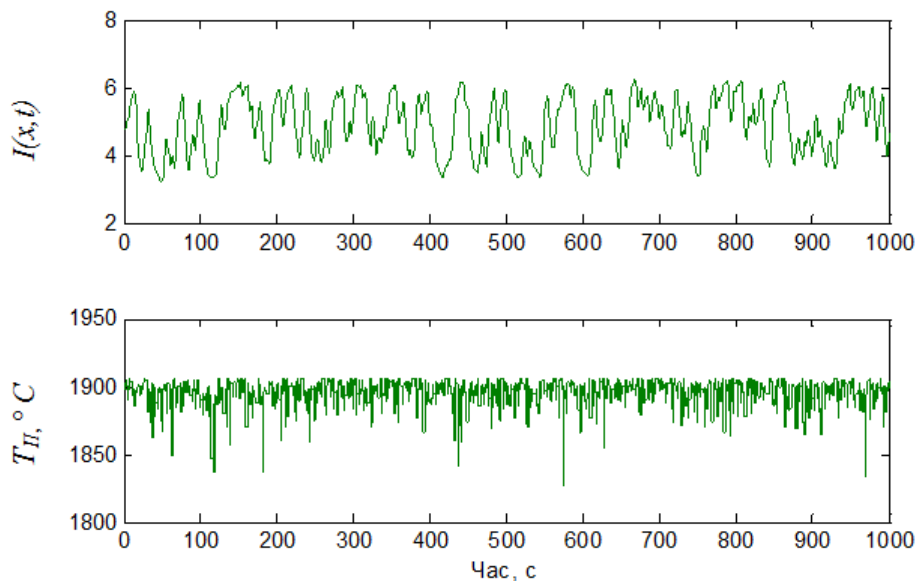


Рис. 2

Проводилося вимірювання інтегрального показника інтенсивності оптичного поля $I(m, n, t)$ у перерізі ОВ зі складною структурою поперечного перерізу. Аналіз послідовних спостережень (X, Y) вказаних величин дозволив провести структурну та параметричну ідентифікацію моделі.

В роботі для визначення стаціонарності часових рядів використана автокореляційна функція. Як бачимо з рис. 3, графіки автокореляційної функції входу (рис. 3, R_{xx}), виходу

(рис. 3, R_{yy}) та взаємна кореляція між входом та виходом (рис. 3, R_{xy}) прямують до нуля, не виявлено наявності яскраво виражених піків

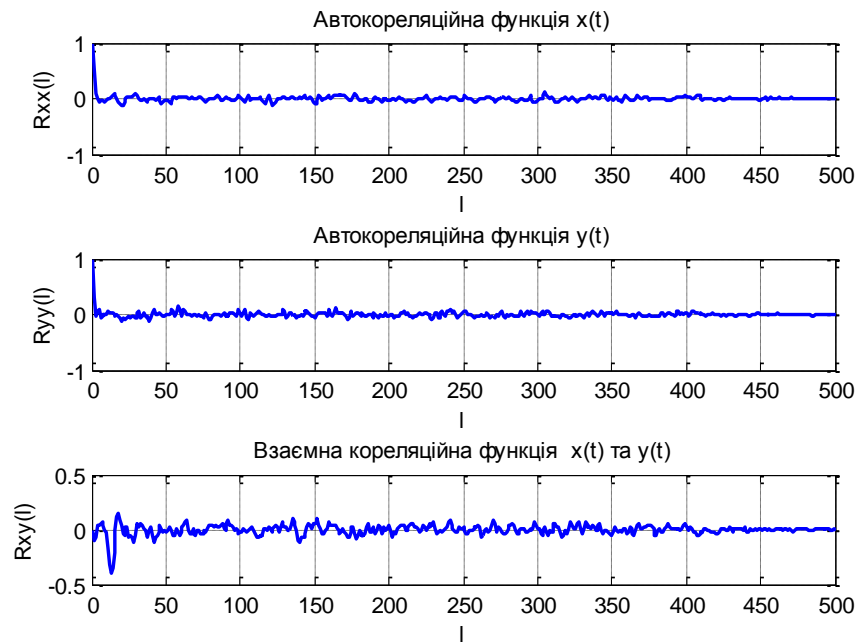


Рис. 3

У свою чергу, бачимо, що взаємна кореляційна функція має чітко виражений пік на значенні 13, який вказує на те, що вихід затриманий відносно входу на 13 кроків. Враховуючи, що крок дорівнює 0,1 с, то час чистого запізнювання складає 1,3 с.

За базову структуру моделі обрано модель типу

$$y(k) = G(z)u(k) + H(z)e(k), \quad (2)$$

де $e(k)$ – випадкова складова типу «білий шум»; $u(k)$ – вхідний сигнал; $G(z)$ – передатна функція від u до y ; $H(z)$ – передатна функція від e до y .

Проведена параметрична ідентифікація множини лінійних моделей (ARX, ARMAX, «вхід-вихід»):

– ARX – модель (Autoregressive with eXternal input) п'ятого порядку

$$A(z)y(k) = B(z)u(k) + e(k),$$

$$A(z) = 1 - 0,9662z^{-1} + 0,0324z^{-2} + 0,02569z^{-3} + 0,1168z^{-4} - 0,05z^{-5},$$

$$B(z) = 0,0001676z^{-1} + 0,00597z^{-2} + 0,06419z^{-3} + 0,06169z^{-4} + 0,02z^{-5},$$

де z^{-1} – оператор зсуву назад;

– модель авторегресії – ковзного середнього $A(z)y(k) = B(z)u(k) + C(z)e(k)$,

$$A(z) = 1 - 0,163z^{-1} + 0,6858z^{-2},$$

$$B(z) = 0,003678z^{-1} + 0,05z^{-2},$$

$$C(z) = 1 - 0,291z^{-1} - 0,4454z^{-2};$$

– модель «вхід-вихід» четвертої степені $y(k) = [B(z)/F(z)]u(k) + H(z)e(k)$,

$$B(z) = 0,0001676z^{-1} + 0,002959z^{-2} + 0,066z^{-3} + 0,0317z^{-4}$$

$$F(z) = 1 - 1,355z^{-1} + 0,4z^{-2} + 0,1322z^{-3} - 0,0769z^{-4}.$$

– модель «вхід-вихід» другої степені $y(k) = [B(z)/F(z)]u(k) + e(k)$,

$$B(z) = -0,04373 z^{-1} + 0,1155 z^{-2},$$

$$F(z) = 1 - 1,506z^{-1} + 0,5796z^{-2}.$$

Параметри моделей (коефіцієнти) визначено за методом найменших квадратів. Для цього мінімізуємо суму квадратів різниць значень $y(k)$ та емпіричних значень функцій у всіх

точках $\sum_{i=1}^N e_i^2 \rightarrow \min.$

Оцінка якості параметричної моделі виконувалася за допомогою коефіцієнту кореляції передбачених значень вихідної величини зі спостереженими. Також проводився аналіз значень помилок апроксимації моделі.

Обрано модель «вхід-вихід» четвертої степені з максимальним коефіцієнтом кореляції (88,7 %) та мінімальною помилкою апроксимації (0,13 %).

Отже, передатна функція дискретної системи має вигляд

$$W(z) = \frac{0,0317z^{-4} + 0,066z^{-3} + 0,002959z^{-2} + 0,00176z^{-1}}{-0,0769z^{-4} + 0,1322z^{-3} + 0,505z^{-2} - 1,355z^{-1} + 1}.$$

Стійкість системи можливо визначити за виглядом перехідної характеристики системи: якщо перехідна функція стійкої систем автоматичного керування після перехідного процесу набуває постійного значення (рис.4), то система є стійкою. Визначили основні якісні показники об'єкту керування, для чого побудовано перехідну характеристику системи (рис. 4, а) та ЛАЧХ з ЛФЧХ системи (рис.4, б).

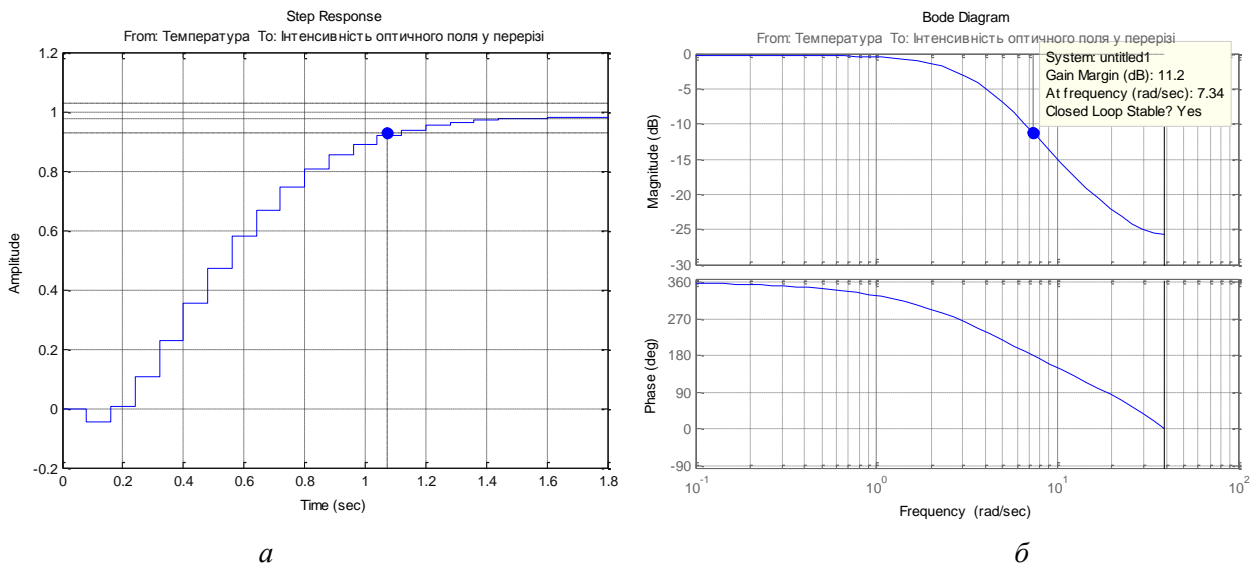


Рис. 4

З метою визначення якості побудованої моделі за введеним каналом регулювання насамперед необхідно оцінити показники якості.

Проведений аналіз ідентифікованої моделі дозволив визначити основні статичні та динамічні характеристики об'єкта автоматизації: час регулювання 1,07 с; перерегулювання – 0 %; статичний коефіцієнт передачі об'єкту – 0,97; запас стійкості за амплітудою – 12,2 дБ.

Висновки

Введення нової інформаційної складової та ідентифікація функції, що пов'язує дану складову з технологічними параметрами, дозволили удосконалити підхід до керування ТП формоутворення мікроструктурованих оптичних волокон. Аналіз експериментальних даних

дозволив ідентифікувати математичну модель процесу витягування ОВ як об'єкту керування за входом – температура у печі та виходом – інтегральний показник інтенсивності оптичного поля у перерізі. Ідентифікована модель показала задовільні показники якості, але має високу степінь, що може вносити додаткові помилки при керуванні об'єктом, тому вважається за необхідне подальші дослідження направити на побудову математичної моделі у просторі станів.

Список літератури: 1. *Филипенко, А. И.* Контроль конструктивно-технологических параметров микроструктурированного волокна в АСУ ТП вытяжки волокна / А. И. Филипенко, А. В. Пономарева // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №1/5 (43). – С. 17-20. 2. *Филипенко, А. И.* Информационное обеспечение АСУ технологическим процессом вытяжки микроструктурированного волокна / А. И. Филипенко, А. В. Пономарева // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – №6/3 (42). – С. 17-20. 3. *Филипенко, О. І.* Підвищення якісних параметрів мікроструктурованих оптичних волокон / О. І. Филипенко, Г. В. Пономарьова // Технология приборостроения. – 2009. – №2. – С. 49-53. 4. *Luutikainen, K.J.* Control of complex structural geometry in optical fibre drawing: A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy / K.J. LYYTIKAINEN. – Sydney, 2004. – 273 с.

*Харківський національний
університет радіоелектроніки*

Надійшла до редколегії 12.03.2015