

М.П. ЛИСИЦЯ, канд. техн. наук, доцент ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка
П.М. ЛИСИЦЯ, асистент ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка

ПІДСИСТЕМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИМ ПРОЦЕСОМ ВИГОТОВЛЕННЯ ТРУБОК ІЗ КВАРЦОВОГО СКЛА

Приведена структурная схема автоматизированной системы управления нестационарным процессом изготовления трубок из кварцевого стекла. Раскрыты ее функции на уровне подсистем. Изложена основная идея построения модели формирования геометрии кварцевой трубки, базирующаяся на процессе вязко-упругого удлинения кварцевой нити, которая позволяет реализовать прямое адаптивное управление подсистемами.

The block scheme of the automated system of unstationary process control of making the tubes from quartz glass is adduced. Its functions are expounded at the level of subsystems. The basic idea of construction of model of geometry forming of quartz tube expounded, being based on the process of the viscid-resilient lengthening of quartz filament, on the basis of the built model the adaptive control by subsystems is executed.

Постановка проблеми. Технологічний процес виготовлення трубок із кварцевого скла шляхом витягування їх із розм'якшеного кварцевого блока, попередньо наплавленого із збагаченого природного кварцу, є однією із основних складових цього процесу і найскладнішим етапом їх виготовлення. Існуючі технологічні рішення щодо виготовлення кварцевих трубок і засобів автоматизованого їх виробництва не задовольняють сучасних вимог до геометричних параметрів трубок. Специфіка виготовлення указаних виробів полягає у тому, що кварцовий блок, з якого формується трубка, характеризується неоднорідністю своєї структури, процес високотемпературного формування трубки із блока у зоні розм'якшення є нестационарним, а отримані неякісні вироби не допускають повторного переплавлення через втрату більшості своїх корисних властивостей. У результаті цього брак труб, що не задовольняють вимог щодо геометричних параметрів (товщина стінки, еліптичність, відповідність значень діаметрів заданим), при існуючій технології виробництва та рівні його автоматизації, складає близько 11%.

Аналіз літератури. У ряді робіт [1, 2] велика увага приділяється дослідженню алгоритмів керування процесом скловитяжки при побудові системи ідентифікаційного типу, де використовується ноніусна ідентифікація передавальних функцій об'єкта при наявності в системі регулятора з діагностиком та компенсатором. При цьому контури самоналагодження працюють за розімкнутим циклом [3], і в результаті похибок ідентифікації зміна параметрів об'єкта і регулятора суттєво впливає на точність керування і її ідентифікаційний режим працює неефективно. При прямому адаптивному

керуванні контури адаптації працюють за замкнутим циклом, що ефективно дозволяє компенсувати зміну параметрів об'єкта одночасно коригованими параметрами регулятора. Проте такий спосіб керування потребує наявності моделі процесу та відповідної структури побудови системи. Крім того, модель процесу формування трубки із блока дозволяє дослідити в об'єкті коефіцієнти комплексного зв'язку між основними каналами та дає можливість отримати інформацію про доцільність використання діагоналізаторів між вибраними каналами або інформацію про необхідність заміни місцями основних гілок каналів.

Мета статті – висвітлення запропонованої ідеї побудови моделі формування геометрії кварцової трубки для реалізації автоматизованої системи керування нестационарним процесом виготовлення трубок із кварцового скла на основі прямого адаптивного керування.

Виклад основного матеріалу. Для дотримання необхідних параметрів технологічного процесу на основі технологічної установки витягування кварцових трубок запропоновано структуру автоматизованої системи виготовлення трубок із кварцового скла (рис. 1). Указана структура містить декілька підсистем, які вирішують локальні задачі підтримання значень окремих параметрів процесу на заданому рівні, робота яких, у свою чергу, координується підсистемою центрального керування технологічним процесом (ПЦКТП).

Підсистема подачі блока (ППБ) містить два електропривода. Перший привод використовується виключно для швидкого піднімання й опускання блока, які мають місце на початку та у кінці технологічного циклу виготовлення кварцової трубки. Другий привод керує швидкістю опускання блока безпосередньо під час технологічного процесу формування трубки.

Підсистема керування температурою витягування (ПКТВ) задає температурний режим розм'якшення кварцу в печі. Вона містить у своєму складі піч із графітовим нагрівачем, водяну систему охолодження печі, датчик температури, перетворювач напруги і блок керування температурними режимами (БКТР) та деякі інші допоміжні елементи. БКТР, аналізуючи сигнали від ПЦКТП і датчика температури, виробляє керуючий сигнал, який через перетворювач напруги поступає на графітовий нагрівач. Таким чином відбувається керування температурою в зоні розм'якшення кварцу.

Підсистема контролю геометричних параметрів трубки (ПКГПТ) утворює головний зворотний зв'язок автоматизованої системи. Контролюється величина як зовнішнього, так і внутрішнього діаметра кварцової трубки. Датчик геометричних параметрів кварцової трубки складається з лазерного джерела світла і фото-приймального пристрою, а також електромеханічного коригуючого пристрою.

Блок вимірювання діаметра (БВД) проводить статистичну обробку результатів вимірювань і забезпечує передачу інформації на ПЦКТП.

Підсистема витягування трубки (ПВТ) містить електропривод витягування трубки (ЕПВТ) і пневмо-привод прижимних роликів (ППР). ЕПВТ задає необхідну швидкість витягування трубки. Величина цього параметра істотно впливає на геометричні параметри виробу. Силу затиснення трубки між роликами витяжного пристрою задає пневмо-привод прижимних роликів. Сила тиску газу перетворюється в механічне зусилля за допомогою двох пневмо-циліндрів.

Підсистемі подачі азоту (ППА) належить ключова роль у процесі формування геометричних параметрів кварцової трубки, адже такі параметри як тиск і витрата азоту в першу чергу впливають на зміну (формування) зовнішнього та внутрішнього діаметрів трубки. До складу підсистеми входять датчики витрати і тиску газу, сигнали від яких поступають на вхід блока керування витратою і тиском азоту (БКВТА). БКВТА оброблює інформацію від датчиків і виробляє керуючі сигнали для електропривода голкового крана, що змінює подачу газу на вході системи. ПЦКТП також проводить обробку результатів вимірювань витрати та тиску азоту, у результаті формуючи сигнали керування для різних підсистем, у тому числі і для підсистеми подачі азоту.

Підсистема автоматичного відрізання трубки (ПАВТ) складається з трьох головних складових частин: фото-датчика, обертального відрізного пристрою і блока керування відрізанням трубки (БКВТ). Фото-датчик представлений світло-діодом і фото-діодом. Він спрацьовує при досягненні трубкою максимального значення довжини. У цьому випадку БКВТ видає сигнал керування обертальному відрізному пристрою, який відрізає трубку необхідної довжини.

Однією з головних функцій ПЦКТП при керуванні іншими підсистемами є пряме адаптивне керування технологічним процесом з використанням моделі формування геометрії трубки з урахуванням пружних та в'язких складових.

Базовою ідеєю побудови моделі є розбиття процесу подовження трубки (на основі дослідження кварцової нитки або тонкого стрижня) на три складові: миттєво-пружне подовження, сповільнено-пружне подовження та рівномірне подовження в'язкого витікання [4].

З метою встановлення параметрів такого процесу проведено його ідентифікацію. Для пружної складової за законом Гука відносна пружна деформація ε пов'язана із напруженням σ_l формулою

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma_l,$$

де E – модуль Юнга.

В'язке осьове подовження, враховуюче коефіцієнт динамічної в'язкості [5], можна знайти за формулою

$$\sigma_l = 2\eta \frac{\partial \vartheta}{\partial l}.$$

В результаті чого, інтегруючи рівняння з нульовими початковими умовами швидкості при початковій довжині кварцової нитки, отримано

$$\vartheta = \frac{1}{2\eta} \sigma_l \cdot l.$$

Для врахування вкладу пружного та в'язкого подовження за деякий проміжок часу Δt запропоновано ідею їх урахування через коефіцієнти K_α і K_η відповідно.

Виражаючи пружне подовження через коефіцієнт пружності α та враховуючи інерційність процесів (рис. 2) запропоновано ідею розбиття коефіцієнта α на дві складові. Для цього введено ще два додаткові коефіцієнти $K_{\alpha u}$, $K_{\alpha zi}$, які враховують вклад миттєвої та інерційної складової коефіцієнта пружності відповідно.

Переходячи до зображення та використовуючи оптимізаційний метод найскорішого спуску [6] для знаходження параметрів моделі, в якості функції мети вибрано мінімум квадратичних відхилень для всіх точок перехідного процесу моделі та експериментальних даних. Вхідними параметрами при цьому виступають: коефіцієнт в'язкості η , коефіцієнт пружності α , сила витягування F , початковий радіус стрижня r та початкова довжина стрижня L .

У результаті ідентифікації параметрів отримано нижче приведену динамічну модель витягування кварцового тонкого стрижня:

$$\Delta L(p) = L \left[K_\alpha \cdot \alpha(T) \cdot \left(K_{\alpha u} + \frac{K_{\alpha zi}}{T_\alpha p + 1} \right) A + \frac{K_\eta}{\eta(T)} \cdot B \frac{1}{p} \right],$$

де $\alpha(T)$, $\eta(T)$ – коефіцієнт пружності та коефіцієнт динамічної в'язкості, що залежать від температури; K_α , K_η , $K_{\alpha u}$, $K_{\alpha zi}$, T_α – ідентифіковані коефіцієнти; A , B – деякі коефіцієнти, що залежать від сили F та радіуса r ; $A = \frac{F}{\pi \cdot r^2}$;

$B = \frac{F}{2 \cdot \pi \cdot r^2}$; p – оператор Лапласа.

Аналогічним чином подовження кварцової трубки як і тонкого стрижня складається із пружного подовження (ділянка OA на кривій рис. 2), сповільнено-пружного (ділянка AB) і рівномірного подовження в'язкого витікання (ділянка FC), як бачимо ці зони складуючись утворюють результуючий графік.

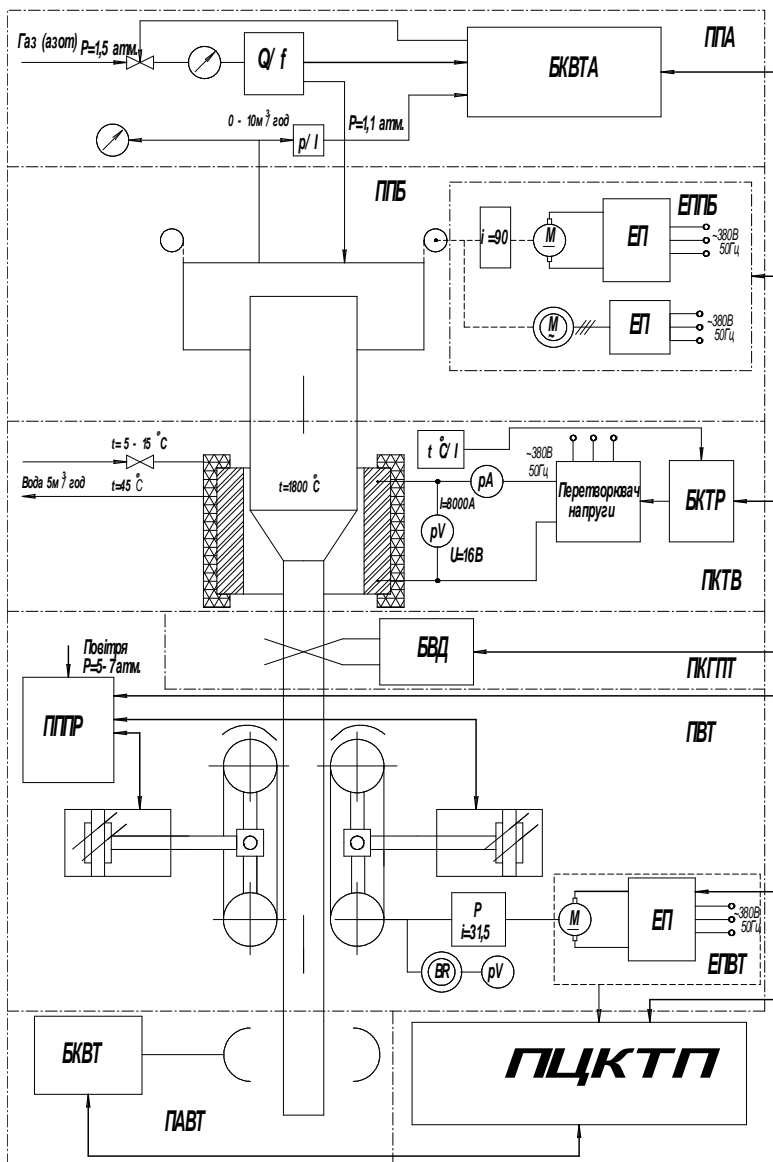


Рис. 1. Загальна структурна схема автоматизованої системи

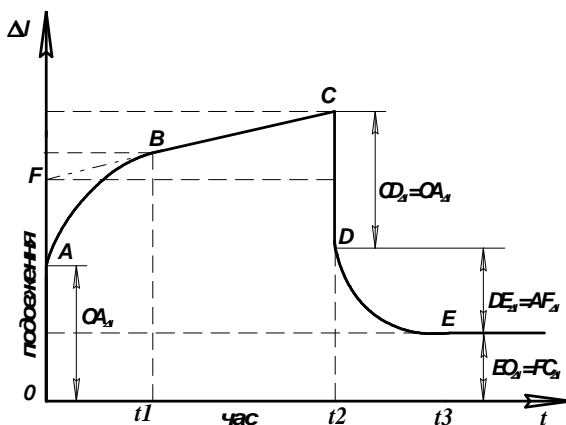


Рис. 2. Діаграма подовження тонкого кварцового стрижня при температурі розм'якшення

Пружне подовження кварцової трубки відбувається дуже швидко (майже миттєво із швидкістю поширення звуку в скломасі) за рахунок прикладення зовнішньої сили (сили витягування трубки) та власної ваги кварцової маси, що знаходиться нижче початкового рівня зони розм'якшення.

Тривалість сповільнено-пружного подовження залежить від в'язкості кварцового скла. Чим вище в'язкість, тим більша ділянка сповільнено-пружної деформації.

Рівномірне подовження в'язкого витікання (ділянка FC на рис. 2) виступає головним чинником, за рахунок якого відбувається витягування кварцової трубки.

Сповільнено-пружна деформація частково обернена – при знятті навантаження відбувається спочатку миттєве (ділянка CD на рис. 2), а потім сповільнено-пружне скорочення трубки (ділянка DE), яке приводить її до нової сталої довжини.

Таким чином, на процес формування кварцової трубки із кварцового блока і її витягування впливають як сила в'язкості, так і сила пружності.

Базуючись на вище викладеному, виведено рівняння для подовження кварцової трубки:

$$\Delta L(p) = L \left[K_{\alpha} \cdot \alpha(T) \cdot \left(K_{\alpha u} + \frac{K_{\alpha u}}{T_{\alpha} p + 1} \right) A_L + \frac{K_{\eta}}{\eta(T)} \cdot B_L \frac{1}{p} \right],$$

де A_L – деяка функція, залежна від сили витягування, внутрішнього і зовнішнього радіусів трубки, коефіцієнта Пуассона, тиску в середині зони формування блок-трубка та ваги скломаси в цій зоні; B_L – деяка функція, залежна

від сили витягування, внутрішнього і зовнішнього радіусів трубки та ваги скломаси в зоні формування блок-трубка.

Аналогічно отримано рівняння для зміни радіуса трубки:

$$\Delta R(p) = R_B \left[K_\alpha \alpha(T) \left(K_{\alpha u} + \frac{K_{\alpha zu}}{T_\alpha p + 1} \right) \cdot A_r + \frac{K_\eta}{\eta(T)} \cdot B_r \cdot \frac{1}{p} \right],$$

де A_r – деяка функція, залежна від сили витягування, внутрішнього і зовнішнього радіусів трубки, коефіцієнта Пуассона, тиску в середині зони формування блок-трубка та ваги скломаси в цій зоні; B_r – деяка функція, залежна від сили витягування, внутрішнього і зовнішнього радіусів трубки, коефіцієнта поверхневого натягу розм'якшеної скломаси, тиску в середині зони формування блок-трубка та ваги скломаси в цій зоні.

Висновки. Для підсистемної реалізації автоматизованої системи керування нестаціонарним процесом виготовлення трубок із кварцового скла запропоновано ідею побудови моделі формування геометрії кварцової трубки на основі аналізу подовження кварцової нитки в режимі розм'якшення кварцової сировини та виявлено три складові такого подовження: миттєво-пружне, сповільнено-пружне та рівномірне подовження в'язкого витікання. Приведена побудова моделі забезпечує пряме адаптивне керування процесом формування геометрії кварцової трубки.

Список літератури: 1. *Галай В.М.* Високоточне ноніусне управління процесом скловитяжки в невизначених стаціонарних умовах / *В.М. Галай, А.М. Сільвестров, О.В. Шефер* // Матеріали 10-ї міжнародної конференції по автоматичному управлінню "Автоматика – 2003", м. Севастополь. В 3-х т. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2003. – Т. 1. – С. 124 – 125. 2. *Галай В.М.* Автоматизація технологічних процесів кварцового заводу: монографія / *В.М. Галай.* – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – 310 с. 3. *Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник.* В 3-х т. – Т. 3. *Методы современной теории автоматического управления;* под ред. *Н. Д. Егунова.* – М.: Изд-во МГТУ, 2000. – 748 с. 4. *Китайгородский И.И.* Технология стекла / под общ. ред. *И.И. Китайгородского.* – М.: изд. лит. по стр-ву, 1967. – 564 с. 5. *Ландау Л.Д.* Теоретическая физика: учеб. пособие. В 10 т. – Т. VI. Гидродинамика / *Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.* – 3-е изд., перераб. – М.: Наука, 1986. – 736 с. 6. *Мэтьюз Джон Г.* Численные методы. Использование MATLAB / *Г. Мэтьюз Джон, Д. Финк Куртин.* – 3-е изд. – М.: Вильямс, 2001. – 720 с.

Стаття представлена д.т.н., проф. НТУ України „КПІ” Сільвестровим А.М.

Надійшла до редакції 31.03.2010