

- [8] M. Peng et al., “Advanced image segmentation for precision agriculture using CNN-GAT fusion and fuzzy C-means clustering,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 226, art. 109431, Feb. 2024.
- [9] L. G. Divyanth, A. Ahmad, and D. Saraswat, “A two-stage deep-learning based segmentation model for crop disease quantification based on corn field imagery,” *Smart Agric. Technol.*, vol. 3, art. 100108, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.sat.2022.100108.
- [10] V. Kromkach, “The role of computer vision in the modern world: achievements, challenges, and prospects,” *Inf. Technol.: Comput. Sci., Softw. Eng. Cyber Secur.*, no. 2, pp. 79–87, Jun. 2024.

УДК:678.057.72(075.8):681.51

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ В ТЕРМОПЛАСТАВТОМАТІ

Башир Б.В., Стельмах Н.В.

Національний технічний університет

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: bbboris030602@gmail.com

Точне керування температурою в термопластавтоматах є критично важливим для забезпечення якості литих виробів, зокрема при роботі з такими матеріалами, як РА6 GF30. Недостатня або надлишкова потужність нагрівача може призвести до дефектів у виробах, а також до неефективного використання енергії. У сучасних умовах, коли енергоефективність та точність технологічних процесів набувають дедалі більшого значення, розробка адаптивних систем керування температурою є актуальним завданням.

Питання моделювання систем керування температурою в термопластавтоматах активно досліджуються. Наприклад, у роботах [1, 2] розглядаються підходи до використання PID-регуляторів для стабілізації температури, однак часто ігноруються обмеження потужності нагрівача. У [3] запропоновано методи оцінки тепловтрат, але вони не враховують затримки в системі. На відміну від цих підходів, наша робота фокусується на адаптації системи до обмежень потужності, що дозволяє моделювати реальні сценарії роботи обладнання.

Функціональна блок-схема (рис.1), створена в MATLAB Simulink, моделює систему керування температурою для термопластавтомата, призначеного для відливу куль із композитного матеріалу — поліаміду 6 зі скловолокном (РА6 GF30). Вона складається з трьох ідентичних підсистем, які представляють різні зони нагріву термопластавтомата, зокрема *Zone1_Heating*, *Zone2_Heating* і *Zone3_Heating*. Ці підсистеми імітують реальні зони обладнання, такі як зона подачі матеріалу, де сировина нагрівається перед пластифікацією, зона стиснення, де матеріал ущільнюється і готується до формування, та зона формування, де безпосередньо відбувається відлив куль. Система працює за принципом замкнутої петлі зворотного зв'язку, використовуючи PI-регулятор для стабілізації температури в кожній зоні на заданому рівні. Модель враховує реальні умови, такі як затримки в роботі датчиків, випадкові коливання

температури через зовнішні фактори, а також тепловтрати, що виникають через різницю між температурою системи та навколишнім середовищем[4].

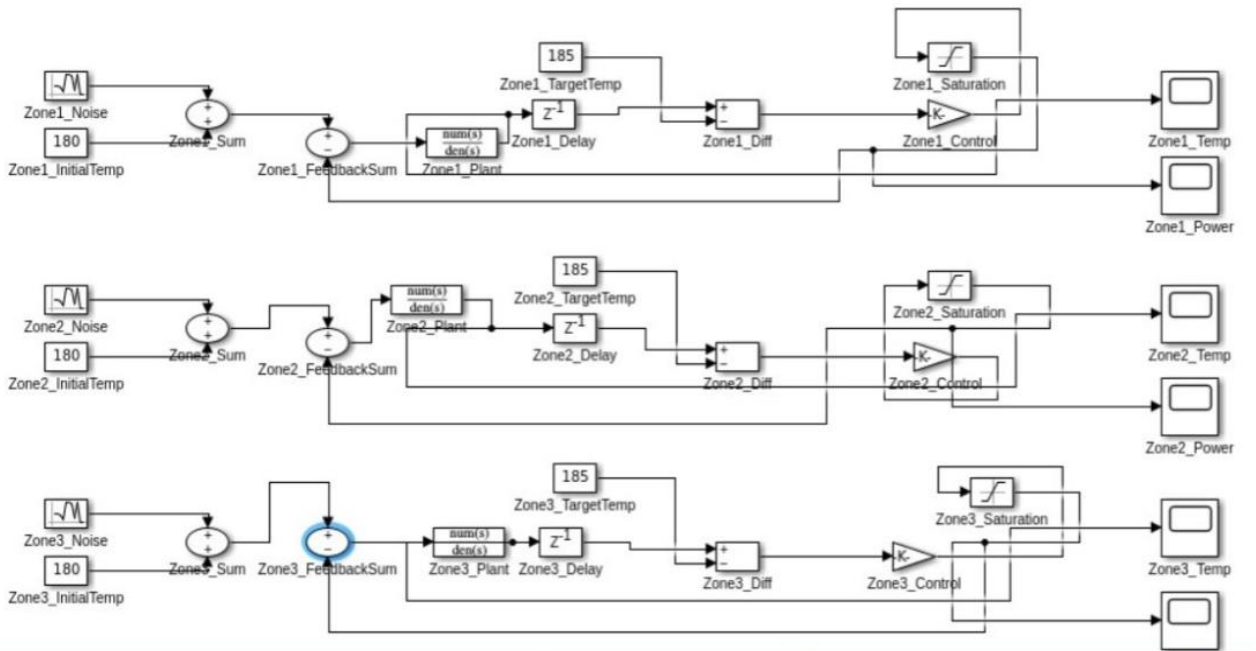


Рис. 1. Функціональна блок-схема системи керування температурою в термопластавтоматі

Кожна зона включає набір взаємопов'язаних компонентів, які виконують специфічні функції, моделюючи фізичні процеси, що відбуваються в реальному термопластавтоматі. Одним із ключових елементів є вихідні сигнали, які представляють результати симуляції. Блок *Zone1_Temp* у першій зоні, *Zone2_Temp* у другій і *Zone3_Temp* у третій відображають реальну температуру в градусах Цельсія для кожної зони. Ці значення генеруються після врахування всіх факторів, таких як нагрів, тепловтрати, шум і затримка, і є кінцевим результатом моделювання. Інший важливий вихідний сигнал — це потужність нагрівача, яка представлена блоками *Zone1_Power*, *Zone2_Power* і *Zone3_Power*. Ці блоки показують потужність у ватах, що подається на нагрівач у відповідній зоні, і є результатом роботи PI-регулятора, який коригує її на основі різниці між цільовою та реальною температурою.

Система починається з вхідних параметрів, які задають початкові умови для симуляції. Блоки *Zone1_InitialTemp*, *Zone2_InitialTemp* і *Zone3_InitialTemp* визначають початкову температуру для кожної зони. Ці початкові значення передаються в систему для ініціалізації процесу моделювання. Інший набір вхідних параметрів задається блоками *Zone1_TargetTemp*, *Zone2_TargetTemp* і *Zone3_TargetTemp*, які визначають цільову температуру для кожної зони. Ці цільові значення використовуються для порівняння з реальною температурою і обчислення помилки, яка є основою для роботи регулятора.

Для створення більш реалістичної моделі до системи додається шум, який генерується блоками *Zone1_Noise*, *Zone2_Noise* і *Zone3_Noise*. Ці блоки створюють випадкові коливання за нормальним розподілом з амплітудою 0.1,

що імітує вплив зовнішніх факторів, таких як перепади напруги в електромережі, неточність вимірювань датчиків температури чи коливання температури навколишнього середовища через вентиляцію в цеху. У реальному термопластавтоматі такі фактори можуть впливати на точність регулювання температури, тому їхнє включення в модель дозволяє перевірити стійкість системи до подібних перешкод. Шум додається до реальної температури в блоці Zone1_Sum для першої зони, Zone2_Sum для другої і Zone3_Sum для третьої, формуючи зворотний зв'язок, який враховує ці випадкові коливання. Це робить модель більш наближеною до реальних умов експлуатації, де ідеальні умови рідко досягаються.

Після додавання шуму реальна температура передається в блоки затримки Zone1_Delay, Zone2_Delay і Zone3_Delay, які імітують інерцію системи та датчиків. У нашій моделі затримка встановлена на 2 секунди, що означає, що для обчислень використовується значення температури, яке було актуальним 2 секунди тому. Це відображає реальну поведінку датчиків температури в термопластавтоматі, які не можуть миттєво зчитувати зміни через фізичні обмеження, а також інерцію самої системи. Затримана температура з цих блоків передається в блоки зворотного зв'язку Zone1_FeedbackSum, Zone2_FeedbackSum і Zone3_FeedbackSum, де вона коригується з урахуванням шуму, після чого використовується для порівняння з цільовою температурою.

Порівняння температур виконується в блоках Zone1_Diff, Zone2_Diff і Zone3_Diff, які обчислюють помилку як різницю між цільовою температурою, заданою блоками Zone1_TargetTemp, Zone2_TargetTemp і Zone3_TargetTemp, і затриманим значенням реальної температури. Ця помилка є ключовим сигналом для системи, оскільки саме на її основі регулятор приймає рішення про зміну потужності нагрівача. Помилка передається в блоки PI-регуляторів Zone1_Control, Zone2_Control і Zone3_Control, які обчислюють необхідну зміну потужності для мінімізації цієї різниці.

Теплова динаміка кожної зони моделюється блоками Zone1_Plant, Zone2_Plant і Zone3_Plant, які імітують фізичну поведінку реального термопластавтомата. Ці блоки приймають вхідний сигнал у вигляді потужності нагрівача і обчислюють зміну температури на основі диференціального рівняння першого порядку. Швидкість нагріву залежить від потужності нагрівача, яка в нашій моделі обмежена максимальним значенням 2500 Вт, і коефіцієнта чутливості нагрівача, який дорівнює 22, що означає, що при 100% потужності температура зростає зі швидкістю 22°C за секунду. Тепловтрати враховуються через часову сталу в 7 секунд і різницю між поточною температурою та температурою навколишнього середовища, яка встановлена на рівні 25°C.

PI-регулятори в блоках Zone1_Control, Zone2_Control і Zone3_Control обчислюють необхідну зміну потужності на основі пропорційної та інтегральної складових. Пропорційний коефіцієнт у нашій моделі дорівнює 1, що забезпечує помірну реакцію на поточну помилку, дозволяючи системі

швидко реагувати на відхилення температури, але уникаючи надмірного перерегулювання. Інтегральний коефіцієнт встановлений на рівні 0.04, що дозволяє поступово усувати залишкову помилку з часом, накопичуючи значення помилки та додаючи коригуючий вплив до вихідного сигналу. Зміна потужності, обчислена регулятором, передається в блоки `Zone1_Saturation`, `Zone2_Saturation` і `Zone3_Saturation`, які обмежують її в межах від 0% до 100%, що відповідає діапазону від 0 до 2500 Вт.

Обмежена потужність із блоків `Zone1_Saturation`, `Zone2_Saturation` і `Zone3_Saturation` повертається в блоки `Zone1_Plant`, `Zone2_Plant` і `Zone3_Plant`, формуючи замкнуту петлю зворотного зв'язку. Вона також передається в блоки `Zone1_Power`, `Zone2_Power` і `Zone3_Power` для аналізу та візуалізації.

Система працює як єдиний цикл, де температура моделюється з урахуванням нагріву, тепловтрат і шуму, проходить через затримку, порівнюється з цільовою, після чого PI-регулятор коригує потужність, і цей процес повторюється протягом усієї симуляції. Наявність трьох зон, таких як `Zone1_Heating`, `Zone2_Heating` і `Zone3_Heating`, дозволяє моделювати різні частини термопластавтомата, враховуючи їхні унікальні теплові характеристики.

Ознайомитись з результатами симуляції можна на рисунку 2.

Як видно з результатів, система досягає цільової температури при майже максимальній своїй потужності. Якщо знизити потужність нагрівача до 500 Вт, то результат симуляції (рис. 3) покаже, що цільова температура не досягнута.

Якщо збільшити потужність системи до 4000 Вт (рис. 4), то можна побачити досягнення цільової температури та використання потужності на рівні 2500 Вт.

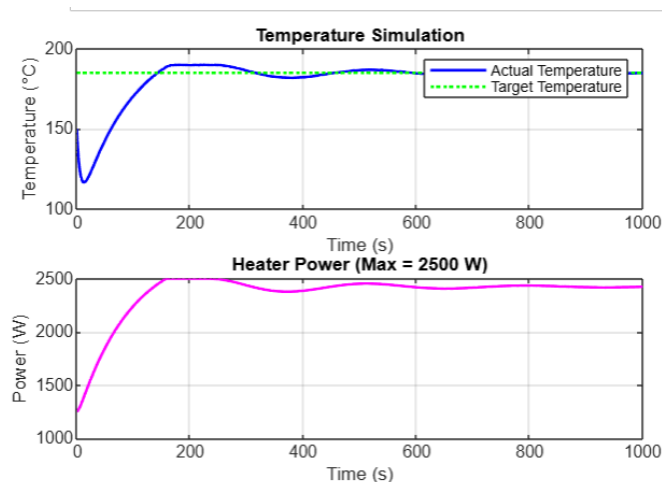


Рис 2. Результат роботи системи при необхідних умовах

Це все говорить про те, що система коректно реагує на зміни потужності. При використанні більш потужніших нагрівачів, система корегує їх потужність для досягнення необхідної температури.

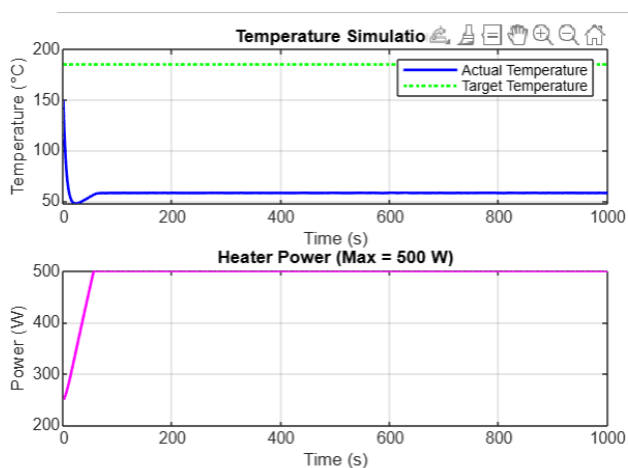


Рис 3. Результат роботи системи при зменшенні номінальної потужності

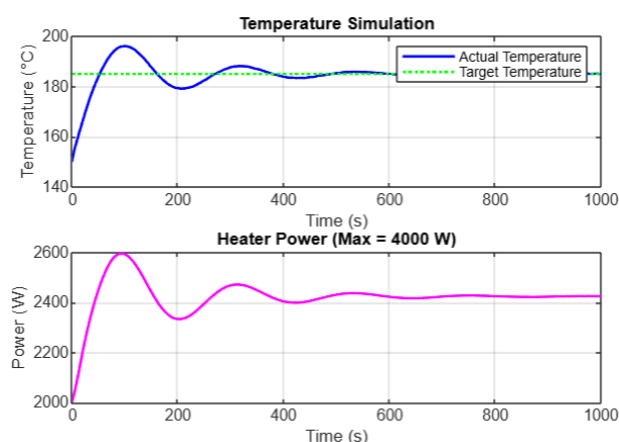


Рис 4. Результат роботи системи при збільшенні номінальної потужності

Висновки

Функціональна блок-схема системи керування температурою для термопластавтомата є детальною моделлю, яка включає всі ключові компоненти, такі як `Zone1_InitialTemp`, `Zone1_TargetTemp`, `Zone1_Noise`, `Zone1_Sum`, `Zone1_Delay`, `Zone1_FeedbackSum`, `Zone1_Diff`, `Zone1_Control`, `Zone1_Saturation`, `Zone1_Plant`, `Zone1_Temp` і `Zone1_Power` для першої зони, а також аналогічні блоки для `Zone2_Heating` і `Zone3_Heating`. Вона охоплює всі аспекти реальної системи, від моделювання теплової динаміки до врахування затримок і шуму, і дозволяє стабілізувати температуру на рівні, близькому до цільового, що є важливим для якісного лиття куль із PA6 GF30. Модель може бути основою для подальшого вдосконалення та практичного впровадження в реальний пристрій.

Ключові слова: термопластавтомат, температура, система керування температурою.

Література

- [1] Chen, Z., & Turng, L.-S. (2015). Control and Simulation of Temperature for Injection Molding Machines Based on PID Neural Networks. *Proceedings of the International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics*. Atlantis Press.

- [2] Huang, M.-S., & Lin, T.-Y. (2013). PID Control of Hybrid Injection Molding Machine Temperature. *Advanced Materials Research, Vols. 753-755*, 1234–1239. Scientific.Net.
- [3] Hu, H., Chen, F., Chen, X., Chu, Y., & Cheng, P. (2004). Effect of cooling water flow rates on local temperatures and heat transfer of casting dies. *Journal of Materials Processing Technology, 148*, 439–451. SpringerLink.
- [4] Башкір Б., & Стельмах Н. (2025). Моделювання процесу температурного регулювання для автоматичної ливарної машини. Measuring and computing devices in technological processes, (1), 337–342. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-42>

UDC681.5.01

DETERMINATION OF TRANSFER FUNCTION OF INDUSTRIAL FURNACE FOR DRYING REED TUBES

¹Ihor Mastenko, ¹Nataliia Stelmakh, ²Pawel Komada

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
Kyiv, Ukraine

²Lublin University of Technology, Lublin, Poland

E-mail: i.mastenko@kpi.ua, n.stelmakh@kpi.ua, p.komada@pollub.pl

One of the key tasks of modern production is to ensure the high quality of both products and processes. Quality is generally understood to mean the absence of various surface defects, such as cracks, holes, stains, and foreign inclusions, as well as the compliance of geometric shapes and colours with regulatory requirements. In addition, the absence of internal defects and compliance of physical and mechanical properties with established standards remain important indicators. At the same time, for the purposes of this study, product quality will be interpreted as the absence of surface defects and compliance of geometric parameters and surface condition with established standards [1].

The drying kiln plays a key role in ensuring the quality of the cane tubes after a number of technological operations. After cutting and cleaning, the tubes are fed into the kiln at ambient temperature, which is a thermal object with distributed parameters - the temperature at different points of the structure and working volume may differ [2].

Due to the lack of technical documentation with passport characteristics, determining the transfer function is necessary to create an effective temperature control system. This is part of building a mathematical model of the furnace, which allows us to study thermal transients.

To simplify the modelling, the furnace was considered as an object with concentrated parameters, since its dimensions are relatively small, the construction materials have high thermal conductivity, and the drying process is long [3,4]. These conditions contribute to the levelling of the temperature field. Due to the long length of the furnace, it could also be divided into two separate thermal objects, but it has been experimentally proven that it is sufficient to treat it as a single object.