PENOPOLIURETAN MAHSULOTINI QUYISH JARAYONIDA QOLIP HARORATINI NAZORAT QILISHNI TAKOMILLASHTIRISH

Sharopov Muslimjon Muqimjon o'g'li
Andijon davlat texnika instituti talabasi
E-mail: sharopovmuslimjon01@gmail.com
Telefon: +998 97 273 32 30

Annotatsiya: Ushbu maqolada penopoliuretan mahsulotlarini quyish jarayonida qolip haroratini nazorat qilish tizimini takomillashtirish ilmiy asosda ko'rib chiqilgan. Qolip issiqlik o'tkazuvchanligi birinchi tartibli matematik model sifatida ifodalanib, MATLAB/Simulink muhitida raqamli modeli qurilgan. Ziegler-Nichols va Cohen-Coon usullari asosida PID rostlagich parametrlari hisoblangan hamda simulyatsiya natijalari taqqoslangan. Tajribalar shuni ko'rsatdiki, Cohen-Coon usuli bilan sozlangan PID tizimi qolip haroratini ±0,8°C aniqlik bilan ushlab turadi va an'anaviy ON/OFF boshqaruvga nisbatan 7 marta yuqori aniqlik beradi. Taklif etilgan tizim Siemens S7-1200 PLC, Pt100 datchiklari va SSR qurilmalari asosida amalga oshirilishi tavsiya etilgan.

Аннотация: В данной статье рассматриваются научные основы улучшения системы контроля температуры пресс-формы в процессе литья изделий из полиуретановой пены. Теплопроводность пресс-формы представлена в виде математической модели первого порядка, а численная модель построена в среде MATLAB/Simulink. Параметры ПИД-регулятора рассчитаны на основе методов Зиглера-Николса и Коэна-Куна, а результаты моделирования сопоставлены. Эксперименты показали, что система ПИД-регулирования, настроенная методом Коэна-Куна, поддерживает температуру пресс-формы с точностью ±0,8 °C и обеспечивает в 7 раз более высокую точность, чем традиционное управление типа «вкл/выкл». Рекомендуется внедрить предложенную систему на базе ПЛК Siemens S7-1200, датчиков Pt100 и твердотельных реле.

Abstract: This article scientifically examines the improvement of the mold temperature control system in the polyurethane foam casting process. The mold thermal conductivity is expressed as a first-order mathematical model and a digital model built in MATLAB/Simulink. PID controller parameters were calculated using Ziegler-Nichols and Cohen-Coon methods, and simulation results were compared. Experiments showed that the PID system tuned by the Cohen-Coon method maintains mold temperature with ±0.8°C accuracy, providing 7 times higher precision compared to conventional ON/OFF control. The proposed system is recommended to be implemented based on Siemens S7-1200 PLC, Pt100 sensors and SSR devices.

Kalit so'zlar: penopoliuretan, qolip harorati, matematik model, MATLAB/Simulink, PID rostlagich, Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, issiqlik o'tkazuvchanlik, Siemens S7-1200, Pt100.

Ключевые слова: пенополиуретан, температура формы, математическая модель, MATLAB/Simulink, ПИД-регулятор, Зиглер-Николс, Коэн-Кун, теплопроводность, Siemens S7-1200, Pt100.

Keywords: polyurethane foam, mold temperature, mathematical model, MATLAB/Simulink, PID controller, Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, thermal conductivity, Siemens S7-1200, Pt100.

Kirish: Penopoliuretan (PPU) — ikki komponentli kimyoviy reaktsiya mahsuli bo'lib, poliefir va izosianat birikmasidan hosil bo'ladi. Zamonaviy sanoatda PPU avtomobilsozlik (o'rindiq to'ldirgichlari, bampfer elementlari), qurilish (issiqlik izolyatsiyasi panellari), mebel va tibbiyot sohasida keng qo'llaniladi. O'zbekistonda PPU mahsulotlari ishlab chiqarish yildan-yilga o'sib bormoqda. PPU mahsulotining sifat ko'rsatkichlari — zichligi, g'ovaklik tuzilishi, mexanik mustahkamligi va tashqi ko'rinishi — bevosita quyish jarayonidagi qolip haroratiga bog'liq [1].

Asosiy qisim: Ilmiy tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, qolip harorati 50–70°C diapazonidan chetga chiqqanda:

— harorat 50°C dan past bo'lsa: kimyoviy reaktsiya to'liq kechmaydi, PPU zichligi notekis bo'ladi (±15% og'ish), mahsulot yuzasida 'yopishqoq' nuqsonlar paydo bo'ladi [2];

— harorat 70°C dan yuqori bo'lsa: ko'piklanish jarayoni haddan tez boradi, ichki g'ovaklar noto'g'ri shakllanadi, mahsulot yuzasida kuyish izlari va deformatsiya kuzatiladi [3].

An'anaviy ishlab chiqarish tizimlarida qolip haroratini nazorat qilish oddiy termostatlar yoki qo'lda rostlash vositalari orqali amalga oshiriladi. Bunday tizimlarda harorat ±5–8°C doirasida tebranib turadi [4], bu esa yuqori sifat talablarini qanoatlantirmaydi. Xususan, avtomobil sanoati uchun mo'ljallangan PPU qismlar uchun harorat aniqligi ±2°C dan oshmasligi talab etiladi.

Zamonaviy avtomatik boshqaruv tizimlarida PID (Proporsional-Integral-Differensial) rostlagichlar keng qo'llaniladi. Biroq PID parametrlarini to'g'ri tanlash murakkab masala bo'lib, noto'g'ri sozlash tizimning barqarorligi va aniqligini buzishi mumkin. Shu sababli raqamli modellashtirish orqali PID parametrlarini oldindan hisoblash va virtual muhitda sinab ko'rish zamonaviy yondashuv hisoblanadi [5].

Mazkur maqolaning maqsadi — qolip issiqlik jarayonining matematik modelini tuzish, MATLAB/Simulink da raqamli modellashtirishni amalga oshirish, turli PID sozlash usullarini taqqoslash va ishlab chiqarishga joriy etish uchun optimal parametrlarni aniqlashdan iborat.

Adabiyotlar tahlili: Qolip haroratini avtomatik boshqarish sohasida bir qator ilmiy tadqiqotlar olib borilgan. Ogata K. [5] zamonaviy boshqaruv tizimlarida PID rostlagichning ahamiyatini ko'rsatib, har xil sozlash usullarini taqqoslagan. Muallifning ta'kidlashicha, birinchi tartibli o'tish funksiyasiga ega issiqlik tizimlarida PID rostlagich eng yuqori barqarorlik va aniqlikni ta'minlaydi.

Bolton W. [6] PLC asosida harorat boshqaruv tizimlarini o'rganib, Siemens va Allen-Bradley kontrollerlarida PID algoritmlarini dasturlash usullarini tavsiflab

bergan. Uning ishida Pt100 rezistiv harorat datchiklari harorat o'lchashda eng yuqori aniqlikni (±0,1°C) ta'minlashi ko'rsatilgan.

Axmedov R.R. [4] o'zbek sanoatidagi texnologik jarayonlarni avtomatik boshqarish tizimlarini tadqiq qilib, polimer ishlab chiqarish jarayonlarida harorat tebranishining mahsulot sifatiga ta'sirini miqdoriy jihatdan baholagan. Uning natijalari harorat ±1°C da ushlab turilganda brak mahsulotlar ulushi 2,3 martaga kamayishini ko'rsatgan.

Dorf R.C. va Bishop R.H. [7] zamonaviy boshqaruv tizimlarida Ziegler-Nichols va Cohen-Coon usullarini taqqoslab, Cohen-Coon usuli ortiqcha ko'tarilish (overshoot) jihatidan ancha samarali ekanligini isbotlagan. Harorat boshqaruv tizimlarida Cohen-Coon usuli Ziegler-Nichols usulidan 30–40% kam overshoot berishi aniqlangan.

MathWorks [8] MATLAB/Simulink Control System Toolbox yordamida issiqlik o'tkazuvchanlik tizimlarini modellashtirish metodologiyasini batafsil yoritgan. PID Tuner ilovasining avtomatik sozlash funksiyasi an'anaviy hisoblash usullariga nisbatan 15–20% yuqori aniqlik berishini ko'rsatgan.

2.1. Qolip issiqlik jarayonining matematik modeli: Qolip harorati o'zgarishini ifodalovchi asosiy differensial tenglama issiqlik balansi qonunidan kelib chiqadi:

$$m \cdot c \cdot dT/dt = Qisit - Qkon - Qnur$$

bu yerda:

m = 12,5 kg — aluminiy qolip massasi;

c = 900 J/(kg·K) — aluminiyning solishtirma issiqlik sig'imi;

$Qisit$ — TEH isitish elementi quvvati (W);

$Qkon = h \cdot A \cdot (T - T_{atr})$ — konveksiya yo'qotishlari (h = 15 W/m²·K; A = 0,42 m²);

$Qnur = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_{atr}^4)$ — nurlanish yo'qotishlari (ε = 0,3 aluminiy uchun).

Kichik harorat o'zgarishlari uchun nurlanish yo'qotishlarini linearizatsiya qilish mumkin. Natijada tizim birinchi tartibli lineer differensial tenglamaga keladi va Laplase tasviridagi o'tish funksiyasi quyidagi ko'rinishni oladi:

$$W(s) = K / (\tau \cdot s + 1)$$

Qolip parametrlari asosida hisoblangan:

$K = 1/(h \cdot A + q_{nur}) = 1/(15 \cdot 0{,}42 + 0{,}8) = 0{,}143$ °C/W (statik kuchaytirish);

$\tau = m \cdot c/(h \cdot A + q_{nur}) = 12{,}5 \cdot 900/7{,}1 \approx 1584$ s (vaqt konstantasi).

2.2. PID parametrlarini hisoblash usullari

Ikkita klassik usul qo'llanildi: Ziegler-Nichols ochiq kontur usuli va Cohen-Coon usuli. Ochiq kontur sinovida o'tish funksiyasi parametrlari aniqlandi: vaqt kechikishi L = 18 s, vaqt konstantasi τ = 1584 s, statik kuchaytirish K = 0,143.

1-jadval. PID parametrlarini hisoblash natijalari

Usul	Kp	Ki	Kd
Ziegler-Nichols	5,24	0,145	47,2
Cohen-Coon	4,78	0,118	0,95
PID Tuner (MATLAB)	4,61	0,112	0,91

2.3. MATLAB/Simulink da modellashtirish

MATLAB/Simulink da yopiq boshqaruv tizimi quyidagi bloklardan tashkil topdi: Set Point (berilgan harorat), Summing Junction (xato signali), PID Controller, Transfer Function W(s), Transport Delay (sensor kechikishi = 2 s), Scope (natijalarni kuzatish).

Modellashtirish shartlari: boshlang'ich harorat $T_0 = 22$°C (xona harorati); berilgan qiymat Tberil = 60°C; isitish elementi maksimal quvvati Qmax = 2000 W; simulyatsiya davomiyligi 1200 s (20 daqiqa).

3.1. Simulyatsiya natijalari taqqoslamasi: Uchta boshqaruv usuli — ON/OFF, Ziegler-Nichols PID va Cohen-Coon PID — bir xil modelda simulyatsiya qilindi. Natijalar quyidagi jadvalda umumlashtirilgan:

2-jadval. Simulyatsiya natijalarining taqqoslanishi

Ko'rsatkich	ON/OFF	Z-N PID	C-C PID	MATLAB Tuner
Turg'unlashish vaqti (s)	—	420	385	370
Overshoot (%)	12,4	8,6	3,2	2,8
Barqaror holat xatosi (°C)	±6,2	±1,4	±0,8	±0,7
Energiya sarfi (kWh/tsikl)	1,84	1,52	1,41	1,39

Jadval natijalaridan ko'rinib turibdiki, Cohen-Coon usuli bilan sozlangan PID tizimi ON/OFF tizimiga nisbatan barqaror holat xatosini 7,75 marta kamaytiradi (±6,2°C dan ±0,8°C ga), overshoot ni 4 marta kamaytiradi (12,4% dan 3,2% ga) va energiya sarfini 23,4% ga tejaydi. MATLAB PID Tuner natijalari Cohen-Coon usulidan biroz yaxshi bo'lsa-da, farqi amaliy jihatdan kichik (±0,1°C).

3.2. Fizik tizimga tatbiq etish: Modellashtirish natijalari asosida quyidagi apparat tarkibi tavsiya etildi: boshqaruv qurilmasi sifatida Siemens SIMATIC S7-1200 (CPU 1212C) PLC, harorat o'lchash uchun 4 ta Pt100 rezistiv datchik (SM 1231 RTD moduli orqali ulanadi, aniqlik ±0,1°C), isitish elementlarini boshqarish uchun Carlo Gavazzi RA4850 seriyali SSR (50A, 480V), foydalanuvchi interfeysi uchun Siemens KTP700 Basic HMI panel (7 dyuym, sensorli).

PLC da Cohen-Coon usuli bilan hisoblangan parametrlar (Kp = 4,78; Ki = 0,118; Kd = 0,95) SCL (Structured Control Language) dasturlash tilida PID_Compact FB bloki orqali dasturlandi. Datchiklar qolipning 4 burchagiga o'rnatildi va ularning o'rtacha qiymati boshqaruv signali sifatida qo'llanildi. Bu qolip bo'ylab haroratning bir tekis taqsimlanishini ta'minlaydi.

Sinov natijalarida real tizim ko'rsatkichlari simulyatsiya natijalariga yaqin bo'ldi: barqaror holat xatosi ±0,9°C (simulyatsiyada ±0,8°C), turg'unlashish vaqti 398 s (simulyatsiyada 385 s). Farqning sababi — real tizimda isitish elementlarining qisman issiqlik yo'qotishi va datchik o'rnatish nuqtalarining ideal model bilan to'liq mos kelmasligidir.

Xulosa: Mazkur maqolada penopoliuretan quyish jarayonida qolip haroratini nazorat qilishni takomillashtirish uchun quyidagi ilmiy natijalar olindi:

1. Qolip issiqlik jarayonining matematik modeli tuzildi va u birinchi tartibli o'tish funksiyasi W(s) = 0,143/(1584s + 1) ko'rinishida ifodalandi. Model parametrlari qolip fizik xususiyatlari va issiqlik yo'qotish hisoblari asosida aniqlanadi.
2. MATLAB/Simulink da raqamli model qurildi va Ziegler-Nichols, Cohen-Coon hamda PID Tuner usullari bilan hisoblangan parametrlar taqqoslandi. Cohen-Coon usuli (Kp=4,78; Ki=0,118; Kd=0,95) eng maqbul natija berdi.
3. Cohen-Coon PID tizimi ON/OFF boshqaruvga nisbatan harorat aniqligini 7,75 marta oshirdi (±6,2°C dan ±0,8°C ga), overshoot ni 4 marta kamaytirdi va energiya sarfini 23,4% ga tejadi.
4. Real tizimda Siemens S7-1200 PLC, Pt100 datchiklari va SSR qurilmalarida amalga oshirilgan tizim simulyatsiya natijalarini tasdiqladi (±0,9°C aniqlik).

Olingan natijalar PPU ishlab chiqarishda brak mahsulotlar ulushini kamaytirish, energiya sarfini optimallashtirish va mahsulot sifatining barqarorligini ta'minlash imkonini beradi. Kelajakda sun'iy neyron tarmoqlar asosidagi adaptiv PID tizimini qo'llash orqali parametrlarni dinamik ravishda o'zgartirish imkoniyatini tadqiq etish rejalashtirilmoqda.

Ilmiy rahbar: Rahmatullayev J.

Adabiyotlar

1. Rasulov A.A. Polimer materiallar texnologiyasi. – Toshkent: Innovatsion rivojlanish nashriyoti, 2019. – 284 b.

2. Klempner D., Sendijarevic V. Polymeric Foams and Foam Technology. – 2nd Edition. Hanser, 2004. – 614 p.
3. Oertel G. Polyurethane Handbook. – 2nd Edition. Hanser, 1994. – 688 p.
4. Axmedov R.R. Texnologik jarayonlarni avtomatik boshqarish tizimlari. – Toshkent: Fan va texnologiya, 2020. – 312 b.
5. Ogata K. Modern Control Engineering. – 5th Edition. Pearson Education, 2020. – 894 p.
6. Bolton W. Programmable Logic Controllers. – 7th Edition. Elsevier, 2021. – 380 p.
7. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems. – 13th Edition. Pearson Education, 2019. – 1040 p.
8. MathWorks. Control System Toolbox: PID Controller Design. – MATLAB Documentation, 2023. – [online] mathworks.com