

Návrh štruktúry a parametrov optimálne riadiaceho člena pre programovú reguláciu vákuového chladenia chleba

JÁN DANKO

Súhrn. Získaný kvázioptimálny priebeh zmeny absolútneho tlaku na chladenie jednokilogramového slovenského výberového chleba vo vákuovej komore, navrhnutá štruktúra a vypočítané nastaviteľné parametre optimálne riadiaceho člena — PI regulátora — sa využili pri programovej regulácii chladenia chleba na prevádzkovom zariadení, ktoré bolo navrhnuté a realizované vo VÚP v Bratislave a overené v Pekárňach v Dunajskej Strede.

Prevádzkové zariadenie je dvojkomorové. Počas vákuového chladenia v jednej komore sa druhá komora súčasne vyprázdňuje a naplňa novou násadkou. Jedna násadka obsahuje 100 kusov jednokilogramových chlebov. Zariadenie umožňuje ochladiť objem násadky za 5 min na 30 °C (v strede chleba) bez porušenia štruktúry chleba.

Tradičná výroba chleba, ktorá značne využívala manuálnu prácu, už ustúpila modernej strojovej výrobe. Nároky na zvýšenie trvanlivosti chleba si vyžiadali zavedenie ďalšej strojovej manipulácie, a to balenie chleba, ktoré je však podmienené jeho rýchlym vychladením, pokiaľ možno bez prerušenia práce na výrobných linkách. Tejto podmienke vyhovuje práve zariadenie priebežnej vákuovej komory do výrobnjej linky.

Na vývoji a výskume novej pekárskej linky pre balený chlieb v ČSSR, ktorý sa uskutočňuje vo VÚP v Bratislave, zúčastňuje sa aj Katedra automatizácie a regulácie ČHTF SVŠT, najmä pri riešení štruktúry a parametrov optimálneho riadiaceho člena pre programovanú reguláciu vákuového chladenia chleba.

Našou úlohou bolo navrhnúť vhodné prístroje a zariadenia, pretože ak je známy kvázioptimálny priebeh zmeny vákua, potrebný na vychladenie daného typu chleba (v našom prípade to bol 1 kg slovenský výberový chlieb), potom

je vhodné využiť prístroje meracej a regulačnej techniky na zabezpečenie daného priebehu zmeny vákua.

Identifikácia dynamických vlastností vákuovej komory

Na zjednodušenie výpočtov a experimentálnych meraní zaradíme dynamické vlastnosti regulačného ventilu a vysielače tlakovej diferencie k dynamickým vlastnostiam vákuovej komory (s náplňou 2 ks 1 kg chlebov) a tento blok pokladáme za riadenú sústavu. Blokovú schému celého experimentálneho zariadenia z hľadiska meracej a regulačnej techniky uvádza obr. 1.

Dynamické vlastnosti riadenej sústavy získame takto: Pomocou ručného relé (pri odpojení p_v z regulátora) skokom otvoríme regulačný ventil medzi vývevou a vákuovou komorou. Vysielač tlakovej diferencie (VTD) pretransformuje zmenu vákua vo vákuovej komore (v rozsahu od atmosferického tlaku do 2 kPa absolútneho tlaku) na zmenu pretlaku p_m v rozsahu $20 \div \div \sim 100$ kPa. Priebeh zmeny tlaku p_m , ktorý je vstupným signálom regulátora programového zariadenia, registruje pneumatický zapisovač tlaku. (VTD analogicky pretransformuje aj vstupný absolútny tlak riadenej sústavy na pretlak p_0 .) Nameraná časová závislosť zmeny tlaku p_m v riadenej sústave pri skokovej zmene vstupného signálu p_0 (prechodová charakteristika) nám jednoznačne určuje dynamické vlastnosti riadenej sústavy.

Jednu z nameraných prechodových charakteristík uvádza obr. 2.

Pretože namerané prechodové charakteristiky nemajú inflexný bod, a aj dopravné oneskorenie je zanedbateľné (v porovnaní s časovou konštantou T) identifikáciu môžeme podstatne zjednodušiť a riadenú sústavu pokladať za sústavu I. rádu opísanú diferenciálnou rovnicou

$$Tp'_m + p_m = Zp_0, \quad (1)$$

kde T je časová konštanta sústavy [min], Z — zosilnenie sústavy, $Z = = p_m(\infty)/p_0(\infty)$, p_0 — vstupný signál (tlak pred regulačným ventilom) [kPa], p_m — výstupný signál (tlak vo vákuovej komore) [kPa].

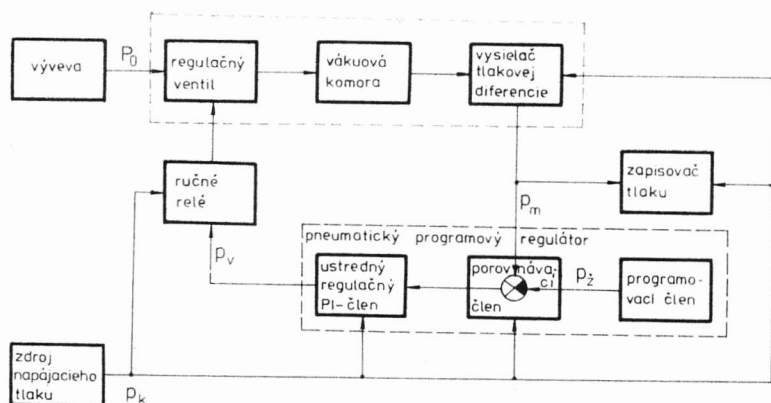
Spôsob určenia časovej konštanty T a zosilnenie sústavy Z je zrejmý z obrázku 2.

Prenos riadenej sústavy $F_s(p)$ získame Laplaceovou transformáciou diferenciálnej rovnice (1)

$$F_s(p) = \frac{P_m(p)}{P_0(p)} = \frac{Z}{Tp + 1}, \quad (2)$$

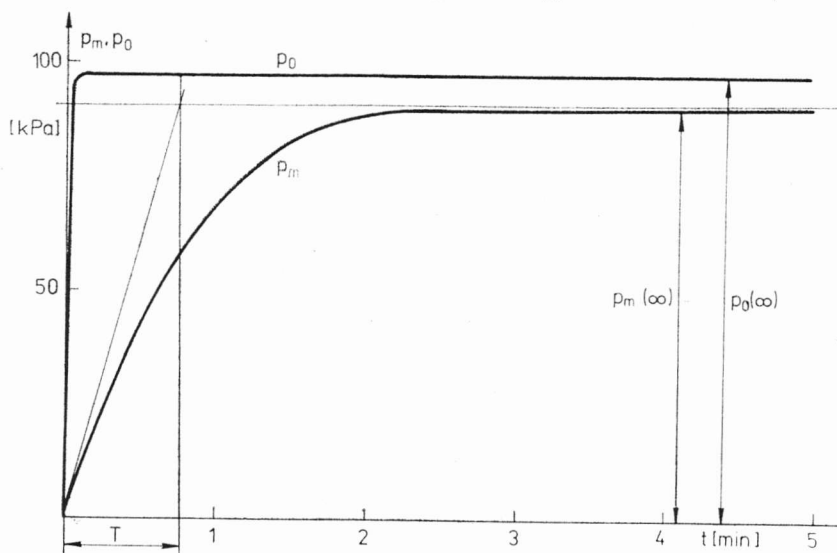
kde p je Laplaceov operátor [min^{-1}], $P_m(p)$ a $P_0(p)$ sú obrazy výstupnej a vstupnej veličiny.

Po dosadení stredných hodnôt parametrov sústavy T a Z do vzťahu (2) získame prenos riadenej sústavy v tvare



Obr. 1. Bloková schéma experimentálneho zariadenia z hľadiska meracej a regulačnej techniky.

Fig. 1. A block diagram of experimental equipment from the standpoint of measuring and regulating technology.



Obr. 2. Prechodová charakteristika riadenej sústavy. p_0 — vstupná veličina. p_m — výstupná veličina.

Fig. 2. A contact characteristic of control system. p_0 — input, p_m — output.

$$F_s(p) = \frac{0,94}{0,71 \cdot p + 1} \quad (3)$$

Stredné hodnoty zosilnenia Z a časovej konštanty T sa získali ako aritmetický priemer z hodnôt získaných pri 4 opakovaných meraniach prechodových charakteristík, uvedených v tabuľke 1.

Tabuľka 1

Meranie č. ⁽¹⁾	T	Z
1	0,667	0,916
2	0,792	0,935
3	0,725	0,941
4	0,650	0,955
$\bar{\varnothing}$	0,71	0,94

Table 1

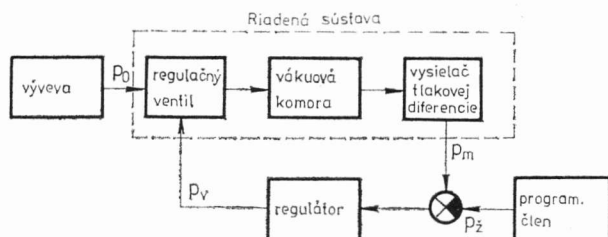
T — časová konštanta, Z — priemerná hodnota zosilnenia.⁽²⁾

⁽¹⁾Measurement No., ⁽²⁾ T — time constant, Z — average value of intensification.

Prevádzkové zariadenie bude mať zrejme iné dynamické vlastnosti, preto bude potrebné urobiť identifikáciu a získané parametre sústavy dosadiť do uvedených vzťahov.

Požadovaný priebeh zmeny tlaku vo vákuovej komore, ktorý je z hľadiska kvality chladenia daného typu chleba kvázioptimálny, môže zabezpečiť programová regulácia tlaku vo vákuovej komore.

Programová regulácia je v podstate regulácia na nulovú regulačnú odchýlku v ustálenom stave, iba s tým rozdielom, že riadiaca veličina nie je konštantná, ale sa mení v závislosti od času podľa zadaného programu. Takýto regulačný obvod schematicky znázorňuje obrázok 3.



Obr. 3. Bloková schéma uzatvoreného regulačného obvodu.
Fig. 3. A block diagram of a closed automatic control system.

Na programovú reguláciu vákua sa použil pneumatický programový regulátor typ č. 06865, vyrábaný v ZPA Praha-Jinonice. V bloku programového nastavenia žiadanej hodnoty bol pôvodný motorček vymenený za elektrický motorček typ B-601 s rýchlostnou prevodovkou. Po tejto úprave jedna otáčka programovej vačky trvá 6 min. Profil programovej vačky je taký, že žiadaná hodnota p_z regulátora sa mení tak, aby výstupný signál regulátora p_v menil tlak vo vákuovej komore podľa kvázioptimálnej závislosti danej vzťahom

$$P_m = 4t^2 - 40t + 100, \quad (4)$$

kde P_m je absolútny tlak vo vákuovej komore [kPa], t — čas, nezávisle premenná [min].

Výpočet štruktúry optimálne riadiaceho člena — regulátora

Štruktúru optimálne riadiaceho člena budeme hľadať z hľadiska požiadavky na kvalitu regulačného procesu.

Najnepriaznivejšou poruchou pri riadení sústav je zmena riadiacej veličiny. Budeme teda predpokladať skokovú zmenu riadiacej veličiny p_z v čase $t = 0$ z hodnoty $p_z = 0$ na hodnotu $p_z = p_{z1} = \text{konšt.}$ Cieľom riadenia je dostať objekt zo stavu $p_m = 0$ v čase $t = 0$ do stavu $p_m = p_{z1}$ v čase $t = t_1$.

Vo všeobecnom prípade riadenú sústavu opisuje prenosová funkcia

$$F_S(p) = \frac{P_m(p)}{P_v(p)} = \frac{Z e^{-pT_d}}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0} \quad (5)$$

kde p je Laplaceov operátor [min^{-1}], T_d — dopravné oneskorenie [min], Z — zosilnenie sústavy, n — rad sústavy, a_i — konštanty.

Ako kritérium kvality regulačného procesu budeme pokladať minimum funkcionálu

$$I = \int_{T_d}^{\infty} f dt = \int_{T_d}^{\infty} [(p_z - p_m)^2 + A^2 p_m'^2] dt. \quad (6)$$

Koeficient A je tzv. hmotnostný koeficient, ktorý rešpektuje obmedzené (konštrukčné) vlastnosti regulátora a jeho hodnota sa volí podľa požiadavky na priebeh prechodového javu.

V prípadoch, keď riadená sústava obsahuje dopravné oneskorenie T_d , dolná hranica integrálu je T_d .

Počiatočná podmienka pre $p_m(t)$ je $p_m(T_d) = 0$, koncová podmienka je $p_m(\infty) = p_{z1}$.

Potrebuje nájsť takú štruktúru riadiaceho člena, ktorý bude riadiť priebeh veličiny $p_m(t)$ tak, aby bolo zabezpečené minimum funkcionálu (6).

Štruktúru riadiaceho člena, ktorého prenos $F_R(p)$ je určený pomerom obrazov výstupnej (riadiacej) veličiny $P_v(p)$ a vstupnej veličiny (regulačnej odchýlky) $P_z(p) - P_m(p)$, zatiaľ nepoznáme

$$F_R(p) = \frac{P_v(p)}{P_z(p) - P_m(p)}. \quad (7)$$

Pretože na riadenú i na riadiacu veličinu existujú ohraničenia, musíme vo vzťahu (6) namiesto funkcie f použiť Hamiltonovu funkciu H [4]

$$H = f + \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \cdot a_i, \quad (8)$$

kde $\lambda_i(t)$ sú Lagrangeove koeficienty

$$H = (p_z - p_m)^2 + A^2 p_m'^2 + \lambda[a_n p_m^{(n)} + a_{n-1} p_m^{(n-1)} + \dots + a_0 - Z p_v(t - T_d)]. \quad (9)$$

Minimum funkcionálu (6) získame riešením Eulerových rovníc, ktoré pre funkcionál tvaru

$$I = \int_{t_0}^{t_1} H(p_z, p_m, p'_m, \dots, p_m^{(n)}, p'_v, p_{\check{c}}) dt \quad (10)$$

sú

$$\frac{\partial H}{\partial p_m} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial H}{\partial p'_m} \right) + \dots + (-1)^n \frac{d^n}{dt^n} \left(\frac{\partial H}{\partial p_m^{(n)}} \right) = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial H}{\partial p_v} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial H}{\partial p'_v} \right) = 0. \quad (12)$$

Na vyriešenie danej úlohy potrebujeme vypočítať derivácie funkcie H podľa premenných $p_m, p'_m, \dots, p_m^{(n)}, p_v, p'_v$

$$\frac{\partial H}{\partial p_m} = 2(p_z - p_m) + \lambda a_0, \quad (13)$$

$$\frac{\partial H}{\partial p'_m} = 2A^2 p'_m + \lambda a_1, \quad (14)$$

.

.

.

$$\frac{\partial H}{\partial p_m^{(n)}} = \lambda a_n, \quad (15)$$

$$\frac{\partial H}{\partial p_v} = \lambda Z, \quad (16)$$

$$\frac{\partial H}{\partial p'_v} = 0. \quad (17)$$

Z rovníc (12), (16) a (17) vyplýva, že $\lambda = 0$. Dosadením rovníc (13), (14) a (15) do vzťahu (11) dostaneme Eulerovu rovnicu v tvare

$$2p_m - 2A^2 p'_m - 2p_z = 0. \quad (18)$$

Riešením rovnice (18) pri uvedených podmienkach ($p_m(T_d) = 0$, a $p_m(\infty) = p_{z1}$) je vzťah

$$p_m(t) = p_{z1} \left(1 - e^{-\frac{t-T_d}{A}} \right), \text{ pre } t > T_d, \quad (19)$$

$$p_m(t) = 0, \text{ pre } 0 \leq t \leq T_d.$$

Laplaceova transformácia rovnice (19) je

$$P_m(p) = P_{z1}(p) \frac{e^{-pT_d}}{p(Ap + 1)}. \quad (20)$$

Pomocou rovníc (5) a (20) môžeme určiť Laplaceov obraz výstupnej veličiny $P_v(p)$ riadiaceho člena

$$P_v(p) = \frac{P_{z1}(p) (a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0)}{Zp(Ap + 1)}. \quad (21)$$

Laplaceov obraz vstupnej veličiny $P_z(p) - P_m(p)$ riadiaceho člena je

$$P_z(p) - P_m(p) = \frac{P_{z1}(p) (Ap + 1 - e^{-pT_d})}{p(Ap + 1)} \quad (22)$$

Dosadením vzťahov (21) a (22) do rovnice (7) získame prenos optimálne riadiaceho člena

$$F_R(p) = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0}{Z(Ap + 1 - e^{-pT_d})}. \quad (23)$$

Po dosadení identifikovaných parametrov sústavy $n = 1$, $T_d = 0$, $a_1 = T$, $a_0 = 1$, štruktúra optimálne riadiaceho člena má prenos

$$F_R(p) = \frac{T}{ZA} + \frac{1}{ZAp}. \quad (24)$$

Je to prenos ideálneho (bez interakcie) PI regulátora s nastaviteľnými parametrami: zosilnením r_0 a integračnou časovou konštantou T_i ;

$$r_0 = \frac{T}{ZA}, \quad T_i = ZA. \quad (25)$$

Optimálne hodnoty nastaviteľných parametrov regulátora závisia od voľby hodnoty hmotnostného koeficientu A . Rozsah nastaviteľnosti A závisí aj od rozsahu nastaviteľnosti (od konštrukčných vlastností použitého regulátora) parametrov r_0 a T_i . Pre PI regulátor, ktorý je zabudovaný v pneumatickom programovom regulátore typ č. 06865, je rozsah nastaviteľnosti

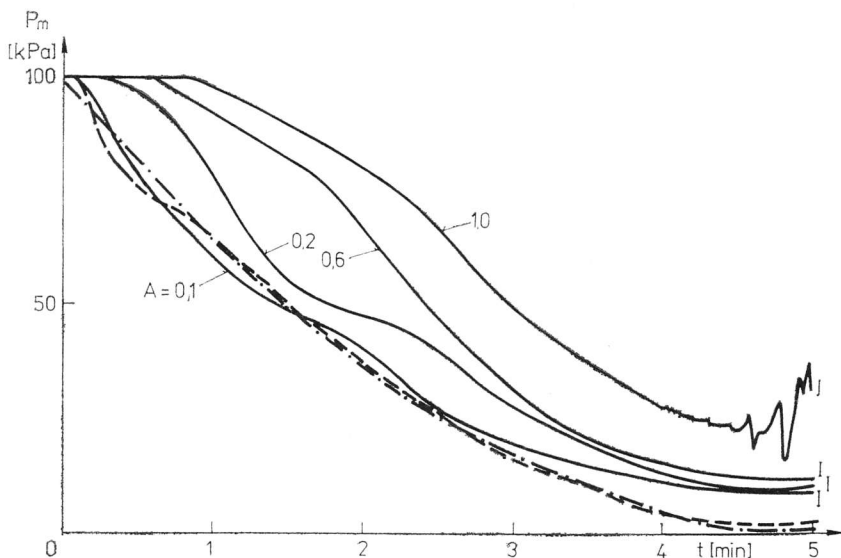
$$\left. \begin{array}{l} r_0 \doteq 0,7 + 50 \\ T_i \doteq 0,1 + 20 \text{ min} \end{array} \right\} A \doteq 0,1 + 1.$$

Optimálne hodnoty nastaviteľných parametrov PI regulátora pre šesť zvolených hodnôt hmotnostného koeficientu A z uvedeného intervalu uvádza tabuľka 2.

Tabuľka 2

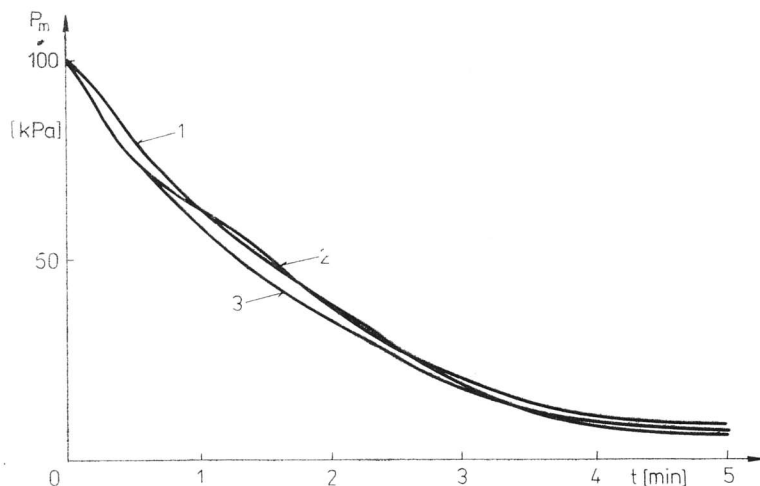
Table 2

A	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
pp [%]	13	26	53	80	106	135
r_0	7,57	3,78	1,9	1,26	0,95	0,76
T_i [min]	0,1	0,19	0,37	0,56	0,75	0,94



Obr. 4. Časové závislosti zmeny absolútneho tlaku vo vákuovej komore pre rôzne hodnoty váhového koeficientu A pri programovej regulácii. - - - - - priebeh zmeny absolútneho tlaku P_z , - - - - - požadovaný priebeh zmeny tlaku P_z podľa vzťahu (4).

Fig. 4. Time dependences of the change of absolute pressure in a vacuum chamber for different values of balance coefficient A at a time-pattern control. - - - - - the course of the change of absolute pressure P_z , - - - - - the required course of the change of pressure P_z according to the relationship (4).



Obr. 5. Priebeh zmeny absolútneho tlaku vo vákuovej komore pre rôzne hmotnostné násadky chleba. 1 — jeden 1,5 kg chlieb, 2 — jeden 2 kg chlieb, 3 — dva 1 kg chleby.

Fig. 5. The course of the change of absolute pressure in vacuum chamber for different mass charges of bread. 1 — one 1.5-kg bread, 2 — one 2-kg bread, 3 — two 1-kg breads.

Namerané časové závislosti zmeny absolútneho tlaku vo vákuovej komore pre rozličné hodnoty A sú na obrázku 4.

Vzhľadom na to, že použitý typ regulačného ventilu neumožňoval zväčšovať absolútny tlak, iba ho udržiavať na konštantnej hodnote (pri úplnom uzatvorení sedla regulačného ventilu) alebo ho znižovať (pri pootvorení sedla ventilu), bolo nevyhnutné voliť čo najnižšiu hodnotu hmotnostného koeficientu A , pretože so zväčšovaním A sa neúmerne zväčšovala regulačná plocha P a klesala stabilita. (Regulačná plocha P je rozdiel plôch medzi závislosťou danou vzťahom (4) a plochou vymedzenou danou časovou závislosťou pre zvolený hmotnostný koeficient A). Napríklad pre $A = 0,1$, $P = 23 \text{ kPa} \cdot \text{min}^{-1}$; pre $A = 0,8$, $P = 142 \text{ kPa} \cdot \text{min}^{-1}$ a pre $A = 1$, $P = 220 \text{ kPa} \cdot \text{min}^{-1}$ (plocha P sa určovala planimetrom).

Závislosť priebehu zmeny absolútneho tlaku, ako aj minimálna dosiahnutá hodnota vo vákuovej komore závisí od voľného (nevyužitého) priestoru komory. Na obrázku 5 sú namerané priebehy zmien absolútneho tlaku vo vákuovej komore pre $A = 0,1$ pre rozličné hmotnostné násadky. Krivka 1 je nameraná s násadkou jedného 1,5 kg chleba, 2 — s jedným 2 kg chlebom, 3 — s dvoma 1 kg chlebmi. (Uvedené vzťahy boli namerané na laboratórnom modeli chladiaceho zariadenia s vývevou Laboport NV 770.3.18 (NSR) a vákuovou komorou s efektívnym objemom $0,012 \text{ m}^3$.)

Literatúra

1. DANKO, J.: Programová regulácia tlaku vo vákuovej komore pre chladenie chleba. Výskumná správa KAR. Bratislava, Chemickotechnologická fakulta SVŠT 1981.
2. KOŠTAL, R.: Programové riadenie tlaku vo vákuovej komore pri chladení chleba. Diplomová práca. Bratislava, Chemickotechnologická fakulta SVŠT 1981.
3. MIKLEŠ, J.: Teória automatického riadenia chemickotechnologických procesov. 2. časť. Skriptum. Bratislava, ES SVŠT 1980.

Проект структуры и параметров оптимально управляющего члена для программной регуляции вакуумного охлаждения хлеба

Резюме

Полученный квазиоптимальный ход изменений абсолютного давления для охлаждения буханки весом 1 кг словацкого хлеба высшего сорта в вакуумной камере, предложенная структура и рассчитанные регулируемые параметры оптимального управляющего члена — PI регулятора были использованы в программной регуляции охлаждения хлеба на производственном оборудовании, которое было предложено и изготовлено в ВУП Братислава и проверено в Пекарнях в Дунайска-Стреде. Производственное оборудование является двухкамерным. В процессе вакуумного охлаждения в одной камере вторая одновременно опорожняется и заполняется новой партией хлеба. Одна партия содержит 100 штук буханок хлеба весом 1 кг. Оборудование позволяет охладить объем партии в течение 5 минут до 30°C (в середине буханки) без нарушения структуры хлеба.

Design of the structure and parameters of an optimal regulating block for time-pattern control of bread vacuum cooling

Summary

A quasioptimal course of absolute pressure change for cooling the 1-kg Slovak selective bread in a vacuum chamber, as well as designed construction and calculated adjustable parameters of optimal regulating block (PI regulator) were made use of in a time-pattern control for bread cooling in an operating plant, designed and put into operation at the Food Research Institute in Bratislava and tested in the bakery at Dunajská Streda.

The operating plant is double-chambered. During vacuum-cooling in one chamber, the other chamber is evacuated and filled with a new charge. One charge contains 100 loaves of a 1-kg bread. In such a plant it is possible to cool one charge in 5 min up to 30 °C (in bread crumb) without bread structure violation.