

Оптимално управление на топлинно интегрирани периодични реактори, използвани в хранителната промишленост

Боян Иванов, Никола Гинов

Резюме: *Работата третира проблеми на оптималното управление на процесите "Нагриване-Охлаждане" в двойка периодични реактори в случаите на топлинната интеграция между тях. Предложен е математичен метод за определяне на управляващите променливи, които осигуряват минимум на стойността използваната енергия от външните енергоизточници. Задачата е формулирана в термините на смесеното нелинейното програмиране (MINLP).*

Optimal control of heat integrated periodic plants used in food industry

Boyan Ivanov, Nikola Ginov

Abstract: *In the paper some problems of the optimal control of processes of heating and cooling in a pair of heat integrated periodic plants are discussed. A mathematic approach is suggested to determine the control variables by which a minimum cost of the received energy from additional energy sources is achieved. The problem is formulated to be solved by mixed integer nonlinear programming (MINLP).*

1. Увод

Проблемът за намаляване на стойността за извършване на процесите "Нагриване-Охлаждане" при работата на периодични реактори е актуален, особено при променените икономически условия на функциониране. Това в значителна степен се отнася до хранителната промишленост, характеризираща се с множество многоасортиментни производства най-често използващи периодични реактори за извършване на основните операции. Намаляване на енергопотреблението на такива производства може да се достигне чрез създаване на условия за оптимално използване на вътрешната енергия в системата, която се осъществява с помощта на топлинна интеграция на процесите. Една от първите работи, третиращи тези проблеми е [3]. В последствие в [2] по нататък доразвита в [1] се разглеждат въпросите на икономия на енергия при работата на периодични реактори, като се предлагат методи за синтез на топлинно-интегрирани системи. В настоящата работа се разглеждат проблеми на оптималното управление на един клас топлинно интегрирани периодични реактори.

2. Описание на проблема

Разглежда се обобщена суперструктура на системата за нагриване-охлаждане в двойка «Н-С» периодични реактора с използване на схема за топлинна интеграция на процесите. На Фиг.1 е показана такава суперструктура на обобщената теплообменна верига. Задачата за определяне на управляващите въздействия се свежда до това да бъдат намерени параметрите на времевите интервали, съставляващи процеса, които осигуряват минимална стойност на използваната от външните системи енергия.

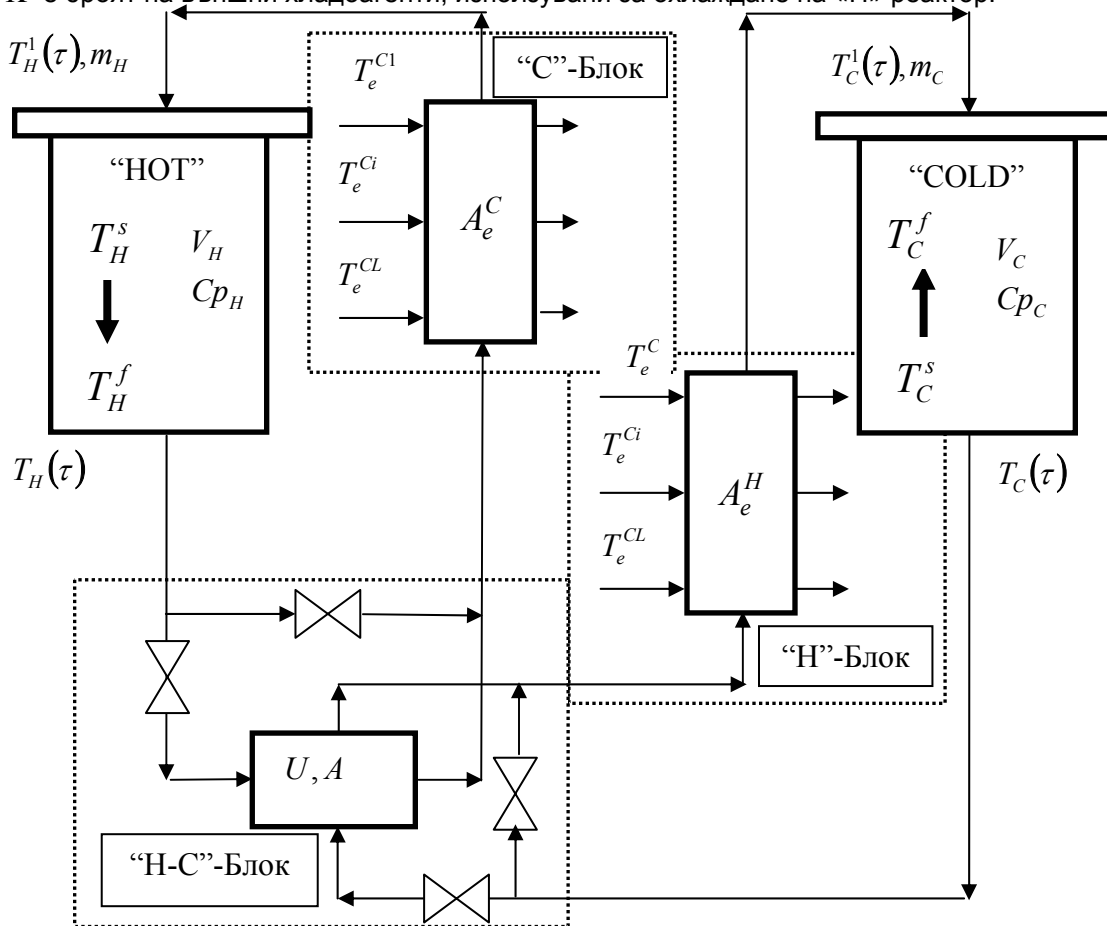
2.1. Организация на процесите «Топлинна интеграция-корекция».

Процесите интеграция и корекция се извършват на подинтервали с продължителност, подлежаща на определяне, както е показано на фиг.2.

Във всеки подинтервал се приема, че се извършва или процес на топлинна интеграция, или автономно охлаждане на «Н» и или нагряване на «С» реактор. Броят на времевите интервали е:

$$N = \text{MAX}(L, K) + 1, \quad (1)$$

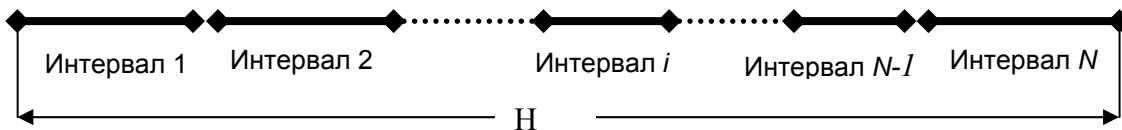
където L е броят на външни топлоизточници, използвани за нагряване на «С» реактор, а K е броят на външни хладагенти, използвани за охлаждане на «Н» реактор.



Фиг.1 Суперструктура на системата за нагряване-охлаждане в система «Н-С» периодични апарати чрез топлинна интеграция на процесите

Задачата на настоящото изследване е да се разработи математичен метод за определяне на управляващите променливи, осигуряващи минимална стойност на

използуваната енергия от достъпните външни източници на енергия за осъществяване на процесите «Нагрояване-Охлаждане» в двойка периодични реактори.



Фиг.2. Организация на процесите във времевия интервал

3. Математическа постановка на проблема

3.1. Математичен модел на процесите на топлинна интеграция и корекция

3.1.1. Процес на обмяна на топлина чрез топлинна интеграция с «Н-С» блок.

На Фиг.1. е показана една от възможните схеми за обмяна на топлина в двойка реактори чрез топлинна интеграция с помощта на «Н-С» блок.

Математичният модел на процеса на обмяна на топлина за n -тия времеви интервал се осъществява съгласно уравненията [1]:

$$T_H^n = (CpVh)T_H^{(n-1)} + (CpVc)(T_C^{(n-1)} + T_H^{(n-1)})\exp(-K_{HC}^I \tau_n), \quad (2)$$

$$T_C^n = \left. \begin{aligned} &(CpVh)T_H^{(n-1)} + (CpVc)T_C^{(n-1)} + \\ &(CpVh)(T_H^{(n-1)} - T_C^{(n-1)})\exp(-K_{HC}^I \tau_n) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

където, $(CpVh) = \frac{Cp_H \cdot V_H}{Cp_H \cdot V_H + Cp_C \cdot V_C}$, $(CpVc) = \frac{Cp_C \cdot V_C}{Cp_H \cdot V_H + Cp_C \cdot V_C}$, T_H^n, T_C^n са крайните

температури които се достигат в края на n -тия времеви интервал в резултат на извършване на процес на интеграция с помощта на топлообменник с мощност P_{HC}^I .

$T_H^{(n-1)}, T_C^{(n-1)}$ са температурите на реакторите в края на предишния времеви интервал, Cp_H, Cp_C са топлосадаржанието на единица обем от сместа на «Н» и «С» реактори, а V_H, V_C са обемите им. Съгласно [1] K_{HC}^I се определя съгласно зависимостта:

$$K_{HC}^I = P_{HC}^I \frac{(Cp_H V_H + Cp_C V_C)}{(Cp_H V_H)(Cp_C V_C)}, \quad (4)$$

където, P_{HC}^I е мощността на топлообменния апарат инсталиран за провеждане на процеса интеграция между двойката «Н-С» апарати по време на n -тия времеви интервал с продължителност τ_n и се определя съгласно зависимостта:

$$P_{HC}^I = \frac{\omega_c m_{HC} (Amf)}{\omega_c + m_{HC} (Amf)} \quad (5)$$

където, $m_{HC} = \frac{\omega_H \omega_C}{(\omega_C - \omega_H)}$, $(Amf) = \left(\exp\left(\frac{\alpha}{m} A_f\right) - 1 \right)$

$\omega_C = w_C Cp_C$, $\omega_H = w_H Cp_H$, w_C, w_H - представляват дебитите на циркулиращите потоци, α -коэффициента на топлопреминаване и A_f -топлообментата площ на топлообменника.

3.1.2. Модел на процеса «Нагриване» на «С» реактор с помощта на «Н»-блок.

Зависимостта описваща процеса за n -тия времеви интервал съгласно [1] е:

$$T_c^n = (T_c^{(n-1)} - T_l) \exp(-K_{cl}^c \tau_n) + T_l \quad (6)$$

където, T_l е температурата на l -ти топлоносител, $K_{cl}^c = P_{cl}^c$ - мощността на външния топлообменник за нагриване на «С» реактор по време на n -тия времеви интервал с използване на l -тия топлоносител.

$$P_{cl}^c = \frac{\omega_l m_{cl} (Amc)}{\omega_l + m_{cl} (Amc)}, \quad (7)$$

$$\text{където, } m_{cl} = \frac{\omega_c \omega_l}{(\omega_l - \omega_c)}, \quad (Amc) = \left(\exp\left(\frac{\alpha_l}{m_{cl}} A_{cl}\right) - 1 \right), \quad \omega_c = w_c C p_c, \quad \omega_l = w_l C p_l, \quad w_c, w_l -$$

представяват дебитите на циркулиращите потоци, α_l - коефициента на топлопреминаване и A_{cl} - топлообменната площ на топлообменника.

3.1.3. Модел на процеса «Охлаждане» на «Горещия» реактор с помощта на «С»-блок.

Зависимостта описваща процеса за n -тия времеви интервал съгласно [1] е:

$$T_H^n = (T_H^{(n-1)} - T_k) \exp(-K_{Hk}^H \tau_n) + T_k, \quad (8)$$

където, T_H^n е температурата на «Н» реактор в края на n -тия времеви интервал по време на охлаждането с използване на k -тия хладагент, T_k - е температурата на k -ти хладагент, $K_{Hk}^H = P_{Hk}^H$ - мощността на топлообменника за охлаждане на «Н» реактор.

$$P_{Hk}^H = \frac{\omega_k m_{Hk} (Amh)}{\omega_k + m_{Hk} (Amh)}, \quad (9)$$

$$\text{където, } m_{Hk} = \frac{\omega_H \omega_k}{(\omega_k - \omega_H)}, \quad (Amh) = \left(\exp\left(\frac{\alpha_k}{m_{Hk}} A_{Hk}\right) - 1 \right), \quad \omega_H = w_H C p_H, \quad \omega_k = w_k C p_k, \quad w_H, w_k -$$

представяват дебитите на циркулиращите потоци, α_k - коефициента на топлопреминаване и A_{Hk} - топлообменната площ на външния топлообменник.

3.2. Управляващи променливи

3.2.1. Двоични (булеви) управляващи променливи.

$$x_n = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}, \quad \forall n \in N \quad (10)$$

$x_n = 1$ когато в n -тия времеви интервал се осъществява топлообмен между «Н» и «С» реактор с помощта на «Н-С» блок и $x_n = 0$ в противен случай.

$$h_{nl} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}, \quad \forall n \in N, \forall l \in L \quad (11)$$

$h_{nl} = 1$ когато се извършва нагриване на «С» реактор по време на n -тия времеви интервал с използване на l -тия топлоносител и $h_{nl} = 0$ в противен случай.

$$c_{nk} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}, \quad \forall n \in N, \forall k \in K \quad (12)$$

$c_{nk} = 1$ когато се извършва охлаждане на «Н» реактор по време на n -тия времеви интервал с използване на k -тия външен хладоагент и $c_{nk} = 0$ в противен случай.

3.2.2. Продължителност на времевите интервали.

$$\tau_n, \quad \forall n \in N \quad (13)$$

3.2.3. Дебити на циркулиращите флуиди.

$$w_n^C, \quad \forall n \in N, \quad w_n^H, \quad \forall n \in N, \quad w_n^I, \quad \forall n \in N, \quad w_n^L, \quad \forall n \in N, \quad \forall l \in L, \quad w_n^k, \quad \forall n \in N, \quad \forall k \in K. \quad (14)$$

3.3. Ограничения.

3.3.1. Областни ограничения гарантиращи последователността на процесите.

$$x_n + \sum_{l=1}^L h_{nl} \leq 1, \quad \forall n \in N, \quad (15)$$

$$x_n + \sum_{k=1}^K c_{nk} \leq 1, \quad \forall n \in N. \quad (16)$$

3.3.2. Ограничения осигуряващи изпълнимост на процесите за интервал H .

$$\sum_{n=1}^N \tau_n \leq H, \quad (17)$$

3.3.3. Ограничения осигуряващи физическата реализуемост на процесите.

$$h_{nl} \leq \frac{(T_l - T_C^{(n-1)} - \Delta T_{MIN})}{|T_l - T_C^{(n-1)} - \Delta T_{MIN}|} + 1, \quad \forall n \in N, \forall l, \quad (18)$$

$$c_{nk} \leq \frac{(T_k - T_H^{(n-1)} - \Delta T_{MIN})}{|T_k - T_H^{(n-1)} - \Delta T_{MIN}|} + 1, \quad \forall n \in N, \forall k, \quad (19)$$

$$x_n \leq \frac{(T_H^{(n-1)} - T_C^{(n-1)} - \Delta T_{MIN})}{|T_H^{(n-1)} - T_C^{(n-1)} - \Delta T_{MIN}|} + 1, \quad \forall n \in N, \quad (20)$$

$$|T_k - T_C^n| \geq \Delta T_{MIN} \cdot c_{nk}, \quad \forall n \in N, \forall k, \quad (21)$$

$$|T_l - T_H^n| \geq \Delta T_{MIN} \cdot h_{nl}, \quad \forall n \in N, \forall l, \quad (22)$$

$$|T_C^n - T_H^n| \geq \Delta T_{MIN} \cdot x_n, \quad \forall n \in N. \quad (23)$$

3.3.4. Ограничения осигуряващи достигане целите на процесите.

$$\left. \begin{aligned} T_H^N - T_H^f &= 0 \\ T_C^N - T_C^f &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (24)$$

където T_H^N и T_C^N са температурите които се достигат в края на последния времеви интервал, а T_H^f и T_C^f са желаните крайни температури.

3.4. Целева функция.

Целта е да бъдат намерени такива условия за осъществяване на процесите «Нагриване» и «Охлаждане» на двата реактора, които да гарантират минимална стойност на използваната външна енергия за двата процеса:

$$\text{MIN} \left(\sum_{l=1}^L Q_l \lambda_l + \sum_{k=1}^K Q_k \lambda_k \right), \quad (25)$$

където, $Q_k = \sum_{n=1}^N (c_{nk} (T_H^{(n-1)} - T_H^n) C_{p_H} V_H)$, $Q_l = \sum_{n=1}^N (h_{nl} (T_C^{(n-1)} - T_C^n) C_{p_C} V_C)$ са количеството студ и топлина използвани съответно от k -тия хладоагент и l -тия топлоносител по време на процесите. Освен това при $n=1$ $T_H^0 = T_H^S$, а $T_H^{(n-1)}$ е температурата на «Н» реактор в края на $(n-1)$ -вия времеви интервал и при $n=1$ $T_C^0 = T_C^S$ и представлява началната температура на «С» реактор, а λ_l и λ_k са цените за единица енергия от съответния топло или хладо носител използван от външните системи.

3.5. Формулиране на проблема за оптимално управление.

Проблемът за оптимално управление може да бъде формулиран като задача на смесеното нелинейно програмиране по следния начин. Търсят се стойности на управляващите променливи (10)-(14), които осигуряват минимум на целевата функция (25) при спазване на системата ограничения (15)-(24). Така формулираната задача е решена с методите за смесеното нелинейно програмиране (MINLP).

4. Заключение:

В резултат от направеното изследване може да се заключи следното:

1. Предложена е математична формулировка на задачата за управление на процесите в система с топлинна интеграция.
2. Задачата за управление е формулирана в термините на смесеното нелинейно математично програмиране при критерий минимална стойност на използваната енергия от външни източници.

5. Литература:

1. **A. Pozna, B. Ivanov and N. Vaklieva-Bancheva**, Design of a Heat Exchanger Network for a System of Batch Vessels, *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*, Volume 26, pp. 205-211, 1998.
2. **B. Ivanov, N. Vaklieva-Bancheva** Optimal Reconstruction of Batch Chemical Plants with Regard to Maximum Heat Recuperation *Computers and Chemical Engineering*, Volume 18, pp. S313-S317, 1994.
3. **Vaselenak, J.A., Grossmann I., E**, *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, **25**, 2, 357-366, 1986.

За контакти:

Ст.н.с. II Д-р. Боян Иванов, Институт по инженерна химия-БАН,

София, ул. Акад. Г. Бончев, блок 103, тел: 02/979-32-75, E-mail: bivanov@bas.bg

Доц Д-р. Никола Гинов, УХТ-Пловдив

Бул. Марица No26, кат. АИУТ, тел. 603-882, E-mail: nvnpb2001@yahoo.com