

ЛАДІЄВА Л. Р., к.т.н., доц.; ШИРМА А. В., магістрант
 Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ РЕЖИМОМ ПУСКУ АВТОКЛАВА У ВИРОБНИЦТВІ АЗОТНОЇ КИСЛОТИ

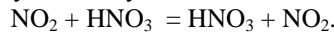
Запропоновано алгоритм оптимального керування режимом пуску автоклаву з використанням нелінійної математичної моделі, методу штрафів і градієнтної процедури.

Ключові слова: виробництво азотної кислоти, автоклав, оптимальне керування.

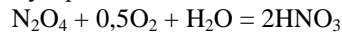
© Ладієва Л. Р., Ширма А. В., 2014.

Постановка проблеми. У виробництві концентрованої азотної кислоти з оксидів азоту вирізняють три стадії. Спочатку нітрозні гази проходять перший етап окиснення та відбілювання. Отриману слабо концентровану кислоту спрямовують у змішувач. На цьому етапі максимальна концентрація HNO_3 становить 40...55 %. На другому етапі азотну кислоту спрямовують в автоклав для досягнення концентрації 98...99 %. Заключний, третій етап – очищення кислоти від розчинених в ній оксидів азоту.

На другому етапі концентрування відбувається двостадійна реакція. На першій стадії оксид азоту NO_2 і кислота HNO_3 , які надходять в автоклав у заданому співвідношенні, утворюють нітролеум:



На другій стадії крізь нітролеум під тиском пропускають чистий кисень. Нітролеум реагує з киснем, утворюючи концентровану азотну кислоту з розчиненими оксидами азоту:



Мета статті – розробити оптимальну систему керування режимом пуску автоклава.

Математична модель. Швидкості описаних стадій [1]: $dc_1/dc = -k_1(T)c_1^2$ і $dc_2/dt = k_1(T)c_1^2 - k_2(T)c_2$, в яких константи k_1 і k_2 залежать від температури T за рівнянням Арреніуса: $k_1(T) = A_1 \exp(-E_1/R_1T)$, $k_2(T) = A_2 \exp(-E_2/R_2T)$; R_1, R_2 – газові сталі; E_1, E_2 – енергії активації.

Цільова функція поставленої задачі $I = 1/2t_f^2 \rightarrow \min$ за обмежень $c_2(t_f) = c_2^{3d}(t_f)$ і $T_1 \leq T \leq T_2$, де t_f – кінцевий момент часу; T_1, T_2 – мінімальне й максимальне значення температури, за якої відбувається реакція.

Задача має сенс, якщо енергія активації реакції утворення нітролеуму є меншою, аніж енергія активації реакції утворення концентрованої азотної кислоти.

Застосовано метод функції штрафів за градієнтного способу пошуку екстремуму в функціональному просторі для обчислення керування й траєкторії для переведення нелінійної системи зі стану $c_1(0) = c_{10}$, $c_2(0) = c_{20}$ у стан $c_2(t_f) = c_2^{3d}(t_f)$ протягом мінімального часу. Цю задачу вирішують як задачу мінімальної функції вартості

$$I = 1/2 S_{22}[c_2(t_f) - c_2^{3d}(t_f)]^2 + 1/2 t_f^2 \rightarrow \min.$$

Можна врахувати обмеження на дію керування, ввівши функцію штрафу

$$I = 1/2 S_{22}[c_2(t_f) - c_2^{3d}(t_f)]^2 + 1/2 t_f^2 + 1/2 \int_0^{t_f} (T_2 - T)^2 H(q_1) + (T - T_1)^2 H(q_2) dt,$$

де H – функція Хевісайда, $q_1 = T_2 - T \geq 0$, $q_2 = T - T_1 \geq 0$.

Тоді $H = 1/2(T_2 - T)^2 H(q_1) + 1/2(T - T_1)^2 H(q_2) + \lambda_1[-k_1(T)c_1^2] + \lambda_2[k_1(T)c_1^2 + k_2(T)c_2]$, де $\lambda_1(t), \lambda_2(t)$ – множники Лагранжа.

Спряжена система має вигляд $\lambda'_1 = 2k_1(T)c_1(\lambda_1 - \lambda_2)$, $\lambda'_2 = k_1(T)\lambda_2$. Умови трансверсальності – $\lambda_1(t_f) = 0$, $\lambda_2(t_f) = S_{22}[c_2(t_f) - c_2^{3d}(t_f)]$.

З огляду на це, $\partial H/\partial T = -(T_2 - T)^2 H(q_1) + (T - T_1)H(q_2) - (\lambda_1 - \lambda_2)(A_1 E_1/R_1) e^{-E_1/(R_1 T^2)} - \lambda_2(A_1 E_1/R_1) e^{-E_2/(R_2 T^2)}$.

Для визначення кінцевого моменту часу використано умову $dl/dt_f = 0$ як критерій зупинки процесу:

$$dl/dt_f = t_f + S_{22}[c_2(t_f) - c_2^{3d}(t_f)] + \lambda_2(t_f) + 1/2(T_2 - T)^2 H(q_1) + 1/2(T - T_1)^2 H(q_2) + \lambda_1[-k_1(T)c_1^2] + \lambda_2[k_1(T)c_1^2 + k_2(T)c_2].$$

Тоді процедуру оптимального керування можна описати так.

Вибираємо початкове керування $T(t)$, обчислюємо траєкторію вектора стану системи і похідну dl_0/dt_f . З умови $dl_0/dt_f = 0$ визначаємо момент закінчення першої ітерації. Із цим кінцевим моментом часу розв'язуємо спряжені рівняння у зворотному часі $\Delta T^N(t) = -k \partial H/\partial T^N$ і $T^{N+1}(t) = T^N(t) + \Delta T^N(t)$ для наступної ітерації. Обчислення продовжують, поки приріст ΔT^N керування від ітерації до ітерації не стане малим.

Припустимо, що як початкове вибрано керування $T^0 = T_1$. Розв'язуємо у пряму часі математичну модель, поки $dl/dt_f = 0$. Потім керування змінюється, приймаючи значення $T = T_2$. Знову розв'язуємо математична модель до виконання умови $dl/dt_f = 0$. Якщо початкове керування не співпадає з оптимальним, і система не виходить на бажаний режим, тоді розв'язують спряжену систему у зворотному часі від t_f до 0. Тоді наступне значення керування $T^1(t) = T^0(t) + \Delta T(t) = T^0(t) - k \partial H/\partial T^0$. Обчислення продовжують, поки не буде забезпечено малий приріст керування.

Для розв'язуваної задачі $T_1 = 323 \text{ K}$, $T_2 = 363 \text{ K}$. З огляду на це, спочатку за температури T_1 розрахували траєкторію переходу концентрації азотної кислоти (рис. 1, 2).

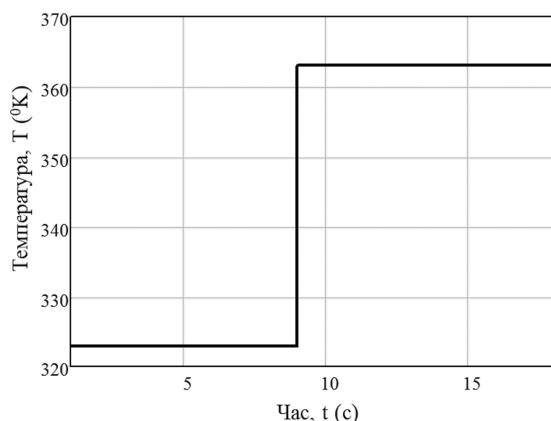


Рис. 1 – Графік зміни температури

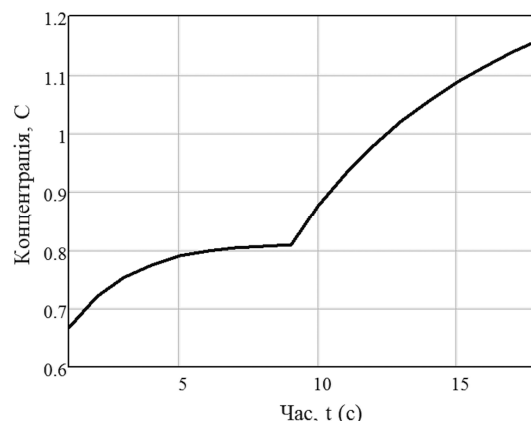
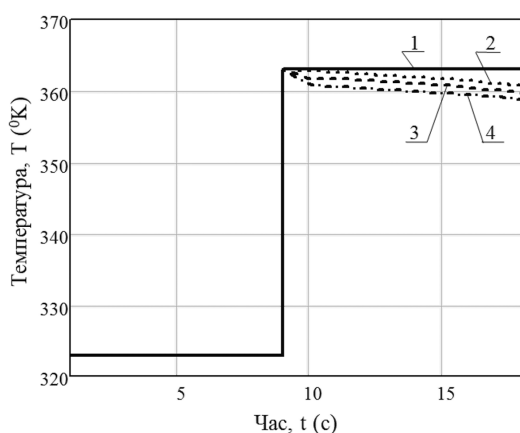
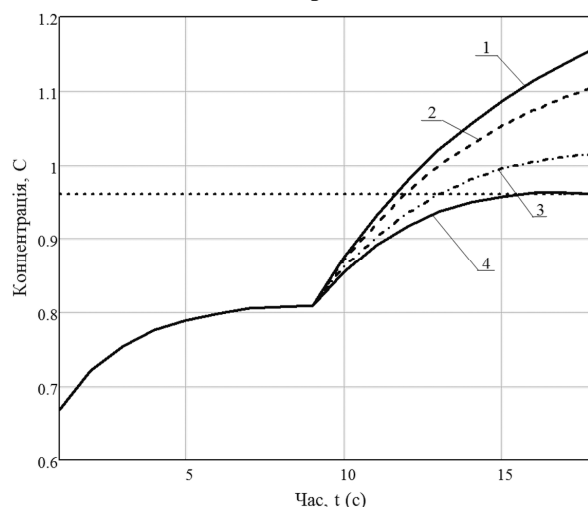


Рис. 2 – Зміна концентрації азотної кислоти



1 – початкове; 2 – на першій ітерації;
3 – на другій ітерації; 4 – на третій ітерації

Рис. 3 – Керування температурою



1 – задана; 2 – за початкового керування;
3, 4, 5 – на першому, другому і третьому етапі

Рис. 4 – Зміна концентрації на етапах керування

Концентрація азотної кислоти виходить на рівень $c_2 = 0,8$. Потім змінюємо температуру на T_2 . Значення концентрації виходить за межі допустимої $c_2 = 1$. Оскільки в методі штрафів застосовано метод зовнішньої точки, це допускається.

Для другого етапу керування розрахували спряжену систему з наведеними вище умовами трансверсальності. Знайшли приріст керування і для нової ітерації – зміну температури в часі. Ітераційний процес пошуку оптимального керування продовжували, поки концентрація азотної кислоти не стала заданою (рис. 3 і 4).

Висновки. Запропоновано алгоритм оптимального керування режимом пуску автоклава у виробництві азотної кислоти. За критерій оптимальності вибрано мінімальний час виходу автоклава на заданий режим з обмеженням на концентрацію азотної кислоти. Кінцевий час режиму пуску введено у термінальну складову функції вартості. Для вирішення задачі використано метод штрафів і градієнтну процедуру. Застосований алгоритм дозволив вивести автоклав на заданий технологічний режим.

Список використаної літератури

1. Бояринов А. И. Методы оптимизации в химической технологии / А. И. Бояринов, В. В. Кафаров. – М. : Химия, 1969. – 563 с.
2. Ладієва Л. Р. Оптимальне керування системами / Л. Р. Ладієва. – К. : НМЦВО, 2000. – 187 с.

Надійшла до редакції 19.03.2014.

Ladieva L. R., Schirma A. V.

OPTIMAL CONTROL OF AUTOCLAVE START MODE IN THE PRODUCTION OF NITRIC ACID

The algorithm of optimal control of autoclave start mode in the production of nitric acid is proposed. By optimality criterion is selected minimum time-autoclave at preset mode with the restriction on the concentration of nitric acid. End time start mode is entered on the terminal part of the cost function. The method of penalties and a gradient

procedure is used to solve the problem. The applied algorithm is allowed to bring an autoclave at a given technological regime.

Keywords: production of nitric acid, autoclave, optimal control.

References

1. Bojarinow A. I. Metody optimizacii w chimitscheskoj technologii [Methods for optimization of Chemical Technology] / A. I. Bojarinow, W. W. Kafarow. – M. : Chimija, 1969. – 563 p.
2. Ladieva L. R. Optimalne keruвання systemami [Automated control systems] / L. R. Ladieva. – K. : NMCWO, 2000. – 187 p.

УДК 66

МИЛЕНЬКИЙ В. В., МИРОНЕНКО Ю. М.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ДИСКРЕТИЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ У ЧАСІ ПІД ЧАС СТАТИСТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розглянуті алгоритми, що дозволяють визначити оптимальний відносно вибраного критерію час дискретизації опитування технологічних параметрів, що забезпечує достатню точність визначення цього параметра, попри дискретність звертання до вимірювальних пристроїв.

Ключові слова: статистичні дослідження, дискретизація, оптимізація.

© Миленький В. В., Мироненко Ю. М., 2014.

Постановка проблеми. Для побудови систем автоматизації, що відповідають сучасним вимогам, потрібні математичні описи об'єктів. Для відносно простих об'єктів, фізична сутність яких відома, можлива побудова аналітичної моделі, для складніших – перевагу надають експериментальним методам, серед яких особливе місце займають статистичні, що використовують дані пасивного збирання інформації. Їхнє застосування дозволяє скласти уяву про хід процесів, не заважаючи експлуатації установок чи системи.

Однак під час статистичного оброблення змінювані параметри представлено дискретним рядом їх значень. Це призводить до втрати інформації. З'являються похибки трьох видів:

- від дискретизації з координатою (для просторово-розподілених параметрів), спричинена тим, що датчики встановлюють лише в деяких точках;
- від дискретизації за часом, пов'язана з тим, що між окремими замірами значення параметрів не контролюється;
- від дискретизації за рівнем сигналу – пов'язана з тим, що зміни кожного сигналу фіксують із визначеною точністю, що залежить, наприклад, від чутливості приладу.

З огляду на це виникає питання про можливість обґрунтованого розрахунку рівня дискретизації параметрів за координатами часу та рівня для збирання статистичних даних із точністю, що вимагається.

Метою статті є встановлення алгоритмів, що дозволяють визначити оптимальний відносно вибраного критерію час дискретизації опитування технологічних параметрів, що забезпечує достатню точність визначення цього параметра, попри дискретність звертання до вимірювальних пристроїв

Виклад основного матеріалу. У загальному випадку задачу дискретизації формулюють так. За заданою похибкою вимірювання слід визначити відстань між сусідніми даними l_0 ; інтервали часу послідовними відліками показів кожного приладу t_0 і крок дискретизації за рівнем сигналу x_0 . В окремих випадках може стати важливим розв'язання задачі дискретизації за однією координатою, наприклад, часом. Обґрунтоване рішення дозволить досягти необхідної точності за мінімальною частотою вимірювань і мінімальною їх кількістю.

Для визначення необхідної частоти вимірювань враховують: вихідні дані, що є в наявності; характер кривої апроксимації, яку використовують під час дискретного контролювання технологічної величини; вимоги до точності вимірювання, що визначаються характером впливу зміни величин на процеси в об'єкті.

Стосовно вихідних даних можливі два випадки:

– під час переходу до дискретного контролювання величини для визначення необхідних вихідних даних є записи змінених величин з часом, одержані під час неперервних вимірювань. Для стаціонарних випадкових процесів оброблення наявних даних дозволить одержати вичерпні статистичні характеристики (кореляційну функцію чи спектральну щільність). У цьому випадку вважають, що статистичні характеристики системи є заданими (підхід Баттеса);

– коли розробляють систему, для якої записи неперервних процесів відсутні, вважаємо, що вихідні статистичні відомості також відсутні.

Характер кривої апроксимації повністю залежить від вибору дослідника. Але при цьому, чим складнішою буде апроксимуюча крива, тим точніше вона описуватиме процес, але й тим більш трудомісткими буде оброблення результатів експерименту. Зазвичай, використовують ступінчасту й лінійну апроксимації.

Залежно від вимог до вимірювань, що визначаються характером процесу, усі контрольовані величини умовно поділяють на дві групи:

– величини, відхилення яких від норми (навіть короткочасне) є неприпустимим (коли, наприклад, це може призвести до аварії). Частоту вимірювання таких величин варто вибирати, виходячи з вимоги точного вимірювання значень в будь-який момент часу;

– показники, короткочасні коливання яких суттєво не впливають на режим роботи об'єкта. Для цієї групи величин частоту вимірювань можна вибирати залежно від деякої усередненої (наприклад, середньоквадратичної) оцінки.

Розглянуті чинники є основою для класифікації об'єктів дослідження, причому для кожної групи пропонується свій метод дискретизації.

1. Метод дискретизації величин, що вимагають особливої точності вимірювання, в разі використання ступінчастої апроксимації, коли відомі статистичні характеристики:

$$N \leq \omega_c |y_{\max}(t)| / (\delta - \delta_n), \quad (1)$$

де N – шукана частота вимірювань; δ – наперед задана максимально допустима похибка вимірювання; $|y_{\max}(t)|$ – модуль максимального значення величини за час реалізації; ω_c – частота (визначається з записів) зрізу спектральної щільності $S = S(\omega)$; δ_n – похибка приладу.

2. Якщо за тих самих умов статистичні характеристики є невідомими, пропонується провести серію пробних дослідів для отримання необхідних вихідних даних.

3. Метод, який за тих самих умов, що й (1), використовує лінійну інтерполяцію (у тих самих визначеннях):

$$N \leq \frac{\omega_c}{2} \sqrt{\frac{|y_{\max}(t)|}{2(\delta - \delta_n)}}. \quad (2)$$

4. Метод дискретизації величин, які можна оцінювати з точністю до середньоквадратичного відхилення, якщо відомі статистичні характеристики об'єкта:

$$R_x(h) = R_x(0) - \sigma^2/2, \quad (3)$$

де σ – задане середньоквадратичне відхилення; $R_x(0)$ і $R_x(h)$ – значення автокореляційної функції процесу, визначені за нульового зсуву та зсуву, що дорівнює h ; h – інтервал часу між сусідніми вимірюваннями.

Користуючись формулою (3) та графіком кореляційної функції, за заданим σ можна легко знайти h або частоту вимірювань $N = 1/h$.

5. Якщо первинні дані відсутні, пропонується метод пробних дослідів, що дозволяють через 2...3 серії з невеликої кількості експериментів знайти оцінку N .

6. Якщо вихідні дані (наприклад, кореляційні функції) мають яскраво виражений характер (наприклад, експоненціальний), можна підібрати коефіцієнти виразу, що апроксимують кореляційну функцію $R_x(t)$, і за формулою (3) прямим розрахунком знайти залежно від σ значення h чи N .

7. Метод заданих функціоналів [1] пропонує спосіб визначення необхідної частоти вимірювань, виходячи з постановки задачі, що не потребує будь-яких опосередкованих характеристик. Його можна застосовувати для об'єктів, статистичні характеристики яких є невідомими, і є лише записи зміни величин з часом.

8. Метод мажоритарних функцій розвиває та уточнює метод заданих функціоналів для випадку, коли сигнал, що підлягає квантуванню, надходить з об'єкта, характеристики якого є відомими.

Зауважимо, що вибравши частоту вимірювання, можна визначити тривалість замірювання даних, наприклад, за методикою [2].

Висновки. Запропоновано класифікацію об'єктів дослідження залежно від співвідношення чинників впливу на вибір кроку дискретизації та наведені рекомендації щодо їх застосування, які дозволяють обґрунтовано планувати експеримент, підвищуючи ефективність досліджень.

Список використаної літератури

1. Хлистунов В. Н. О погрешности аппроксимации дискретных методов измерения / В. Н. Хлистунов // Приборостроение. – 1960. – № 5. – С. 3–5.
2. Бородюк В. П. Статистическое описание промышленных объектов / В. П. Бородюк, Э. К. Лецкий. – М. : Энергия, 1971. – 112 с.

Надійшла до редакції 25.03.2014.

Mylenkyi V. V., Myronenko Yu. M.

PARAMETERS DISCRETIZATION IN TIME DURING STATISTICAL STUDIES

The classification of objects of statistical study is proposed, depending on the ratio of the factors influencing the choice of resampling. The recommendations for their use are given, which allow plan reasonably experiment and improve the efficiency of research.

Keywords: *statistical studies, discretization, optimization.*

References

1. *Hlistunov V. N.* O pogreshnosti approksimacii diskretnyh metodov izmerenija [Errors of approximation of discrete measurement methods] / V. N. Hlistunov // *Priborostroenie.* – 1960. – # 5. – P. 3–5.
2. *Borodjuk V. P.* Statisticheskoe opisanie promyshlennyh obektov [Statistical description of the industrial facilities] / V. P. Borodjuk, Je. K. Leckij. – M. : Jenergija, 1971. – 112 p.