УДК 681.5.015.27

Тітова О.В., Мінакова Н.О., Шуть О.Ф., Гнатко О.М.

ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІКИ ОБ'ЄКТІВ РЕГУЛЮВАННЯ

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро,Україна

В даній роботі приділено увагу проблемі параметричної ідентифікації моделей динаміки триємнісних об'єктів. При наявності математичних моделей динаміки об'єктів можна достатньо точно виконати розрахунки оптимальних налагоджень регуляторів з отриманням бажаного виду перехідного процесу регулювання, здійснити моделювання автоматичних систем регулювання ще на стадії їх проектування, використавши ПЕОМ. Відомі методи параметричної ідентифікації мають невисоку точність і зазвичай потребують перетворення отриманих рівнянь в передатні функції або в системи диференціальних рівнянь першого порядку для більшої зручності їх використання. Метою роботи було визначення за графічним зображенням кривої розгону триємнісного об'єкта всіх параметрів моделі динаміки з максимальною точністю. В статті наведено порядок графічного опрацювання кривої розгону з позначенням характерних параметрів і надано алгоритм параметричної ідентифікації математичних моделей динаміки триємнісних об'єктів. Запропонований розрахунковий метод визначення сталих часу T_1, T_2 та T_3 триємнісних об'єктів з використанням ідеальних кривих розгону, які згуртовані за сумою величин ординат характерних точок в три окремі групи, що теж дало можливість суттєво підвищити точність параметричної ідентифікації. Запропонований метод ідентифікації параметрів моделей динаміки триємнісних об'єктів дає можливість найбільш точно визначити суму S всіх сталих часу ідеальних кривих розгону. При ідентифікації параметрів моделей динаміки реальних об'єктів запропоновано здійснювати пошук точки перегину за величиною та знаком різниці $\Delta T'_2$ шляхом коректування вхідних даних і виконання декількох повторних розрахунків, доки різниця $\Delta T'_2$ не досягне встановленого мінімального значення.

Ключові слова: параметрична ідентифікація, триємнісний об'єкт, крива розгону, сталі часу, динамічна характеристика, об'єкт регулювання.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень та публікацій

Точні відомості про динамічні характеристики об'єктів регулювання є важливою основою синтезу якісних автоматичних систем регулювання (АСР) [1,2]. При наявності математичних моделей динаміки об'єктів можна достатньо точно виконати розрахунки оптимальних налагоджень регуляторів з отриманням бажаного виду перехідного процесу регулювання, виконати моделювання АСР ще на стадії їх проектування, використавши ПЕОМ [3].

Раніше нами були виконані роботи з параметричної ідентифікації моделей динаміки двоємнісних об'єктів [4], але переважну більшість об'єктів регулювання можна розглядати як триємнісні, адже до складу регульованої частини АСР відносяться три основні її елементи: виконавчий пристрій, безпосередньо об'єкт регулювання та вимірювальний прилад регульованого параметра. Якщо об'єкт регулювання надати у вигляді трьох послідовно з'єднаних аперіодичних ланок першого порядку, як це показано на рис. 1, то основними параметрами моделі динаміки такого об'єкта будуть три сталі часу: T_1, T_2 та T_3, визначення яких і є основною задачею параметричної ідентифікації моделей.

Відомий метод асимптот [5] при параметричній ідентифікації моделей динаміки триємнісних об'єктів дозволяє отримувати коефіцієнти рівняння часової характеристики, наданої у вигляді суми експонент. Якщо необхідно отримати математичну модель об'єкта у вигляді диференціального рівняння третього та більш високих ступенів, то використовують метод площин [6,7]. Ці методи мають невисоку точність параметричної ідентифікації і зазвичай потребують перетворення отриманих рівнянь в передатні функції або в системи диференціальних рівнянь першого порядку для більшої зручності їх використання.

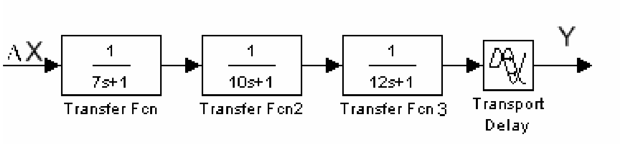

Рис. 1. Структура триємнісного об'єкта з запізнюванням

Формулювання цілей статті

В цій роботі за мету поставлено визначити за графічним зображенням кривої розгону триємнісного об'єкта всі параметри моделі динаміки з максимально можливою точністю.

Виклад основного матеріалу дослідження

Залежності сталих часу моделей динаміки вивчали на ідеальних кривих розгону об'єктів, які будували за допомогою комп'ютерної техніки за заздалегідь вибраними моделями. На рис. 2 зображено, як приклад, порядок графічного опрацювання кривої розгону з позначенням характерних параметрів, які легко визначаються з врахуванням масштабу рисунка. Отже з кривої розгону визначали такі характерні параметри:

– T_0 – загальна стала часу, хв;

– T'_2 – інтервал часу від точки перегину кривої до точки перетину дотичної з усталеним значенням вихідного параметру, хв;

– $ф_0$ – загальний час запізнювання, хв;

– $ф_п$ – час перехідного (ємнісного) запізнювання, хв;

– $Y_н$ – величина ординати до точки перетину кривої розгону перпендикуляром, встановленим з початкової точки дотичної, %;

– $Y_п$ – величина ординати точки перегину кривої розгону, %;

– $Y_к$ – величина ординати точки перетину кривої перпендикуляром, встановленим з кінцевої точки дотичної, %.

З кривої розгону також визначають коефіцієнт передачі об'єкта K_0 за формулою

$$K_0 = \frac{Y_{уст} - Y_0}{\Delta X}, \qquad (1)$$

де $Y_{уст}$ і Y_0 – відповідно нове усталене та початкове значення вихідного параметра, %; ΔX – величина ступеневого збурювання на вході

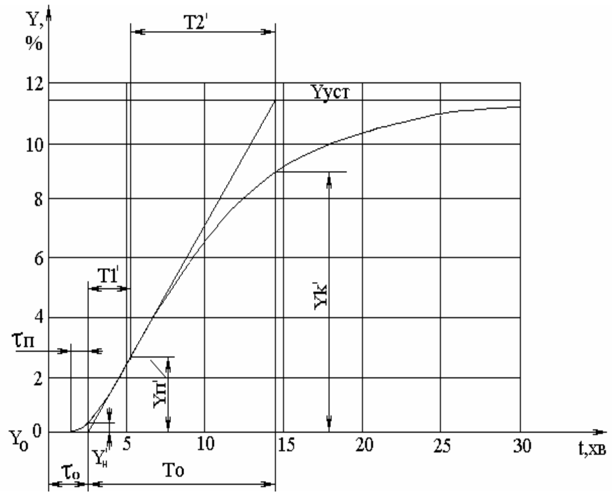

Рис. 2. Графічне опрацювання кривої розгону з позначенням характерних параметрів

об'єкта, %.

Необхідно звернути увагу на відомий факт, що від переміни місцями ланок в структурній схемі об'єкта (рис. 1) вигляд кривої розгону вихідного параметра не змінюється. Тому при моделюванні триємнісних об'єктів ланки їх будемо розташовувати в послідовності збільшення їх сталих часу, тобто $T_1<T_2<T_3$. В реальних ситуаціях ланки моделі повинні розташовуватись у відповідності з розташуванням їх елементів.

Відносно величини ординат трьох характерних точок, які показані на кривій розгону, можна відмітити, що ці величини залежать не тільки від значень T_1, T_2 та T_3, а також від значення коефіцієнта передачі об'єкта K_0 і величини нанесеного на об'єкт ступеневого збурювання ΔX. Тому величини ординат необхідно скорегувати і привести їх до прийнятних нам базових значень $K_0=1$ і $\Delta X=10\%$, використавши для цього формулу

$$Y_Н = \frac{Y_Н^{/}\cdot 10}{k_О \cdot \Delta X};\ Y_П = \frac{Y_П^{/}\cdot 10}{k_О \cdot \Delta X};\ Y_К = \frac{Y_К^{/}\cdot 10}{k_О \cdot \Delta X}. \qquad (2)$$

Спроби отримати залежності сталих часу T_1, T_2 та T_3 від характерних параметрів кривої розгону у вигляді лінійних рівнянь регресії для всього діапазону зміни їх не дали бажаних результатів, адже ці залежності суттєво нелінійні. Щоб не ускладнювати розрахунки при створенні математичної моделі використали метод кусочно-лінійної апроксимації. Це означає, що весь діапазон зміни сталих часу досліджуваних кривих розгону необхідно було розділити на декілька піддіапазонів і для кожного із них створити свою математичну модель. Якщо в об'єкті сталі часу двох ланок, наприклад, T_2 та T_3 за величиною близькі між собою і кожна із них значно більша від сталої часу T_1, то такий об'єкт можна вважати приближеним до двоємнісного. Можливий і такий характерний варіант, коли сталі часу T_1 та T_2 за величиною зовсім незначні в порівнянні зі сталою часу T_3 і такий об'єкт можна вважати одноємнісним з запізнюванням.

Виконаний аналіз досліджуваних кривих розгону триємнісних об'єктів показав, що чим ближче наближаються між собою сталі часу T_1, T_2 та T_3, тим більшими за величиною стають всі три їх ординати характерних точок і величини цих ординат досягають максимального значення у випадку, коли всі сталі часу за величиною є однаковими, тобто $T_1=T_2=T_3$.

Враховуючи те, що на форму кривої розгону реального об'єкту мають суттєвий вплив зміни сторонніх факторів та інші вади, то в наших розрахунках для розподілу досліджуваних кривих розгону у відповідні групи використовується сумарне значення величини ординат:

$$Y_S = Y_H + Y_П + Y_K \ . \qquad (3)$$

На рис. 3 надано складений нами алгоритм параметричної ідентифікації математичних моделей динаміки триємнісних об'єктів.

Розрахунок сталих часу триємнісного об'єкта розпочинається розрахунком інтервалу часу T'_{2p}з використанням рівняння регресії:

$$T_{2p}^{/} = 16,9424 + 0,9257 \cdot T_0 - 1,1628 \cdot \tau_П +$$
$$+5,4803 \cdot Y_H + 0,6342 \cdot Y_П + 2,6431 \cdot Y_K . \qquad (4)$$

Після цього розраховують різницю між T'_2, визначеним з графіка кривої розгону та його розрахунковим значенням T'_{2p}:

$$\Delta T_2^{/} = \frac{T_2^{/} - T_{2p}^{/}}{T_{2p}^{/}} \cdot 100 \ . \qquad (5)$$

Величина цієї відносної різниці $\Delta T'_2$ характеризує точність визначення на графіку кривої розгону точки перегину і, відповідно, величини її ординати Y', а також точність встановлення дотичної в точці перегину кривої. В більшості випадків при опрацюванні кривої розгону T_0 має значення більше того, яке є в дійсності, а від цього суттєво залежить точність розрахунку параметрів моделі динаміки. Отже з метою підвищення точності визначення сталих часу T_1, T_2 та T_3 рекомендується виконувати розрахунок відносного значення різниці $\Delta T'_2$ декілька разів, змінюючи кожен раз значення $Y'_П$ та T'_2, а також T_0 та T'_K. Якщо $\Delta T'_2$ має від'ємне значення і воно складає менше −1%, то треба збільшувати T'_2, тобто точку перегину перемістити по кривій вниз, і навпаки, точку перегину перемістити вверх, якщо $\Delta T'_2$ має значення більше 1%, а також зменшити T_0 і відповідно Y'_K. Таку процедуру розрахунків завершують, якщо значення $\Delta T'_2$ знаходиться в інтервалі (1%÷1%).

Якщо апріорі відомо, що об'єкт складається з трьох однакових послідовно з'єднаних елементів, то всі сталі часу його теж однакові і визначати їх слід за формулами:

$$S = 0,8113 \cdot T_0 \ ; \qquad (6)$$

$$T_1 = T_2 = T_3 = \frac{S}{3} \ . \qquad (7)$$

Сумарна величина ординат характерних точок кривої розгону в цьому випадку становить Y_S>11,9%, що і слід вважати першою групою кривих розгону з близькими за значеннями сталими часу.

У всіх інших випадках процедуру визначення значень сталих часу T_1, T_2 та T_3 виконують за таким алгоритмом. Спочатку визначають залежність суми $S=T_1+T_2+T_3$ від значення найбільш впливових вказаних вище характерних параметрів кривої розгону. Потім таку ж залежність визначають для суми $S_{23}=T_2+T_3$ і нарешті визначають залежність сталої часу T_3 від тих же параметрів кривої розгону. Далі визначають сталі часу за різницею:

$$T_1 = S - S_{23} \ ; \qquad (8)$$

$$T_2 = S_{23} - T_3 \ . \qquad (9)$$

Досліджувані криві розгону за величинами суми ординат характерних точок Y_S розділити на дві групи і для кожної із цих груп визначили рівняння регресії для розрахунку S − суми всіх трьох сталих часу, S_{23} − суми сталих часу T_2 та T_3 і окремо сталої часу T_3.

Друга група: Y_S=11,0÷11,9:

$$S = 21,0175 + 0,685 \cdot T_0 + 0,6157 \cdot \tau_П +$$
$$+1,3585 \cdot Y_H + 0,2573 \cdot Y_П - 2,7417 \cdot Y_K \ ; \qquad (10)$$

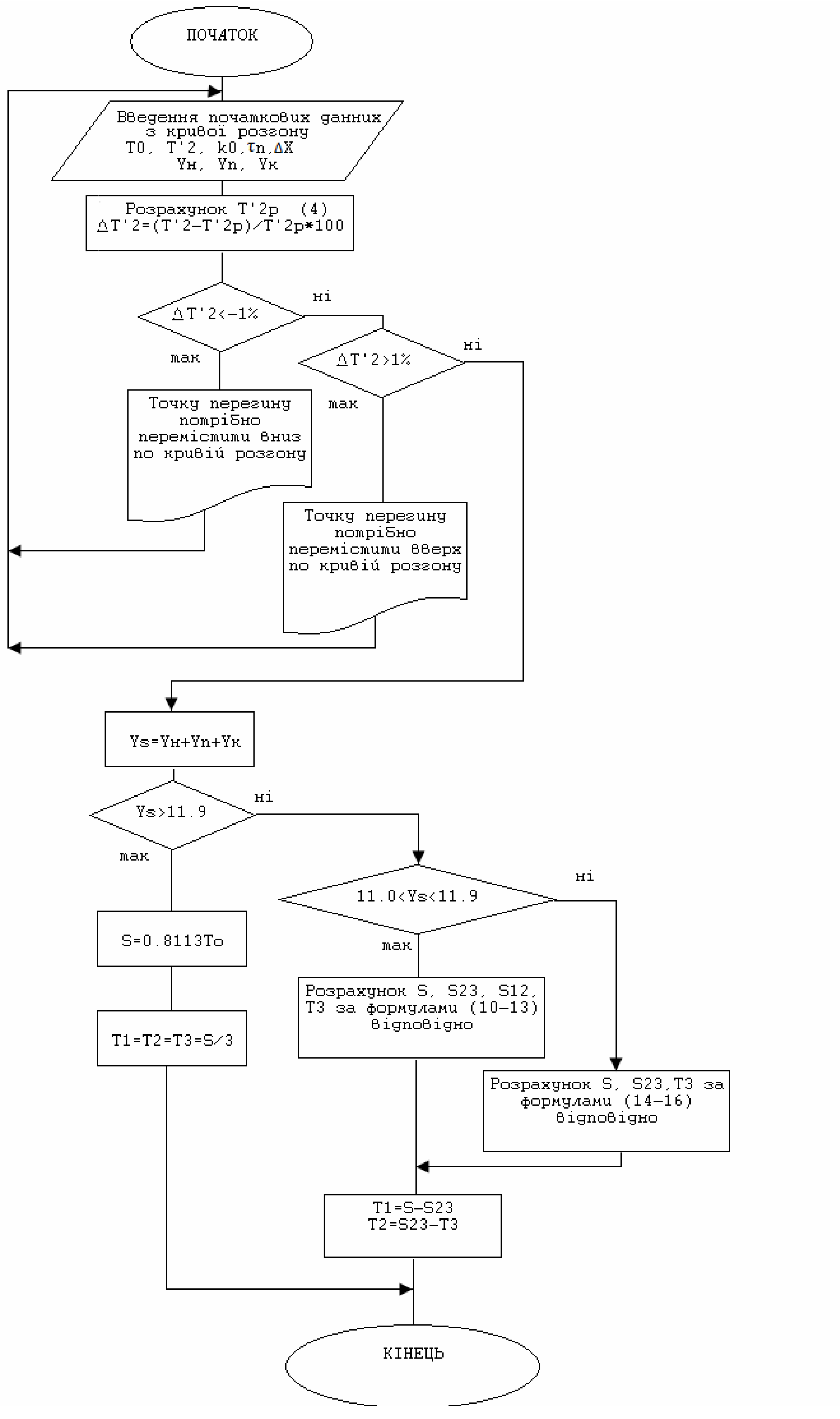

Рис. 3. Алгоритм параметричної ідентифікації математичних моделей динаміки триємнісних об'єктів

$$S_{23} = -11,856 - 0,0159 \cdot T_0 - 3,5961 \cdot \tau_{П} + \\ +9,4673 \cdot Y_{Н} + 0,0472 \cdot Y_{П} + 0,9003 \cdot Y_{К} + \\ +1,7028 \cdot S; \quad (11)$$

$$S_{12} = -75,7718 + 1,2188 \cdot T_0 - 0,9266 \cdot \tau_{П} - \\ -4.0083 \cdot Y_{Н} - 0,3755 \cdot Y_{П} + 9,5919 \cdot Y_{К} - \\ -0,9061 \cdot S_{23}; \quad (12)$$

$$T_3 = 28,826 - 0,1154 \cdot T_0 + 1,7096 \cdot \tau_{П} + \\ +0,007 \cdot Y_{Н} + 0,1299 \cdot Y_{П} - 3,5605 \cdot Y_{К} + \\ +0,6974 \cdot (S_{23} - S_{12}). \quad (13)$$

Третя група: $Y_S<11,0$:

$$S = 22,005 + 0,9952 \cdot T_0 - 1,0748 \cdot \tau_{П} + \\ +18,0468 \cdot Y_{Н} + 0,4619 \cdot Y_{П} - 3,8199 \cdot Y_{К}; \quad (14)$$

$$S_{23} = -3,009 + 0,97 \cdot T_0 - 1,4444 \cdot \tau_{П} + \\ +9,6443 \cdot Y_{Н} - 1,0793 \cdot Y_{П} + 0,2432 \cdot Y_{К}; \quad (15)$$

$$T_3 = 81,205 + 1,0676 \cdot T_0 - 3,0982 \cdot \tau_{П} + \\ +38,0184 \cdot Y_{Н} + 1,274 \cdot Y_{П} - 11,2811 \cdot Y_{К} - \\ -11,9666 \cdot \left(\frac{S_{23}}{S}\right). \quad (16)$$

На основі наданого алгоритму параметричної ідентифікації розроблено програму розрахунку, яка використовується в навчальному процесі кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій і метрології.

Висновки

1. Запропонований метод ідентифікації параметрів моделей динаміки триємнісних об'єктів дає можливість найбільш точно визначити суму S всіх сталих часу ідеальних кривих розгону (коефіцієнт кореляції R=0,999, залишкова дисперсія $S^2_{зал}=0,1$ при середньому значенні суми S=22 хв) Менш точно визначаються суми двох сталих часу та кожна з них окремо.

2. В роботі відпрацьовано алгоритм розрахунку сталих часу об'єктів за ідеальними кривими розгону, які згуртовані за сумою величин ординат характерних точок в три окремі групи, що теж дало можливість суттєво підвищити точність параметричної ідентифікації.

3. При ідентифікації параметрів моделей динаміки реальних об'єктів запропоновано здійснювати пошук точки перегину за величиною та знаком різниці $\Delta T'_2$ шляхом коректування вхідних даних і виконання декількох повторних розрахунків, доки різниця $\Delta T'_2$ не досягне встановленого мінімального значення. Ця процедура теж сприяє підвищенню точності визначення сталих часу реальних об'єктів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Карабутов Н.Н.* Адаптивная идентификация систем: информационный синтез. – М.: КомКнига, 2006. – 384 с.

2. *Дубовой В.М., Кабачій В.В., Паночишин Ю.М.* Контроль та керування в мережах теплопостачання: монографія. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 190 с.

3. *Перов В.Л.* Основы теории автоматического регулирования химико-технологических процессов. – М.: Химия, 1970. – 351 с.

4. *Блонський С.Д., Шуть О.Ф., Левчук І.Л.* Визначення параметрів динамічних характеристик двоємнісних об'єктів керування // Вопр. химии и хим. технологии. – 2006. – № 4. – С.208-210.

5. *Petrovas A., Rinkeviciene R.* Automatic Control Theory I, II: A Laboratory Manual. – Vilnius: Technika, 2012. – 98 p.

6. *Кравцов А.Ф., Зайцева Е.В., Чуйко Ю.Н.* Расчет автоматических систем контроля и регулирования металлургических процессов. – К.: Вища шк., 1981. – 320 с.

7. *Дубовой В.М.* Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів і систем керування: навчальний посіб. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 308 с.

Надійшла до редакції 21.10.2017

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Титова Е.В., Минакова Н.А., Шуть А.Ф., Гнатко Е.Н.

В данной работе уделено внимание проблеме параметрической идентификации моделей динамики трехемкостных объектов. Известны методы параметрической идентификации имеют невысокую точность и обычно требуют преобразования полученных уравнений в передаточные функции или в системы дифференциальных уравнений первого порядка для большего удобства их использования. Целью работы было определение по графическим изображением кривой разгона трехемкостного объекта все параметры модели динамики с максимальной точностью. В статье приведен порядок графической обработки кривой разгона с обозначением характерных параметров и представлены алгоритм параметрической идентификации математических моделей динамики трехемкостных объектов. Предложенный расчетный метод определения постоянных времени T_1, T_2 и T_3 трехемкостных объектов с использованием идеальных кривых разгона, которые сгруппированы по сумме величин ординат характерных точек в три отдельные группы, тоже позволило существенно повысить *точность параметрической идентификации. Предложенный метод идентификации параметров моделей динамики трехемкостних объектов дает возможность наиболее точно определить сумму S всех постоянных времени идеальных кривых разгона. При идентификации параметров моделей динамики реальных объектов предложено проводить поиск точки перегиба по величине и знаку разницы* $\Delta T'_2$ *путем корректировки входных данных и проведение нескольких повторных расчетов, пока разница* $\Delta T'_2$ *не достигнет установленного минимального значения.*

Ключевые слова: параметрическая идентификация, трехемкостной объект, кривая разгона, постоянные времени, динамическая характеристика, объект регулирования.

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF DYNAMICS MODELS OF REGULATED OBJECTS

Titova O.V., Minakova N.O., Shut O.F., Gnatko O.M.

Ukrainian State Chemical Technology University, Dnipro, Ukraine

In this work attention is paid to the problem of parametric identification of dynamics models of three-capacity objects. When mathematical models of the objects dynamics exist, it is possible to accurately perform calculations of the optimal settings of regulators with the desired type of transition control process, to carry out the modeling of the automatic control systems at the stage of their design, using PC. The known methods of parametric identification have low accuracy and usually require transformation of the obtained equations into transfer functions or into systems of differential equations of the first order for greater convenience of their use. The purpose of the work was to determine, by graphic representation of the acceleration curve of a three-capacity object, all parameters of the dynamical model with maximum accuracy. The article describes the order of graphic processing of the acceleration curve with the designation of characteristic parameters and presents the algorithm for parametric identification of mathematical models of dynamics of three-capacity objects. The proposed calculation method is the determination of the stable time T_1, T_2 *and* T_3 *of three-capacity objects using ideal acceleration curves, which are united by the sum of the ordinates of characteristic points in three separate groups, which also made it possible to significantly increase the accuracy of parametric identification. The proposed method for identifying the parameters of dynamics models of three-capacity objects gives the opportunity to accurately determine the sum S of all constant time of ideal acceleration curves. When identifying the parameters of real-time object dynamics models, it is suggested to search for the point of overlap by the magnitude and sign of the* $\Delta T'_2$ *difference, adjusting the input data and conducting several repeated calculations until the difference* $\Delta T'_2$ *reaches the established minimum value.*

Keywords: parametric identification, three-capacity object, acceleration curve, time constant, dynamic characteristic, object of regulation.

PREFERENCES

1. Karabutov N.N. *Adaptivnaya identifikatsiya sistem: informatsionnyy sintez* [Adaptive identification of systems: information synthesis]. Moscow: ComKniga, 2006. 384 p. *(in Russian).*

2. Dubovoy V.M., Kabachiy V.V., *Panochishin Yu.M. Kontrol ta keruvannya v merezhah teplopostachannya: monografiya* [Control of control in the dimensions of heat supply: monograph]. Vinnitsa: UNIVERSUM-Vinnitsa, 2005. 190 p. *(in Ukrainian).*

3. Perov V.L. *Osnovy teorii avtomaticheskogo regulirovaniya khimiko-tekhnologicheskikh protsessov* [Fundamentals of the theory of automatic regulation of chemical-technological processes]. Moscow: Chemistry, 1970. 351 p. *(in Russian).*

4. Blonskii S.D., Shut O.F., Levchuk I.L. Vyznachennya parametriv dynamichnykh kharakterystyk dvoyemnisnykh obyektiv keruvannya [Determination of the parameters of the dynamic characteristics of two-element control objects]. *Quest. chemistry and chemistry technology*. 2006. no. 4. pp. 208-210. *(in Ukrainian).*

5. Petrovas A., Rinkeviciene R. *Automatic Control Theory I, II: A Laboratory Manual.* Vilnius: Technika, 2012. 98 p.

6. Kravtsov A.F., Zaitseva E.V., Chuiko Yu.N. *Raschet avtomaticheskih sistem kontrolya i regulirovaniya metallurgicheskih protsessov* [Calculation of automatic control systems and regulation of metallurgical processes]. Kiiv: Higher School, 1981. 320 p. *(in Russian).*

7. Dubovoy V.M. *Identyfikatsiya ta modelyuvannya tekhnolohichnyh obyektiv i system keruvannya: navchalnyy posibnyk* [Identification and modeling of technological objects and control systems: textbook]. Vinnitsa: VNTU, 2012. 308 p. *(in Ukrainian).*