

Информационные системы и технологии

УДК 681.5.015

А.С. Ткачов

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ
проспект Перемоги, 37, корпус 18, м. Київ, 03056, Україна

Ідентифікація об'єктів керування за результатами активного експерименту

Виконано огляд існуючих підходів до структурної та параметричної ідентифікації динамічних об'єктів керування в умовах дії шумів вимірювальних пристроїв. Засобами інженерного пакету MATLAB побудовано часові та частотні характеристики, отримано моделі об'єкту керування та перевірено їх адекватність вихідному процесу на основі якого виконується ідентифікація. Бібл. 7, рис. 13.

Ключові слова: активний експеримент, структурна ідентифікація, параметрична ідентифікація, моделі простору станів.

Вступ

Актуальність проблем, пов'язаних зі створенням математичних моделей об'єктів керування, технологічних процесів не викликає жодних сумнівів, оскільки ці проблеми формують один з основних напрямків науки і техніки сьогодні – моделювання. Це пояснюється тим, що математичні моделі об'єктів широко застосовуються як при створенні систем керування цими об'єктами, так і при їх експлуатації. Побудова математичної моделі об'єкта може здійснюватися кількома методами: аналітичними, експериментальними та їх комбінацією. Аналітичні методи передбачають отримання математичного опису об'єкта на основі законів фізики, механіки, хімії та ін. Такий підхід застосовується у тих випадках, якщо досліджуваний об'єкт досить простий за структурою і добре вивчений. Якщо ж об'єкт вивчений недостатньо або ж настільки складний, що аналітичний опис його математичної моделі практично неможливий, вдаються до експериментальних методів, суть яких зводиться до статистичної обробки даних вимірювань. При комбінації аналітичних та експериментальних методів спочатку створюється апріорна модель, отримана аналітичним шляхом, яка уточнюється за допомогою відповідних експериментів.

Експерименти бувають пасивними та активними. При пасивному експерименті інформація

про досліджуваний об'єкт накопичується шляхом пасивного спостереження, тобто інформацію отримують в умовах звичайного функціонування об'єкта. Активний експеримент проводиться зі застосуванням штучного впливу на об'єкт за спеціальною так званою програмою експерименту. Прикладом пасивного експерименту може бути об'єкт, що не має входів, тільки виходи, і вплинути на його роботу неможливо. Яскравим прикладом такого об'єкта є кліматичний об'єкт, коли вимірюють метеорологічні параметри (температуру, вологість, швидкість вітру та ін.). При плануванні активного експерименту вирішується завдання раціонального вибору факторів, що істотно впливають на об'єкт дослідження, та визначення відповідної кількості проведених дослідів.

Активний експеримент дозволяє швидше й ефективніше вирішувати завдання дослідження, але більш складний та може перешкоджати нормальному ходу технологічного процесу. Проте, враховуючи переваги активного експерименту, коли це можливо, застосовують саме його.

Метою статті є побудова математичних моделей об'єктів керування на основі даних, отриманих за допомогою активного експерименту.

Задачі ідентифікації

Основна задача ідентифікації полягає у визначенні математичної моделі об'єкта, що перетворює вхідні впливи у вихідні величини. У зв'язку з цим виділять задачі структурної та параметричної ідентифікації.

При структурній ідентифікації визначають структуру і вигляд математичної моделі об'єкта. Після того як математична модель об'єкта визначена, проводять параметричну ідентифікацію, яка полягає у визначенні числових параметрів (коефіцієнтів) математичної моделі. Завданням структурної ідентифікації є представлення реального об'єкта керування у вигляді математичної моделі. Конкретний вибір математичної моделі залежить від типу об'єкта. У якості

математичних моделей технічних систем застосовуються диференційні рівняння в звичайних і часткових похідних. Причому при вирішенні задач керування перевага надається моделям, що описуються диференційними рівняннями в звичайних похідних.

Рішення задач ідентифікації здійснюється методами непараметричної та параметричної ідентифікації. При використанні методів непараметричної ідентифікації визначають часові та частотні характеристики об'єктів, а також характеристики випадкових процесів, що генеруються об'єктами або вимірювальними пристроями. Друга група методів використовується для визначення коефіцієнтів передавальних функцій або рівнянь об'єкта у просторі станів.

Заключним етапом ідентифікації об'єкту є перевірка адекватності отриманої моделі з точки зору близькості виходів реального об'єкту керування та його математичної моделі.

Види моделей

Розглянемо основні види лінійних неперервних стаціонарних моделей динамічних об'єктів.

1. *Диференційне рівняння.* Найбільш універсальна модель, що має форму

$$\sum_{i=0}^n a_i y^{(i)}(t) = \sum_{j=0}^m b_j u^{(j)}(t),$$

де n – порядок моделі ($n \geq m$), a_i та b_j – постійні коефіцієнти (параметри моделі), $y^{(i)}(t)$, $u^{(j)}(t)$ – похідні, відповідно, сигналів на виході та вході моделі.

2. *Передавальна функція* визначається як відношення перетворень Лапласа від вхідного та вихідного сигналів моделі.

$$W(s) = \frac{L\{y(t)\}}{L\{u(t)\}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\sum_{j=0}^m b_j s^j}{\sum_{i=0}^n a_i s^i},$$

де S – змінна Лапласа.

3. *Імпульсна характеристика* представляє собою реакцію об'єкта з нульовими початковими умовами на вхідний сигнал у вигляді δ -функції.

4. *Перехідна характеристика* – це реакція об'єкта з нульовими початковими умовами на вхідний сигнал у вигляді одиничного стрибка.

5. *Частотні характеристики* об'єкта ви -

значаються коефіцієнтом передачі комплексної передавальної функції $W(j\omega)$.

Модуль комплексної передавальної функції $|W(j\omega)| = A(\omega)$ є амплітудо-частотною характеристикою (АЧХ) об'єкта, а аргумент $\arg(W(j\omega)) = \varphi(\omega)$ – фазо-частотною характеристикою (ФЧХ). Графічне представлення $W(j\omega)$ на комплексній площині при зміні частоти від 0 до $+\infty$ називається амплітудо-фазочастотною характеристикою (АФЧХ), або діаграмою Найквіста. У теорії керування часто використовуються логарифмічні частотні характеристики (ЛЧХ).

6. *Модель у просторі станів.* У просторі станів об'єкт керування описується сукупністю наступних векторів: вектор вхідних впливів $u(t)$, вектор станів $x(t)$ та вектор вихідних змінних $y(t)$.

Лінійний стаціонарний об'єкт представляють у вигляді векторно-матричних рівнянь:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t); \end{aligned}$$

де A – матриця об'єкта розмірністю $n \times n$;

B – матриця керування розмірністю $n \times m$;

C – матриця виходу розмірністю $r \times n$;

D – матриця розмірністю $r \times m$.

Всі наведені моделі є еквівалентними, тобто, маючи кожен з них, можна одержати решту інших.

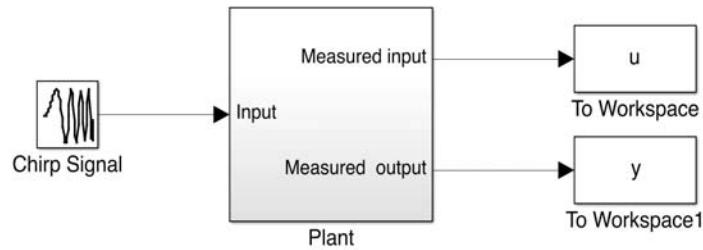
На практиці вимірювання неперервних сигналів проводиться в дискретні моменти часу, що представляє певну зручність при наступній обробці даних за допомогою обчислювальної техніки. Тому безперервні об'єкти представляють у вигляді дискретних моделей, використовуючи Z-перетворення або білінійне перетворення.

Основна частина

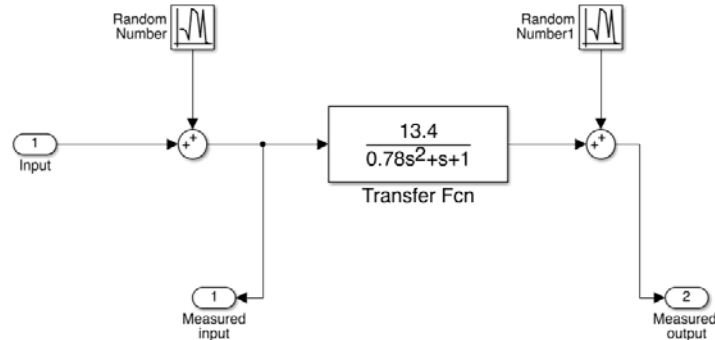
Для ілюстрації процедури ідентифікації об'єкту керування розглянемо об'єкт, що описується передавальною функцією

$$W(s) = \frac{13,4}{0,78s + s + 1}.$$

Вважатимемо, що ця модель нам не відома і будемо використовувати її як джерело статистичних даних для ідентифікації. На рис.1 представлено модель у пакеті MATLAB/Simulink, що імітує експериментальну установку з отримання вихідних даних для процесу ідентифікації.



а)



б)

Рис. 1. Модель експериментальної установки а) – загальний вигляд, б) – модель об'єкту керування з шумами вимірювання

Тестовим сигналом, за допомогою якого ми будемо визначати модель об'єкту керування, обрано гармонійний сигнал з плавно зростаючою частотою.

Такий сигнал генерує блок *Chirp Signal*. На рис. 2 представлено графік вихідного сигналу розглядаємого об'єкту.

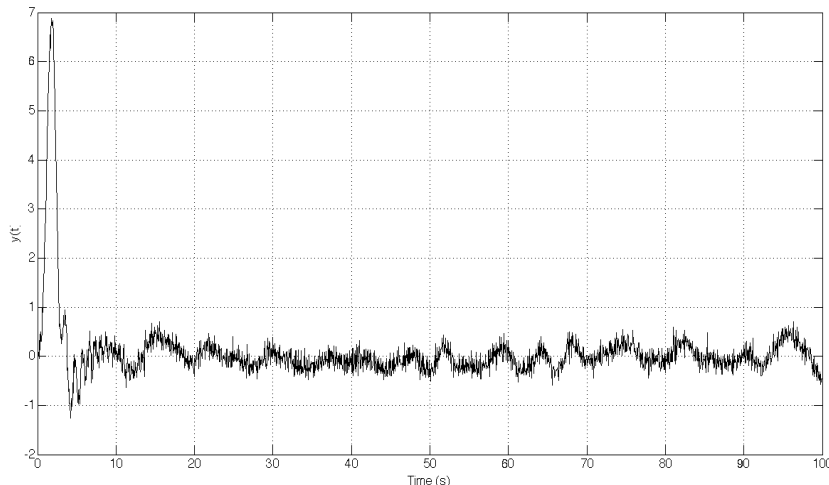


Рис. 2. Графік вихідного сигналу об'єкту

Блоки *To Workspace* імітують процес вимірювання значень вхідного та вихідного сигналів у дискретні моменти часу та зберігають ці значення у вигляді масивів *U* та *Y*. За допомогою блоків *Random Number*, що генерують нормально розподілений випадковий сигнал типу «білий

шум», моделюються шуми вимірювань вхідної та вихідної величини.

Інструментом для ідентифікації у пакеті MATLAB є спеціалізований тулбокс *System identification tool*, що викликається командою *ident*. На рис. 3 представлено вигляд його головного вікна.

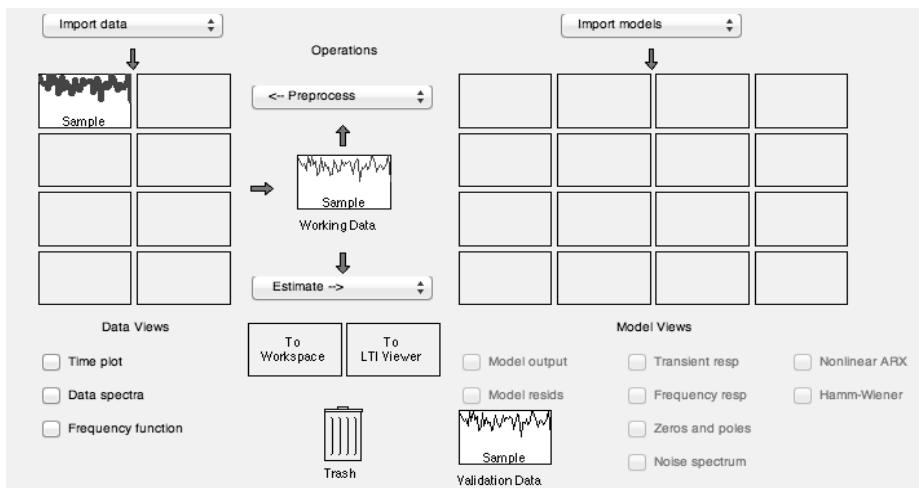


Рис. 3. Вікно тулбоксы *System identification tool*

Імпортуємо дані (масиви U та Y) і побудуємо графіки відповідних величин в залежності від

часу, натиснувши *Time plot* у вікні тулбоксы. Вказані графіки зображені на рис. 4.

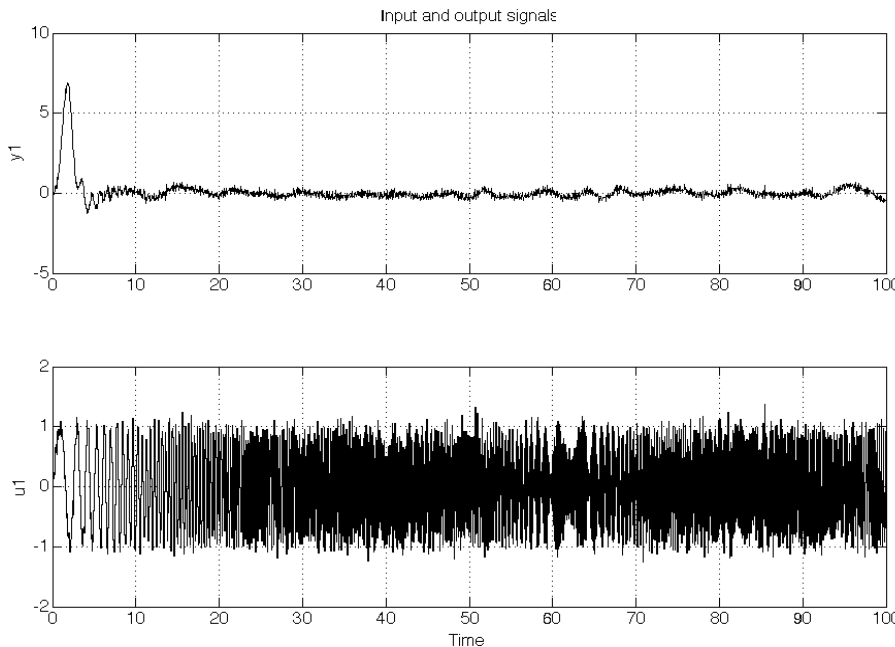


Рис. 4. Графіки вхідного та вихідного сигналів досліджуваного об'єкту

Проведемо попередню обробку сигналів досліджуваного об'єкта. З цією метою активізуємо список *Preprocess* (попередня обробка). Для попередньої обробки даних виберемо варіант *Remove means* (видалити середнє) – використовується при обробці експериментальних даних для видалення з масиву постійної складової. Результатом операції буде поява у лівій верхній частині вікна інтерфейсу *Ident* інформації про нові дані з новим іменем. Знову активізуємо вікно *Time plot* де можна побачити зображення двох нових сигналів, що відрізняються від початкових відсутністю постійної складової.

Виконаємо оцінювання перехідної характеристики об'єкта. У списку *Estimate* (оцінювання)

оберемо варіант *Correlation Model* (кореляційна модель), що приведе до появи діалогового вікна в якому задаємо діапазон часу та натискаємо кнопку *Estimate* (оцінити).

В правій частині основного вікна інтерфейсу *Model Views* з'явиться значок з написом *Imp*, це означає, що обрана модель побудована. Щоб побачити результат, перетягнемо значок *Imp* у поле *To LTI Viewer*. У вікні, що з'явилося, зможемо спостерігати перехідну характеристику об'єкта, знайдену кореляційним методом. На рис. 5 представлено порівняння перехідної характеристики вихідної моделі (пунктирна лінія) та знайденої за допомогою кореляційного методу (суцільна лінія).

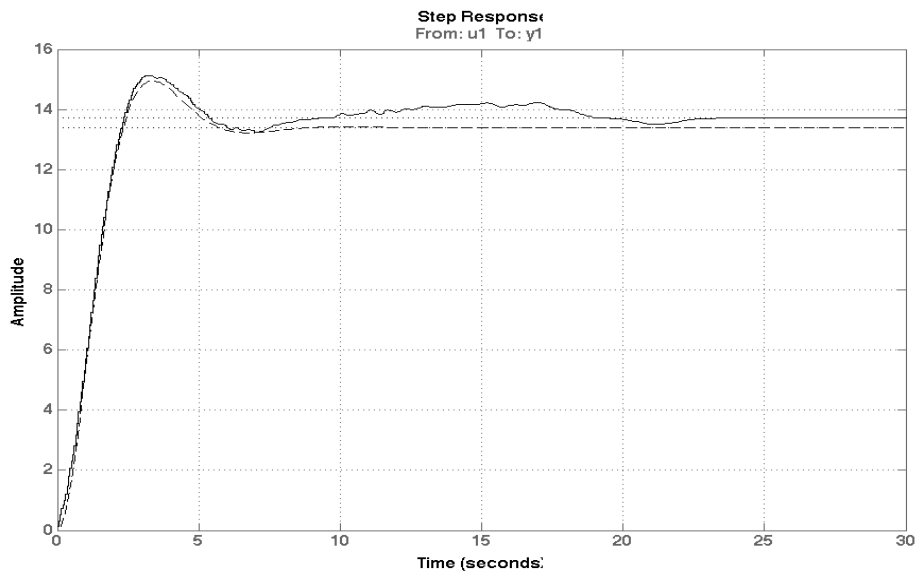


Рис. 5. Графіки перехідних характеристик досліджуваного об'єкту

Наступним кроком оцінимо частотні характеристики досліджуваного об'єкту.

Для цього у списку *Estimate* оберемо варіант *Spectral Model* (спектральна модель). На рис. 6 зображено логарифмічні амплітудну та фазову

частотні характеристики вихідного об'єкту та моделі, отриманої спектральним методом. Як видно з рисунку, отримана модель дуже точно повторює характеристики вихідного об'єкту.

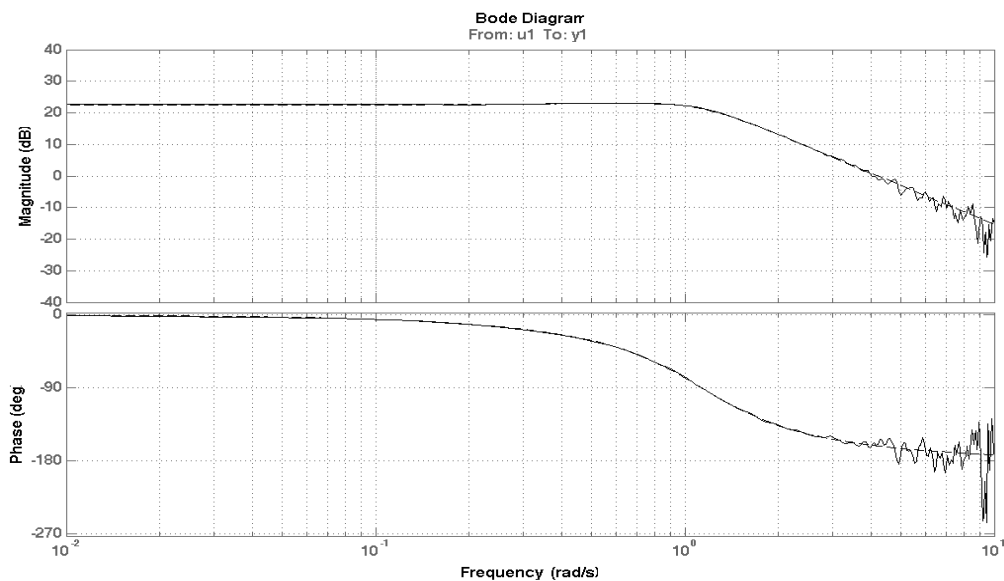


Рис. 6. Логарифмічні частотні характеристики

Для синтезу систем керування, як зазначалося вище, інженеру необхідно мати в розпорядженні математичну модель об'єкту у вигляді передавальної функції або моделі простору станів. Для цього тулбок *System identification*

tool має інструментарій для оцінки параметричних моделей.

У списку *Estimate* оберемо варіант *Transfer function Models* (моделі у вигляді передавальних функцій), діалогове вікно якого представлено на рис. 7.

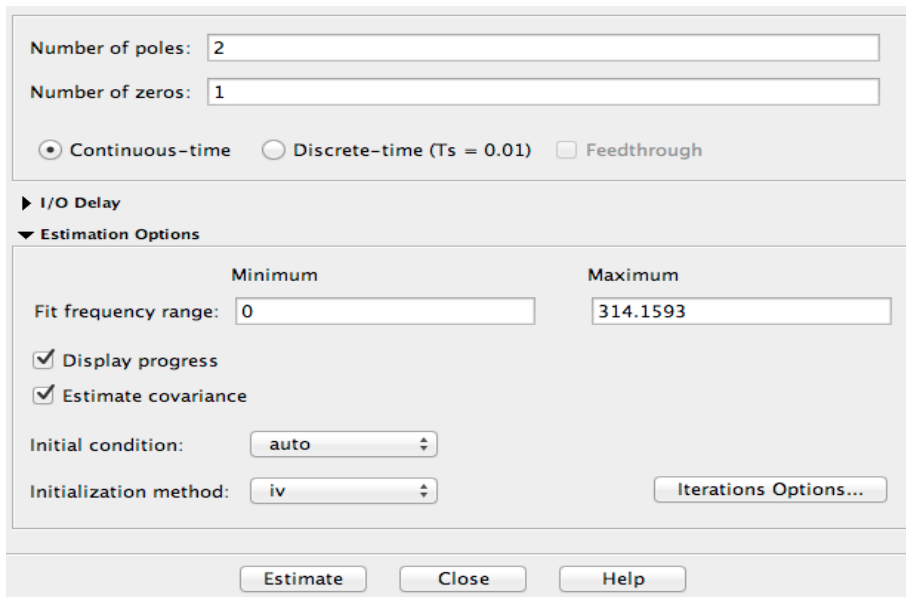


Рис. 7. Оцінка моделі у вигляді передавальної функції

На рис. 8 представлено перехідні характеристики для передавальних функцій, порядок яких складає 1, 2 та 3.

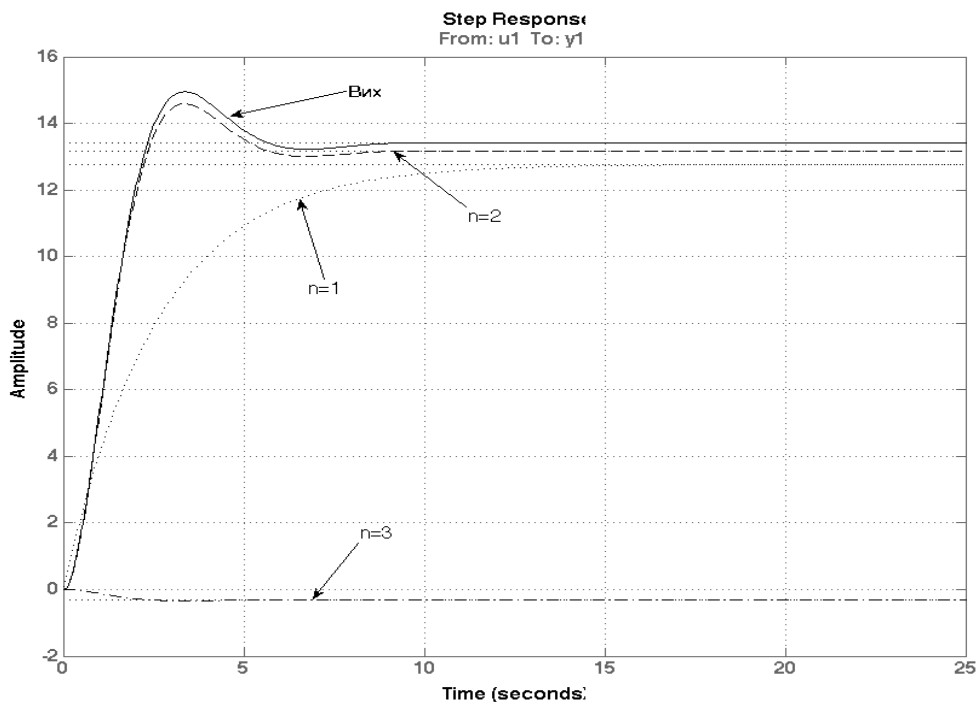


Рис. 8. Графічне зображення перехідних характеристик знайдених моделей

Як видно з рисунку, найбільше відповідає вихідному процесу графік моделі системи другого порядку. Передавальна функція, яку було отримано в ході ідентифікації

$$W(s) = \frac{13,1607}{0,7616s + 1,0084s + 1}$$

дуже близька за параметрами до передавальної функції вихідного об'єкту керування.

Оцінимо модель об'єкту у вигляді моделі простору станів. Для цього у списку *Estimate* оберемо варіант *State space Models* (моделі у просторі станів). Відповідне вікно представлено на рис. 9.

Рис. 9. Оцінювання моделі у просторі станів

Тулбок також дозволяє оцінити, який порядок моделі найбільше підходить для опису процесу, що досліджується. Для цього у полі *Orders*

можна вказати діапазон (в нашому випадку від 1 до 10). На рис. 10 представлено вікно вибору порядку моделі.

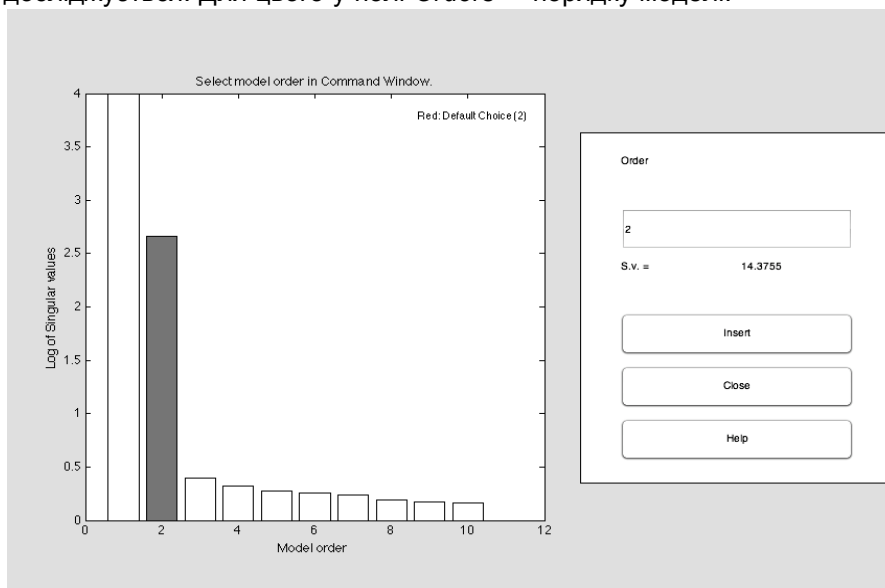


Рис. 10. Вікно вибору порядку моделі простору станів

Стовпчаста діаграма показує внесок n -ї складової вектора змінних стану у вихідний сигнал моделі (значення n зазначені по осі абсцис). Доцільно обирати значення n таким, щоб стовпці, з номерами більше n , мали б набагато меншу висоту, ніж стовпці, розташовані ліворуч. Вихо-

дячи із цих передумов система пропонує порядок, виділяючи його червоним кольором, на якому ми й зупинимося ($n=2$).

На рис. 11 представлено перехідні характеристики вихідного об'єкта (штрихова лінія) та знайденої моделі (суцільна лінія).

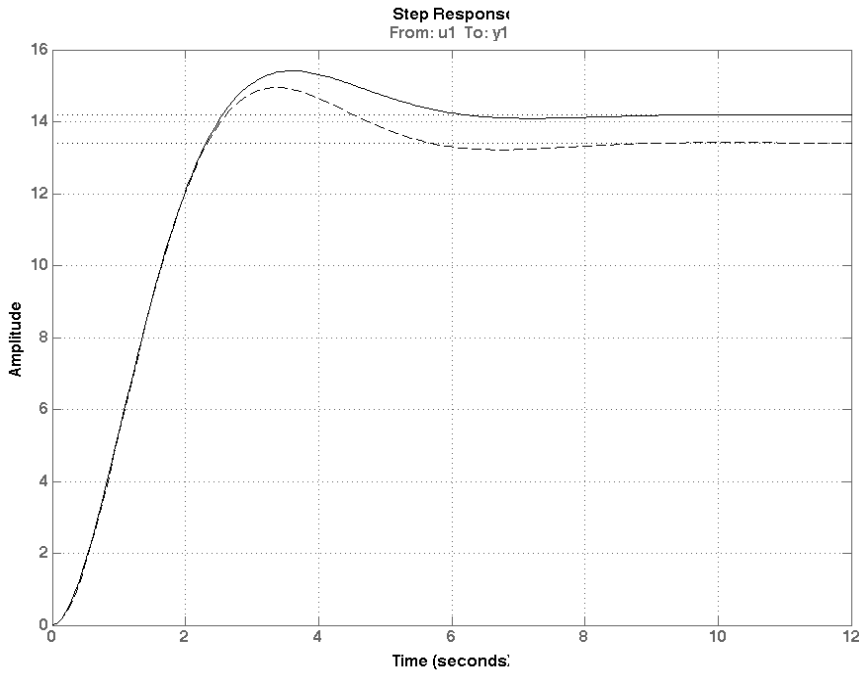


Рис. 11. Графічне зображення перехідних характеристик знайденої моделі у просторі станів та об'єкта керування

Отриману модель експортуємо у робочу область MATLAB та запишемо відповідні матриці

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1,143 & 1,326 \\ -0,7314 & -0,2176 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0,267 \\ 0,7956 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 19,56 & -6,262 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{d} = 0.$$

На рис. 12 представлено модель у пакеті MATLAB/Simulink, яка дозволяє порівняти отримані параметричні моделі з перехідною характеристикою вихідного об'єкта, а на рис. 13 – відповідно перехідні характеристики.

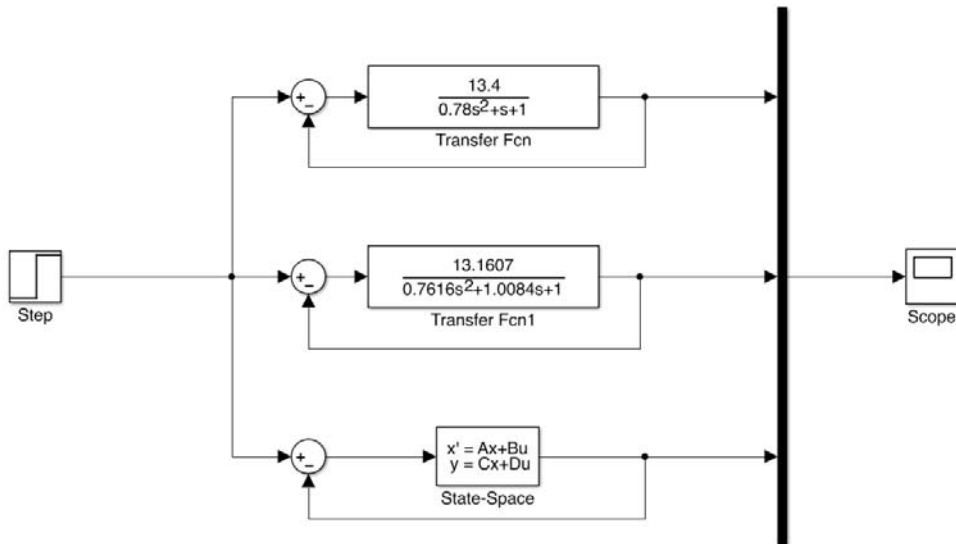


Рис. 12. Модель для порівняння отриманих результатів

На рис. 13 суцільною лінією зображено перехідну характеристику вихідного об'єкта, штриховою – характеристику моделі у вигляді пере-

давальної функції, а штрихпунктирною – модель у просторі станів.

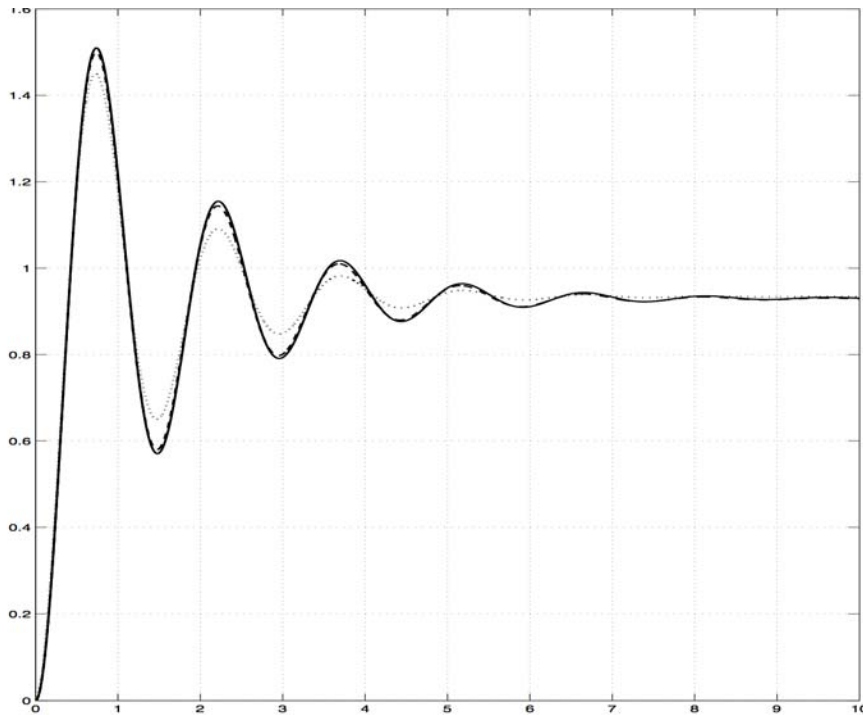


Рис. 13. Графічне зображення перехідних характеристик моделей

Як видно з рисунку, отримані перехідні характеристики моделей у вигляді передавальних функцій та векторно-матричних моделей практично співпадають, що свідчить про ефективність застосування методів параметричної ідентифікації об'єктів керування в умовах неповної інформації.

Висновки

Таким чином у статті розглянуто основні підходи до оцінювання моделей об'єктів керування, виходячи з вимірних даних у ході активного експерименту. За допомогою пакету MATLAB змодельовано процес отримання даних з реального об'єкту, враховуючи дію шумів, що виникають при застосуванні реальних вимірювальних приладів. На основі отриманих даних було за допомогою кореляційного методу побудовано перехідну характеристику об'єкту, за допомогою спектрального аналізу – отримано логарифмічні частотні характеристики. Методи параметричної оцінки дозволили знайти математичні моделі у вигляді передавальних функцій та простору станів, що дозволить в подальшому на їх основі виконувати синтез систем керування.

Список використаних джерел

1. Балакирев В.С., Дудников Е.Г., Цирлин А.М. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. – М.: Энергия, 1967. – 232 с.
2. Гроп Д. Методы идентификации систем. – М: Мир, 1979. – 302 с.
3. Ивахненко А. Г., Юрачковский Ю. Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. – М.: Радио и связь, 1987. – 120 с.
4. Коновалов В.И. Идентификация и диагностика систем. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 156 с.
5. Современные методы идентификации систем / Под ред. П. М. Эйкхоффа. М. Мир, 1983. – 400 с.
6. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
7. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. М: Наука, 1984. – 320 с.

Поступила в редакцию 16 декабря 2013 г.

УДК 681.5.015

А.С. Ткачов

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
проспект Победы, 37, корпус 18, г. Киев, 03056, Украина.

Идентификация объектов управления по результатам активного эксперимента

Выполнен обзор существующих подходов к структурной и параметрической идентификации динамических объектов управления в условиях действия шумов измерительных устройств. Средствами инженерного пакета MATLAB построены временные и частотные характеристики, получены модели объекта управления и проверена их адекватность исходному процессу на основе которого выполняется идентификация. Библиография, 7, рис. 13.

Ключевые слова: активный эксперимент, структурная идентификация, параметрическая идентификация, модели пространства состояний.

UDC 681.5.015

A.S. Tkachov

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
Peremogy av., 37, build. 18, Kyiv, 03056, Ukraine.

Identification of plants on active experiment results

Review of existing approaches to structural and parametric identification of dynamic objects under conditions of noise measuring equipment was done. By means of engineering package MATLAB it was built time and frequency characteristics, obtained control object model and tested their adequacy to initial process through which identity is performed. Reference 7, figures 13.

Keywords: active experiment, structure identification, parameter identification, state space models.

References

1. Balakirev V.S., Dudnikov E.G., Tsirlin A.M. (1967), "Experimental determination of the dynamic characteristics of industrial plants". Moscow: Energiya, P. 232 (Rus)
2. Grop D. (1979), "Methods of systems identification". Moscow: Mir, P. 302. (Rus)
3. Ivakhnenko A.G., Yurachkovsky U.G. (1987), "Simulation of complex systems by experimental data". M.: Radio and communication, P. 120. (Rus)
4. Kononov V.I. (2010), "Identification and systems diagnostics". Tomsk: TPU, P. 156 (Rus)
5. ed. Eykhoff P.M. (1983), "Modern methods of systems identification". Mir, P. 400. (Rus)
6. Rotach V.Y. (1973), "The dynamics of the industrial automatic control systems". Moscow: Energiya, P. 440. (Rus)
7. Tzipkin Y.Z. (1984), "Fundamentals of information theory of identification". Moscow: Nauka, P. 320. (Rus)