Zhuchenko A. I., Spitsyn Ye. I.
STRUCTURE OF COMPUTER SIMULATION SYSTEM OF REFORMER FURNACE

The structure of computer simulation system of reformer furnace for training and certification of oil refineries personnel is developed. The modular structure of training system is got.

Keywords: *reformer furnace, computer simulator, modular structure.*

References

1. *Marshal V.* Osnovnye opasnosti himicheskih proizvodstv [Main dangers of chemical productions] / V. Marshal ; per. s angl. – M. : Mir, 1991. – 672 s.
2. *Garrison W. G.* Major fires and explosions analyzed for 30 year period / W. G. Garrison // Hydrocarbon Processing. – 1988. – Vol. 67. – № 9. – P. 115-120.
3. *Dozorcev V. M.* Dinamicheskoe modelirovanie v optimal'nom upravlenii i avtomatizirovannom obuchenii operatorov tehnologicheskih processov. Komp'juternye trenazhery real'nogo vremeni [Dynamic modeling in optimum control and the automated training of operators of technological processes. Computer simulators of real time] / V. M. Dozorcev // Pribory i sistemy upravlenija. – 1996. – № 8. – S. 41-50.
4. *Altunin V. K.* Obuchajushhie sistemy i trenazhery [Training systems and exercise machines] / V. K. Altunin // Pribory i sistemy upravlenija. – 1996. – № 6. – S. 13-14.

УДК 681.5.03

КОВАЛЮК Д. О.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ В МАТЕМАТИЧНОМУ ПАКЕТІ MATLAB

Розглянуто дослідження стійкості систем керування засобами математичного пакету Matlab. Показано основні моменти створення моделей систем, наведено власні реалізації критеріїв стійкості, що дозволяє проводити дослідження довільної складності.
Ключові слова: *стійкість систем керування, моделювання систем, Matlab, Control System Toolbox.*

Постановка проблеми. Функціонування систем керування повинно задовольняти деяким вимогам, важливе місце серед яких має показник стійкості. Дослідженню стійкості систем керування присвячено багато робіт, в яких наводяться різні групи критеріїв та область їх застосування. Дані дослідження вимагають як математичних розрахунків, так і графічної інтерпретації. Проте на практиці реалізація цих критеріїв є непростим завданням, яке важко вирішити інженеру-розробнику без суттєвих знань програмування або використання спеціальних програмних засобів.

Аналіз попередніх досліджень. Серед наявних засобів моделювання та розрахунку систем керування – найперспективнішим є використання математичних пакетів, а особливо інструментарію Control System Toolbox у Matlab. Його перевагою є велика кількість вбудованих функцій, виклик яких дозволяє за одну інструкцію побудувати перехідну чи частотну характеристику, об'єднати елементи систем керування різними типами зв'язків. Проте цей Toolbox не містить реалізації деяких критеріїв та підходів дослідження стійкості (основною причиною є використання різних методів теорії автоматичного керування на заході та в пострадянських країнах). Крім того, різним дослідникам необхідно зосередитися на окремих аспектах.

Метою статті є підвищення ефективності дослідження стійкості систем керування за рахунок реалізації критеріїв стійкості та методик дослідження на базі готової платформи для моделювання.

Виклад основного матеріалу. У статті для наочності розглянуто клас SISO-систем (single-input/single-output), тобто система має один вхід та один вихід. Проте результати досліджень без зайвих труднощів можуть бути поширені на системи, що мають декілька пар вхід – вихід (MIMO-системи). У цій роботі можливості Control System Toolbox будуть досліджені для одноконтурних замкнених систем автоматичного керування, в яких об'єкт задається передатною функцією:

$$W(p) = \frac{b_m p^m + ... + b_1 p + b_0}{a_n p^n + ... + a_1 p + a_0} e^{-p\tau}. \quad (1)$$

Створення моделі об'єкта, що описується передатною функцією (1), наведено в праці [1]. Нехай маємо такі коефіцієнти передатної функції: $b_0 = 1$, $a_1 = 10$, $a_0 = 1$. Тоді передатну функцію задамо так:

```
num = [1];              %numerator
den = [10 1];           %denominator
tau = 4;                %input_delay
Wob = tf(num, den);
Wob.ioDelay = tau;
Wob.variable = 'p'      %transfer function variable
```

Остання інструкція за допомогою властивості variable встановлює значення змінної Лапласа. Якщо ввести вказані інструкції в командному вікні Matlab, отримаємо результат:

```
Transfer function:
                1
exp(-4*p) * --------
             10 p + 1
```

Створення моделі розімкненої та замкненої системи. Як регулятор виберемо один з типових регуляторів, що реалізують лінійні закони керування – *ПІ*-регулятор. Розглянемо створення розімкненої і замкненої системи для об'єкта, заданого передатною функцією (1) та *ПІ*-регулятора. Для створення моделі регулятора необхідно:

```
%% represent contoller
Kp = 1;
Ti = 20;
p = tf('p');
Controller = Kp*(1 + 1/(Ti*p))
```

Якщо ввести вказані інструкції в командному вікні Matlab, отримаємо такий результат:

```
Transfer function:
    20 p + 1
    --------
      20 p
```

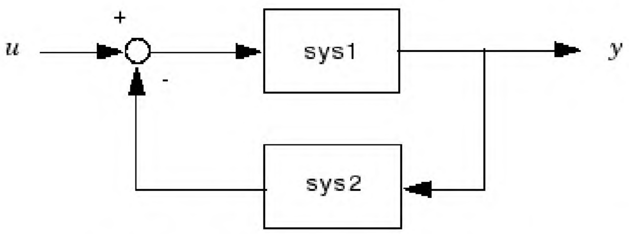


Рис. 1 – Схема системи керування

Вважатимемо, що система керування реалізує принцип керування за відхиленням, а вихідна величина *y* повинна дорівнювати задаючому впливу *u* (рис. 1).

Для утворення моделей систем Control System Toolbox пропонує функції конкатенації (`[,]`, `[;]`, `append`), паралельного і послідовного з'єднання (`parallel` та `series`), зворотнього зв'язку (`feedback`). Ці функції є корисними для моделювання розімкнених і замкнутих систем. Для реалізації системи, структура якої представлена на рис. 1, підходить функція `feedback`, що повертає LTI – модель для від'ємного зворотнього зв'язку – `sys = feedback(sys1,sys2)`

Одним з нюансів при об'єднанні об'єкта і регулятора є складова транспортного запізнювання в об'єкті. Для застосування методів дослідження стійкості системи керування таке транспортне запізнювання має бути у вигляді передатної функції відповідної структури. Control System Toolbox підтримує апроксимацію транспортного запізнювання на основі дробу Паде. Синтаксис команди `sysx = pade(sys, N)` – повертає вільну від затримок апроксимовану передатну функцію.

Реалізуємо тепер замкнену і розімкнену системи:

```
%% create openloop/closeloop  system
approximation_order = 2;
Wob_x = pade(Wob, approximation_order);

sys_open = series(Controller, Wob_x);
sys_close = feedback(sys_open, 1)
```

Отримуємо таку передатну функцію замкненої системи:

```
          20 p^3 - 29 p^2 + 13.5 p + 0.75
  ------------------------------------------
  200 p^4 + 340 p^3 + 151 p^2 + 28.5 p + 0.75
```

Дослідження стійкості системи за коренями характеристичного поліному. Стійкість системи за наявності її характеристичного полінома можна визначити дуже просто – треба знайти корені цього полінома і з’ясувати, чи всі вони знаходяться в лівій половині комплексної площини. Для розрахунку коренів та полюсів передатної функції та їх графічного представлення будемо використовувати команди:

Таблиця 1 – Функції для обчислення нулів і полюсів передатної функції

Команда	Синтаксис	Опис
`esort`	`esort(p)`	сортує полюси по дійсній частині
`pole`	`pole(sys)`	розрахунок полюсів LTI-моделі
`zero`	`tzero(sys)`	розрахунок нулів LTI-моделі
`pzmap`	`pzmap(sys)`	виводить полюси і нулі передатної функції

Використаємо отриману передатну функцію замкненої системи і застосуємо до неї команди:

```
%% stability by poles
poles = esort(pole(sys_close))
zeros = esort(zero(sys_close))
pzmap(sys_close)
```

Результатом виконання буде:

```
poles =
 -0.0311
 -0.2605 + 0.1930i
 -0.2605 - 0.1930i
 -1.1480

zeros =
 0.7500 + 0.4330i
 0.7500 - 0.4330i
-0.0500
```

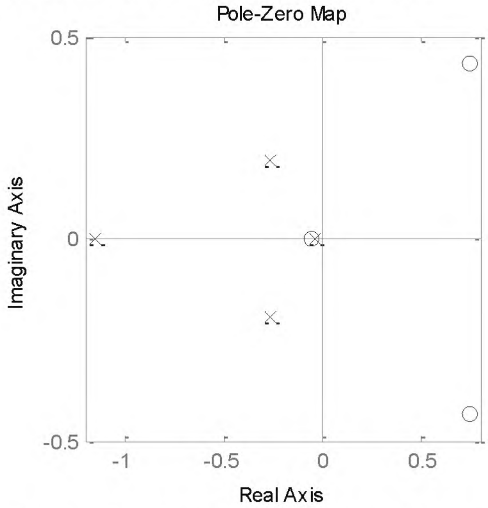


Рис. 2 – Полюси і нулі передатної функції замкненої системи

Усі корені мають від’ємну дійсну частину, тобто знаходяться в лівій половині комплексної площини – система стійка.

Критерій Михайлова. Будемо розглядати графічну інтерпретацію даного критерію. Аби система була стійкою, необхідно, щоб годограф характеристичного рівняння замкненої системи по черзі проходив кількість квадрантів, що дорівнює порядку характеристичного рівняння. Для розв’язання дціеї задачі необхідно: виокремити знаменник передатної функції замкненої системи; замінити в характеристичному поліномі *p* на *jw* та побудувати годограф.

Оскільки у нас передатна функція замкненої системи представлена у вигляді дробу, тепер необхідно отримати характеристичний поліном. Функція `tf` «запаковує» дані про модель і час дискретизації в окремий LTI об’єкт. Також існують команди для забезпечення виокремлення даних з об’єкта. Для моделі, представленої у вигляді передатної функції, такою командою є `[num, den, Ts] = tfdata(sys)`.

Для отримання знаменника характеристичного полінома передатної функції виконаємо команди:

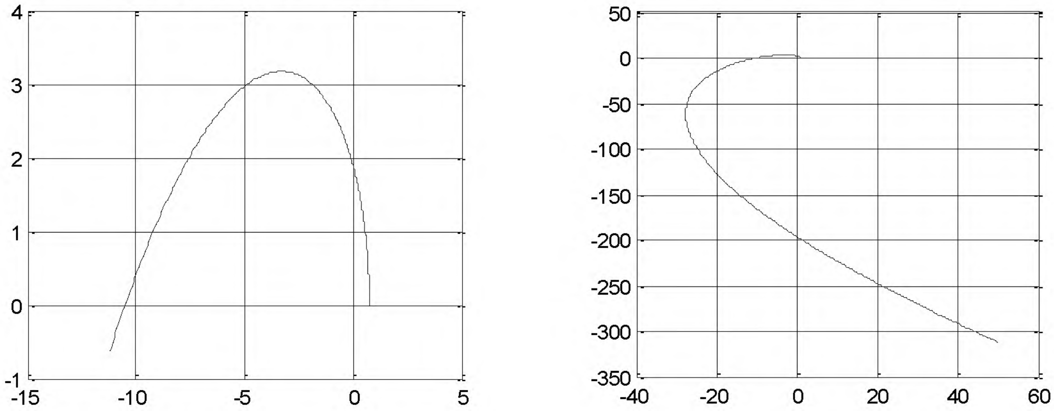
```
[num_koef, den_koef, Ts] = tfdata(sys_close);
den_koef = den_koef{1,1}
den_koef = 200.0000 340.0000 151.0000 28.5000 0.7500
```

Тепер залишається обчислити значення цього полінома в заданому діапазоні частот, для цього використаємо `polyval`, що повертає значення полінома степеня n, розраховане в точках x. Перший аргу-мент – це вектор довжини, $n+1$ елементи якого є коефіцієнтами степенів полінома за спаданням.

```
%%Mihaylov
Wbeg = 0.01;           %
```

```
Wend = 10;
w = Wbeg : 0.001 : Wend;
y = polyval(den_koef, j*w);
plot(y(:))
grid
```

Годограф по черзі проходить чотири квадранта, що відповідає порядку системи. Таким чином, можна зробити висновок про стійкість системи.

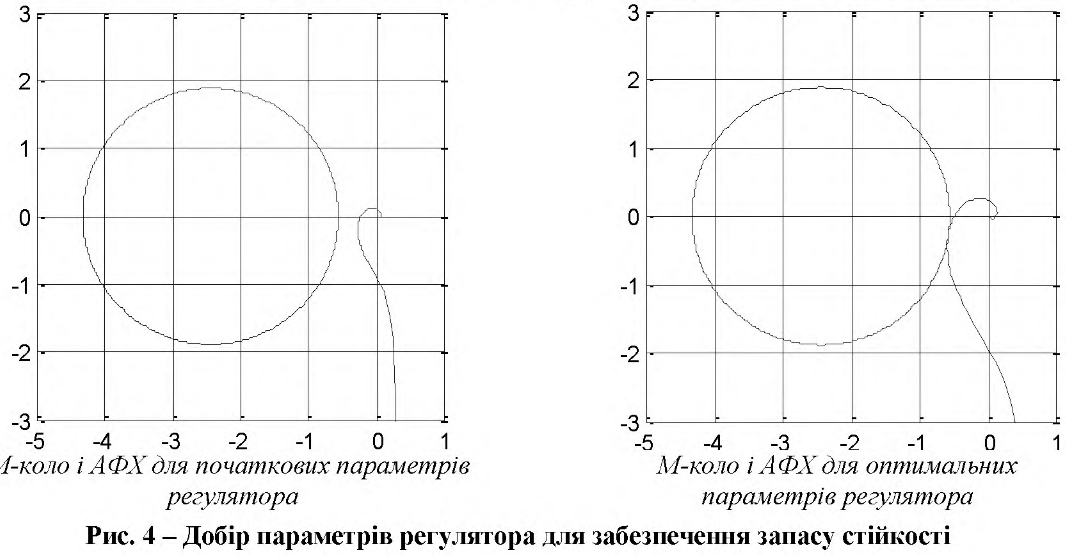


низькочастотний діапазон (w = 0... 0,3) *діапазон w = 1... 10*

Рис. 3 – Годограф Михайлова

Критерій Найквіста. Критерії Гурвіца та Михайлова доцільно використовувати для визначення стійкості систем із зосередженими параметрами, коли порядок системи скінченний, відносно невисокий. Разом з тим, частотний критерій Найквіста дозволяє досліджувати стійкість систем як із зосередженими, так і з розподіленими параметрами. Одне з формулювань цього критерію такий: аби система, стійка в розімкненому стані, залишалась стійкою і після замикання, необхідно і достатньо, щоб годограф розімкненої системи в діапазоні частот від 0 до ∞ не охоплював точку $-1+0j$.

На практиці більш важливим є розрахунок не стійкості, а запасу стійкості, що досягається настроюванням системи на заданий показник коливності. Детально ця методика М-кола розглядається в праці [3], а алгоритм її реалізації в Matlab – у праці [2]. Основна ідея: будується АФХ розімкненої системи керування та коло, радіус якого залежить від показника коливності. За рахунок зміни параметрів регулятора потрібно забезпечити торкання АФХ до кола. Це означає, що системі керування буде задовольняти вибраний показник коливності. Результат ітеративного підбору параметрів регулятора наведено на рис. 4.



М-коло і АФХ для початкових параметрів регулятора *М-коло і АФХ для оптимальних параметрів регулятора*

Рис. 4 – Добір параметрів регулятора для забезпечення запасу стійкості

АФХ системи керування торкається кола, що свідчить про забезпечення заданого показника коливності (для нашого випадку $M = 1,3$).

Висновок. Написання власного програмного коду для дослідження стійкості систем керування, що використовує вбудовані функції пакету Matlab, дозволяє виконати дослідження довільної складності, суттєво спростивши їх реалізацію.

Список використаної літератури

1. *Медведев В. С.* Control System Toolbox. Matlab 5 для студентов / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. – М. : Диалог-МИФИ, 1999. – 287 с.
2. *Ковалюк Д. О.* Моделювання систем керування в інструментарії Control System Toolbox / Д. О. Ковалюк // Автоматика – 2012 : тези доп. 19 міжнар. конф. з автоматич. управл. (Київ, 26-28 вер. 2012 р.). – К. : НУХТ, 2012. – С. 368-369.
3. *Ротач В. Я.* Теория автоматического управления / В. Я. Ротач. – М. : МЭИ, 2008. – 396 с.

Надійшла до редакції 05.05.2012.

Kovaliuk D. O.

CONTROL SYSTEMS STABILITY RESEARCH USING CONTROL SYSTEM TOOLBOX OF MATHEMATICAL PACKAGE MATLAB

The article describes control systems stability research using Control System Toolbox of mathematical package Matlab. Single-input/single-output system for the object specified in the form of a rational transfer function with delay and the PI-controller has been created. The system stability has been determined over the roots of the characteristic polynomial, Mikhailov and Nyquist criteria. The own implementation of stability criteria has been proposed. That allows to work study of arbitrary complexity. The controller parameters have been calculated for a given rate of oscillation by the M-circle method.

Keywords: *stability control systems, simulation systems, Matlab, Control System Toolbox.*

References

1. *Medvedev V. S.* Sontrol System Toolbox. Matlab 5 dlja studentov [Control System Toolbox. Matlab 5 for students] / V. S. Medvedev, V. G. Potemkin. – M. : Dialog-MIFI, 1999. – 287 s.
2. *Kovaliuk D. O.* Modeliuvannia system keruvannia v instrumentarii Sontrol System Toolbox [A design of control system is in the tool of Sontrol System Toolbox] / D. O. Kovaliuk // Avtomatyka – 2012 : tezy dop. 19 mizhnar. konf. z avtomatych. upravl. (Kyiv, 26-28 ver. 2012 r.). – K. : NUKhT, 2012. – S. 368-369.
3. *Rotach V. Ja.* Teorija avtomaticheskogo upravlenija [Theory of automatic control] / V. Ja. Rotach. – M. : Izdatel'skij dom MJeI, 2008. – 396 p.

УДК 681.3.06

ЖУЧЕНКО А. І., д.т.н., проф.; ЦАПАР В. С., асист.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

Наведено результати моделювання температурного розподілу у скловарній печі. Наведено дослідження одержаних температурних полів у різних перетинах скловарної печі. Сформульовано результати дослі-джен-ня температурних полів у скловарній печі.
Ключові слова: *скловарна піч, температурне поле, математична модель.*

Постановка проблеми. Однією із найбільших проблем вітчизняного скловарного виробництва є сьогодні його велика енергоємність. Зважаючи на сучасні тенденції росту цін на природний газ, який залишається основним паливом для скловарних печей, оптимізація витрат газу мала б значний економічний ефект. Досягти цього можна, визначивши і реалізувавши оптимальні режими процесу скловаріння. Температурний режим є