DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-269-5-20-23

УДК 621.18

ЦИФРОВІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ В МЕХАТРОННИХ СИСТЕМАХ

Морнева М.О., Голубєва С.М., Торопов А.С.

DIGITAL AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS IN MECHATRONIC SYSTEMS

Morneva M.O, Golubieva S.M., Toropov A.S.

У статті розглянуто питання щодо цифрових систем автоматичного керування, які відносяться до класу лінійних імпульсних систем, але мають свої особливості. Також знайдені різницеві рівняння і Z-перетворення передавальної функції двома способами: класичним і за допомогою білінійних перетворень. Побудовані перехідні і частотні характеристики системи автоматичного керування (САК). За допомогою математичного моделювання підтверджено, що при порівнянні характеристик безперервного і дискретного фільтрів з ростом частоти відмінність в характеристиках зростає.

Ключові слова: *мехатронні системи, автоматична система керування, мікропроцесори, автоматичні пристрої, електромеханічні перетворювачі.*

Вступ. Автоматична система керування – це сукупність керованого об’єкта й автоматичних вимірювальних та керуючих пристроїв[1]. На відміну від автоматизованої системи керування ця система самодіюча і реалізує встановлені функції процесу автоматично, без участі людини (крім етапів пуску та налагодження). На практиці часто послуговуються терміном-аналогом система автоматичного керування (САК).

Основними компонентами САК є:

– об’єкт керування (ОК), яким система повинна керувати;

– датчики, які забезпечують отримання інформації про об’єкт;

– пристрій керування,

– головний компонент системи керування, який порівнює задані і вимірювані на об’єкт і дані та формує вхідні змінні, які поступають на об’єкт. Задані дані подаються в пристрій керування. Вихідні дані з об’єкту керування вимірюються за допомогою датчиків, і вимірювані значення поступають в пристрій керування[2]. Пристрій керування формує вхідні дані, які поступають на вхід об’єкту керування.

Цифрові САК відносяться до дискретних, в яких вхідні або вихідні сигнали є послідовністю імпульсів.

В цифрових системах проводиться квантування сигналів за часом та рівнем. В цифрових системах, крім об‘єкту керування, є аналого-цифрові і цифро-аналогові перетворювачі, таймер часу та комп’ютер (мікропроцесор, мікроконтролер)[3].

В даний час цифрові САК набули широкого поширення в різних галузях промисловості. Ці системи, як правило, мають вбудовані керуючі мікро-ЕОМ або мікропроцесори. Робота цифрових САК здійснюється під управління робочої програми, яка міститься в пам'яті ЕОМ, або вводиться ззовні[4]. Перевагою цифрових САУ є висока точність роботи, малі габарити керуючої частини, можливість оперативне змінювати алгоритм роботи САУ за рахунок зміни керуючої програми.

Мета дослідження полягає в спробі найти різницеві рівняння і Z-перетворення передавальної функції двома способами: класичним і за допомогою білінійних перетворень (використовуючи пакет прикладних програм для вирішення задач технічних обчислень Matlab) та побудувати перехідні і частотні характеристики.

Результати дослідження. Цифрові САК відносяться до класу лінійних імпульсних систем, але мають свої особливості. Так в імпульсних системах інформація про вхідну дію визначається в дискретні моменти часу $(t = t_i(0,1,2,3...))$ і модулюється різними способами (амплітудна, фазова, широтно-імпульсна).

У цифрових САК моменти часу рівновіддалені, тобто $t_i = iT$, де *T*- період квантування, а *i* - модуляція амплітудна[5]. Наявність і вид інформації в проміжках між моментами виміру залежить від типу екстраполятору, який визначає закон зміни інформації між моментами виміру інформації. Екстраполятор бувають нульового, першого і більш високого порядку. Екстраполятор нульового порядку зберігає після виміру сигнал постійним до наступного виміру, екстраполятор першого порядку реалізує тенденцію зміни сигналу по першій похідній і т.д.

В основі теорії імпульсних, а отже і цифрових систем, лежать різницеві рівняння (аналог диференціальних рівнянь) і Z - передавальні функції (аналоги передавальних функцій безперервних систем)[6].

Для імпульсних систем існує також поняття рівняння в кінцевих різницях. Воно може бути отримано з лінійного диференціального рівняння шляхом заміни символу диференціювання *d* на кінцеве прирощення *Δ*, а поточного часу *t* на період квантування *T.* Наприклад для лінійного диференціального рівняння 2-го порядку

$$a_2\frac{d^2x}{dt^2}+a_1\frac{dx}{dt}+a_0x=b_1\frac{dg}{dt}+b_0g, \qquad (1)$$

рівняння в кінцевих різницях матиме вигляд:

$$\frac{a_2}{T}\Delta^2x+\frac{a_1}{T}\Delta x+a_0x=\frac{b_1}{T}\Delta g+b_0g. \qquad (2)$$

У зв'язку з тим, що цифрова система керування оперує не різницями, а абсолютними значеннями змінних - рівняння в кінцевих різницях непридатне для використання в прикладних програмах і його перетворюють у різницеві рівняння. Різницеве рівняння для нашого прикладу складається таким чином. Нехай в деякий поточний момент часу *t = Tn* вхідні змінна *g(t)=g(Tn),* а в попередній момент знімання інформації *g(t)=g(T(n-1)).* Аналогічно, якщо в поточний момент вихідна змінна *x(t)=x(Tn),* то в попередній і предпопередний моменти значення *x(t)* відповідно були: *x(t)=x(T(n-1))іx(t)=x(T(n-2))* (рис. 1).

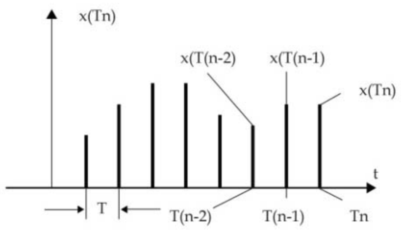


Рис. 1. Дискретний сигнал (решітчаста функція)

Через ці значення змінних можуть бути виражені різниці:

$$\begin{aligned}&\Delta g=g(Tn)-g(T(n-1)),\\&\Delta x_1=\Delta x=x(Tn)-x(T(n-1)),\\&\Delta x_2=x(T(n-1)-xT(n-2)),\\&\Delta^2x=\Delta_1x-\Delta_2x=x(Tn)-2x(T(n-1))+x(T(n-2)).\end{aligned} \qquad (3)$$

Після підстановки виразів (3) в (2) і деяких очевидних перетворень отримаємо:

$$x(nT)=d_0g(Tn)+d_1g(T(n-1))-c_1x(T(n-1))-c_2x(T(n-2)), \qquad (4)$$

де $c_1=\dfrac{-(2a_2+a_1T)}{a^2+a_1T+a_0T^2}$, $c_2=\dfrac{a_2}{a_2+a_1T+a_0T^2}$,

$d_0=\dfrac{b_1T+b_0T^2}{a_2+a_1T+a_0T^2}$, $d_1=\dfrac{-b_1T}{a_2+a_1T+a_0T^2}$.

У загальному вигляді рівняння лінійного дискретного фільтра буде мати вигляд:

$$x(nT)=\sum_{k=0}^{N}d_mg(nT-kT)-\sum_{k=1}^{M}c_mx(nT-mT), \qquad (5)$$

де *n* - порядок правій частині диференціального рівняння фільтра, а *m*- порядок лівій частині. Вираз (5) по суті є алгоритмом для обчислення черговий поточної змінної *x* за значеннями поточної вхідної змінної *g*, її попередніх значень, кількість яких одно порядку правій частині вихідного диференціального рівняння, а також попередніх значень вихідних змінних x, кількість яких одно порядку лівій частині вихідного диференціального рівняння. Різницеве рівняння у виразах (3,5) безпосередньо застосовується в прикладних керуючих програмах цифрових САК. Різницеві рівняння у виразі (5) можна отримати з Z - передавальних функцій. Нагадаємо, що Z - передатну функцію отримують застосовуючи дискретне перетворення Лапласа до вхідних і вихідних змінних розглянутого динамічного ланки, наприклад

$$X^*(s)=\sum_{n=0}^{\infty}xT_ne^{-sTn}, \text{ або}$$

$$Z(x(Tn))=X(z)=\sum_{n=0}^{\infty}x(Tn)z^{-n},$$

де $z=e^{sT}$, і беручи їх ставлення. Для різницевого рівняння (5), з огляду на, що у теоремі змішання

$$Z(x(T(n-m))=z^{-m}X(z),$$

а $$Z(g(T(n-k))=z^{-k}G(z),$$

отримаємо:

$$W(z)=\frac{X(z)}{G(z)}=\frac{\sum_{k=0}^{N}d_kz^{-k}}{1+\sum_{m=1}^{M}c_mz^{-m}} \qquad (6)$$

Для приватного рівняння *Z* - передавальна функція матиме вигляд

$$W(z)=\frac{X(z)}{G(z)}=\frac{d_0+d_1z^{-1}}{1+c_{-1}z^{-1}+c_2z^{-2}} \qquad (7)$$

Як бачимо коефіцієнти *c* і *d* в виразах (5) і (7) мають одні і ті ж значення, проте отримати безпосередньо різницеве рівняння високого порядку (як ми отримали для другого порядку) зазвичай буває складно і ці коефіцієнти беруть з Z - передавальної функції. Останню можна отримати кількома різними способами. В інженерній практиці Z - передавальну функцію найчастіше отримують зі звичайної передавальної функції за допомогою білінійної перетворення [] шляхом підстановки:

$$p = \frac{2}{T} \cdot \frac{(1 - z^{-1})}{(1 + z^{-1})}, \tag{8}$$

з якої випливає, що

$$z = \frac{1 + \frac{Ts}{2}}{1 - \frac{Ts}{2}} \tag{9}$$

Таким чином проведена заміна трансцендентного значення на лінійний вираз (9). Правомірність такої заміни заснована на припущенні, що гранична частота вхідного впливу і частота зрізу САК набагато менше частоти квантування ЦВМ $\omega_{кв} = 2\pi / T$.

Дійсно поклавши $s = j\omega$ маємо

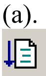
$$z = e^{jwT} = \cos\omega T + j\sin\omega T = \frac{1 + jtg\frac{\omega T}{2}}{1 - jtg\frac{\omega T}{2}}.$$

При $\omega T / 2 = 1$, або отримаємо *z,* що в операторної формі відповідає 9.

З теорії імпульсних систем відомо, що смуга відтворюваних частот лежить в межах $0 \le \omega_в \le \frac{\omega_{кв}}{2}$.

Застосування виразу (8) дозволяє при аналізі і синтезі дискретних систем використовувати апарат частотних характеристик, розроблений для безперервних лінійних систем.

Прикладом реалізації подібної моделі може бути дискретний фільтр бібліотеки Simulink прикладного пакета Matlab [7].

1. Використовуючи процедуру "bileniar" пакета Matlab знайдемо коефіцієнти Z-передавальної функції для коригуючої ланки $W_k(s) = \frac{bs + 1}{as + 1}$, в якому $b = 0,05$, $a = 0,7$. Для їх знаходження відкриємо вікно редагування М-файлів і внесемо в нього програму (а). У цьому ж вікні «клацнемо» мишкою по кнопці  (RUN). Результат обчислень (коефіцієнти *ad* і *bd*) з'явиться в командному (первинному) вікні (б).

2. З розділу Discrete (дискретні елементи) бібліотеки Simulink використовуємо блок Discrete Filtre, ввівши в нього коефіцієнти *bd* (чисельник) і *ad* (знаменник) по зростаючим ступенями і період квантування T=0,005с (рис. 2). Коефіцієнти *bd* і *ad* відповідають коефіцієнтам "*d*" і "*c*" в рівняннях (6) і (7).

а

```
b=[0.05 1]

a=[0.7 1]

Fs=200;
[bd, ad] = bilinear (b, a, Fs).
```

б

```
b =                  bd =

  0.0500   1.0000      0.0747  -0.0676

a =                  ad =

  0.7000   1.0000      1.0000  -0.9929
```

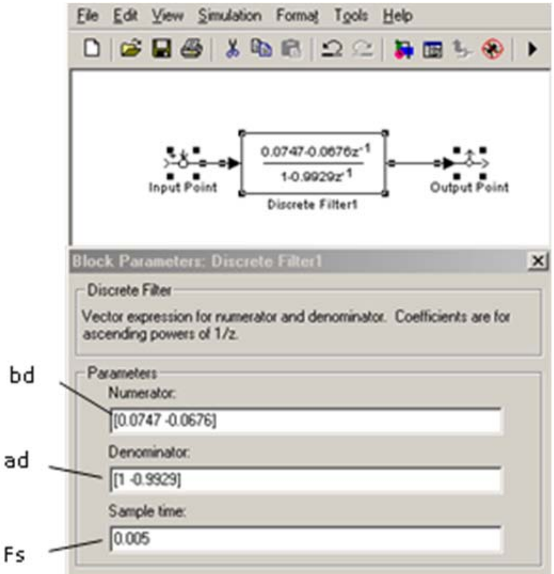


Рис. 2. Дискретний фільтр

3. При розгляді і порівняння частотних характеристик амплітудних і фазочастотних для пристроїв різних видів виникає проблема їх компактного представлення, так як значення амплітуд і частот істотно відрізняються один від одного. Вирішення цієї проблеми лежить у використанні логарифмічних масштабів в частотних характеристиках.

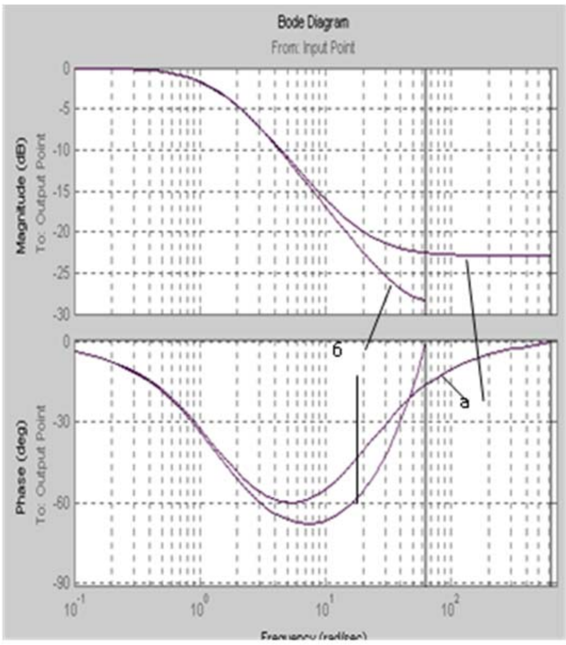


Рис. 3. ЛАЧХ та ЛФЧХ безпреревного (а) та дискретного (б) фільтрів

Логарифмічною амплітудною частотною характеристикою (ЛАЧХ) динамічної ланки називають таке уявлення амплітудної частотної характеристики (АЧХ), в якому модуль (амплітуда) частотної характеристики виражений в децибелах, а частота - в логарифмічному масштабі.

Логарифмічною фазовою частотною характеристикою (ЛФЧХ) динамічної ланки називають таке уявлення фазочастотної характеристики (ФЧХ), в якому частота виражена в логарифмічному масштабі.

Визначимо і зафіксуємо частотні характеристики безперервного і аналогічного дискретного фільтрів відповідно до методики визначення ЛАЧХ і ЛФЧХ безперервних ланок (рис.3).

Висновки. Використовуючи процедуру "bileniar" пакета Matlab знайдені коефіцієнти Z-передавальної функції для коригуючої ланки. Відповідно до методики визначення ЛАЧХ і ЛФЧХ безперервних ланок визначені частотні характеристики безперервного і аналогічного дискретного фільтрів. При порівнянні характеристик безперервного і дискретного фільтрів можливо переконатися, що з ростом частоти відмінність в характеристиках зростає.

Л і т е р а т у р а

1. https://uk.wikipedia.org/wiki/
2. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая єлектроника / Ю.Ф. Опадчий // М.: Горячая линия - Телеком, 2017. - 768 с.
3. Подураев, Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение / Ю. В. Подураев // Учеб. пособие для вузов - М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
4. Карнаухов Н.Ф. Электромеханические и мехатронные системы / Н.Ф. Карнаухов // Учеб. пособие для вузов - Ростов н/Д.: Феникс, 2006. - 320 с.
5. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов //- СПб.: Изд-во «Профессия», - 2003. – 768 с.
6. Іванов А.О. Теорія автоматичного керування / А.О. Іванов // Підручник Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, - 2003.- 250 с.
7. Голубєва С.М., Морнева М.О. Порівняльна оцінка програмних пакетів комп'ютерного моделювання інженерних процесів / С.М. Голубєва, М.О. Морнева // Вісник СНУ ім. В. Даля, вип. 3(233), 2017, с. 44-48.

R e f e r e n c e s

1. https://uk.wikipedia.org/wiki/
2. Opadchij Ju.F., Gludkin O.P., Gurov A.I. Analogovaja i cifrovaja єlektronika / Ju.F. Opadchij // M.:Gorjachaja linija - Telekom, 2017. - 768 s.
3. Poduraev, Ju.V. Mehatronika: osnovy, metody, primenenie / Ju. V. Poduraev // Ucheb. posobie dlja vuzov - M.: Mashinostroenie, 2006. – 256 s.
4. Karnauhov N.F. Jelektromehanicheskie i mehatronnye sistemy / N.F. Karnauhov // Ucheb. posobie dlja vuzov - Rostov n/D.: Feniks, 2006. - 320 s.
5. Besekerskij V.A., Popov E.P. Teorija sistem avtomaticheskogo upravlenija / V.A. Besekerskij, E.P. Popov //- SPb.: Izd-vo «Professija», - 2003. – 768 s.
6. Ivanov A.O.Teorija avtomatichnogo keruvannja / A.O. Iva-nov // Pidruchnik Dnipropetrovs'k: Nacional'nij girnichij universitet, - 2003.- 250 s.
7. Golubieva S.M., Morneva M.O. Porivnjal'na ocinka programnih paketiv komp'juternogo modeljuvannja inzhenernih procesiv / S.M. Golubieva, M.O. Morneva // Visnik SNU im..V. Dalja, vip. 3(233), 2017, s.44-48.

Morneva M.O., Golubieva S.M., Toropov A.S. Digital automatic control systems in mechatronic systems

The article deals with the issues of digital automatic control systems, which belong to the class of linear impulse systems, but have their own characteristics. Automatic control systems (ACS), as a rule, are equipped with built-in control micro-computers or microprocessors. The advantage of digital automatic control systems is high accuracy of operation, small dimensions of the control part, the ability to quickly change the algorithm of the ACS operation by changing the control program. The computer operates not with differences, but with the absolute values of the variables of the equation in finite differences; therefore, it is unsuitable for use in applied programs and is converted into difference equations. The presence and type of information in the intervals between the moments of measurement depends on the type of extrapolator (in a computer, this is a program that determines the law of information change between the moments of measurement of information). Extrapolators are of zero, first and higher order. The zero-order extrapolator keeps the signal constant after measurement until the next measurement. The first-order extrapolator implements the tendency of the signal to change according to the first derivative, etc. The theory of impulse, and therefore digital systems, is based on difference equations (analogue of differential equations) and z-transfer functions (analogs of transfer functions of continuous systems). Difference equations and Z-transformations of the transfer function were also found in two ways: classical and using bilinear transformations; transient and frequency characteristics were also constructed. Using the "bileniar" procedure of the Matlab package, you can find the coefficients of the Z-transfer function for the correcting link. Using the "bileniar" procedure of the Matlab package, the coefficients of the Z-transfer function for the correcting link are found.. By means of mathematical modeling, it was confirmed that when comparing the characteristics of continuous and discrete filters with increasing frequency, the difference in characteristics increases.

Key words: *mechatronic systems, automatic control system, microprocessors, automatic devices, electromechanical converters.*

Морнева М.О. – доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, morneva@gmail.com

Голубєва С.М. – старший викладач кафедри суднових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації Державного університету інфраструктури та технологій, glbvvnu@gmail.com

Торопов А.С. – старший викладач кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, andrei4ik86@gmail.com

Стаття подана 09.08.2021.