

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

*Висновки.* Поставлена проблема по визначенню причин руйнування підшипників кочення та застосування неруйнівних акустичних способів їх контролю вимагає комплексного підходу і її рішення може містити наступні основні етапи:

- розробка теоретичних основ і механізму процесу тертя при роботі підшипників кочення і створення оптимальних умов тертя при роботі пар кочення з застосуванням технологічних мастил;
- подальше впровадження акустичних неруйнівних способів контролю пар кочення, що дозволить обґрунтувати підбір мастил для підшипників кочення;
- розвиток і вдосконалення експериментальних пристроїв акустичних неруйнівних методів контролю підшипників кочення.

### Інформаційні джерела

1. Неруйнівний контроль та діагностика: Довідник / В.В. Ключев, Ф.Р. Соснін, А.В. Ковальов та ін.; Під ред. В.В. Ключева. 2-е вид., випр. та доп. – М.: Машинобудування, 2003. 656 с., іл.
2. Яковлев С.Г. Методи та апаратура магнітного і вихрострумowego контролю: Навч. посібник. – СПб.: Вид-во СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2003. – 88 с.
3. Альошин Н.П., Щербинський В.Г. Радіаційна, ультразвукова та магнітна дефектоскопія металовиробів. – М.: Вищ.шк. 1991. – 271 с.
4. Білокур І.П., Коваленко В.А. Дефектоскопія матеріалів та виробів. – Київ: Техніка. 1989. – 192 с.
5. Білокур І.П. Дефектологія та неруйнівний контроль. – Київ: Вища шк.. 1990. – 207 с.

УДК 681.2

**П.С. Шолом**, аспірант

Луцький національний технічний університет

### МОДЕЛЮВАННЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ З ДИСКРЕТНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

*Управляющий прибор активного контроля размеров деталей соединяет засіб вимірювання та регулятор. Для управління режимами оброблення використовуються окремі команди – дискретні імпульси, що подаються з управляючого приладу у схему управління верстату. Вимірювальна частина сучасних приладів ґрунтується на принципах цифрового перетворення з використанням мікропроцесорів. В статті розглядаються особливості математичного моделювання передатних характеристик приладів, що містять дискретні елементи.*

**Ключові слова:** математичне моделювання, дискретний сигнал, імпульсний елемент, перетворення, аргумент, функція

*Управляющий прибор активного контроля размеров деталей объединяет в себе средство измерения и регулятор. Для управления режимами обработки используются отдельные команды – дискретные импульсы, подаваемые с управляющего прибора в схему управления станка. Измерительная часть современных приборов основывается на принципах цифрового преобразования с использованием микропроцессоров. В статье рассматриваются особенности математического моделирования передаточных характеристик приборов, включающих дискретные элементы.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, дискретный сигнал, импульсный элемент, преобразования, аргумент, функция

*Managing device active control sizes details combines means of measurement and control. To control the processing modes use separate teams – discrete impulses that are served with the control device in the machine scheme. Measuring part of modern devices based on the principles of digital conversion using microprocessors. The article discusses the features of mathematical modelling of optical characteristics of devices that contain discrete items.*

**Keywords:** mathematical modeling, discrete signal switching element transformations argument function

У якості управляючих приладів, інформаційний сигнал на які поступає з первинного перетворювача вимірювальної головки, застосовуються електронні блоки, що містять вимірювальну схему, індикатори поточного значення сигналу, а також регулятор, для управління процесом оброблення. Це багатопозиційні виключно дискретні регулятори з релейним виходом. У сучасних системах все частіше застосовуються цифрові мікропроцесорні прилади, але їх вихідний управляючий сигнал також має дискретний характер.

Для складення математичної моделі засобу вимірювання, що містить дискретні елементи, як і у випадку присутності нелінійностей доцільно виділити у ньому дискретний елемент і неперервну, або аналогову, частину. Потім задача зводиться до опису дискретного елемента й використанню відомих методів для опису лінійної неперервної частини. Релейні й цифрові прилади належать до однозначно нелінійних, бо їх характеристики містять розриви першого роду.

Імпульсні елементи у процесі дискретизації сигналів у часі замінюють неперервну функцію решітчастою, яка визначається сукупністю виділених ординат, або дискрет, модульованих за одним з параметрів імпульсної послідовності: амплітуді, ширині (тривалості), періоду повторення імпульсів тощо. У відповідності з різновидами імпульсної модуляції сигналів розрізняють амплітудно-імпульсні, широтно-імпульсні, часо-імпульсні та інші елементи. Найбільше поширення отримала амплітудно-імпульсна модуляція, що використовується в управляючих приладах. Такий же підхід можна застосувати і для мікропроцесорних приладів. У загальному випадку її можна подати трьома блоками – вхідним, центральним і вихідним (рис. 1).

У вхідному блоці виконується квантування і дискретизація сигналів за рівнем і у часі. Першим елементом цього блоку є імпульсний елемент ІЕ1 мультиплексора, який виконує перетворення аналогового сигналу у дискретні імпульси. Другий – кодуєчий елемент КЕ – перетворює імпульси в код шляхом квантування за рівнем.

Центральний процесорний блок – це дискретний елемент без запізнювання. Він виконує перетворення одного дискретного сигналу в інший у відповідності з прийнятим алгоритмом. Запізнення можна знехтувати, оскільки швидкодія, а відповідно, і продуктивність сучасних мікропроцесорів достатньо великі і неспіврозмірні з періодом дискретизації сигналу.

Вихідний блок складається з нелінійного елемента, який перетворює код у послідовність імпульсів; імпульсного елемента ІЕ2 мультиплексора, який за необхідності розділяє канали у часі; екстраполятора Е, який у більшості випадків виконує функції фіксуєчого пристрою, що генерує неперервну ступінчасту функцію.

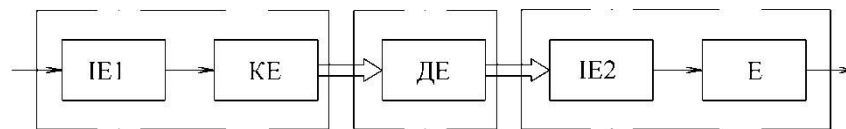


Рис. 1. Структура мікропроцесорного засобу

Збільшуючи кількість розрядів, ступінь квантування можна вибрати достатньо малим, щоб результат заокруглення практично не відрізнявся від дійсного значення величини. Це дозволить під час дослідження динаміки не враховувати квантування за рівнем, тобто знехтувати елементами КЕ і ІЕ.

Допустимо, що ІЕ1 і ІЕ2 працюють синхронно і синфазно. Тоді мікропроцесор може бути поданий у вигляді елементарного імпульсного елемента й екстраполятора. А екстраполятор можна розглядати як аналог формуючої ланки імпульсної системи.

Елементарний імпульсний елемент виконує операцію дискретизації сигналу і його вихідний сигнал  $x^*(t)$  може бути поданий як добуток вхідного сигналу  $x(t)$  і не модульованої послідовності імпульсів  $\delta^*(t)$ :

$$x^*(t) = x(t)\delta^*(t) \tag{1}$$

де

$$\delta^*(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) . \tag{2}$$

Формуючу ланку можна віднести до неперервної частини вимірювального кола. Перетворення Лапласа вихідного сигналу елементарного імпульсного елемента:

$$X^*(p) = L\{y^*(t)\} = L\{x(t)\delta^*(t)\} , \tag{3}$$

або

$$X^*(p) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT)L\{\delta(t - nT)\} . \tag{4}$$

Враховуючи, що  $\delta$ -функція, окрім точок  $t = nT$ , скрізь рівна нулю, а

$$L\{\delta(t - nT)\} = \int_0^{\infty} \delta(t - nT)e^{-pt} dt = e^{-pnT} ,$$

в результаті, для випадку  $x(t) \cong 0$  для  $t \leq 0$ , отримаємо

$$X^*(p) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT)e^{-pnT} = D\{x(nT)\}, \quad (5)$$

де  $D\{x(nT)\}$  – дискретне перетворення Лапласа решітчастої або дискретної функції.

Оскільки вимірювальне коло засобу вимірювання (рис. 2) розділене на елементарний імпульсний елемент 1, формуючу ланку і неперервну частину, то, знаючи рівняння елементарного імпульсного елемента, нескладно знайти рівняння реального імпульсного елемента:

$$Y(p) = X^*(p)K_{\phi}(p), \quad (6)$$

або вимірювального кола в цілому:

$$Y(p) = X^*(p)K_{\phi}(p)K_n(p), \quad (7)$$

де  $K_{\phi}(p)$ ,  $K_n(p)$  – передатні функції формуючої ланки і неперервної частини вимірювального кола.

Вихідний сигнал реального імпульсного елемента  $y(nT)$  (рис. 2) буде відображати реакцію лінійного елемента на вхідну дію імпульсу, що становить  $\delta$ -функцію, або, що одне й те ж, імпульсну перехідну функцію  $h(t)$ .

Використавши вираз  $\delta^*(t)$ , поданий рядом Фур'є, отримаємо:

$$X^*(p) = \frac{2\pi}{\omega_0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} L\{x(t)e^{jk\omega_0 t}\}. \quad (8)$$

З врахуванням перетворень Лапласа

$$L\{x(t)e^{jk\omega_0 t}\} = X(p - jk\omega_0). \quad (9)$$

Залежність між зображенням неперервного сигналу на вході елементарного імпульсного елемента  $X(p)$  і решітчастою функцією  $X^*(p)$  на його виході для  $x(t) \cong 0$ , якщо  $t \leq 0$ :

$$X^*(p) = \frac{2\pi}{\omega_0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(p - jk\omega_0). \quad (10)$$

Допустивши  $p = j\omega$ , визначимо з (10) зв'язки між частотними характеристиками (спектрами) вихідної і вхідної величин елементарного імпульсного елемента:

$$X^*(j\omega) = \frac{2\pi}{\omega_0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X[j(\omega - k\omega_0)]. \quad (11)$$

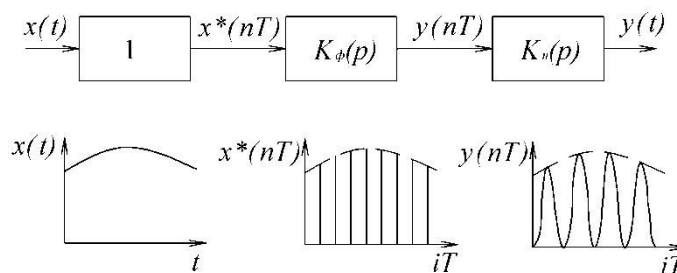


Рис. 2. Вимірювальне коло з дискретним елементом і форми сигналів

Звідси випливає, що спектр решітчастої функції рівний сумі зміщених спектрів вхідного сигналу. У цьому випадку, залежно від періоду дискретизації  $T$  або частоти  $\omega_0$  і максимальної частоти неперервного вхідного сигналу  $\omega_c$ , їх спектри можуть перекриватись, що приводить до втрати інформації у період відновлення сигналу. На основі теорії Котельникова допустиме значення періоду дискретизації, яке не приводить до втрати інформації:

$$T \leq \frac{2\pi}{2\omega_c} = \frac{1}{2f_c}. \quad (12)$$

Отже, елементарний імпульсний елемент у часовій області може бути описаний рівнянням (1), що встановлює зв'язок між вхідним неперервним сигналом  $x(t)$  і дискретним вихідним сигналом  $x^*(t)$ . Перехід в область комплексного змінного здійснюється за допомогою дискретних перетворень Лапласа. У цьому випадку зображеннями будуть функції  $e^{-pT}$ , а не змінної  $p$ , як це проявляється для неперервних функцій. Іншою відмінною особливістю опису елементарного імпульсного елемента є те, що для нього не існує поняття передатної функції як відношення зображення вхідної і вихідної величин. Залежність між виходом і входом реального імпульсного

елемента або вимірювального кола в області комплексної змінної може бути віднайдена на основі рівнянь (7) і (11).

Але як впливає з рівнянь (1) і (5), вихідний сигнал елементарного імпульсного елемента, або решітчаста функція (рис. 3, а), має значення тільки в моменти часу  $t = nT$ , а для часу  $t \neq nT$  він ідентично рівний нулю. Тому для встановлення значень (поведінки) функції у проміжках дискретних моментів вводиться зміщення аргументу  $0 \leq \Delta T < T$ . Решітчасту функцію  $y = (nT + \Delta T)$  називають зміщеною відносно  $y(nT)$ .

Ввівши нормування по часу  $\bar{t} = \frac{t}{T} = n$ ;  $\varepsilon = \pm \frac{\Delta T}{T}$ , решітчасту і зміщену функції можна подати у вигляді

$$y[n] \cong y(nT); \quad y[n, \varepsilon] \cong y(nT \pm \Delta T). \quad (13)$$

В області комплексної змінної як дискретне перетворення Лапласа вони мають вигляд:

$$Y^*(p) = \sum_{n=0}^{\infty} y[n] e^{-pnT}; \quad (14)$$

$$Y^*(p, \varepsilon) = \sum_{n=0}^{\infty} y[n, \varepsilon] e^{-pnT}. \quad (15)$$

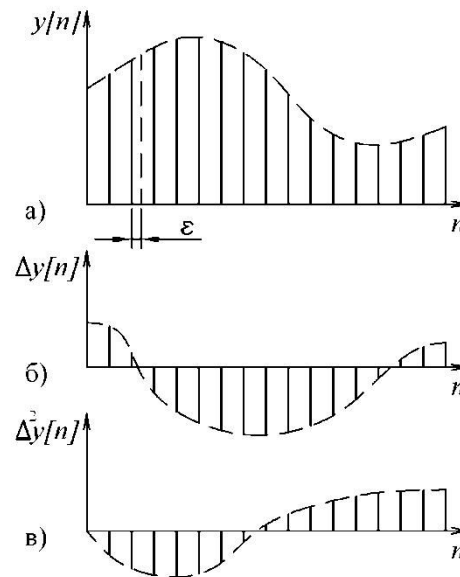


Рис. 3. Решітчаста функція і її різниці

Рівнозначно з дискретним перетворенням Лапласа (15), широко використовується також  $Z$ -перетворення, що відрізняється від першого аргументом  $z \cong e^{-pT}$ , а в решті практично співпадає з дискретним перетворенням Лапласа, тобто:

$$Y(z) = \sum_{n=0}^{\infty} y[n] z^{-n} = Z\{y[n]\}; \quad (16)$$

$$Y(z, \varepsilon) = \sum_{n=0}^{\infty} y[n, \varepsilon] z^{-n} = Z\{y[n, \varepsilon]\}. \quad (17)$$

Решітчаста функція може бути описана також за допомогою кінцевих різниць (рис. 3), що є аналогами похідних неперервних функцій. Перша різниця (рис. 3, б) характеризує швидкість зміни решітчастої функції  $y[n]$  і аналогічна першій похідній неперервної функції:

$$\Delta y[n] = y[n+1] - y[n]. \quad (18)$$

Друга різниця, або різниця другого порядку (рис.3, в) отримується аналогічно в результаті віднімання перших різниць, тобто:

$$\Delta^2 y[n] = \Delta y[n+1] - \Delta y[n], \quad (19)$$

або через дискети решітчастої функції:

$$\Delta^2 y[n] = (y[n+2] - y[n+1]) - (y[n+1] - y[n]) = y[n+2] - 2y[n+1] + y[n]. \quad (20)$$

Відповідно, різниця  $k$ -го порядку може бути визначена як:

$$\Delta^k y[n] = \Delta^{k-1} y[n+1] - \Delta^{k-1} y[n], \quad (21)$$

або через значення решітчастої функції:

$$\Delta^k y[n] = \sum_{v=0}^k (-1)^v \frac{k!}{v!(k-v)!} y[n+k-v]. \quad (22)$$

Різницеві рівняння, що використовуються для опису перетворень у вимірювальному колі решітчастих функцій і є по-суті вхідною дискретною послідовністю  $x[n]$ , можуть бути отримані на основі (21) через кінцеві різниці:

$$\begin{aligned} c_m \Delta^m y[n] + c_{m-1} \Delta^{m-1} y[n] + \dots + c_1 \Delta y[n] + c_0 y[n] = \\ = b_l \Delta^l x[n] + b_{l-1} \Delta^{l-1} x[n] + \dots + b_1 \Delta x[n] + b_0 x[n] \end{aligned} \quad (23)$$

або на основі (22) через значення решітчастих функцій:

$$\begin{aligned} a_m y[n+m] + a_{m-1} y[n+m-1] + \dots + a_1 y[n+1] + a_0 y[n] = \\ = b_l \Delta^l x[n] + b_{l-1} \Delta^{l-1} x[n] + \dots + b_1 \Delta x[n] + b_0 x[n] \end{aligned} \quad (24)$$

Коефіцієнти  $a_k$  знаходяться із залежності:

$$a_k = \sum_{v=0}^k (-1)^{k-v} c_v \frac{(m-v)!}{(k-v)!(m-v)!}. \quad (25)$$

Якщо у рівняннях (24) і (25) права частина  $x[n] = 0$ , то рівняння стають однорідними.

Для отримання дискретної передатної функції можна використати  $Z$ -перетворення. Враховуючи властивості лінійності  $Z$ -перетворень і застосувавши теорію зсуву, згідно з якою за нульових початкових умов:

$$Z\{y[n+m]\} = z^m Y(z), \quad (26)$$

рівняння (25) може бути записаним в алгебраїчній формі:

$$\begin{aligned} (a_m z^m + a_{m-1} z^{m-1} + \dots + a_1 z + a_0) Y(z) = \\ = (b_l z^l + b_{l-1} z^{l-1} + \dots + b_1 z + b_0) X(z) \end{aligned} \quad (27)$$

Тоді, взявши відношення зображення вихідної і вхідної величин, отримаємо:

$$K(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_l z^l + b_{l-1} z^{l-1} + \dots + b_1 z + b_0}{a_m z^m + a_{m-1} z^{m-1} + a_1 z + a_0}, \quad (28)$$

яке називається, за нульових початкових умов, дискретною передатною функцією.

Аналогічно, скориставшись дискретним перетворенням Лапласа, може бути отримана дискретна передатна функція у формі поліномів від  $e^{pT}$ :

$$K^*(p) = \frac{Y^*(p)}{X^*(p)} = \frac{b_l e^{lpT} + b_{l-1} e^{(l-1)pT} + \dots + b_1 e^{pT} + b_0}{a_m e^{mpT} + a_{m-1} e^{(m-1)pT} + \dots + a_1 e^{pT} + a_0}. \quad (29)$$

Дискретні передатні функції (28) і (29) мають ті ж значення для опису засобу вимірювання, що містять дискретні елементи або мікропроцесор як елемент вимірювального кола, що й звичайні передатні характеристики для аналогових ЗВ. Вони як динамічні характеристики є скороченим записом різницевих рівнянь, які описують стан ЗВ у дискретні проміжки часу.

Застосуємо дискретне перетворення Лапласа до рівняння (7), що визначає вихідний сигнал вимірювального кола:

$$D\{Y(p)\} = D\{X^*(p)K(p)\}. \quad (30)$$

де  $K(p) = K_\phi(p)K_n(p)$  – приведена передатна функція неперервної частини і формуючої ланки.

Використавши теорему про множення зображень неперервної і решітчастої функцій, згідно з якою:

$$D\{X^*(p)K(p)\} = D\{K(p)\}X^*(p) = K^*(p)X^*(p), \quad (31)$$

і, оскільки

$$X^*(p) = D\{x(nT)\} = D\{X(p)\}, \quad (32)$$

із (30) отримаємо дискретну передатну функцію

$$K^*(p) = \frac{Y^*(p)}{X^*(p)}, \quad (33)$$

аналогічну (29), а якщо використовується  $Z$ -перетворення – (28).

Частотна характеристика  $K^*(j\omega)$  може бути отримана із (33) шляхом заміни аргументу  $p = j\omega$ :

$$K^*(j\omega) = [K^*(p)]_{p=j\omega} = \frac{Y^*(j\omega)}{X^*(j\omega)}. \quad (34)$$

$Y^*(j\omega)$  і  $X^*(j\omega)$  – дискретне перетворення Фур'є вихідного і вхідного сигналів.

Отже, управляючий прилад, що входить в систему активного контролю розмірів, описується різницевиими рівняннями, дискретною передатною функцією і частотною характеристикою.

Математичний опис передатних характеристик дискретних елементів, що входять у схему управляючого приладу, дозволяє методами моделювання оптимізувати в цілому функціональні та конструктивні параметри складних приладів, що застосовуються в системах автоматичного управління технологічними процесами.

#### Інформаційні джерела

1. Волосов С.С., Педь Е.И. Приборы для автоматического контроля в машиностроении. М., «Машиностроение», 1970. – 310 с.
2. Элементы автоматического управления и контроля / Н.И. Подлесный, В.Г. Рубанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1982. – 477 с.
3. Таланчук П.М., Рущенко В.Т. Основы проектирования измерительных приборов: Учеб. Пособие. – Киев: Вища шк. Головное изд-во, 1989. – 454 с.

УДК 658.567.3:629.3:629.3.027.514:621.91

**Е.С. Скорняков**, д.т.н., **О.О. Сасов**, к.т.н., **Ю.А. Коржавін**, к.т.н., **С.В. Калініченко**, аспірант., **Я.В. Яковенко**, магістр., **І.С. Кашинський**, магістр.

Дніпродзержинський державний технічний університет

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОДРІБНЕННЯ РІЗАННЯМ ПНЕВМАТИЧНИХ ШИН ПРИ УТИЛІЗАЦІЇ

*Проведені теоретичні та експериментальні дослідження процесів подрібнення різанням пневматичних шин під час їх утилізації. Розроблена експериментальна установка для визначення оптимальної геометрії, матеріалу ріжучого інструменту та вибору режимів подрібнення різанням пневматичних шин.*

**Ключові слова:** утилізація, пневматична шина, сили різання, швидкість різання.

*Проведены теоретические и экспериментальные исследования процессов измельчения резанием пневматических шин во время их утилизации. Разработана экспериментальная установка для определения оптимальной геометрии, материала режущего инструмента и выбора режимов измельчения резанием пневматических шин.*

**Ключевые слова:** утилизация, пневматическая шина, сила резания, скорость резания.

*Theoretical and experimental studies of grinding processes by cutting pneumatic tires at their utilization were carried out. Geometric parameters of cutting part of the cutter have an essential effect on a cutting process. Cutting forces and tool wear depend on the choice of cutter. Grinding by cutting pneumatic tires is a complicated and no investigated process because of a large number of factors affects it. Experimental unit to determine optimal geometry of cutting tool, cutting tool material and mode of conditions of grinding pneumatic tires were developed.*

**Keywords:** utilization, pneumatic tires, cutting forces, cutting rate.

*Постановка проблеми.* Згідно існуючих технологічних процесів утилізації автомобільних пневматичних шин вони потрапляють спочатку на склад, де розподіляються по групам та транспортуються на місця зберігання. За допомогою транспортера потрапляють в блок попередньої підготовки, де відбувається миття шин в мийній машині при температурі 50-80 °С в спеціальних миючих розчинах. Далі вимиті шини висушують в інфрачервоній сушильній установці. Очищені шини за допомогою підвісного транспортера встановлюються на прилад для розрізання навпіл шин та вирізання бортових кілець [1]. Механічне подрібнення різанням зношених автомобільних шин з різною жорсткістю гуми, при розрізанні шини навпіл та при вирізанні бортових кілець пов'язане з відомими труднощами [2], обумовленими пружними властивостями гуми, а також багатшаровістю з різних матеріалів: гума, текстильний та металокард. У процесі подрібнення різанням матеріали шини