

УДК 62-82-55

В.М. Тіхенко, д-р техн. наук, доц., Одес. нац.  
політехн. ун-т

## ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ ДАТЧИКІВ ЗВОРОТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ В ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИХ СЛІДКУЮЧИХ ПРИВОДАХ

*В.М. Тіхенко. Особливості перетворення сигналів датчиків зворотних зв'язків в електрогідрравлічних слідкуючих приводах.* Розглядаються похибки, які виникають при перетворенні сигналів аналогових датчиків зворотних зв'язків в електрогідрравлічних слідкуючих приводах металорізальних верстатів.

*Ключові слова:* електрогідрравлічний слідкуючий привод, датчик зворотного зв'язку, аналого-цифровий перетворювач, дискретизація аналогового сигналу.

*В.Н. Тіхенко. Особенности преобразования сигналов датчиков обратных связей в электрогидравлических следящих приводах.* Рассматриваются погрешности, возникающие при преобразовании сигналов аналоговых датчиков обратных связей в электрогидравлических следящих приводах металло-режущих станков.

*Ключевые слова:* электрогидравлический следящий привод, датчик обратной связи, аналого-цифровой преобразователь, дискретизация аналогового сигнала.

*V.N. Tikhenko. Features of feedback-sensor signals transformation in electrohydraulic servo drives.* Errors that occur during the transformation of signals of analogue feedback sensors in electrohydraulic servo drives of metal-cutting machine-tools are considered.

*Keywords:* electrohydraulic servo drive, feedback sensor, analog-to-digital converter, analog signal digitization.

Сучасні металорізальні верстати та промислові роботи все більше оснащуються різноманітними датчиками, сигнали яких можуть бути в аналоговій або цифровій формі. Це дає змогу використовувати електрогідрравлічні мехатронні модулі руху в якості слідкуючих приводів переміщень робочих органів [1]. У складі електрогідрравлічних слідкуючих приводів верстатів, керування якими здійснюється від ЕОМ, за наявності аналогових датчиків зворотних зв'язків використовуються аналого-цифрові перетворювачі. Вони є пристроями, призначеними для перетворення безперервних сигналів у цифрові коди, причому виконуються три незалежні математичні операції: дискретизація, квантування і кодування. Найчастіше входною величиною є напруга  $U$ , тому всі інші величини необхідно перетворювати в напругу. Важливим завданням дослідження є аналіз похибок, які виникають при перетворенні сигналів аналогових датчиків у цифрову форму.

Удосконалення електрогідрравлічних слідкуючих приводів як підсистем металорізальних верстатів найпростіше здійснювати за рахунок поліпшення характеристик гідропідсилювачів, розширення їх функцій і структур. Як відомо, формування в електрогідрравлічних підсилювачах (ЕГП) зворотних зв'язків за навантаженням і за швидкістю виконавчих гідродвигунів дозволяє покращувати статичні і динамічні характеристики приводів [1, 2]. У разі недостатньої стійкості електрогідрравлічних слідкуючих приводів, що мають додаткові зворотні зв'язки, можливо застосування керованих пристроїв демпфірування [3]. Використання джерелом гідравлічної енергії насоса з керуванням за тиском підвищує ККД привода. Теж саме забезпечує регулювання частоти обертання приводного електродвигуна за допомогою частотного перетворювача. Можливе поєднання декількох варіантів реалізації додаткових зворотних зв'язків в гідравлічному приводі [2].

Таким чином, узагальнена схема можливих варіантів керування лінійним електрогідрравлічним приводом за наявності керуючого і обчислювального пристрою може бути представлена в наступним чином (рис. 1).

Сигнал керування  $U$  надходить на керуючий пристрій, а потім на електрогідравлічний підсилювач, який керує лінійним гідродвигуном, пов'язаним з робочим органом. Сигнали зворотних зв'язків від електрогідравлічного підсилювача, лінійного гідродвигуна, вихідної ланки робочого органу надходять на обчислювальний пристрій, який з урахуванням керуючого сигналу  $U$  виробляє сигнали керування джерелом гідравлічної енергії або приводним двигуном керованим демпфуючим пристроєм.

Кожний вид зворотного зв'язку формується на основі сигналів відповідного датчика, похибка якого може суттєво впливати на точність позиціонування робочого органу. У загальному випадку безперервна вхідна величина на вході аналого-цифрового перетворювача характеризується її миттєвим значенням, проте можна також користуватися її середнім за вибраний проміжок часу значенням.

При дискретизації безперервних сигналів  $x(t)$  датчиків положення, швидкості, прискорення, зусилля, тиску, витрати рідини або інших змінних, що доволно змінюються, відбувається їх перетворення в послідовність рівновіддалених за часом ( $t=T_0, 2T_0, 3T_0, \dots$ ) значень  $x(nT_0)$ . В результаті безперервна функція  $x(t)$  приймає форму послідовності ступінчастих значень  $X(nT_0)$ .

На відміну від дискретизації, яка теоретично є оберненою операцією, квантування є перетворенням початкової послідовності і супроводжується появою неминучих похибок.

Третя операція, що зветься кодуванням, представляє дискретні квантовані за рівнем значення  $X(nT_0)$  у вигляді цифрового коду, який формується за певним законом.

При перетворенні аналогових сигналів, значення яких змінюються з швидкістю, сумірною зі швидкістю роботи аналого-цифрових перетворювачів, з безперервного сигналу доводиться робити вибірки. Для цього сигнал у вибраному відрізку часу повинен запам'ятовуватися на інтервалі, необхідному для того, щоб провести його перетворення в аналого-цифровому перетворювачі.

При дискретизації сигналу, що надходить від датчика, з'являється похибка, яка обумовлена кінцевим часом одного перетворення і невизначеністю моменту часу його закінчення. В результаті замість рівномірної отримуємо дискретизацію із змінним періодом. Така апертурна похибка, яка визначається швидкістю зміни сигналу, може бути визначена з виразу

$$\Delta x(t_n) = x'(t_n)T_a,$$

де  $T_a$  — апертурний час;

$x'(t_n)$  — швидкість зміни сигналу у момент часу  $t_n$ .

Апертурним часом  $T_a$  є інтервал часу, протягом якого зберігається невизначеність між вибіровим значенням сигналу, що утворився, і моментом часу, до якого воно дійсно відноситься.

Чинники, які обумовлюють наявність похибки квантування за часом, мають технологічний характер і не пов'язані з процесом цифрової обробки інформації.

З аналізу реалізацій вихідних процесів аналого-цифрових перетворювачів можна зробити висновок про те, що розподіл вірогідності близький до рівномірного з прямокутною щільністю розподілу вірогідності [1].

Якщо похідна вхідного сигналу змінює свій знак, похибка  $\delta x(t)$  приймає будь-яке значення в межах від  $-h$  до  $+h$ , а при плавному процесі, що ідеалізується, із знакопостійною похідною ця похибка змінюється від 0 до  $+h$ . Очевидно, що такий розподіл вірогідності значно відрізняє дані процеси від часто використовуваних моделей випадкових процесів із законом розподілу Гау-

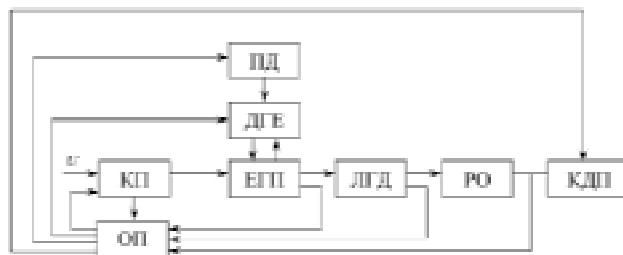


Рис. 1. Узагальнена схема можливих варіантів керування підсистемою гідропривода: КП — керуючий пристрій; ЕГП — електрогідравлічний підсилювач; ДГЕ — джерело гідравлічної енергії; ПД — приводний двигун; ЛГД — лінійний гідродвигун; РО — робочий орган; КДП — керований демпфуючий пристрій; ОП — обчислювальний пристрій

са [2]. Статистичні оцінки в цьому випадку змінюються в широких межах. При постійному значенні вхідного процесу дана похибка квантування є постійною випадковою величиною.

Вплив на похибку електрогідравлічних слідкуючих приводів може створювати шумова дія аналого-цифрового перетворювача, рівень шуму залежить від структури і елементної бази перетворювача. Але визначити просте математичне описання шуму квантування за рівнем, який відповідає всім видам процесів на вході аналого-цифрового перетворювача, не виявляється можливим. Тому на практиці при аналізі точності електрогідравлічних слідкуючих приводів доцільно використовувати описання декількох елементарних процесів. Найбільший вплив може виникати при перешкоді у вигляді центрованого “білого” шуму з обмеженим спектром. Для описання цього впливу можна прийняти, що похибка перетворювача є випадковим процесом, який складається з послідовності імпульсів тривалістю  $T$  з випадковою амплітудою  $\sigma$  і середнім значенням, яке дорівнює нулю [1].

Для одиничного імпульсу висотою  $\sigma$  і тривалістю  $T$  зображення Фур’є може бути записано таким чином

$$F(j\omega) = \frac{\sigma(1 - e^{-j\omega T})}{j\omega}.$$

Модуль цього виразу

$$|F(j\omega)| = \frac{\sigma}{\omega} |1 - \cos \omega T - j \sin \omega T| = 1,41 \frac{\sigma}{\omega} \sqrt{1 - \cos \omega T} = 2 \frac{\sigma}{\omega} \sin \frac{\omega T}{2}.$$

Цим виразам відповідає спектральна щільність

$$S(\omega) = \frac{1}{2T} |F(j\omega)|^2 = \frac{2\sigma^2}{\omega^2 T} \sin^2 \frac{\omega T}{2}. \quad (1)$$

На основі виразу (1)  $S(\omega)$  як функцію щодо аргументу  $\omega T/(2\pi)$  можна представити графічно (рис. 2, а).

Аналіз графіка показує, що при  $\omega T/2\pi \geq 1$ , тобто при  $\omega \geq 2\pi/T$  значення  $S(\omega)$  лише трохи відрізняється від нуля, тому значення  $\omega_n = 2\pi/T$  можна приймати як практичну межу смуги частот спектру похибки аналого-цифрового перетворювача системи керування [1].

Якщо позначити еквівалентну інтенсивність спектра як  $N$ , то за визначенням дисперсії стаціонарного випадкового процесу з нульовим середнім значенням  $D$  отримаємо вираз

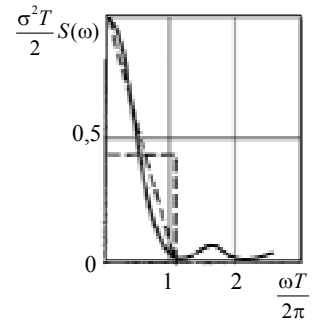
$$D = \sigma^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_n} N d\omega = N \frac{\omega_n}{\pi}. \quad (2)$$

На підставі виразу (2) при відомих  $\sigma$  і  $T$  можна знайти еквівалентну інтенсивність спектра  $N = \pi \sigma^2 / \omega_n = \sigma^2 T / 2$ .

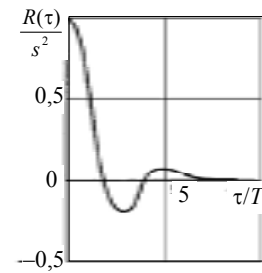
Кореляційна функція може бути визначена на основі інтеграла Фур’є

$$R(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_n} N \cos \omega \tau d\omega = N \frac{\sin \omega_n \tau}{\pi \tau}. \quad (3)$$

На підставі виразу (3) можна побудувати графік, який відображає кореляційну функцію  $R(\tau)$  (рис. 2, б). Аналіз наведених графічних залежностей дозволяє з певним ступенем точності вважати, що дані процеси є “білим” шумом з обмеженим спектром. Припущення про похибку перетворювача як про “білий” шум має силу при достатньо великій кількості його розрядів у разі інтенсивного вхідного сигналу, що змінюється [1].



а



б

Рис. 2. Залежності на основі спектральної щільності (а) та кореляційної функції (б) аналого-цифрового перетворювача

Для формування сигналу зворотного зв'язку за швидкістю робочого органу в електрогідравлічних слідкуючих приводах зручно застосовувати датчики витрати робочої рідини в гідродвигуні. Але при цьому виникають похибки через нестабільність величини витрати.

Експериментальні дослідження показують, що флуктуації витрати протягом деякого інтервалу часу є випадковим стаціонарним процесом [3].

Процес зміни витрати  $Q(t)$  у середині інтервалу часу  $\tau=t_2-t_1$  можна вважати таким, що складається з невідповідної функції  $M_q(t)$  і стаціонарного випадкового процесу  $q(t)$  (рис. 3).

Якщо детерміновані зміни витрати можуть бути виділені, то флуктуація витрати рідини близько середнього значення описуватиметься функцією  $q(t)$ .

Похибка вимірювання кількості рідини, яка виникає внаслідок нестабільності витрати всередині інтервалу усереднення [4],

$$S^2 = 2S_q^2 \tau_{R_q} \tau, \quad (4)$$

де  $S_q^2$  — дисперсія процесу  $q(t)$ ;

$\tau_{R_q}$  — глибина кореляційного зв'язку

$$\tau_{R_q} = \int_0^{\infty} \left| \frac{R_q(t)}{R_q(0)} \right| dt ;$$

$R_q(t)$  — кореляційна функція процесу;

$R_q(0)$  — значення  $R_q(t)$  при інтервалі кореляції  $\tau=0$ .

Значення  $S_q^2$  і  $R_q(t)$  можуть бути визначені за експериментальними даними.

При розрахунку за виразом (4) отримуються задовільні результати, зважаючи на малість випадкових похибок вживаних для оцінки  $Q(t)$  датчиків витрати в порівнянні з випадковими флуктуаціями витрати  $q(t)$  близько  $M_q(t)$ . Якщо вказані величини приблизно одного порядку, то при перетворенні сигналів, що надходять від датчиків витрати, їх необхідно коригувати.

Проведений аналіз особливостей перетворення сигналів датчиків зворотного зв'язку електрогідравлічних слідкуючих приводів дає можливість оцінювати вплив похибок вимірювання на точність виконання формуютьоруючих рухів металорізальних верстатів.

### Література

1. Казмиренко, В.Ф. Электрогидравлические мехатронные модули движения. Основы теории и системное проектирование / В.Ф. Казмиренко. — М.: Радио и связь, 2001. — 432 с.
2. Проектирование гидравлических систем машин / Г.М. Иванов, С.А. Ермаков, Б.Л. Коробочкин, Р.М. Пасынков. — М.: Машиностроение, 1992. — 224 с.
3. Струтинський, В.Б. Стохастичні процеси у гідроприводах верстатів: монографія / В.Б. Струтинський, В.М. Тіхенко. — Одеса: Астропринт, 2009. — 456 с.
4. Бирюков, Б.В. Точные измерения расхода жидкостей / Б.В. Бирюков, М.А. Данилов, С.С. Кивилис. — М.: Машиностроение, 1977. — 144 с.

### References

1. Kazmirenko, V.F. Elektrogidravlicheskie mekhatronnye moduli dvizheniya. Osnovy teorii i sistemnoe projektirovanie [Electro-hydraulic mechatronic motion modules. Theoretical basis and system design] / V.F. Kazmirenko. — Moscow, 2001. — 432 p.

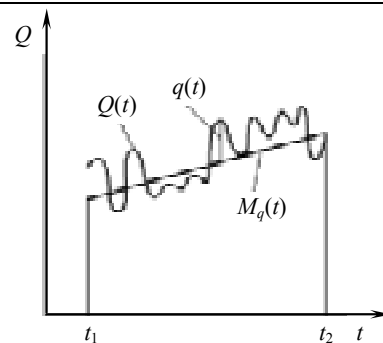


Рис. 3. Зміни величини витрати робочої рідини у часі

- 
2. Proektirovanie gidravlicheskih sistem mashin [Designing hydraulic systems of machine tools] / G.M. Ivanov, S.A. Ermakov, B.L. Korobochkin, R.M. Pasyukov. — Moscow, 1992. — 224 p.
  3. Strutynskiy, V.B. Stokhastychni protsesy u hidropriyodakh verstativ: monohrafiia [Stochastic processes in hydraulic drives of machine tools: monograph] / V.B. Strutynskiy, V.M. Tikhenko. — Odesa, 2009. — 456 p.
  4. Biryukov, B.V. Tochnye izmereniya raskhoda zhidkostey [Precise measurements of fluid flow rate] / B.V. Biryukov, M.A. Danilov, S.S. Kivilis. — Moscow, 1977. — 144 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. політехн. ун-ту Водічев В.А.

Надійшла до редакції 27 червня 2011 р.