

ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВТ

ТЕМА1

ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПОХИБКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Лекція 1

Загальні відомості про динамічні властивості ЗВТ

КТН Коваль А. О.

Навчальні питання

1. Вступ. Природа похибок динамічних вимірювань.
2. Нормовані динамічні характеристики. Повні динамічні характеристики.
3. Часткові динамічні характеристики.

Література:

1. ДСТУ ГОСТ 8.009:2008 (ГОСТ 8.009-84, IDT). Державна система забезпечення єдності вимірювань. Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювань [Текст]. – Чинний від 2008-10-01. – М.: Стандартиформ, 2006. – 26 с.
2. ДСТУ ГОСТ 8.256:2008 (ГОСТ 8.256-77, IDT). ГСИ. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения [Текст]. – Введ. 2008-10-01. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 7 с.

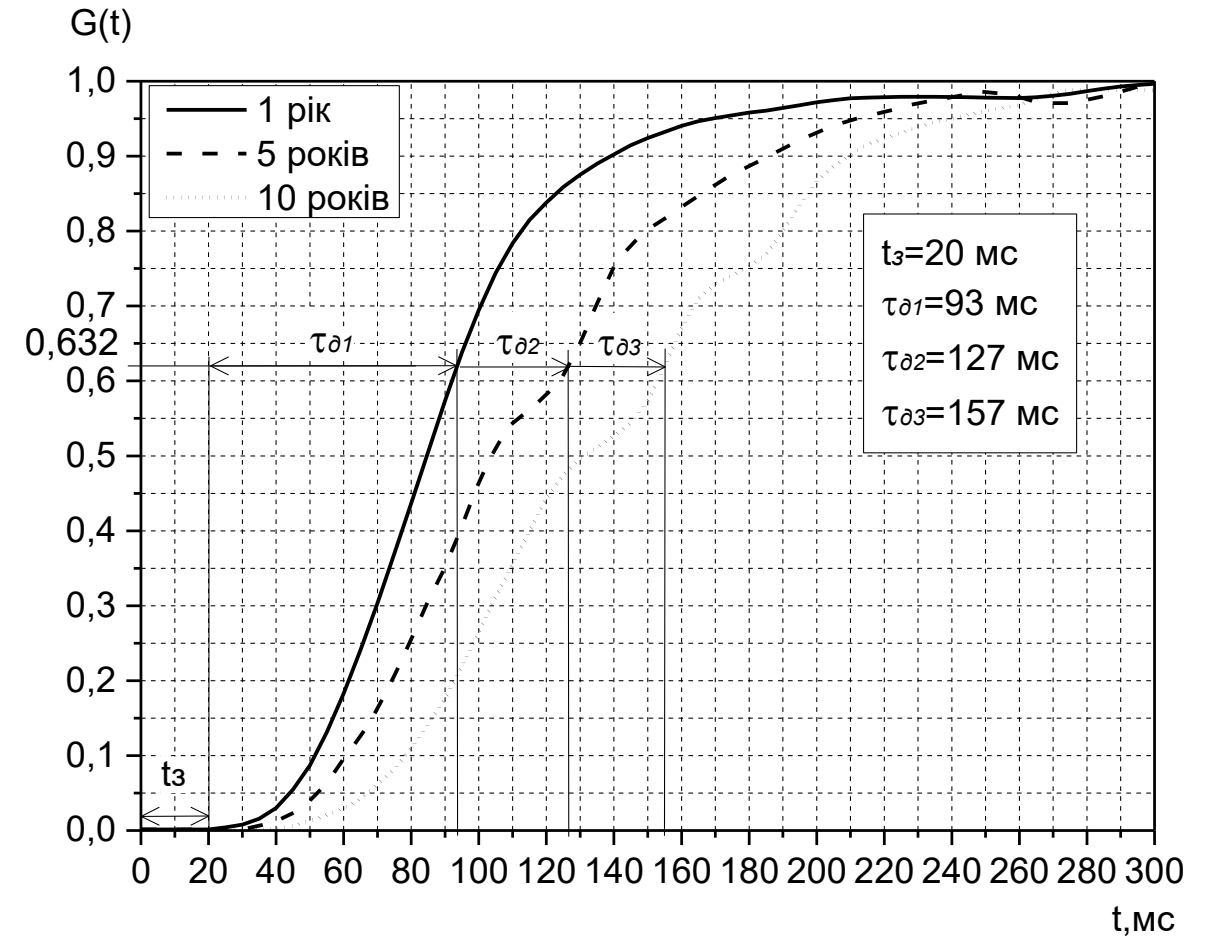
ПРИРОДА ДИНАМІЧНИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ

Динамічні похибки зумовлені інерційними властивостями ЗВТ – невідповідністю їх справжніх динамічних властивостей ідеальним. Ці похибки виникають при вимірюванні змінних в часі величин чи параметрів змінних сигналів і проявляються в тому, що при подачі на вхід ЗВТ вхідного сигналу $x(t)$ його вихідний $y(t)$ змінюється в часі інакше, ніж мав би змінюватися при ідеальних динамічних властивостях $y_n(t)$. Тобто динамічна похибка на виході ЗВТ [1].

$$\Delta_d(t) = y(t) - y_n(t).$$

ПРИРОДА ДИНАМІЧНИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ

Запізнення, або часова затримка показів вимірювального приладу в загальному вигляді проявляється в тому, що при миттєвій подачі на його вхід вимірюваної величини постійного значення $x(t) \equiv X$ у момент часу t_0 має місце перехідний процес, внаслідок чого вихідна величина (відгук, реакція) $G(t)$ ЗВТ є змінною і відлік результату вимірювання G зі шкали приладу затримується практично до завершення перехідного процесу — до моменту часу t у відліку або встановлення показу.



ПРИРОДА ДИНАМІЧНИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ

Як і будь-який процес, динамічні властивості ЗВТ найбільш повно можна описати відповідним диференціальним рівнянням, яке відображає функціональну залежність вихідної величини $y(t)$ ЗВТ від вхідної величини $x(t)$. Якщо ЗВТ є безінерційним, тобто в кожен момент часу величини $y(t)$ і $x(t)$ є пропорційними, то в диференціальному рівнянні відсутні похідні за часом. Тоді це рівняння прямої лінії, яка відображає статичну характеристику ЗВТ:

$$y(t) = k \cdot x(t). \quad (1)$$

В інерційних ЗВТ відбувається часова затримка зміни вихідної величини $y(t)$ відповідно до зміни вхідної величини $x(t)$ і в рівнянні (1) з'являються члени, що містять похідні вихідної величини $y(t)$ за часом. Найвища степінь похідної визначається порядком часової затримки вхідного сигналу $x(t)$ у вимірювальному каналі ЗВТ. Так, якщо ЗВТ має коло затримки другого порядку, то воно описується диференціальним рівнянням другого порядку $a_2 \cdot y''(t) + a_1 \cdot y'(t) + a_0 \cdot y(t) = k \cdot x(t)$

ПРИРОДА ДИНАМІЧНИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ

Таким чином, час затримки ЗВТ можна визначити теоретично, якщо відомі його параметри та всі впливні величини (фактори). Крім того, час затримки ЗВТ залежить не тільки від його схеми та конструкції, але й від фізичних зв'язків з об'єктом вимірювання та зовнішніми засобами. Більше того, час затримки відрізняється навіть для ЗВТ одного типу. Звичайно всі ці дані невідомі в повному обсязі та з необхідною точністю, тому час затримки ЗВТ визначають, як правило, експериментально.

НОРМОВАНІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Динамічні властивості ЗВТ описують динамічними характеристиками, які належать до метрологічних характеристик ЗВТ і підлягають нормуванню. Комплекс динамічних характеристик (ДХ) ЗВТ, їх визначення та способи нормування встановлюються:

1. ДСТУ ГОСТ 8.009:2008 (ГОСТ 8.009-84, IDT). Державна система забезпечення єдності вимірювань. Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювань [Текст]. – Чинний від 2008-10-01. – М.: Стандартиформ, 2006. – 26 с.
2. ДСТУ ГОСТ 8.256:2008 (ГОСТ 8.256-77, IDT). ГСИ. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения [Текст]. – Введ. 2008-10-01. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 7 с.

НОРМОВАНІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Динамічна характеристика ЗВТ — це метрологічна характеристика властивостей ЗВТ, які виявляються в тому, що на вихідний сигнал цього ЗВТ впливають значення вхідного сигналу та будь-які зміни цих значень у часі. Динамічні характеристики ЗВТ поділяють на повні та часткові.

Повна ДХ ЗВТ — це динамічна характеристика, яка повністю описує прийнятну математичну модель динамічних властивостей ЗВТ.

До часткових ДХ ЗВТ належать будь-які функціонали або параметри повних ДХ ЗВТ.

Повні ДХ вводять тільки для аналогових ЗВТ, які можна розглядати як лінійні, а часткові ДХ вводять як для лінійних аналогових ЗВТ, так і для цифрових вимірювальних приладів (ЦВП), аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) і цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП).

ПОВНІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Перехідна характеристика ЗВТ — часова характеристика ЗВТ, яку отримують при ступінчатому тест-сигналі, що подається на його вхід.

Часова характеристика ЗВТ — динамічна характеристика, яка є функцією часу й описує зміни вихідного сигналу ЗВТ у часі при подачі на його вхід типового тест-сигналу.

Імпульсна перехідна (вагова) характеристика ЗВТ — часова характеристика ЗВТ, яку отримують при подачі на його вхід тест-сигналу, близького за формою до дельта-функції (або функції Дірака).

Передавальна функція ЗВТ — це відношення перетворення Лапласа вихідного сигналу лінійного ЗВТ $Y(p)$ до перетворення Лапласа вхідного синусоїдного сигналу $X(p)$ при нульових початкових умовах, тобто

$$G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)},$$

де p – оператор Лапласа або «операторна» частота.

ПОВНІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Амплітудно-фазова характеристика, або частотна (комплексна) передавальна функція ЗВТ — це залежне від кругової частоти вхідного синусоїдного сигналу відношення перетворення Фур'є вихідного сигналу лінійного ЗВТ до перетворення Фур'є його вхідного сигналу при нульових початкових умовах.

Амплітудно-частотна характеристика ЗВТ — це залежність від кругової частоти вхідного синусоїдного сигналу відношення амплітуди вихідного сигналу лінійного ЗВТ до амплітуди його вхідного сигналу в усталеному режимі. Амплітудно-частотну похибку ЗВТ носить характер відносної похибки ЗВТ.

Фазово-частотна характеристика ЗВТ — це залежність від кругової частоти вхідного синусоїдного сигналу різниці фаз між вихідним сигналом і вхідним сигналом лінійного ЗВТ в усталеному режимі.

ПОВНІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Повні ДХ лінійних аналогових ЗВТ однозначно пов'язані між собою такими співвідношеннями:

- перехідна характеристика $h(t)$ з імпульсною перехідною характеристикою $g(t)$:

$$h(t) = \int_0^t g(t) d(t), \quad (3)$$

і навпаки,

$$g(t) = \frac{dh(t)}{dt}; \quad (4)$$

- передавальна функція $G(p)$ з імпульсною перехідною характеристикою $g(t)$:

$$G(p) = \int_0^{\infty} g(t) e^{-pt} dt, \quad (5)$$

тобто перетворенням Лапласа;

ПОВНІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

- амплітудно-фазова характеристика або частотна (комплексна) передатна функція $G(j\omega)$ з імпульсною перехідною характеристикою $g(t)$:

$$G(j\omega) = \int_0^{\infty} g(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (6)$$

і навпаки,

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(j\omega)e^{j\omega t} d\omega, \quad (7)$$

тобто прямим і зворотним перетвореннями Фур'є;

ПОВНІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

- амплітудно-фазова характеристика $G(j\omega)$ з АЧХ і ФЧХ:

$$G(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (8)$$

де $A(\omega) = \text{mod } G(j\omega) = |G(j\omega)| = Y_m / X_m$;

- АЧХ ЗВТ, яка являє собою залежність від кругової частоти ω відношення амплітуди Y_m вихідної синусоїдної величини $y(t)$ до амплітуди X_m вхідної синусоїдної величини $x(t)$ ЗВТ;

- ФЧХ ЗВТ:

$$\varphi(\omega) = \arg G(j\omega). \quad (9)$$

Отже, АФХ, або частотна комплексна передавальна функція $G(j\omega)$ ЗВТ, являє собою комплексне число, модуль якого дорівнює відношенню амплітуди Y_m вихідної величини $y(t)$ до амплітуди X_m вхідної синусоїдної величини $x(t)$, а аргумент – зсуву фаз $\varphi(\omega)$ вихідної величини $y(t)$ відносно вхідної величини $x(t)$.

ПОВНІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

У більш загальному формулюванні для вхідної величини $x(t)$ ЗВТ будь-якого виду АФХ можна відобразити відношенням зображень Фур'є (частотних зображень) вихідної $y(t)$ та вхідної $x(t)$ величин ЗВТ:

$$G(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}, \quad (10)$$

що впливає безпосередньо при переході від зображення Лапласа до зображення Фур'є підстановкою $p=j\omega$, тобто

$$G(j\omega) = G(p) \Big|_{p = j\omega} = \frac{Y(p)}{X(p)} \Big|. \quad (11)$$

ПОВНІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Зв'язок між вимірюваною величиною $x(t)$ на вході ЗВТ і його вихідною величиною $y(t)$ у загальному вигляді описують диференціальним рівнянням з постійними коефіцієнтами a_i ,

$$j = \overline{1, n}, \quad b_l, \quad l = \overline{1, m}:$$

$$\begin{aligned} b_m \frac{d^m y(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} y(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dy}{dt} + y(t) = \\ = a_n \frac{d^n x(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx(t)}{dt} + a_0 x(t). \end{aligned}$$

(12)

ПОВНІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для будь-яких сигналів $x(t)$ розв'язання цього рівняння може бути досить складним. Тому для визначення динамічних властивостей ЗВТ беруть найбільш прості тест-сигнали $x(t)$, зокрема синусоїдний сигнал. У цьому випадку передатна функція $G(p)$ й АФХ $G(j\omega)$ ЗВТ мають дробово-раціональне зображення з тими самими коефіцієнтами, що й диференціальне рівняння:

$$G(p) = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^n a_i p^i}{1 + \sum_{l=1}^m b_l p^l}; \quad (13)$$

$$G(j\omega) = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^n a_i (j\omega)^i}{1 + \sum_{l=1}^m b_l (j\omega)^l}. \quad (14)$$

ПОВНІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Отже, передавальна функція $G(p)$ ЗВТ може бути зображена амплітудно-фазовою характеристикою $G(j\omega)$, яка, в свою чергу, дозволяє перейти до більш наочних частотних характеристик ЗВТ – АЧХ $A(\omega)$ і ФЧХ $\varphi(\omega)$.

АФХ $G(j\omega)$ ЗВТ відображається на комплексній площині та являє собою геометричне місце кінців векторів (годограф), що відповідає такому запису:

$$G(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) \quad (15)$$

при змінюванні кругової частоти ω вихідного синусоїдного сигналу $x(t)$ від 0 до ∞

ПОВНІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На практиці більш наочним є зображення замість однієї АФХ двох окремих частотних характеристик — дійсної $U(\omega)$ і уявної $V(\omega)$ (рис.1). З графіків (рис.1а, б) випливає, що АЧХ $A(\omega)$ ЗВТ показує, як цей засіб пропускає сигнали різної частоти. Оцінка пропускання здійснюється за відношенням амплітуд вихідної та вхідної синусоїдних величин ЗВТ, тобто $A(\omega) = Y_m / X_m$. ФЧХ $\varphi(\omega)$ ЗВТ відображає фазові зсуви, які вносить цей засіб на різних частотах. Для компактного зображення АЧХ і ФЧХ зручніше користуватися логарифмічним масштабом, коли АЧХ і ФЧХ відображають у десятичних логарифмах. Так, для побудови АЧХ знаходять величину

$$L(\omega) = 20 \lg |G(j\omega)| = 20 \lg A(\omega). \quad (16)$$

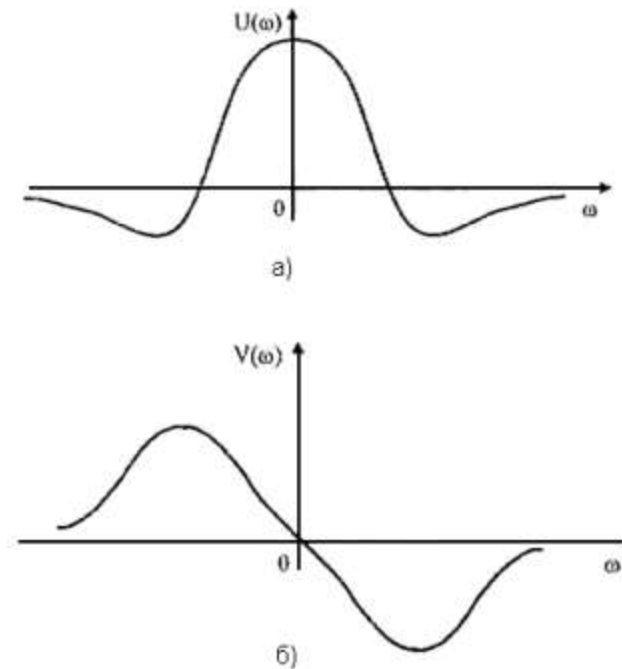


Рисунок 1 – Якісний приклад дійсної (а) та уявної (б) частотних характеристик

ПОВНІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Розмірністю цієї величини є безрозмірна одиниця «децибел» - часткова від одиниці «бел».

Один бел (1Б) - логарифмічна одиниця, що відповідає десятиразовому збільшенню потужності, а отже, 2 Б — збільшенню потужності в 100 раз, 3 Б — в 1000 раз і т. д.

Один децибел (1 дБ) дорівнює одній десятій частині бела. Якби АЧХ $A(\omega)$ була відношенням потужності, то перед логарифмом у правій частині рівняння (16) необхідно було б поставити множник 10.

ЧАСТКОВІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Часткові динамічні характеристики засобів вимірювальної техніки (частковими ДХ), що найбільш розповсюджені є:

- час реакції t_p (або t_r);
- відносний коефіцієнт затухання або коефіцієнт демпфірування d ;
- значення АЧХ на резонансній частоті $\omega_0 - A(\omega_0)$;
- значення резонансної власної кругової частоти ω_0 .

Вибір часткових ДХ ЦВП, АЦП і ЦАП для нормування залежить від співвідношення їх часу реакції та інтервалу часу між двома вимірюваннями, що відповідає максимально можливій для даного типу ЗВТ частоті f_{\max} або швидкодії вимірювань. При цьому можливі два варіанти.

ЧАСТКОВІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для першого варіанта, коли час реакції ЗВТ не перевищує вказаного вище інтервалу часу між двома вимірюваннями, до часткових ДХ, що можуть бути вибрані для нормування, належать:

- час реакції t_p (або t_r);
- похибка датування t_D (або t_d) відліку;
- максимальна частота f_{max} або швидкодія вимірювань.

Для другого варіанта, коли час реакції ЗВТ перевищує вказаний вище інтервал часу між двома вимірюваннями, до часткових ДХ ЗВТ, що можуть бути вибрані для нормування, належать:

- повні ДХ еквівалентної аналогової частини аналогоцифрових ЗВТ;
- похибка датування t_D (або t_d) відліку;
- максимальна частота f_{max} або швидкодія вимірювань.

У нормативно-технічній документації (НТД) на ЦВП конкретних видів або типів поряд з установленням часу реакції або похибки датування відліку можна встановлювати їх окремі складові, наприклад, час затримки запуску, час очікування, час перетворення, час затримки видачі результату і т. п.

ЧАСТКОВІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Час реакції для різних видів ЗВТ має такі визначення:

- час реакції вимірювального приладу — це час установлення його показів;
- час реакції аналогового вимірювального перетворювача — це час установлення його вихідного сигналу;
- час реакції ЦАП або багатозначної міри — це інтервал часу від моменту подачі на нього керуючого сигналу або сигналу запуску до моменту часу, починаючи з якого вихідний сигнал ЦАП або міри відрізняється від усталеного значення не більш ніж на заданий допуск;
- час реакції АЦП або ЦВП — це інтервал часу від моменту стрибкоподібного зміни вимірюваної величини в бік зростання й одночасної подачі сигналу запуску до моменту, починаючи з якого показ ЦВП або вихідний код АЦП відрізняються відповідно від усталеного показу або усталеного вихідного коду не більш ніж на заданий допуск.

Відносний коефіцієнт затухання або коефіцієнт демпфування ЗВТ — це коефіцієнт затухання в диференціальному рівнянні другого порядку, що описує відповідний лінійний аналоговий ЗВТ.

Похибка датування відліку АЦП або ЦВП — це інтервал часу від моменту початку циклу перетворення (запуску) АЦП або ЦВП до моменту, за якого в даному циклі перетворення значення змінної вимірюваної величини дорівнює значенню вихідного цифрового сигналу, вираженому в одиницях вимірюваної величини.