

ОЦІНКА ВПЛИВУ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ ЗАТРИМОК НА ДИНАМІЧНУ ТОЧНІСТЬ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ІМПУЛЬС- НОГО НАВАНТАЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Дослідження точності відтворення імпульсних навантажень у гідроімпульсних стендах є актуальним завданням для сучасного матеріалознавства та авіабудування. У доповіді проведено системний аналіз та математичне обґрунтування чотирьох основних складових часової затримки в цифровому контурі керування стенда, що обмежують динамічну точність формування імпульсів трикутної, прямокутної та гаверсинової форми. Запропоновано інтегральний критерій оцінки швидкодії обладнання.

Ключові слова: гідроімпульсний стенд, часова затримка, динамічна точність, програмне забезпечення реального часу, предиктивна компенсація.

Abstract

Reproducing impulse loads accurately on hydropulse test rigs is an important task for modern materials science and aircraft engineering. The paper presents a systematic analysis and mathematical substantiation of four main components of time delay in the digital control loop of the rig that limit the dynamic accuracy of forming triangular, rectangular, and haversine pulse shapes. An integral criterion for evaluating the equipment's speed of response is proposed.

Keywords: hydropulse test rig, time delay, dynamic accuracy, real-time software, predictive compensation.

Вступ

Дослідження поведінки матеріалів під дією короточасних імпульсних навантажень є важливим завданням для сучасного авіабудування, космонавтики та машинобудування. Як показано в [1], традиційні випробувальні машини (наприклад, маятникові копри) здатні виконувати лише базові випробування на одноразовий удар з фіксованою енергією, що не дозволяє моделювати реальні умови експлуатації. Наявність сучасних гідроімпульсних генераторів у складі силових випробувальних установок дозволяє формувати складну геометрію імпульсу (трикутну, прямокутну або гаверсинову форму). Проте точність відтворення таких динамічних профілів на високих частотах обмежується сумарною часовою затримкою (латентністю), яка виникає в інформаційно-керуючому та виконавчому контурах системи.

Мета дослідження — декомпозиція, системний аналіз та математичне обґрунтування джерел часових затримок у цифровому контурі керування гідроімпульсного стенда для підвищення достовірності випробувань матеріалів.

Результати досліджень

Загальний час реакції системи τ_{Σ} від моменту програмного розрахунку команди до моменту її фізичного відпрацювання на зразку матеріалу є адитивною величиною. На основі аналізу мехатронних контурів [2, 3] встановлено, що динамічна точність стенда визначається чотирма основними чинниками.

1. Програмно-обчислювальна затримка (τ_{sw}). Визначається як $\tau_{sw} = T_s + T_{calc}$, де T_s — період дискретизації алгоритму (крок квантування), а T_{calc} — чистий час обчислення керуючого впливу мікроконтролером. Під час деформації зразка його механічний опір змінюється нелінійно за мілісекунди. Якщо крок квантування T_s є завеликим, цифрова система пропускає момент переходу матеріалу від пружної деформації до пластичної текучості. Застосування складних адаптивних алгоритмів (наприклад, безмодельного адаптивного керування MFAC) збільшує T_{calc} , що призводить до фазового зсуву та амплітудного спотворення імпульсу навантаження.

2. Апаратна та комунікаційна затримка (τ_{hw}). Формується в електронних компонентах плати керування: час аналого-цифрового перетворення сигналів (TADC) з датчиків тиску, зусилля та екстензометрів і час передачі даних (Tcomm) по промислових шинах (наприклад, EtherCAT). Критичним параметром є мережевий джиттер (Tjitter) — випадкові флуктуації часу доставки пакетів. У високодинамічних стендах наявність джиттеру понад 50–100 мкс генерує стохастичний фазовий зсув, через що передній фронт ударної хвилі розмивається, унеможливаючи точне відтворення прямокутного чи гаверсинового профілю.

3. Електро механічна затримка сервопривода (τ_{servo}). Визначає швидкість реакції сервоклапанів на подачу електричного струму. Час затримки τ_{servo} обмежується електричною постійною часу (індуктивністю обмоток) та механічною постійною (інерцією золотника клапана). На частотах випробувань понад 20 Гц ця інерційність діє як фільтр низьких частот, зрізаючи пікові значення імпульсу сили. Математично динаміка таких вузлів описується передавальною функцією коливальної ланки другого порядку (1).

$$W_{servo}(s) = \frac{kv \omega^2 v}{s^2 + 2\xi \omega v s + \omega^2 v} \quad (1)$$

4. Фізична (гідродинамічна) затримка (τ_{phys}). Зумовлена транспортною затримкою поширення хвилі тиску в трубопроводі довжиною L зі швидкістю звуку в рідині c , а також часом подолання мертвих зон (досягнення тиску відкриття гідрозамка Pcrack). Ефективний модуль пружності рідини β суттєво падає при використанні гнучких рукавів високого тиску замість жорстких сталевих труб, що додатково збільшує латентність системи.

Для комплексної оцінки динамічної досконалості обладнання запропоновано безрозмірний інтегральний коефіцієнт швидкодії K_{sh} (2), де f — задана частота формування імпульсів навантаження. Дослідження показують, що для точного відтворення геометрії удару (з похибкою амплітуди $< 3\%$) необхідно забезпечити умову $K_{sh} \geq 5$. При $K_{sh} < 5$ виникає ефект запізнювання зворотного зв'язку: система фіксує руйнування зразка із запізненням, продовжуючи подавати гідравлічну енергію в зону випробувань, що викривляє діаграму деформування матеріалу.

$$K_{sh} = \frac{1}{f \cdot (\tau_{sw} + \tau_{hw} + \tau_{servo} + \tau_{phys})} \quad (2)$$

Висновки

Системний аналіз показав, що для створення високоточного обладнання для дослідження матеріалів недостатньо лише модернізації гідросистеми — визначальний вплив мають програмно-апаратні затримки ($\tau_{sw} + \tau_{hw}$). Для досягнення стабільного коефіцієнта $K_{sh} \geq 5$ на високих частотах необхідно: застосовувати обчислювальні платформи з операційними системами реального часу (RTOS) для гарантування стабільного кроку квантування T_s ; впроваджувати в програмне забезпечення модулі предиктивної компенсації часу затримки (Time Delay Compensation), які прогнозують динаміку опору матеріалу та видають випереджальну команду на серводрайвер, нівелюючи фазовий зсув системи.

Список використаної літератури

1. Zheng, H. et al. Model-Free Multi-Parameter Optimization Control for Electro-Hydraulic Servo Actuators with Time Delay Compensation // Actuators. — 2025. — Vol. 14. — № 12.
2. Zhang, J. et al. Delay Analysis and the Control of Electro-Hydrostatic Actuators // Applied Sciences. — 2022. — Vol. 12. — № 6.

Слабкий Андрій Валентинович — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.
e-mail: Slabkiyandrey@gmail.com

Котик Сергій Іванович — аспірант кафедри галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.
e-mail: sergii.kotik@gmail.com