

УДК 621.9.06-529

doi: 10.32620/aktt.2019.7.23

В. В. КОМБАРОВ<sup>1</sup>, Є. О. АКСЬОНОВ<sup>2</sup>, Є. В. ЦЕГЕЛЬНИК<sup>2</sup>,  
Є. О. КРИЖИВЕЦЬ<sup>2</sup>, С. М. ЗАДОРЖНИЙ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ТОВ НВФ «ХАІ-Інжиніринг», Харків

<sup>2</sup> Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків

<sup>3</sup> ДП «Харківське державне авіаційне виробниче підприємство», Харків

## ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИКОНАВЧИХ ОРГАНІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Виробництво складнопрофільних деталей авіаційно-космічної техніки реалізується обробкою по просторовим траєкторіям. Характер руху кожної осі обладнання є динамічним і нестационарним. Точність необхідно забезпечувати не тільки в сталому, але і в динамічному режимі. Визначення динамічних характеристик виконавчих органів є важливою і актуальною задачею для оптимізації процесу керування. Запропоновано експериментальний спосіб проведення досліджень із застосуванням можливостей системи ЧПК, оснащеної додатковими апаратними та програмними засобами. Це дозволяє виконувати реєстрацію великої кількості параметрів, що описують стан обладнання, рішення задачі інтерполяції траєкторії, формування керуючих впливів, фактичне переміщення виконавчих органів. Розглянуто методики проведення експериментальних досліджень із заданням ступеневої зміни швидкості та зі зміною швидкості по гармонійному закону для розімкненої і замкненої системи з використанням різних складових передзадання в регуляторі. Запропоновано застосування кругової інтерполяції для формування гармонійного закону зміни швидкості. Показані результати дослідження динаміки перехідного процесу розімкненої системи. Отримано частотні характеристики досліджуваного приводу. Встановлено його смугу пропускання. Дослідження процесу руху при зміні швидкості осі за гармонійним законом виконувалося в межах смуги пропускання. Показана можливість визначення гранично допустимих величин інерційних навантажень за характером зміни фактичного прискорення. Досліджено вплив складу передзадання регулятора на точність позиціонування сервоприводу та на точність обробки контуру при різних частотах керуючого впливу. Для кожного способу передзадання визначені діапазони частот керуючого впливу, на яких забезпечується задана точність обробки. Встановлено, що технологічне обмеження частоти по точності відтворення траєкторії виявилось значно жорсткішим порівняно з класичним підходом визначення смуги пропускання.

**Ключові слова:** складнопрофільні деталі; ЧПК; динамічна характеристика; швидкість; прискорення; ривок; регулятор положення; точність; похибка позиціонування

### Вступ

Більшість технологічних процесів у виробництві складнопрофільних деталей авіаційно-космічної техніки здійснюється із застосуванням обладнання з ЧПК. Для виробництва таких деталей застосовується високошвидкісне механообробне обладнання, технологічні системи комбінованих процесів із застосуванням лазерних джерел та інше високотехнологічне обладнання. Формотворчі рухи в такому обладнанні реалізуються за допомогою приводних електродвигунів. Особливість геометрії виготовлених деталей визначає необхідність переміщення по складним просторовим траєкторіям. Це визначає динамічний нестационарний характер руху кожної керованої осі обладнання. Точність переміщення керованого органу необхідно забезпечувати не тільки в сталому, але і в динамічному режимі руху. Отже, визначення динамічних характеристик є

надзвичайно важливою і актуальною задачею.

Динамічні характеристики конкретних виконавчих органів технологічного обладнання можуть бути визначені експериментальними методами.

Метою даної роботи є зниження похибки, що викликана впливом динамічних характеристик на точність переміщення керованих органів обладнання з ЧПК при обробці складнопрофільних деталей авіаційно-космічної техніки.

### 1. Постановка задачі проведення експериментальних досліджень

Динамічна характеристика – це залежність вихідного стану об'єкта керування від вхідних параметрів у перехідному режимі його функціонування. Це означає, що для дослідження динамічних характеристик необхідно мати можливість синхронної реєст-

рації параметрів керування і поведінки об'єкта.

В системі ЧПК можуть бути використані достатньо складні алгоритми керування, що враховують динамічні процеси, які відбуваються в системах верстата. Оскільки параметри керування СЧПК формуються всередині обчислювача, раціонально розглядати можливість реєстрації експериментальних даних безпосередньо системою ЧПК. Запропоновано спосіб проведення досліджень із застосуванням можливостей СЧПК на основі ПК [1, 2], яка оснащена додатковими апаратними та програмними засобами. Розроблено програмно-апаратний комплекс для дослідження алгоритмів і процесів у верстатах з ЧПК, що забезпечує виконання досліджень безпосередньо на технологічному обладнанні. Це дозволяє реєструвати велику кількість параметрів, що описують стан обладнання, рішення задачі інтерполяції траєкторії, формування керуючих впливів, фактичне переміщення виконавчих органів [2, 3]. Запропонований підхід дозволяє виконувати дослідження безпосередньо на реальному обладнанні, що важливо при вивченні динамічних процесів [4].

Важливим для дослідження точності руху органів обладнання з ЧПК є взаємозв'язок змін кінематичних параметрів з процесом керування. Для отримання динамічних характеристик, що забезпечують точність, пропонується використання різних регуляторів [5 – 8]. Одним зі способів покращення динамічних характеристик може бути застосування регулятора з прямим керуванням за диференціальними параметрами, зокрема прискоренням [7] і ривком [5].

Оцінка точності формотворчих рухів здійснюється шляхом аналізу похибки переміщення керованих осей або похибки отриманого контуру [2, 9, 10].

Динамічна характеристика досліджуваного об'єкта може бути визначена методом аналізу реакції на вплив сигналу ступінчатої форми або шляхом безпосереднього визначення реакцій на гармонійні впливи різних частот з однаковою амплітудою.

Для дослідження динамічних характеристик осі система ЧПК має забезпечувати можливість формування сигналів заданої форми. Для визначення характеристик розімкненої і замкненої системи необхідна можливість зміни конфігурації регулятора осі.

На рис. 1 показана структурна схема керування віссю досліджуваного обладнання з ЧПК.

Застосовується сервопривод Estun EMG-10ARA22 потужністю 1 кВт. У даному дослідженні керування електроприводом виконується через аналоговий канал задання швидкості  $\pm 10$  В.

Програмно реалізований регулятор контуру положення системи ЧПК виконує обчислення керуючого впливу  $U$  для  $i$ -того такту за виразом [11]:

$$U[i] = k_p \varepsilon[i] + k_d \Delta \varepsilon[i] + k_i \sum_{j=0}^i \varepsilon[j] + F_V (V[i]) + F_a (a[i]) + F_J (J[i]), \quad (1)$$

де  $V$ ,  $a$ ,  $J$  – задані значення швидкості, прискорення та ривка для  $i$ -того такту;

$\varepsilon$  – розузгодження (похибка позиціонування) осі;

$\Delta \varepsilon$  – зміна розузгодження за такт керування;

$k_p$ ,  $k_d$ ,  $k_i$  – пропорційний, диференціальний та інтегральний коефіцієнти регулятора;

$F_V$ ,  $F_a$ ,  $F_J$  – функції передачі по швидкості, прискоренню та ривку.

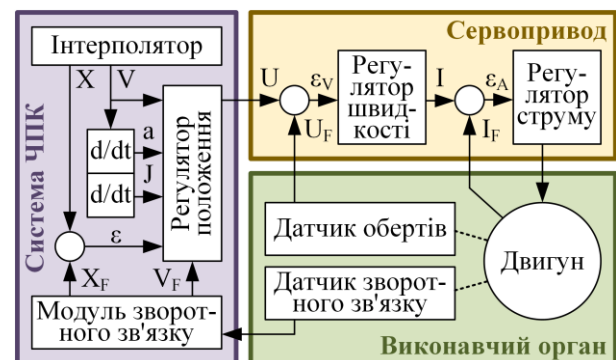


Рис. 1. Структурна схема керування віссю

Зміна значень коефіцієнтів  $k_p$ ,  $k_d$ ,  $k_i$  дозволяє здійснювати керування розімкненою системою або формувати П-, ПД-, ПДД-регулювання з різними складовими попереднього задання по  $V$ ,  $a$ ,  $J$ .

Для отримання динамічних характеристик методом задання гармонійних коливань необхідно сформулювати впливи різної частоти з однаковою амплітудою. Це може бути реалізовано заданням переміщень із застосуванням кругової інтерполяції, при якій швидкість по кожній осі змінюється за гармонійним законом:

$$V(t) = -F \cdot \sin(2\pi \cdot f_K \cdot t),$$

де  $F$  – контурна подача,  $F = 2\pi \cdot f_K \cdot R$ ;

$f_K$  – частота коливань.

Метод реалізується шляхом проведення серії експериментів, для яких програмується рух з однаковою подачею  $F$  по колу радіусом  $R$ , значення якого залежить від частоти:

$$R = \frac{F}{2\pi \cdot f_K}. \quad (2)$$

Приклад керуючої програми для дослідження гармонійного руху осі  $X$  на частоті 4 Гц з амплітудою 9549 мм/хв наведено на рис. 2.

Для отримання динамічних характеристик методом аналізу реакції об'єкта на вплив сигналу ступінчатої форми необхідно сформулювати миттєву зміну керуючого впливу на задану величину. Програм-

не забезпечення СЧПК формує задання впливу один раз за такт керування. На апаратному рівні зміна вихідного сигналу відбувається за кілька мікросекунд, що набагато менше тривалості такту. Таким чином, процеси, що відбуваються за час менше одного такту керування, реалізуються у вигляді ступінчатої зміни сигналу.

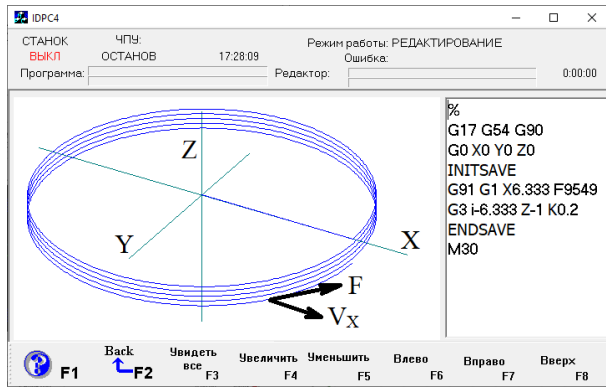


Рис. 2. Приклад керуючої програми для дослідження гармонійного руху

Миттєву зміну заданої швидкості переміщення від нульового значення до кінцевої заданої швидкості  $F$  можна отримати виконанням програми лінійного переміщення уздовж заданої осі  $X$  при налаштуванні завищеного значення прискорення  $a_x$ . Прискорення в цьому випадку визначається виразом:

$$a_x \geq F \cdot f_c,$$

де  $f_c$  – частота циклу керування СЧПК.

Приклад керуючої програми для дослідження поведінки осі  $X$  при заданні ступінчатої зміни швидкості від 0 до 9549 мм/хв наведено на рис. 3, а.

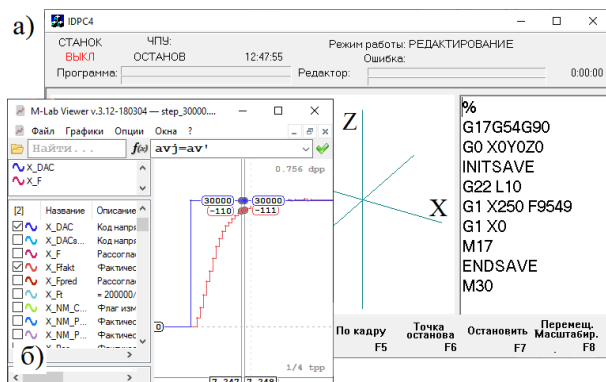


Рис. 3. Приклад керуючої програми для дослідження ступінчатого впливу (а) і програмне забезпечення обробки результатів експерименту (б)

Реєстрація результатів експериментів здійснюється із застосуванням спеціальних можливостей програмного забезпечення СЧПК. Функції збереження даних дозволяють в ході експерименту вико-

нувати реєстрацію великої кількості параметрів, що описують процес функціонування обладнання, в тому числі формування керуючих впливів і зміну параметрів заданої і фактичної траєкторії, швидкості і положення керованої осі. Обробка та аналіз результатів експерименту здійснюється за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення. На рис. 3, б показано вікно програми, що відображає ступінчасту зміну коду керуючого впливу і зміну фактичної швидкості досліджуваної осі.

## 2. Дослідження динаміки перехідного процесу

Дослідження динамічної характеристики сервоприводу методом аналізу реакції об'єкта на вплив сигналу ступінчатої форми виконано для розімкненої системи. Розімкнення системи досягається обнуленням коефіцієнтів  $k_p$ ,  $k_d$ ,  $k_i$  та функцій передачі  $F_a$ ,  $F_j$  в регуляторі (1). На рис. 4 наведені графіки зміни заданої і фактичної швидкостей ( $V$ ,  $V_F$ ), фактичних прискорення  $a_F$  та ривка  $J_F$  осі  $X$ .

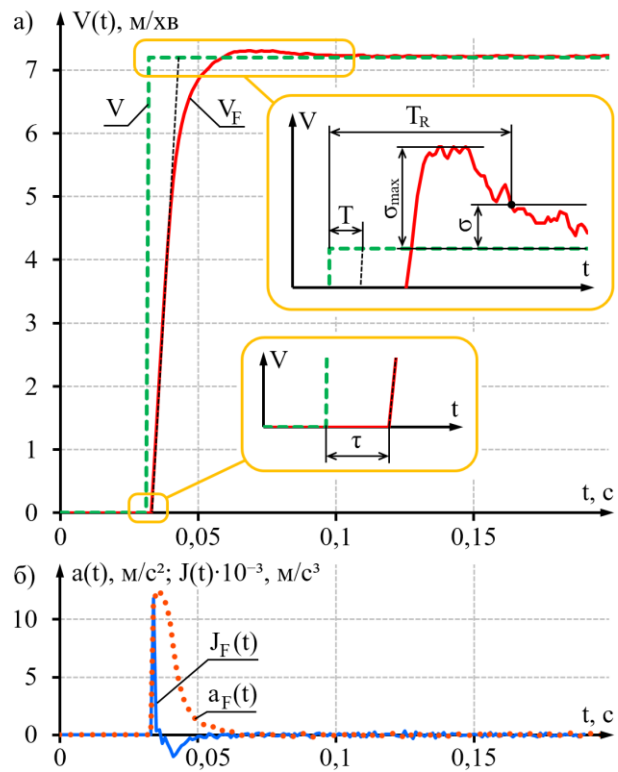


Рис. 4. Перехідний процес розімкненої системи без навантаження: задана і фактична швидкість (а); фактичні прискорення і ривок (б)

Досліджувалась поведінка осі без додаткового інерційного навантаження при розгоні зі стану спокою до подачі 7,2 м/хв. Отриманий перехідний процес є аперіодичним з часом запізнення  $\tau = 0,002$  с та постійною часу  $T = 0,010$  с. Перерегулювання  $\sigma_{max}$

складає 1,1 %. Час  $T_R$  досягнення сталою значення, що не виходить за допуск  $\sigma = 0,02$  м/хв, складає 0,062 с. Максимальне прискорення на ділянці розгону становить  $12,5$  м/с<sup>2</sup>, максимальний ривок –  $11\,800$  м/с<sup>3</sup>. Досліджений сервопривод показав високу повторюваність перехідного процесу. Поле розсіювання швидкості не перевищує  $\pm 0,18$  м/хв.

Амплітудо-частотна характеристика досліджуваного сервоприводу (рис. 5) показує, що смуга пропускання розімкненої системи без зворотного зв'язку по положенню становить 28 Гц.

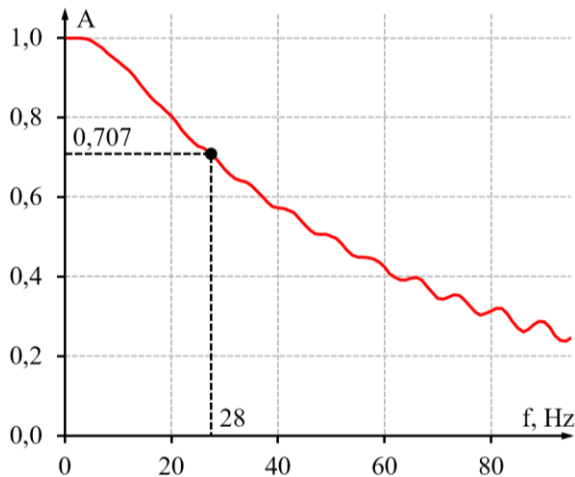


Рис. 5. Амплітудо-частотна характеристика досліджуваного сервоприводу

### 3. Дослідження руху по гармонійному закону

Визначення динамічних характеристик методом задання гармонійних коливань виконано для діапазону частот в межах отриманої смуги пропускання. Досліджувалась поведінка осі як без навантаження, так і з додатковим інерційним навантаженням. Застосовувалось розімкнене керування та керування з використанням П-регулятора з різними складовими попереднього задання по швидкості, прискоренню та ривку. На рис. 6 наведено графіки зміни заданих і фактичних параметрів руху осі.

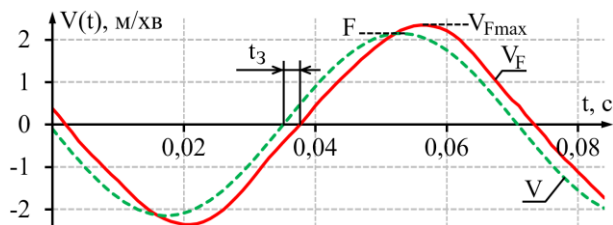


Рис. 6. Графіки зміни заданих та фактичних параметрів руху осі

На основі аналізу співвідношень амплітуд фактичної  $V_{Fmax}$  і заданої  $F$  швидкостей для різних частот отримана амплітудо-частотна характеристика розімкненої системи (рис. 7, а).

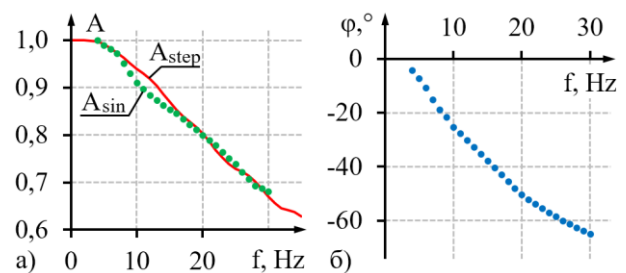


Рис. 7. Амплітудо-частотна (а) та фазо-частотна (б) характеристики розімкненої системи

Порівняння АЧХ, отриманих різними способами показує їх збіг між собою. За значеннями часу запізнення  $t_3$  фактичної швидкості відносно заданої отримана фазо-частотна характеристика (рис. 7, б). У межах смуги пропускання величина запізнення фази не досягає гранично допустимого значення  $90^\circ$ .

Вплив інерційного навантаження оцінювався за характером зміни фактичного прискорення досліджуваного сервоприводу. На рис. 8 показані зміни кінематичних параметрів при русі з гармонійним заданням керуючого впливу частотою 8 Гц.

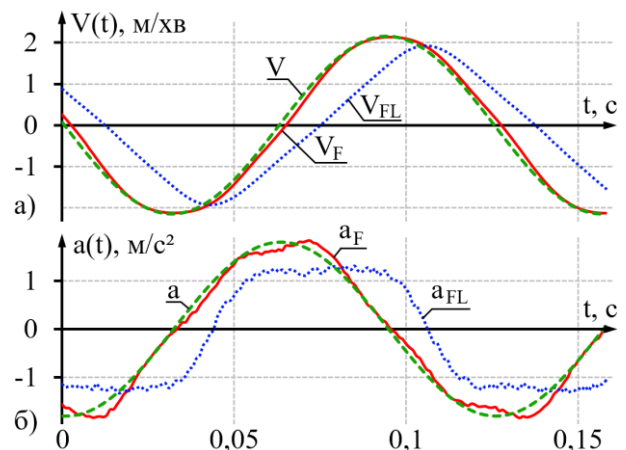


Рис. 8. Зміни кінематичних параметрів при різних величинах інерційного навантаження: задана та фактична швидкості (а); задане та фактичне прискорення (б)

На рис. 8, а показана зміна заданої швидкості  $V$  і фактичних швидкостей руху органу без навантаження  $V_F$  і з завищеним інерційним навантаженням  $V_{FL}$ . Графік фактичної швидкості руху без навантаження близький до форми графіка заданої швидкості, а при завищеному навантаженні – набуває трикутної форми. На рис. 8, б наведені відповідні графіки зміни заданого і фактичних прискорень ( $a$ ,  $a_F$ ,  $a_{FL}$ ). При завищеному інерційному навантаженні спостерігається формування ділянки постійного прискорення, що свідчить про вихід сервоприводу на обмеження за струмом двигуна.

Отже, характер зміни графіків фактичного прискорення при заданні гармонійного руху показує взаємозв'язок величин інерційного навантаження осі



і реалізованого прискорення. Аналіз форми графіка може бути використано для експериментального визначення величини гранично допустимого прискорення при фіксованому інерційному навантаженні або величини допустимого інерційного навантаження досліджуваного органу при заданому обмеженні прискорення.

Поведінка замкненої системи досліджувалась із застосуванням П-регулятора з різними складовими попереднього задання. Дослідження виконано з передзаданням тільки по швидкості (V-передзадання), по швидкості і прискоренню (VA-передзадання), а також по швидкості, прискоренню та ривку (VAJ-передзадання). На рис. 9 наведені графіки зміни похибки позиціонування (неузгодженості) досліджуваної осі при однаковій частоті (4 Гц) і амплітуді (2,150 м/хв) гармонійного задання і різних варіантах передзадання регулятора.

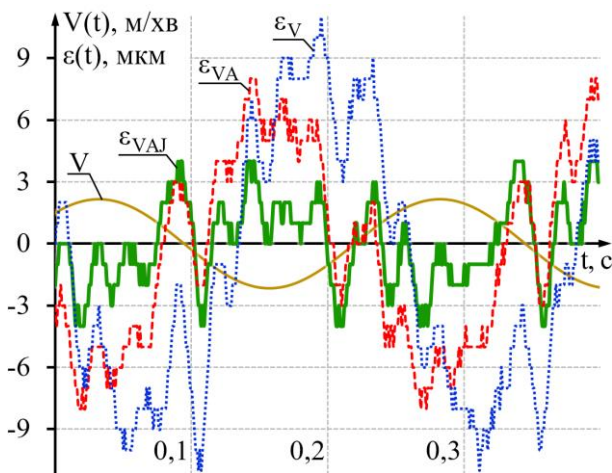


Рис. 9. Зміна похибки позиціонування при різних варіантах передзадання регулятора

Застосування в регуляторі передзадання не тільки по швидкості, а й по прискоренню та ривку дозволяє знизити похибку позиціонування (неузгодженість) більш ніж в 2,5 рази з 11 мкм до 4 мкм.

У технологічній системі неузгодженість є важливим параметром, але не еквівалентним точності обробки. Здатність технологічної системи забезпечувати необхідну точність обробки складнопрофільних деталей відповідно до стандарту ДСТУ 3630-97 оцінюється тестом колової траєкторії. При цьому точність визначається похибкою контуру  $\delta$  – відхиленням фактичного радіуса від заданого. Розбіжність значень похибки контуру  $\Delta\delta$  уздовж кола є відхиленням форми.

У даній роботі для дослідження впливу динамічних характеристик на точність відтворення контурів обробки тест кола радіусом R (2) виконувався при постійній подачі F на різних частотах для різних складових попереднього задання П-регулятора.

На рис. 10 показані залежності точності обробки контурів від частоти при V-, VA- і VAJ-передзаданні ( $\delta_V$ ,  $\delta_{VA}$ ,  $\delta_{VAJ}$ ). Викривлення форми і розміру колових траєкторій в залежності від частоти показані на рис. 10, а. На рис. 10, б наведені графіки максимальних і мінімальних значень величини відхилення радіуса траєкторії. П-регулятор з V-передзаданням вже на частотах вище 5,5 Гц дає величину похибки контуру більше 20 мкм.

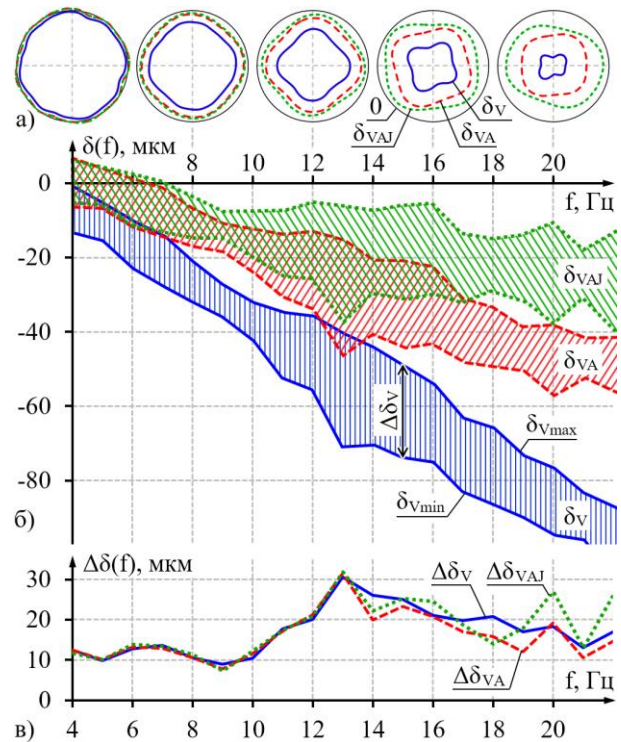


Рис. 10. Залежності точності обробки контурів від частоти та складу попереднього задання: діаграми тесту кола (а), діапазони відхилень радіуса (б) та відхилення форми (в)

Застосування VA-передзадання дозволило забезпечити похибку не більше 20 мкм до частоти 9 Гц (рис. 10, б), а VAJ-передзадання – до 10 Гц. До частоти 7 Гц відмінності між VA- і VAJ-передзаданням не істотні. При збільшенні частоти збільшується перевага VAJ-передзадання в порівнянні з VA-передзаданням.

На рис. 10, в показані графіки зміни похибки форми колової траєкторії  $\Delta\delta$ . До 10 Гц величина відхилення становить  $9 \pm 4$  мкм. На частоті 13 Гц відхилення форми досягає максимального значення (32 мкм), що може бути пов'язано з проявом резонансних явищ в замкненій системі. До 13 Гц відхилення форми не залежить від складових передзадання П-регулятора. На більш високих частотах графіки відхилення форми відрізняються, але явної переваги будь-якого типу регулятора не спостерігається.

Таким чином, експериментальні дослідження показали, що П-регулятор з V-передзаданням дає

задовільні показники точності до частоти 5,5 Гц, з VA-передзаданням – до частоти 9 Гц, з VAJ-передзаданням – до частоти 10 Гц, що значно менше граничної частоти смуги пропускання (28 Гц). Отже, технологічне обмеження частоти по точності відтворення траєкторії виявилось значно жорсткішим порівняно з класичним підходом визначення смуги пропускання.

### Висновки

У роботі виконано дослідження динамічних характеристик органів технологічного обладнання на прикладі сервоприводу Estun EMG-10APA22 потужністю 1 кВт. Запропоновано спосіб проведення досліджень із застосуванням можливостей системи ЧПК на основі ПК, яка оснащена додатковими апаратними та програмними засобами.

Аналіз реакції об'єкта на вплив ступінчатої форми виконаний за допомогою лінійного переміщення на подачі 7,2 м/хв уздовж осі X при завищеному значенні прискорення. Отримано аперіодичний перехідний процес з часом запізнення 0,002 с і постійною часу 0,010 с. Перерегулювання становить 1,1 %. Стале значення досягається за 0,062 с. Максимальне прискорення, що досягається на ділянці розгону, склало 12,5 м/с<sup>2</sup>, максимальний ривок – 11 800 м/с<sup>3</sup>.

Отримано АЧХ осі при впливі сигналу ступінчатої форми і гармонійних впливів. Смуга пропускання розімкненої системи без зворотного зв'язку по положенню склала 28 Гц.

Показано зв'язок інерційного навантаження на вісь з формою графіка зміни реалізованого прискорення. Запропоновано на основі аналізу графіка визначати величини гранично допустимого прискорення або допустимого інерційного навантаження.

Досліджено вплив складу передзадання в П-регуляторі на похибку позиціонування. Введення передзадання по прискоренню та ривку дозволило знизити похибку більш ніж в 2,5 рази.

Експериментально визначені динамічні характеристики конкретного типу обладнання та встановлено вплив типу застосовуваного регулятора на точність траєкторних переміщень. Отримано точність відтворення траєкторії близько 20 мкм на частотах до 5,5 Гц при використанні П-регулятора зі зворотним зв'язком по положенню і передзаданням по швидкості. Введення в регулятор передзадання по прискоренню дозволило підвищити частоту до 9 Гц, а введення передзадання по ривку – до 10 Гц.

Таким чином, для забезпечення точності траєкторних переміщень осі технологічного обладнання є важливим не тільки обмеження величин кінематичних характеристик, таких як швидкість, прискорення і ривок, але і частота їх зміни.

### Література

1. Rogelio, J. P. A PC-based controller for the computer numerically-controlled (CNC) LASER machine [Text] / J. P. Rogelio, R. G. Baldovino // *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*. – 2015. – Vol. 1. – P. 242–247.
2. Программно-аппаратный комплекс для исследования алгоритмов и процессов в станках с ЧПУ [Текст] / В. С. Кривцов, Е. В. Комбарова, Р. В. Варнас, Е. А. Аксёнов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 4(81). – С. 5–11.
3. Chang, W.-Y. Investigated information data of CNC machine tool for established productivity of industry 4.0 [Text] / W.-Y. Chang, S.-J. Wu // *5th International Congress on Advanced Applied Informatics*. – 2016. – P. 1088–1092.
4. The milling of airframe components with low rigidity: A general approach to avoid static and dynamic problems [Text] / S. Herranz, F. J. Campa, L. N. L. De Lacalle, A. Rivero, A. Lamikiz, E. Ukar, J. A. Sánchez, U. Bravo // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2005. – Vol. 219(11). – P. 789–801.
5. Boerlage, M. Jerk derivative feedforward control for motion systems [Text] / M. Boerlage, R. Tousain, M. Steinbuch // *Proceedings of the American Control Conference*. – 2004. – Vol. 5. – P. 4843–4848.
6. Schraeder, T. F. Experimental performance analysis of an inverse dynamics CNC compensation scheme for high-speed execution of curved toolpaths [Text] / T. F. Schraeder, R. T. Farouki // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 73. – P. 195–208.
7. Feed drive modelling for the simulation of tool path tracking in multi-axis High Speed Machining [Text] / D. Prévost, S. Lavernhe, C. Lartigue, D. Dumur // *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*. – 2011. – Vol. 4. – P. 266–284.
8. A Comparative Study of Predictive Current Control Schemes for a Permanent-Magnet Synchronous Machine Drive [Text] / F. Morel, X. Lin-Shi, J.-M. Rétif, B. Allard, C. Buttay // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2009. – Vol. 56. – No. 7.
9. Experimental study of contouring accuracy for CNC machines executing curved paths with constant and curvature-dependent feedrates [Text] / J. R. Conway, A. L. Darling, C. A. Ernesto, R. T. Farouki, C. A. Palomares // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2013. – Vol. 29(2). – P. 357–369.
10. Комбаров, В. В. Исследование влияния стабильности цикла управления системы ЧПУ на точность формообразующих движений [Текст] / В. В. Комбаров, В. Ф. Сорокин, Е. А. Криживец // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 10 (127). – С. 58–64.
11. Комбаров, В. В. Обеспечение стабильности контурной подачи в системе ЧПУ высокоскоростным оборудованием на примере круговой интерполяции [Текст] / В. В. Комбаров, В. Ф. Сорокин //

Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 10 (107). – С. 7–14.

## References

1. Rogelio, J. P., Baldovino, R. G. A PC-based controller for the computer numerically-controlled (CNC) LASER machine. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2015, vol. 1, pp. 242–247.
2. Krivtsov, V. S., Kombarova, E. V., Varnas, R. V., Aksonov, Ye. O. Programmno-apparatnyi kompleks dlya issledovaniya algoritmov i protsessov v stankakh s ChPU [Hardware-software complex for the study of algorithms and processes in CNC machines]. *Авиационно-космическая техника и технология - Aerospace technic and technology*, 2011, vol. 4(81), pp. 5–11.
3. Chang, W.-Y., Wu, S.-J. Investigated information data of CNC machine tool for established productivity of industry 4.0. *5th International Congress on Advanced Applied Informatics*, 2016, pp. 1088–1092.
4. Herranz, S., Campa, F. J., De Lacalle, L. N. L., Rivero, A., Lamikiz, A., Ukar, E., Sánchez, J. A., Bravo, U. The milling of airframe components with low rigidity: A general approach to avoid static and dynamic problems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2005, vol. 219 (11), pp. 789–801.
5. Boerlage, M., Tousain, R., Steinbuch, M. Jerk derivative feedforward control for motion systems. *Proceedings of the American Control Conference*, 2004, vol. 5, pp.4843–4848.
6. Schraeder, T. F., Farouki, R. T. Experimental performance analysis of an inverse dynamics CNC compensation scheme for high-speed execution of

curved toolpaths. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 73, pp. 195–208.

7. Prévost, D., Lavernhe, S., Lartigue, C., Dumur, D. Feed drive modelling for the simulation of tool path tracking in multi-axis High Speed Machining. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 2011, vol. 4, pp. 266–284.

8. Morel, F., Lin-Shi, X., Rétif, J.-M., Allard, B., Buttay, C. A Comparative Study of Predictive Current Control Schemes for a Permanent-Magnet Synchronous Machine Drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, no. 7.

9. Conway, J. R., Darling, A. L., Ernesto, C. A., Farouki, R. T. Palomares, C. A. Experimental study of contouring accuracy for CNC machines executing curved paths with constant and curvature-dependent feedrates. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, vol. 29 (2), pp. 357–369.

10. Kombarov, V. V., Sorokin, V. F., Krizhivets, E. A. Issledovanie vliyaniya stabil'nosti tsikla upravleniya sistemy ChPU na tochnost' formoobrazuyushchikh dvizhenii [Study of CNC system control cycle stability influence on shape-generating accuracy]. *Авиационно-космическая техника и технология - Aerospace technic and technology*, 2015, vol. 10 (127), pp. 58–64.

11. Kombarov, V. V., Sorokin, V. F. Obespechenie stabil'nosti konturnoi podachi v sisteme ChPU vysokoskorostnym oborudovaniem na primere krugovoi interpolatsii [The providing stability of contour feedrate in CNC system by high-speed equipment on example of circular interpolation]. *Авиационно-космическая техника и технология - Aerospace technic and technology*, 2013, vol. 10 (107), pp. 7–14.

Поступила в редакцию 16.04.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРГАНОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**В. В. Комбаров, Е. А. Аксёнов, Е. В. Цегельник, Е. А. Криживец, С. Н. Задорожный**

Производство сложнопрофильных деталей авиационно-космической техники реализуется обработкой по пространственным траекториям. Характер движения каждой оси оборудования является динамическим и нестационарным. Точность необходимо обеспечивать не только в установившемся, но и в динамическом режиме. Определение динамических характеристик исполнительных органов является важной и актуальной задачей для оптимизации процесса управления. Предложен экспериментальный способ проведения исследований с применением возможностей системы ЧПУ, которая оснащена дополнительными аппаратными и программными средствами. Это позволяет выполнять регистрацию большого количества параметров, описывающих состояние оборудования, решение задачи интерполяции траектории, формирование управляющих воздействий, фактическое перемещение исполнительных органов. Рассмотрены методики проведения экспериментальных исследований с заданием ступенчатого изменения скорости и с изменением скорости по гармоническому закону для разомкнутой и замкнутой системы с использованием различных составляющих задания в регуляторе. Предложено применение круговой интерполяции для формирования гармонического закона изменения скорости. Показаны результаты исследования динамики переходного процесса разомкнутой системы. Получены частотные характеристики исследуемого привода. Установлена его полоса пропускания. Исследование процесса движения при изменении скорости оси по гармоническому закону выполнялось в пределах полосы пропускания. Показана возможность определения предельно допустимых величин инерционных нагрузок по характеру изменения фактического ускорения. Исследовано влияние состава задания регулятора на точность позиционирования сервопривода и на точность обработки контура при различных частотах управляющего воздействия. Для каждого способа задания определены диапазоны частот управляющего воздействия, на которых обеспечивается заданная точность обработки. Установ-

лено, что технологическое ограничение частоты по точности воспроизведения траектории оказалось значительно более жёстким по сравнению с классическим подходом определения полосы пропускания.

**Ключевые слова:** сложнопрофильные детали; ЧПУ; динамическая характеристика; скорость; ускорение; рывок; регулятор положения; точность; ошибка позиционирования.

## DETERMINATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT ORGANS

*V. V. Kombarov, Ye. O. Aksonov, Ye. V. Tsegelnyk, Ye. O. Kryzhyvets, S. M. Zadorozhnyi*

The production of complicated profile parts for aerospace technology is carried out by processing along spatial paths. The nature of the movement of each axis of the equipment is dynamic and unsteady-state. Accuracy must be ensured not only in a steady-state but also in dynamic mode. The determination of dynamic characteristics of the executive bodies is an important and urgent task to optimize the control process. An experimental research method using capabilities of the CNC system, which was equipped with additional hardware and software, is proposed. This allows to register a large number of parameters that describe the state of the equipment, the solving of the task of trajectory interpolating, the formation of control actions, the actual movement of the executive bodies. The methods of conducting experimental studies with the setting of a stepwise change in speed and with a change in speed according to the harmonic law for an open-loop and closed-loop system using various components of the feedforward in the regulator are considered. The use of circular interpolation for the formation of a harmonic law of speed change is proposed. The results of the study of the dynamic of the transition process of an open system are shown. The frequency characteristics of the drive under study are obtained. Its bandwidth is determined. The study of the moving process when the axis velocity changes in harmonic law was performed within the passband. The possibility of determining the maximum permissible values of inertial loads by the nature of the change in actual acceleration is shown. The influence of the regulator feedforward composition on the accuracy of positioning of the servo drive and the accuracy of the contour processing at various frequencies of the control action is studied. For each feedforward method, the frequency ranges of the control action are determined, on which the specified processing accuracy is ensured. It was found that the technological frequency limitation by the accuracy of the reproduction of the path turned out to be significantly more stringent compared to the classical approach for determining the bandwidth.

**Keywords:** complicated profile parts; CNC; dynamic response; speed; acceleration; jerk; position controller; accuracy; positioning error.

**Комбаров Владимир Викторович** – директор, товариство з обмеженою відповідальністю науково-виробнича фірма «ХАІ-Інжиніринг», Харків, Україна.

**Аксёнов Євген Олександрович** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

**Цегельник Євген Володимирович** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

**Криживець Євген Олександрович** – аспірант кафедри технології виробництва ЛА, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

**Задорожний Сергій Миколайович** – генеральний директор, Харківське державне авіаційне виробниче підприємство, Харків, Україна.

**Kombarov Volodymyr Viktorovych** – Director, Research-and-production Company "KhAI-Engineering" LLC, Kharkiv, Ukraine, e-mail: vl.kombarov@gmail.com,

ORCID Author ID: 0000-0002-6158-0374, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=LNMPiwgAAAAJ>.

**Aksonov Yevhen Oleksandrovych** – PhD, Senior Researcher, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: aksev@i.ua,

ORCID Author ID: 0000-0002-2615-0598, Scopus Author ID: 36561143800, ResearcherID: M-5093-2018, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=JfXCKosAAAAJ>.

**Tsegelnyk Yevgen Volodymyrovych** – PhD, Senior Researcher, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: y.tsegelnyk@khai.edu,

ORCID Author ID: 0000-0003-1261-9890, Scopus Author ID: 57192961558, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=i4sxoxYAAAAJ>.

**Kryzhyvets Yevhen Oleksandrovych** – PhD Student of Aircraft Manufacturing Chair, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: cj31337@gmail.com,

ORCID Author ID: 0000-0001-8360-4069, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=Hc8WDdUAAAAJ>.

**Zadorozhnyi Sergiy Mykolayovych** – Director, Kharkiv state aircraft manufacturing company, Kharkiv, Ukraine, e-mail: sergiy.zadorozhnyi63@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-7394-0875.