

УДК 621.9.04

В.Б. Струтинський, професор, д-р техн. наук,

А.А. Гуржій, аспірант,

А.С. Дем'яненко, аспірант

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056*

kvm_mmi@mail.ru

СТОХАСТИЧНІ ДИНАМІЧНІ КОЛИВАЛЬНІ ПРОЦЕСИ У ВИКОНАВЧОМУ ПРИБОРІ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ВЕРСТАТА ПАРАЛЕЛЬНОЇ КІНЕМАТИКИ

Розглянуто конструктивні особливості виконавчого пристрою мехатронної системи, який включає електродвигун та передачу гвинт-гайка. Розроблена математична модель і виконано розрахунки стохастичних динамічних процесів у виконавчому пристрої мехатронної системи верстата паралельної кінематики.

Ключові слова: *верстат паралельної кінематики, виконавчий пристрій, електродвигун, коливальні процеси, математична модель, моделювання, перехідні процеси, вимушені коливання.*

Верстата паралельної кінематики є новим і перспективним видом металообробного обладнання. Верстат являє собою шести координатну мехатронну систему. Характеристики мехатронної системи значною мірою залежать від властивостей виконавчих пристроїв. Виконавчими пристроями мехатронних систем верстатів паралельної кінематики є електродвигуни з відповідним навантаженням. Електроприводи працюють в жорстких динамічних режимах при випадкових навантаженнях. Тому дослідження стохастичних динамічних процесів у приводах мехатронних систем є актуальним.

Проблема в загальному вигляді полягає у вдосконаленні мехатронних систем верстатів паралельної кінематики.

Проблема пов'язана з вирішенням важливих задач вдосконалення металообробного обладнання.

Дослідження динамічних властивостей електродвигуна із навантаженням дозволяє цілеспрямовано вдосконалити конструкцію виконавчого пристрою, а відповідно і поліпшити якісні показники мехатронної системи.

Дослідження мехатронних систем останнім часом набули значного розвитку [1]. Наявна значна кількість публікацій, де розглянуті верстата паралельної кінематики та їх приводи [2]. В літературних джерелах наведено результати досліджень коливальних процесів у динамічних системах верстатів паралельної кінематики [3]. В ряді робіт [2, 4] вказано на головну роль привода в забезпеченні параметрів точності верстата.

Результатів досліджень динамічних коливальних процесів у виконавчих пристроях мехатронної системи верстата паралельної кінематики в літературних джерелах не виявлено. Не розглянуті динамічні процеси і в електромеханічних системах.

Дана наукова проблема є основою суттєвого вдосконалення характеристик мехатронних систем та їх основних вузлів. На основі досліджень виконавчих пристроїв проводиться розробка вузлів і агрегатів мехатронних систем. Одним із основних методів досліджень мехатронних систем є математичне моделювання. Воно здійснюється на основі застосування сучасних програмних продуктів зосереджених в математичних пакетах.

До невіршених раніше частин загальної проблеми відноситься розробка математичної моделі та розрахунок стохастичних динамічних коливальних процесів у виконавчому пристрої мехатронної системи верстата паралельної кінематики.

Метою досліджень викладених в даній статті є дослідження стохастичних коливальних процесів у виконавчому пристрої мехатронної системи верстата паралельної кінематики. Задачами дослідження є розробка математичної моделі виконавчого пристрою, її алгоритмічна і програмна реалізація та математичне моделювання стохастичних коливальних процесів у виконавчому пристрої.

Аналіз конструктивних особливостей виконавчого пристрою верстата паралельної кінематики

Верстат паралельної кінематики (рисунок 1) має шість виконавчих пристроїв на основі електропривода.

Кожен виконавчий пристрій має електродвигун 1, який зубчатою пасовою передачею 2 з'єднаний із поворотною гайкою 3, яка переміщує гвинт 4. Виконавчий пристрій встановлено на рамці 5, що встановлена в карданному шарнірі з підшипниками 6 і 7 та може повертатись відносно нерухомої основи верстата. Зміна довжин гвинтів 4 приводить до переміщення платформи верстата 8, на якій розміщено мотор-шпindel.

Основою виконавчого пристрою є електродвигун. Він є динамічною слабодемпфованою електромеханічною системою. В процесі досліджень виконані спеціальні конструктивні заходи по підвищенню показників динамічної якості системи. Вони полягають у застосуванні спеціального

інерційного демпфера коливань ротора електродвигуна та використання дисипативних властивостей навантаження для підвищення показників динамічної якості виконавчого пристрою.

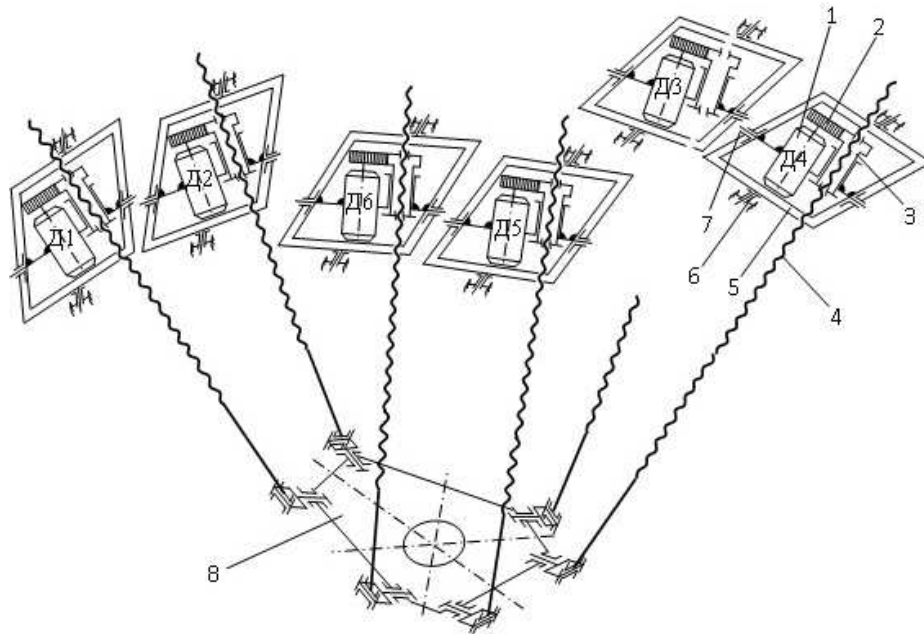


Рисунок 1 – Кінематична схема верстата паралельної кінематики який має шість штанг змінної довжини із виконавчими пристроями

Конструктивна реалізація виконавчого пристрою забезпечує його компактну компоновку (рисунок 2).

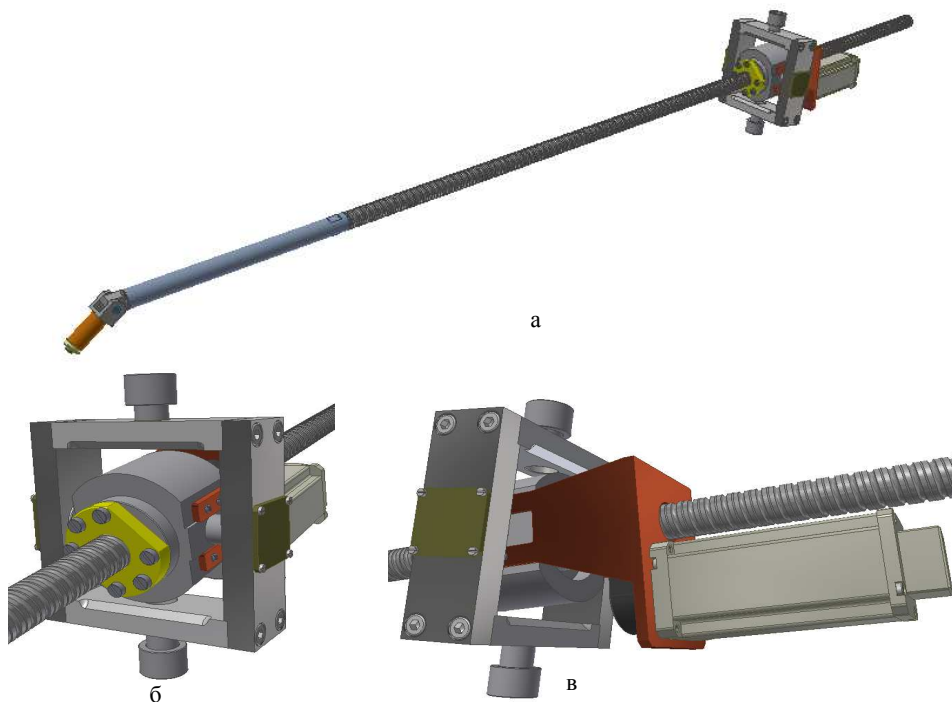


Рисунок 2 – Конструктивна реалізація виконавчого пристрою мехатронної системи верстата паралельної кінематики: а – загальний вигляд штанги змінної довжини з приводом; б – передача гвинт-гайка встановлена в поворотній рамці; в – загальний вигляд електропривода

Електродвигун являє собою електромеханічний пристрій, який перетворює сигнал системи керування без зворотного зв'язку. Тому важливе значення має характер навантаження вала двигуна. Електродвигун навантажено моментом, який виникає при повороті гайки, що переміщує гвинт штанги (рисунок. 3)

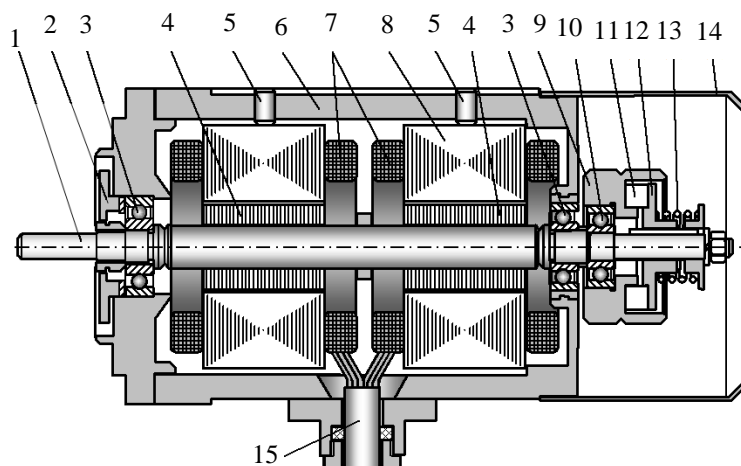


Рисунок 3 – Конструктивна схема електродвигуна, який використано в якості виконавчого пристрою мехатронної системи: 1 – вал ротора; 2 – передній фланець; 3 – підшипник ротора; 4 – пакети магнітопровода ротора; 5 – штифти пакетів магнітопровода; 6 – корпус статора; 7 – обмотки фаз статора; 8 – пакети магнітопровода статора; 9 – інерційний демпфер; 10 – підшипник демпфера; 11 – фрикційна прокладка; 12 – натискна шайба демпфера; 13 – пружина демпфера; 14 – кожух демпфера; 15 – виводи обмоток фаз статора.

Розробка математичної моделі виконавчого пристрою.

Динамічна модель виконавчого пристрою являє собою тримасову ланцюгову систему із нелінійними пружно-дисипативними зв'язками (рисунок 4).

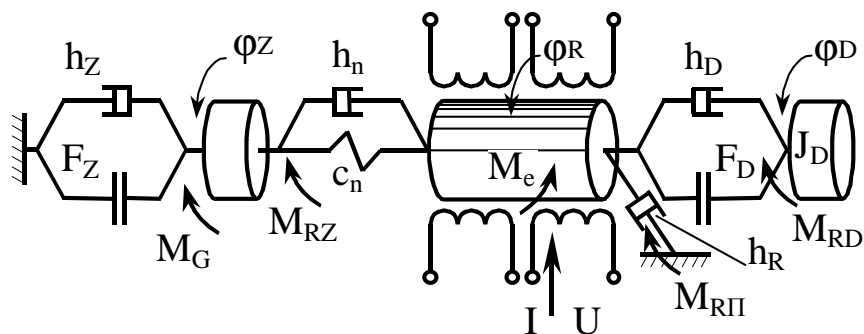


Рисунок 4 – Динамічна модель виконавчого пристрою мехатронної системи

Інерційні елементи динамічної моделі J_z, J_R, J_D відповідають масам гайки та пасової передачі, ротора електродвигуна та масі інерційного демпфера. Коефіцієнт опору підшипників ротора h_R та коефіцієнт опору підшипника інерційного демпфера h_D описують лінійні складові сил тертя обертової механічної системи. Інерційний демпфер має в своєму складі фрикційний механізм, сили тертя якого відповідають нелінійній залежності

$$M_D = k_D F_D \operatorname{sgn} \omega,$$

де k_D – коефіцієнт; F_D – зусилля дії пружини демпфера.

На динамічну систему ротора діє момент M_e , який визначається електромагнітними силами системи статора. Вони залежать від характеру динамічних змін напруги U на обмотках двигуна та струму в електричних ланцюгах обмоток.

Кінематичний ланцюг між валом електродвигуна і гайкою включає маложорстку передачу із зубчастим ременем. Вони мають певну деформативність, а муфти є елементами дисипації енергії. Тому між поворотним елементом гайки і ротором двигуна наявний пружно-дисипативний зв'язок з коефіцієнтом жорсткості C_n і коефіцієнтом опору h_n .

Електродвигун являє собою електричну машину, ротор якої має специфічне моментне навантаження з боку передачі. Навантаження має складові, обумовлені силами сухого і рідинного тертя та складові, обумовлені дисипативними силами в передачі гвинт-гайка. Сили сухого тертя визначаються залежністю:

$$M_z = k P_0 \operatorname{sgn} \omega,$$

де k – коефіцієнт; P_0 – середнє значення навантаження; ω – кутова швидкість повороту гайки та вала електродвигуна.

Сили тертя, які виникають при повороті гайки пропорційні кутовій швидкості обертання:

$$M_p = h_z \omega,$$

де h_z – коефіцієнт лінійного опору при повороті гайки.

Сили, які діють на гайку пропорційні крутному моменту:

$$M_G = K_G M_{kp}.$$

Система диференціальних рівнянь, яка описує динамічні процеси в електроприводі записана у вигляді

$$\begin{cases} J_z \ddot{\varphi}_z = M_{Rz} - M_{sz}, \\ J_R \ddot{\varphi}_R = M_e - M_{Rz} - M_{RП} - M_{RD}, \\ J_D \ddot{\varphi}_D = M_{RD}, \end{cases}$$

де $\varphi_z, \varphi_R, \varphi_D$ – відповідно абсолютні кути повороту гайки, ротора електродвигуна та момент інерційного демпфера; M_{Rz} – момент, який виникає в кінематичному ланцюзі між валом електродвигуна та гайкою; M_{sz} – сумарний момент сил опору гайки; M_e – момент електромагнітних сил, які діють на ротор; $M_{RП}$ – момент сил опору підшипників ротора; M_{RD} – сумарний момент сил дисипативного зв'язку між ротором і масою інерційного демпфера.

Наведена система рівнянь приведена до спеціального вигляду шляхом подвійного інтегрування в часі. При цьому вона має вигляд

$$\begin{aligned} \varphi_z &= \frac{1}{J_z} \int_0^t \int_0^t (M_{Rz} - M_{SE})(dt)^2; \\ \varphi_R &= \frac{1}{J_R} \int_0^t \int_0^t (M_e - M_{Rz} - M_{RП} - M_{RD})(dt)^2; \\ \varphi_D &= \frac{1}{J_D} \int_0^t \int_0^t M_{RD}(dt)^2. \end{aligned}$$

Дана система рівнянь послужила основою для розробки структурної математичної моделі, яка забезпечує чисельне інтегрування рівнянь динаміки динамічної системи виконавчого пристрою (рисунок 5).

Моделю своїм входом має вектор M , компоненти якого є динамічними моментами сил

$$M = \begin{Bmatrix} M_{Rz} \\ M_{sz} \\ M_{Rp} \\ M_{RD} \\ M_E \end{Bmatrix}.$$

Виходами моделі є вектор переміщень мас, вектори кутових переміщень мас та вектори кутових швидкостей ротора двигуна та маси інерційного демпфера

$$f_i = \begin{Bmatrix} \varphi_z \\ \varphi_R \\ \varphi_D \end{Bmatrix} \quad om = \begin{Bmatrix} \dot{\varphi}_z \\ \dot{\varphi}_R \\ \dot{\varphi}_D \end{Bmatrix}.$$

Наведена модель сформована у вигляді блока DinElertr. Вектор вхідних параметрів моделі формується в спеціальній структурній моделі, яка здійснює обчислення окремих динамічних моментів і подачу їх на вхід блока DinElertr (рисунок 6).

Входами математичної моделі є поточні кути повороту і кутові швидкості окремих мас крутильної динамічної системи електродвигуна, які заводяться у вигляді зворотних зв'язків та зовнішніх керуючих параметрів. В якості керуючих параметрів використано моментне навантаження в приводі та сигнал керування електродвигуном U і виміряні значення струмів у обмотках двигуна DI .

Моделю включає окремі блоки призначені для обчислення динамічних моментів.

Моменти в динамічній системі електропривода залежать від параметрів, які зазнають суттєвих динамічних змін. Моменти визначено наступними залежностями.

Динамічний момент в кінематичному ланцюзі між валом двигуна і гайкою.

$$M_{Rz} = h_{П} (\dot{\varphi}_R - \dot{\varphi}_z) + C_{П} (\varphi_R - \varphi_z),$$

де $h_{П}$ – коефіцієнт лінійного опору кінематичного ланцюга між ротором двигуна та гайкою; $C_{П}$ – еквівалентна крутильна жорсткість кінематичного ланцюга у вигляді зубчатого ременю.

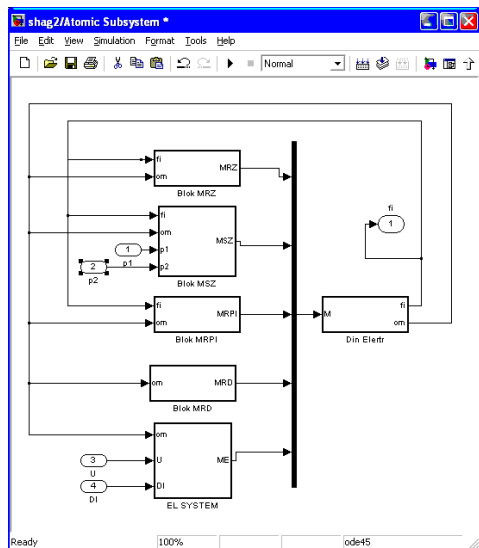


Рисунок 5 – Структурна математична модель призначена для чисельного інтегрування рівнянь динаміки системи електродвигуна

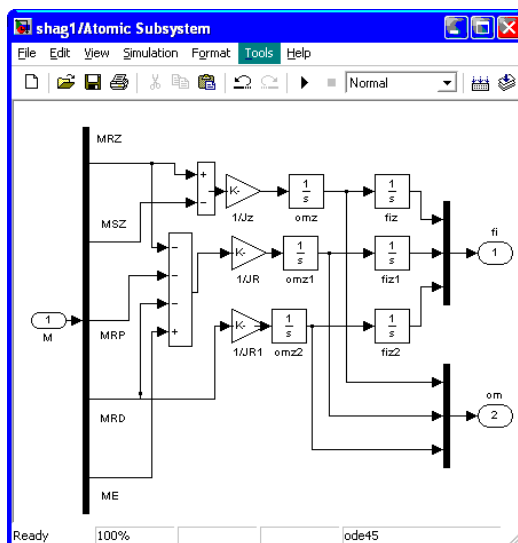


Рисунок 6 – Структурна математична модель, яка забезпечує обчислення крутних моментів у динамічній системі електропривода

Момент електромагнітних сил, що діють на ротор електродвигуна, визначається параметрами електричної мережі обмоток. Струм в обмотці I , магнітний потік збудження Φ , крутний момент на валу M_e , кутова швидкість обертання ротора ω_r та протиелектрорушійна сила E , яка наводиться в обмотці, зв'язані наступними співвідношеннями:

$$E = C_e \Phi \omega_p, M_e = C_m \Phi I, U = IR + E,$$

де $C_e = \frac{P \cdot N \cdot 10^{-8}}{2\pi a}$, $C_m = \frac{C_e}{9.81}$, P – число пар полюсів обмоток; N – число провідників у обмотці; a – число пар паралельних гілок обмоток; R – активний опір мережі обмоток; U – напругення на обмотках.

Виключивши із наведених рівнянь E та I одержимо залежність крутного моменту від параметрів привода у вигляді

$$M_e = \frac{C_m}{R} \Phi U - \frac{C_e C_m}{R} \Phi^2 \omega$$

Напругення на обмотках електродвигуна зв'язане із магнітним потоком згідно залежності

$$\Phi = \frac{LI}{n}, U = IR + \frac{dI}{dt},$$

де L – індуктивний опір обмоток електродвигуна; n – число витків обмотки.

Підставивши значення магнітного потоку, знайдемо залежність моменту від кутової швидкості обертання вала двигуна

$$M_e = \frac{C_m L}{Rn} IU - \frac{C_e C_m}{R} \frac{L^2 I^2}{\omega^2} \omega.$$

В правій частині формули знаходяться регульовані параметри живлення електродвигуна. При регулюванні струму в обмотках одержимо

$$M_e = \left(\frac{C_m L}{R\omega} - \frac{C_e C_m}{R} \frac{L^2}{\omega^2} \omega \right) I^2 + \frac{C_m L I}{R\omega} \cdot \frac{dI}{dt}.$$

Таким чином момент від дії електромагнітних сил визначається у вигляді

$$M_e = (K_I - K_\omega \omega) I^2 + K_V I \cdot \frac{dI}{dt},$$

де коефіцієнти зв'язані із параметрами електричної мережі двигуна наступними залежностями

$$K_e = \frac{C_m L}{R\omega}, K_\omega = \frac{C_e C_m}{R} \frac{L^2}{\omega^2}, K_V = \frac{C_m L}{R\omega}.$$

Дані коефіцієнти певним чином змінюються в часі при роботі електродвигуна.

Прийнято, що значення коефіцієнтів мають невеликі випадкові відхилення відносно своїх номінальних значень. При цьому

$$K_I = K_I^0 + K_I^*, K_\omega = K_\omega^0 + K_\omega^*, K_v = K_v^0 + K_v^*,$$

де K_I^0, K_ω^0, K_v^0 – номінальні значення (математичні сподівання) коефіцієнтів; K_I^*, K_ω^*, K_v^* – випадкові відхилення коефіцієнтів.

Для визначення моменту дії електромагнітних сил на ротор електродвигуна розроблена спеціальна структурна математична модель (рисунок 7).

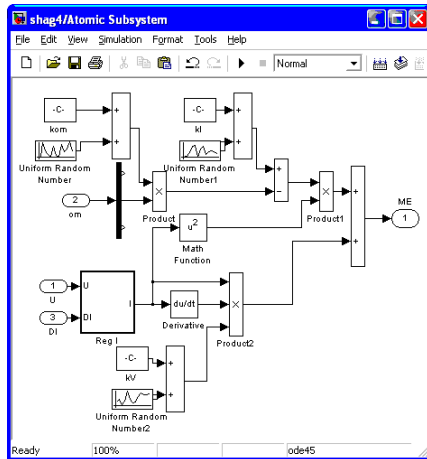


Рисунок 7 – Структурна математична модель електричної частини двигуна

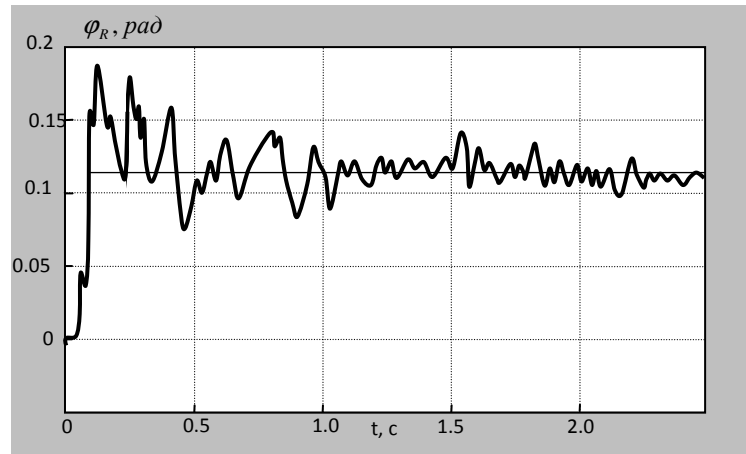


Рисунок 8 – Результати математичного моделювання кута повороту вала електродвигуна при ступінчастій зміні напруги

Математична модель в своєму складі має блок Reg1 регулювання струму в обмотках двигуна.

Окремі блоки моделі об'єднані в загальну модель виконавчого пристрою. На основі розробленої моделі виконано математичне моделювання виконавчого пристрою мехатронної системи. Входом моделі прийнято динамічні зміни керуючого напруги на електродвигуні. Виходом моделі є кут повороту вала електродвигуна.

В процесі математичного моделювання визначена перехідна функція виконавчого пристрою. Розрахунки перехідної функції проведено при ступінчастій зміні входу моделі (рисунок 8).

Із результатів математичного моделювання випливає, що виконавчий пристрій мехатронної системи має складний стохастичний перехідний процес. Максимальне перерегулювання процесу сягає 50%, а коливальність (число повних коливань) перехідного процесу складає 8...12. Час перехідного процесу є достатньо великим (0,8...0,9 с). Базова частота власних коливань системи знаходиться в межах 8...12 Гц. За час перехідного процесу має місце затухання всіх складових коливань. Виконавчий пристрій має високу швидкість. Час наростання перехідного процесу не перевищує 0,08 с. В перехідному процесі наявна випадкова гармонічна складова розмахом 0,015...0,02 рад та частотою 25...30 Гц.

В процесі математичного моделювання визначено стохастичний коливальний процес в приводі при синусоїдальній зміні напруги живлення електродвигуна (рисунок 9).

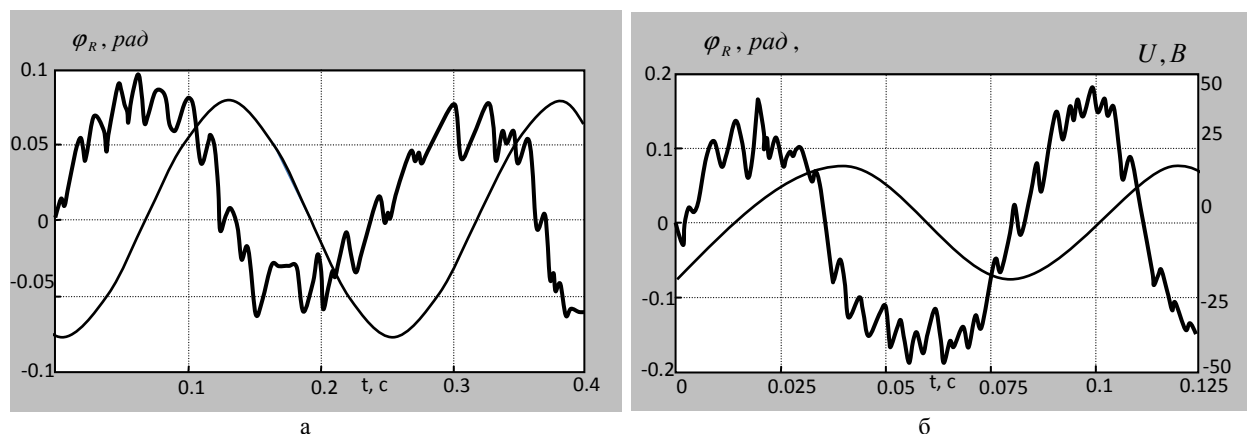


Рисунок 9 – Математичне моделювання динамічного кута повороту вала двигуна при синусоїдальній зміні напруги (а) та зміна кутового положення вала електродвигуна в резонансному режимі (б)

Розрахунки приведені для різних значень частоти синусоїдальних змін напруження. На частоті близько 4.2 Гц (рисунок 9, а) фазове запізнення складає близько 75 градусів. При цьому вал електродвигуна здійснює високочастотні коливання з частотою 42...47 Гц. Амплітуда високочастотної складової сягає 22...28 % амплітуди вимушених гармонічних коливань.

Проведено розрахунки динамічного кута повороту вала двигуна в режимі близькому до резонансного. Прийнята розрахункова частота синусоїдальних коливань в режимі близькому до резонансного складає 13 Гц (рисунок 9, б). При цьому фазове запізнення кута повороту вала електродвигуна знаходиться в межах 110...120 градусів. Форма коливань кута повороту вала електродвигуна близька до синусоїдальної. Відхилення від синусоїди має регулярний характер відповідний випадковим процесам із характерними значеннями частоти 28...33 Гц та 46...48 Гц. Амплітуда високочастотних коливань сягає 35% амплітуди вимушених коливань.

В результаті проведених досліджень встановлена наявність значної стохастичної кутової похибки вала електродвигуна. Вона визначається робочими процесами електромашини і проявляється у вигляді високочастотних коливальних процесів вала електродвигуна. Наявність пасової передачі із зубчастим ременем і передачі гвинт-гайка із значним коефіцієнтом редукції певною мірою компенсує негативні наслідки високочастотних коливань вала електродвигуна.

Висновки.

1. Виконавчий пристрій мехатронної системи є високодинамічною системою, власні частоти коливань якої складають 9...14 Гц, а високочастотні складові – 25...30 Гц та 45...48 Гц.

2. У виконавчому пристрої виникають високочастотні стохастичні коливальні процеси вала електродвигуна, амплітуда яких може досягати 30% від амплітуди вимушених коливань, а частота в 2...3 рази перевищує частоту власних коливань.

3. Для компенсації негативних наслідків високочастотних коливань валу електродвигуна рекомендується передача з підвищеною демпфувальною здатністю для з'єднання вала електродвигуна із приводом зміни довжини штанги верстата паралельної кінематики.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Струтинський С.В., Кропивна А. Аналіз процесів технологічних систем: навч. посібник / С.В. Струтинський, А. Кропивна. — Кіровоград: КОД, 2010. — 428 с.

2. Новіков М. Розробка верстата-гексапода з шестикоординатною системою ЧПК і результати його дослідницького застосування / М. Новіков, В. Струтинський, А. Кириченко // *Машинознавство*. — Львів: ТзОВ «КІНПАТРИ ЛТД», 2011. — № 5–6 (167–168). — С. 3–10.

3. Струтинський В.Б. Наукове обґрунтування та розробка системи моніторингу фактичного просторового положення інструменту верстата паралельної кінематики / В.Б. Струтинський, А.С. Дем'яненко // *Технологічні комплекси: наук. журнал*. — 2013. — № 1 (7).

4. Струтинський В.Б. Ідентифікація геометричних параметрів механізмів паралельної структури з ланками змінної довжини / В.Б. Струтинський, А.М. Кириченко // *Технологічні комплекси: наук. журнал*. — Луцьк: Вид-во ЛНТУ, 2011. — № 2 (4). — С. 62 – 67.

Надійшла до редакції 20.03.2013 р.

Струтинский В.Б., Гуржий А.А., Демьяненко А.С. Стохастические динамические колебательные процессы в исполнительном устройстве мехатронной системы станка параллельной кинематики

Рассмотрены конструктивные особенности исполнительного органа мехатронной системы, который включает электродвигатель и передачу винт-гайка. Разработана математическая модель и проведены расчеты стохастических динамических процессов в исполнительном органе мехатронной системы станка параллельной кинематики.

Ключевые слова: станок параллельной кинематики, исполнительный орган, электродвигатель, колебательные процессы, математическая модель, моделирование, переходные процессы, вынужденные колебания.

Strutinsky V.B., Gurgiy A.A., Demyanenko A.S. Stochastic dynamic oscillatory processes in the actuator mechatronic systems of machine tool parallel linkage

The design features of executive mechatronic system which includes the motor and the lead screw-and-nut transmission were considered. The mathematical model of the stochastic dynamic processes in the executive body of the mechatronic system of the parallel kinematics machine tool was developed and the appropriate calculations were done.

Keywords: parallel kinematics machine tool, executive body, motor, oscillation processes, mathematical model, modeling, transitional processes, forced oscillations.