

ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ТОЧНОСТІ ТОКАРНОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ НА ОСНОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИКЛІЧНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ ВУЗЛА ЗАКРІПЛЕННЯ ЗАГОТОВКИ

Разработана теоретическая модель упругой системы шпиндельного узла станка для расчета статических и динамических деформаций заготовки и изменения ее положения в зоне резания. Даны рекомендации по повышению точности положения заготовки при резании и точности обработки в целом. В частности, для снижения статических и динамических погрешностей обработки предложено использование дополнительной промежуточной упруго-демпфирующей опоры заготовки.

The theoretical model of the resilient system of spindle knot of machine-tool is developed for the calculation of static and dynamic deformations of purveyance and change of its position in the area of cutting. Resulted suggestion on the increase of exactness of position of purveyance at cutting and exactness of treatment on the whole. In particular, for the decline of static and dynamic errors of treatment the use of additional intermediate support is of purveyance is offered.

Вступ.

Актуальність досліджень

Підвищення конкурентоспроможності верстатобудівної галузі промисловості потребує широкого впровадження наукових розробок при проектуванні нового верстатного обладнання. Показники точності обробки визначаються в основному умовами закріплення заготовки в патроні та її статичними і динамічними деформаціями. Тому дослідження циклічних процесів, які визначають статичні і динамічні деформації та переміщення заготовки при обробці деталей на токарних автоматизованих комплексах є актуальною науковою проблемою.

Постановка проблеми в загальному вигляді.

Металорізальний верстат включає прецизійні вузли і механізми, що забезпечують точність положення деталей порядку 1 мкм і вище. Високі вимоги висуваються до параметрів геометричної, кінематичної та динамічної точності. Дані параметри, як правило, змінюються періодично (циклічно). Статичні та динамічні процеси в шпиндельній групі верстата відзначаються значною складністю. Тому для їх дослідження ефективним є теоретичні розрахунки та математичне моделювання динамічної системи. Підвищення точності і достовірності розрахунків досягається врахуванням розподіленості параметрів у динамічній системі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В результаті аналізу літературних джерел встановлено, що питанням дослідження циклічних процесів у металорізальних верстатах присвячено ряд публікацій [1, 2]. Як правило, розглядалися конкретні пружні системи шпиндель-заготовка в детермінованій постановці [3]. Результатів досліджень циклічних статичних і динамічних процесів, що визначають деформативність системи заготовки при стохастичних змінах параметрів із врахуванням розподіленості маси заготовки в літературних джерелах не виявлено.

Вирішення невирішеної раніше частини загальної проблеми.

Для розробки прогресивних конструкцій основних вузлів верстатів необхідні принципово нові підходи до побудови теоретичних моделей циклічних процесів. Одним із основних і плідних підходів є врахування стохастичного характеру процесів, що визначають геометричні, кінематичні і динамічні параметри руху заготовки.

В даний час рівень розробки даної науково-технічної проблеми є недостатнім. Це пояснюється в першу чергу відсутністю відповідного математичного апарату придатного для опису циклічних стохастичних процесів. Розробка відповідного теоретичного забезпечення на основі стохастичних моделей складає основу наукової проблеми, якій присвячена дана стаття.

Мета і задачі досліджень.

Метою досліджень є визначення параметрів циклічних процесів, що описують деформативність пруткової заготовки при стохастичних навантаженнях і врахуванні розподіленості параметрів.

Задачами досліджень є аналіз пружної системи шпиндельного вузла верстата, розробка теоретичної моделі для розрахунку статичних і динамічних деформацій заготовки та зміни її положення в зоні різання і розробка на цій основі пропозицій по підвищенню точності положення заготовки при різанні, а відповідно, і точності обробки.

Виклад основного матеріалу досліджень.

Особливості закріплення пруткової заготовки в шпиндельному вузлі верстата.

Пруткова заготовка поміщається в отвір трубчастого шпинделя і закріплюється в цанговому патроні (рис. 1).

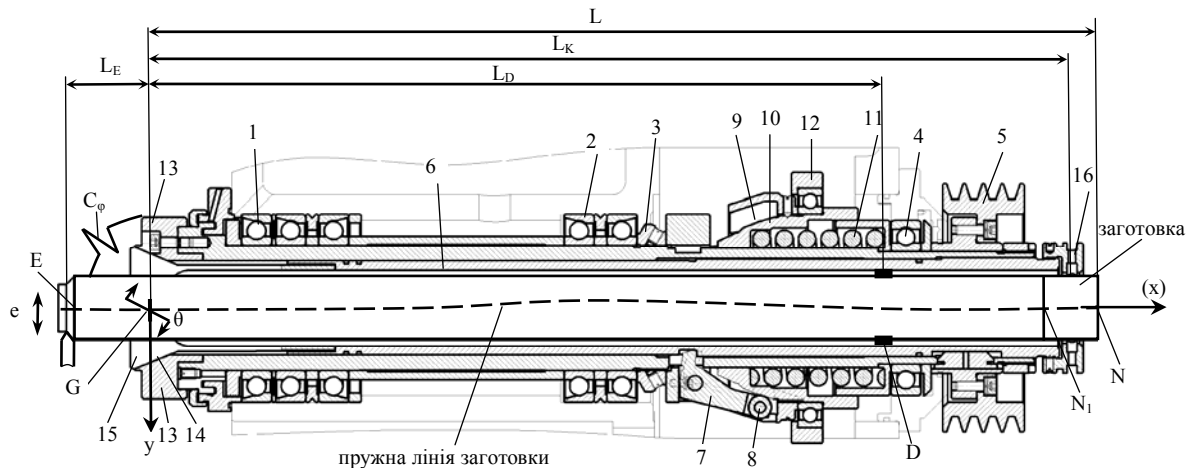


Рис. 1. Шпиндельний вузол модуля комплексу ТАК із встановленою в патроні заготовкою

Передня 1 і задня 2 опори шпинделя мають радіально-упорні кулькові підшипники з попереднім натягом. Натяг підшипників забезпечується гайкою 3. Шпиндель має додаткову опору у вигляді радіального підшипника 4. На кінцевій частині розміщено шків 5 пасової передачі привода головного руху. Механізм затиску заготовки має трубу 6, хвостовик якої з'єднується з цангою. Труба 6 переміщується важелями 7, які мають ролик 8, що взаємодіють з кінцевою поверхнею 9 втулки 10. При затиску деталі в патроні втулка 10 переміщується вліво пружиною 11. Розтиск деталі здійснюється переміщенням втулки 10 вправо за допомогою вилки 12. Вилка 12 має механічний привод переміщень за допомогою кулачків, встановлених на розподільному валу верстата. Шпиндель оснащено цанговим патроном.

Патрон має корпус 13 із кінцевою поверхнею 14. З нею взаємодіють зовнішні кінцеві поверхні губок цанги 15. Цанга переміщується за допомогою розглянутого раніше привода затиску. Заготовка у вигляді прутка або труби встановлюється і затискається в патроні верстата. Затиск заготовки здійснюється в перетині G, який знаходиться в середній частині затискних поверхонь губок цанги.

При обробці довгої заготовки ($L > L_k$) вона підтримується в задній частині шпинделя, опираючись на кільце 16. При цьому кінець заготовки (точка N) знаходиться за межами шпиндельного вузла. Довга заготовка зашкреплена в цанговому патроні (точка G) і опирається на кільце.

В процесі роботи верстата довжина заготовки зменшується. Коли довжина заготовки $L < L_k$ і її кінець (точка N_1) не контактує з кільцем 16 має місце консольне закріплення заготовки в патроні. Зміна умов опирання і закріплення заготовки, коли її довжина близька до L_k , суттєвим чином змінює її статичний і динамічний напружено-деформований стан.

Статичні деформації заготовки при різних умовах опирання.

При невисоких частотах обертання шпинделя відцентрові сили є значно меншими від гравітаційних сил, що діють на заготовку, тому основним навантаженням на заготовку є гравітаційні сили. В процесі роботи верстата довжина заготовки зменшується і вона змінює умови опирання (рис.2).

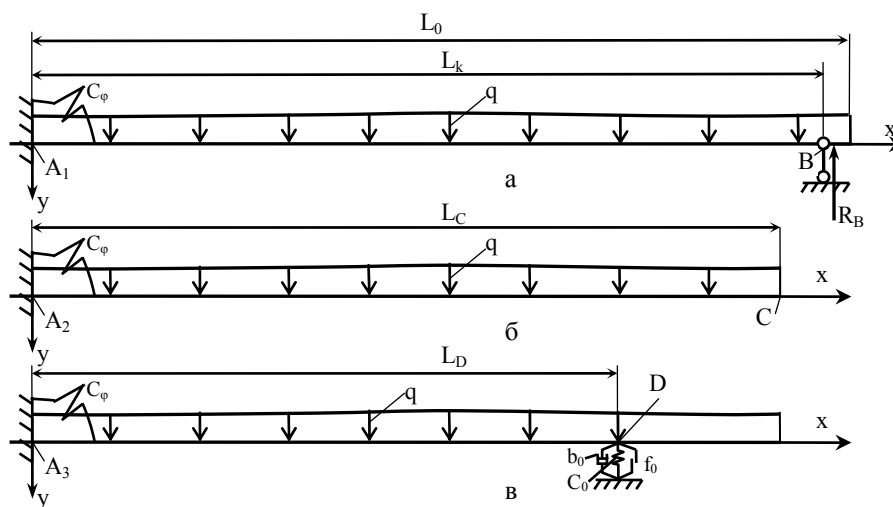


Рис. 2. Зміна умов опирання і закріплення заготовки, яка має місце при роботі верстата: а – опирання кінцевої частини заготовки на кільце; б – консольне закріплення заготовки; в – введення проміжної пружно-демпфуючої опори заготовки

Схема закріплення заготовки з опиранням на консолі (рис. 2а) є статично невизначеною. Дана задача розв'язана і в літературних джерелах наявні дані про її напружено-деформований стан. Враховуючи, що кут

повороту перетину заготовки в точці A_1 є незначним, схему можна спростити, прийнявши $C_\varphi \rightarrow \infty$. При цьому згідно [4] згинальний момент в точці A_1 складе

$$M_{A_1} = \frac{qL_k^2}{8}, \quad (1)$$

де q – розподілене по довжині заготовки гравітаційне навантаження. Опорна реакція при опиранні заготовки в точці B складає $R_B = \frac{3}{8}qL_k$. Прогини заготовки в перетині на відстані x від точки A_1 складуть

$$y_0(x) = \frac{q}{48EI} (3L_k^2 x^2 - 5L_k x^3 + 2x^4) \quad (2)$$

де E – модуль пружності матеріалу заготовки; I – момент інерції перетину заготовки.

Прогин заготовки при її опиранні по схемі рис. 2а є незначним (рис. 3).

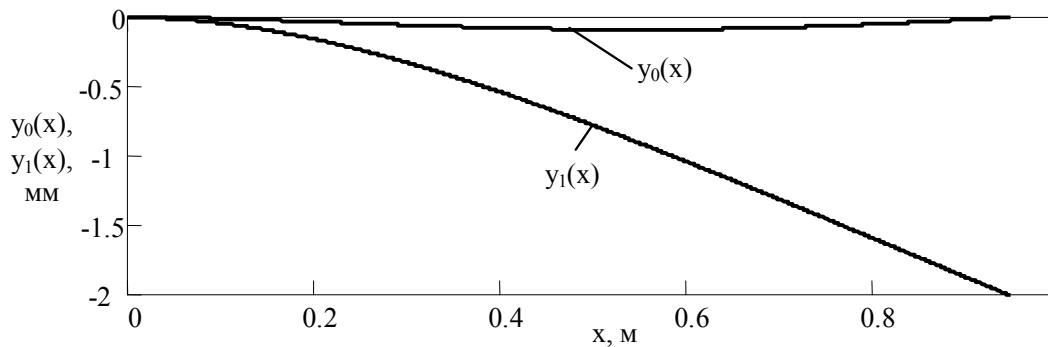


Рис. 3. Прогин заготовки при її опиранні на кільце (крива $y_0(x)$) та консольно закріпленої заготовки (крива $y_1(x)$)

Розглянемо консольну схему закріплення заготовки (див.рис. 2б). Згідно [4] згинальний момент в перетині A_2 заготовки складе

$$M_{A_2} = \frac{qL_C^2}{2}. \quad (3)$$

Прийнявши наближено $L_C = L_k$ із порівняння формул (1) і (3) визначимо, що момент в перетині A_2 заготовки при консольному закріпленні в 4 рази більший ніж при опиранні заготовки на кільце. Різка збільшення моменту приведе до суттєвого прогину заготовки. Згідно [4] прогин консольно закріпленої заготовки визначається залежністю

$$y_1(x) = \frac{q}{24EI} (x^4 - 4L_C x^3 + 6L_C^2 x^2). \quad (4)$$

Розрахунковий за даною формулою максимальний прогин заготовки (див. рис.3) в 20 раз перевищує прогин при опиранні заготовки на кільце. Різка зміна прогину заготовки приведе до зниження точності обробки деталей. Тому для запобігання небажаного зниження точності запропоновано ввести проміжну пружну опору заготовки. Для визначення місця встановлення проміжної опори (точка D на рис. 2в) проведено розрахунок прогинів для різної довжини консольної частини заготовки (рис. 4).

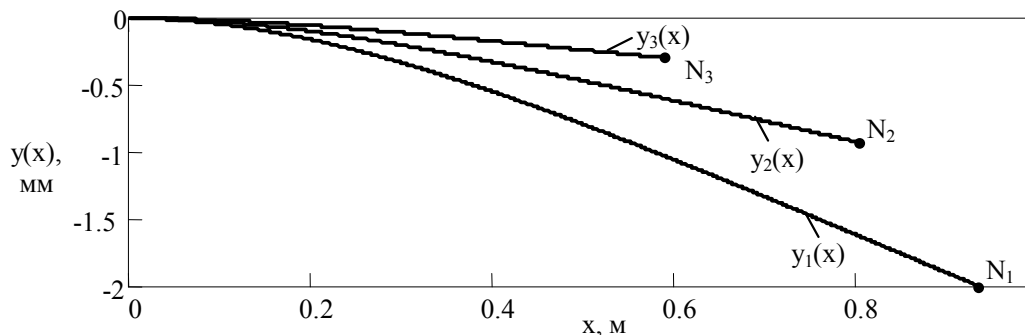


Рис. 4. Розрахункові значення пружних ліній заготовки при зміні довжини консольної частини заготовки: y_1 при довжині заготовки L_k ; y_2 – при довжині $0,8L_k$; y_3 – при довжині $0,6L_k$

Із аналізу графіків випливає, що зменшення довжини заготовки від $L_C=0,95$ м до $L_C=0,6$ м знижує максимальний прогин в 6...8 разів. Тому додаткова проміжна опора заготовки повинна встановлюватись на відстані $L_D=(0,6..0,7)L_k$.

Визначення випадкових статичних похибок положення заготовки в зоні різання.

Консольне закріплення заготовки потребує забезпечення високої поперечно кутової жорсткості патрона. Даний параметр залежить від конструкції цангового патрона та кута повороту. Проведені дослідження [5] показали, що параметр жорсткості є циклічним випадковим процесом, який залежить від кута повороту шпинделя (рис. 5а).

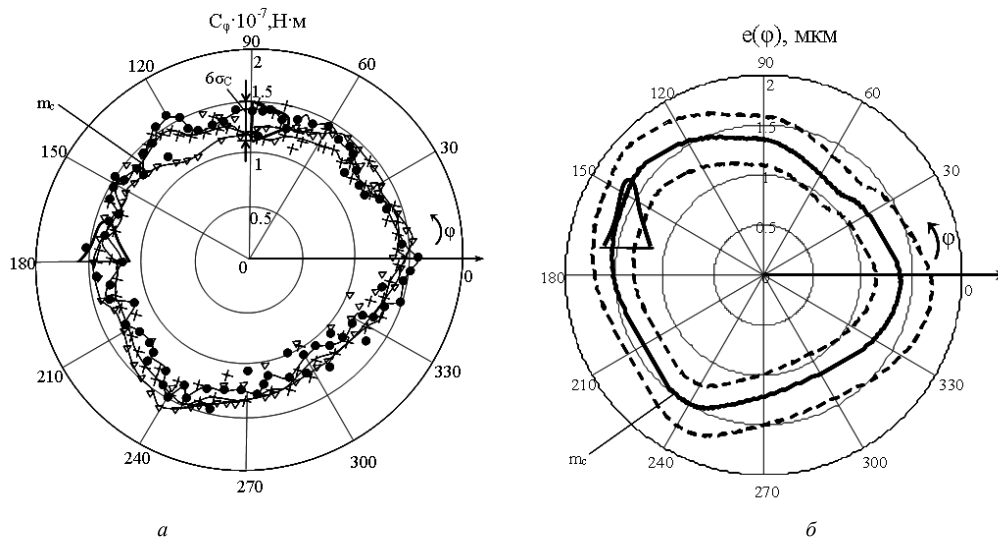


Рис. 5. Набір експериментально визначених випадкових значень поперечно-кутової жорсткості закріплення заготовки (а) та полоса розташування значень відхилення радіуса розташування вісі заготовки в зоні різання (б)

Для математичного опису параметру жорсткості використана математична модель у вигляді квазістатичного циклічного випадкового процесу. При цьому прийнято, що математичне сподівання процесу змінюється в залежності від полярного кута φ , а дисперсія мало залежить від зміни кута φ . Відповідно даній моделі радіальна жорсткість закріплення заготовки визначається залежністю:

$$C(\varphi) = m_c(\varphi) + \delta_c \quad (5)$$

де m_c – математичне сподівання, δ_c – випадкові зміни жорсткості в перерізі $\varphi = \text{const}$, що являють собою гаусівський випадковий процес із постійною дисперсією.

Для моделювання випадкових змін жорсткості використано канонічний розклад випадкового процесу δ_c по системі синусоїдальних функцій. Математичне сподівання радіальної жорсткості, яке входить в (5) описано полігармонічним процесом. Відповідно залежність радіальної жорсткості від полярного кута подана у вигляді

$$C(\varphi) = \sum_{k=1}^M a_k \sin(k\varphi + \psi_k) + \sum_{n=1}^N u_n \cos(m\varphi) + v_n \sin(m\varphi) \quad (6)$$

де a_k, ψ_k – амплітуди і початкові фази гармонік, які описують математичне сподівання радіальної жорсткості; u_n, v_n – випадкові величини з нормальним законом розподілу з дисперсією σ_c^2 .

Показники точності обробки залежать від зміщення заготовки в зоні різання. Кут повороту заготовки Θ визначається крутним моментом M_{A1} і значенням параметра жорсткості патрона

$$\Theta = \frac{M_{A1}}{C(\varphi)}, \quad (7)$$

де згинальний момент для консольно закріпленої заготовки визначається формулою (3), а жорсткість залежністю (6). Переміщення вісі заготовки в зоні різання (точка Е на рис. 1) буде визначено через кут повороту перетину заготовки

$$e = \Theta \cdot L_E, \quad (8)$$

Розрахункове зміщення вісі заготовки відповідне залежностям (3), (6), (7), (8) являє собою циклічний випадковий процес, який характеризується математичним сподіванням та полосою розсіяння (рис. 5б). Для підвищення точності обробки необхідно зменшувати нерівномірність відхилення вісі шпинделя e по куту повороту. Цього можна досягти вирівнюванням значення жорсткості відповідним розрахунком по формулі (6). Радикальним методом є зменшення величини згинального моменту, що досягається введенням проміжної опори.

Оцінка динамічних складових похибок положення заготовки в зоні різання.

Показники точності обробки значною мірою залежать від динамічних коливальних переміщень заготовки. Коливання заготовки як системи з розподіленими параметрами визначається нормальними формами коливань.

Нормальні форми коливань $X_i(x)$ для консольно закріпленої заготовки розраховуються через функції Крилова K_3, K_4 згідно залежностей [6]:

$$X_i(x) = D \left[K_3 \left(k_i \frac{x}{L_C} \right) - K_4 \left(k_i \frac{x}{L_C} \right) \right] \quad (9)$$

де D – константа; k_i – корені частотного рівняння; L_C – довжина заготовки.

Значення коренів частотного рівняння для даного випадку складає:

$$k_1 = 1,875; k_2 = 4,694; k_3 = 7,855; k_4 = 10,996 ;$$

Розраховані по формулі (9) перші чотири нормальні форми коливань мають характерний вигляд (рис. 6).

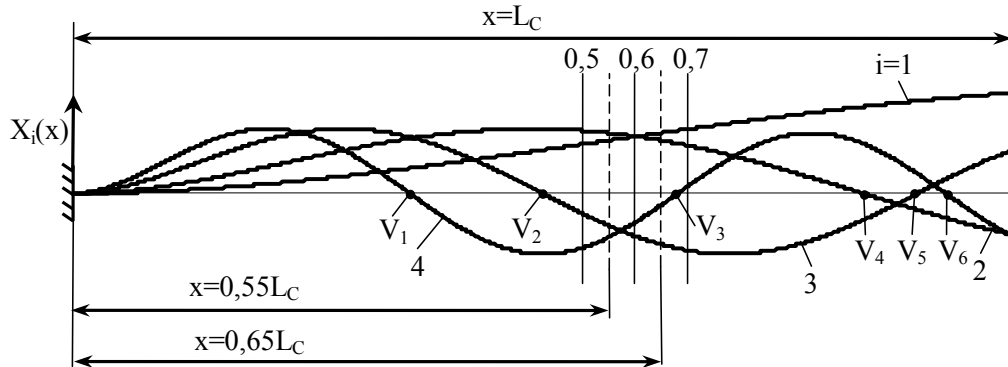


Рис. 6. Нормальні форми поперечних коливань консольно закріпленої заготовки з розподіленою по довжині масою

Наведені нормальні форми коливань мають вузлові точки V_1, \dots, V_6 , в яких значення форми дорівнює нулю. Для ефективного демпфування коливань демпфер необхідно встановлювати за межами вузлових точок. Перші чотири форми не мають вузлових точок на відстані від патрона $x = (0,55..0,65)L_C$. Дана відстань (показано на рисунку пунктиром) є раціональною для встановлення демпфера.

З метою визначення динамічних переміщень заготовки в зоні різання виконано математичне моделювання поперечних коливань заготовки як системи з розподіленими параметрами. Використано спеціально розроблену математичну модель заготовки [7], яка має вигляд нескінченного числа коливальних ланок, коефіцієнти передачі яких пропорційні нормальним формам коливань заготовки (рис. 7).

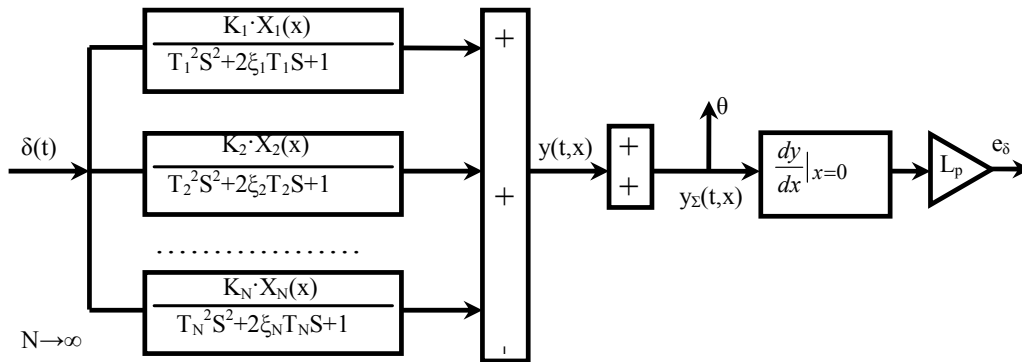


Рис. 7. Структурна математична модель, призначена для визначення власних поперечних коливань окремих перетинів заготовки $y(t)$ та обчислення кута повороту перетину заготовки в патроні θ та динамічних переміщень ϵ заготовки в зоні різання

На вхід математичної моделі подається імпульсний сигнал у вигляді функції Дирака $\delta(t)$. Виходом моделі є імпульсна характеристика $y(t,x)$, яка визначає поперечні динамічні переміщення перетину консольної заготовки, розташованої на відстані x від точки закріплення.

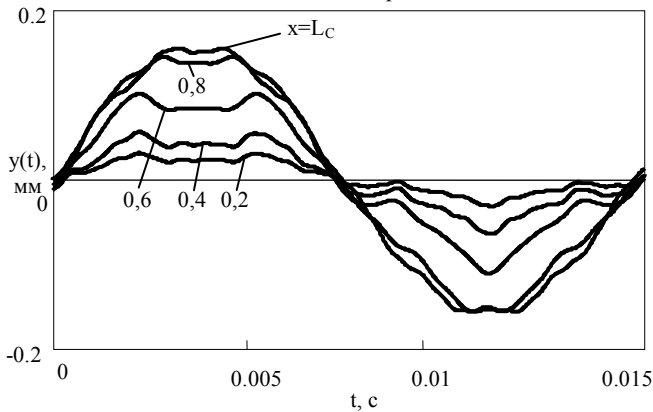


Рис. 8. Динамічні переміщення окремих перетинів консольної заготовки, обумовлені імпульсним (ударним) навантаженням в зоні різання

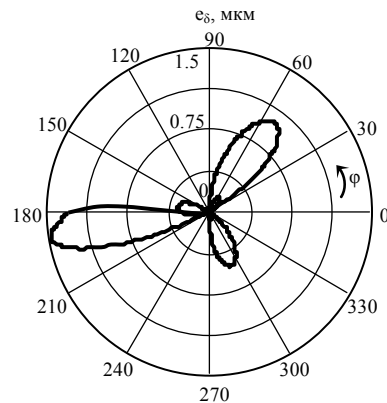


Рис. 9. Розрахункова полярна діаграма переміщення вісі заготовки в зоні різання, яке обумовлене власними коливаннями заготовки як системи з розподіленими параметрами

В результаті моделювання визначено переміщення перетинів заготовки (рис. 8).

Із аналізу кривих випливає, що коливання заготовки визначаються, в основному, першою нормальною формою. Вплив форм більш високих номерів не є суттєвим і проявляється в незначних відхиленнях закону переміщення перетину заготовки від синусоїдального.

Математична модель дає можливість визначити динамічний кут повороту перетину заготовки в патроні θ та відповідні динамічні зміщення вісі обертання заготовки в зоні різання e_δ . Внаслідок обертання заготовки має місце петле подібна траєкторія динамічних переміщень вісі заготовки в зоні різання (рис.9).

Із аналізу траєкторії переміщення вісі заготовки випливає, що динамічні коливальні процеси в заготовці суттєвим чином впливають на параметри точності обробки.

Висновки.

1. Зміна умов опираючої заготовки внаслідок зменшення її довжини значною мірою знижує точність обробки деталей. Зниження точності має місце для заготовок, які мають консольне закріплення з найбільшою довжиною консолі.

2. Статичні похибки обробки є результатом циклічних випадкових змін жорсткості закріплення заготовки в патроні і досягають 2 мкм, а динамічні похибки обумовлені власними коливаннями заготовки і складають 1..1,5 мкм.

3. Для зниження статичних і динамічних похибок обробки необхідно ввести додаткову проміжну опору, яка повинна бути встановлена на відстані від патрона 0,55..0,65 максимальної довжини заготовки.

4. Як напрямок подальших досліджень рекомендується розробити конструкцію додаткової опори заготовки у вигляді нелінійного пружно-фрикційного демпфера коливальних заготовок.

Список літератури.

1. Кузнецов Ю.М., Кушик В.Г., Юрчишин О.Я., Ковальчук Р.І. Порівняльні експериментальні дослідження характеристик цангових затискних патронів токарно-револьверного верстату з ЧПК // Вісник КПІ, серія машинобудування. – 2006. - №48. – С.143-148.
2. Кузнецов Ю.М., Юрчишин О.Я. Вплив факторів на пружно-демпфуючу систему «широкодіапазонний цанговий патрон – деталь» // Промислова гідроліка і пневматика, Вінниця. – 2007. - №1. – С. 110-114.
3. Кузнецов Ю.Н. Синтез зажимных механизмов прутковых автоматов. Дис...докт. техн. наук. - М.: 1984. - 515 с.
4. Тимошенко С.П. [Сопротивление материалов / Москва: Наука, 1965](#). Т.1: Элементарная теория и задачи. – 1965. –364 с.
5. Юрчишин О.Я. Пружно-демпфуючі характеристики та прогнозування меж використання широкодіапазонних цангових патронів. Дис...канд.техн.наук. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 198с.
6. Василенко М.В., Алексейчук О.М. Теорія коливальних і стійкості руху: Підручник. – К.: Вища школа, 2004. – 525с.
7. Струтинський В.Б., Дрозденко В.М., Юрчишин О.Я. Математичне моделювання вібраційного поля заготовки токарного автоматизованого комплексу при випадкових навантаженнях силами різання // Вісник КПІ, серія машинобудування. - 2011. - №62. - С.20-29.