

ГОРОХОВСЬКИЙ ВІКТОР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0002-0676-0038>e-mail: aigordeev54@ukr.net**ГОРДЄЄВ АНАТОЛІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4494-4348>e-mail: aigordeev54@ukr.net

СТВОРЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ СТАТИЧНОГО БАЛАНСУВАННЯ КОНСОЛЬНИХ БОРШТАНГ ДЛЯ РОЗТОЧУВАННЯ ГЛУХИХ ОТВОРІВ В ПРОЦЕСІ ПРОЕКТУВАННЯ З АНАЛІЗОМ КІНЕМАТИКИ РУХУ

Запропоновано методологію визначення параметрів противаги для статичного балансування консольних борштанг на етапі проектування та досліджено кінематику обертального руху вершини різця борштанги у SolidWorks Motion. У програмному продукті CAD - системи будують 3D-модель борштанги у масштабі 1:1 та за допомогою опції CAD - системи визначають її масу та координати центру ваги у тривимірному просторі, створюють графічні проекції борштанги у CAD - системі і за допомогою опції постановки розміру визначають відстані розташування центру ваги, кут повороту від горизонтальної площини та проводять розрахунок маси противаги, параметри форми противаги і за масою будують її 3D-геометричну конфігурацію, за допомогою опції CAD - системи противагу встановлюють на борштангу з подальшою перевіркою координат центра ваги борштанги з противагою за допомогою опції CAD - системи. Важливим аспектом працездатності спроектованої конструкції борштанги є аналіз кінематики руху крайньої точки різця під час роботи верстата. Застосування запропонованої методології визначення параметрів противаги для статичного балансування консольної борштанги та кінематики руху вершини різця при розточуванні глухих отворів за допомогою програмного продукту SolidWorks Motion, дає можливість скоротити витрати часу та підвищити точність розрахунків борштанги для конкретного її розміру.

Ключові слова: статичне балансування, борштанга, координати центра ваги, противага, кінематика руху.

HOROKHOVSKYI VIKTOR, HORDIEIEV ANATOLYI

Khmelnitskyi National University

CREATION OF THE METHODOLOGY OF STATIC BALANCING OF CANTILEVER BARS FOR DRILLING DEAF HOLES IN THE DESIGN PROCESS WITH THE ANALYSIS OF MOVEMENT KINEMATICS

A methodology for determining counterweight parameters for static balancing of cantilever drill rods at the design stage is proposed, and the dynamics of rotary motion of the drill rod in SolidWorks Motion is investigated. CAD systems build a 3D model of a borscht on a scale of 1:1 in the CAD system software and, using the CAD system option, determine its mass and the coordinates of the center of gravity in three-dimensional space, create graphic projections of the borscht in the CAD system, and determine the distances using the sizing option the location of the center of gravity, the angle of rotation from the horizontal plane and calculate the mass of the counterweight, the parameters of the shape of the counterweight and build its 3D geometric configuration based on the mass, using the CAD option - the counterweight system is installed on the bar with further verification of the coordinates of the center of gravity of the bar with the counterweight using the option CAD - systems. An important aspect of the performance of the designed construction of the borscht is the analysis of the kinematics of the movement of the extreme point of the cutter during the operation of the machine. According to the results of the studies of the displacement of the tip of the boring bar cutter, it is possible to recommend rational modes of processing the workpiece when boring blind holes. Based on the tolerance for radial runout of the hole surface, the following cutting modes can be recommended for the boring bar that was studied: $V =$ from 240 to 480 m/min.

The application of the proposed methodology for determining the counterweight parameters for static balancing of the cantilever rod and the dynamics of the movement of the tip of the cutter when boring blind holes using the SolidWorks Motion software product makes it possible to reduce the time spent on performing on-site determination of the mass characteristics of the counterweight and to increase the accuracy of calculations of the distance of the center of gravity in the vertical and horizontal projection of the borscht for its specific size.

Keywords: static balancing, barbell, coordinates of the center of gravity, counterweight, kinematics of movement.

Постановка проблеми

Вирішення наукових завдань, які полягають у впровадженні інформаційних технологій для підтримки та прийняття рішень при синтезі складних технологічних систем з врахуванням просторової геометрії компонентів при синтезі складних технологічних систем є актуальним завданням для різних галузей народного господарства.

Горизонтально-розточувальні верстати використовуються в серійному і масовому виробництві для обробки деталей різних форм і матеріалів, таких як втулки, шатуни, поршні, фланці, муфти і корпусні деталі, такі як картери, блоки і циліндри. Горизонтально-розточувальні верстати оснащені стійкою на станині, на якій розміщується шпindelний вузол. На точність обробки мають вирішальний вплив параметри шпindelного вузла, інструмента борштанги та точність верстатного пристрою. У машинобудуванні оброблення глухих отворів у корпусних заготовках, глибоко розташованих, здійснюється консольною борштангою на розточувальних верстатах де вона обертається у шпindelі верстата (рис.1).

Процес консольної обробки викликає небажані вібрації, впливає на точність, якість і

продуктивність виготовлених деталей і обмежує технічні можливості верстата, як найменш жорсткої ланки в технічній системі верстата. Використання сучасних інструментальних матеріалів зумовлює необхідність збільшення швидкості обертання шпindelного вузла під час розточування отворів. За своєю конструкцією розточувальна борштанга з сильно нависаючим різцем та елементами його кріплення є складною статично невривноваженою системою з позаосьовими координатами центру ваги, що призводить до виникнення статичного дисбалансу та крутильних коливань під час її обертання. Все це суттєво впливає на відносний рівень вібрації між інструментом та заготовкою. Зменшення інтенсивності вібрації консольних розточувальних борштанг є одним з важливих способів підвищення продуктивності та точності обробки.

Використання моделювання динамічної поведінки багатотільних і багатомасових систем дозволяє: уникнути критичних помилок вже на ранніх етапах проектування і таким чином знизити вартість розробки виробів та зменшити кількість фізичних прототипів, що створюються, визначити масові та динамічні характеристики складних рухомих об'єктів та підвищити точність розрахунків параметрів руху системи з урахуванням змінних параметрів її об'ємної геометричної конфігурації.

Метою роботи є: вирішення науково-технічної задачі, яка полягає у створенні та впровадженні методології підтримки та прийняття конструктивних рішень та статичного балансування при проектуванні борштанг для розточування глухих отворів та аналізі кінематики руху з урахуванням змінних параметрів об'ємної геометричної конфігурації.

Аналіз останніх джерел

Центр маси твердого тіла - це унікальна точка, яка представляє середнє положення всієї матерії, що його складає. Концепція представлення складних тіл як одну точку, лежить в основі всіх важливих механічних розрахунків і, отже, має вирішальне значення в різних галузях техніки при визначенні центру мас та подальших розрахунків. Для кількох форм об'єктів, які можна представити як області, обмежені графіками функцій, цю точку можна знайти за допомогою інтегрального числення. Однак визначення центру мас вручну не тільки досить стомлююче, але й дуже складне до об'єктів довільної форми. Для цього застосовується метод розташування зображень [1]. У роботі [2] розглянуто розробку і оптимізацію моделі космічної техніки: концепції, інструменти, розробки і перспективи, де одним з головних завдань є визначення центру ваги складної системи. Визначення центру ваги важливо також для транспортних засобів. Визначення центру тяжіння запропонованим способом [3,4], засновано на математичних викладках. Розроблений метод визначення координат центру тяжіння машини не вимагає використання силових вимірювальних пристроїв та дозволяє визначити всі три координати центра ваги аналітично, що також має певну трудомісткість. Процеси різання на верстатах також вимагають знання координат центру ваги спеціальних пристроїв, що обертаються або розточувальних борштанг для зменшення вібрацій та підвищення точності оброблення заготовок. Процес консольної обробки викликає небажані вібрації, впливає на точність, якість і продуктивність виготовлених деталей і обмежує технічні можливості верстата, як найменш жорсткої ланки в технічній системі верстата. Використання сучасних інструментальних матеріалів зумовлює необхідність збільшення швидкості обертання шпindelного вузла під час розточування отворів. За своєю конструкцією розточувальна борштанга з сильно нависаючим різцем та елементами його кріплення є складною статично невривноваженою системою з осьовими координатами центру ваги, які не співпадають з осями, що призводить до виникнення статичного дисбалансу та крутильних коливань під час її обертання. Все це суттєво впливає на відносний рівень вібрації між інструментом та заготовкою. Зменшення інтенсивності вібрації консольних розточувальних борштанг є одним з важливих способів підвищення продуктивності та точності обробки. Дослідженням коливань при точінні та моделюванню форм коливань механічної коливної системи «шпindelний вузол-основа» присвячено значна кількість робіт, як вітчизняних так і закордонних вчених [5-7]. Визначенням джерела дисбалансу системи шпindel-інструмент та динамікою тонкого розточування багато різцевими консольними бурильними штангами займалися автори [8, 9]. Для зменшення вібрації консольних борштанг застосовують різні конструкції з елементами, які знижують вібрації: встановленням армованих пружних елементів [10]; встановленням симетричних силових циліндрів з джерелом тиску [11]; виконують корпус борштанги у вигляді труб, заповнених пружним середовищем [12]. Ускладнення конструкції борштанги веде до зниження надійності та зручності її застосування. Іншим шляхом зменшення впливу вібрацій при обробленні отворів борштангою є процес її статичного балансування. Статичне балансування – це балансування, при якому визначається і зменшується вектор дисбалансу ротора, що характеризується статичною нерівномірністю ротора. У разі статичного дисбалансу центр ваги і геометрична вісь обертання компонента не збігаються. Завдання статичного балансування полягає в тому, щоб знайти важчу і легшу частини деталі для отримання необхідного ступеня балансу, або розвантаживши важчу сторону, або навантаживши легшу сторону. Для вирішення завдання статичного балансування складного об'єкта головним є визначення координат центру ваги об'єкта та місця розташування противаги та її маси. В основному це багаторазовий експериментальний підбір. Відомий графічний спосіб визначення координат центру ваги об'єкта, при якому все зводиться до побудови силового і мотузкового багатокутників Варіньона [13] Недоліком такого способу є громіздкість виконання операцій при побудові силових і мотузкових багатокутників у двох взаємно перпендикулярних площинах або у зміні положення об'єкта, а паралельне перенесення

ліній призводить до неточностей в розрахунку і низької продуктивності оператора, який визначає центр ваги об'єкта. Відомий спосіб статичного балансування обертальних мас, при якому визначається опір коченню деталі, при умові, що контакт між цапфами і призми є точковим [14]. Але використання цього способу не дає прямого визначення маси противаги та потребує здійснення значної кількості практичних спроб для визначення цієї маси. Відомий спосіб [15] який полягає в тому, що тіло для балансування кладуть цапфами на паралельні призми з низьким тертям, після чого тіло відхиляють вліво, а потім вправо та після повернення і зупинки центра ваги тіла у найнижчому положенні на торці деталі наносять дві діаметральні риски відповідних зупинок і отримують кут, на бісектрисі якого лежить істинний центр ваги тіла, потім довільно задають радіус прикладення противаги та обчислюють опір коченню при точковому контакті і потім розраховують масу противаги. Для складних систем, таких як розточувальна борштанга, виникає потреба проводити статичне балансування на верстаті, закріплюючи її у шпинделі де у підшипниках виникають значні сили тертя, що знижує точність статичного балансування.

Викла основного матеріалу

Авторами [16, 17] запропоновано методологію статичного балансування консольних борштанг розточування глухих отворів в процесі проектування з визначенням параметрів противаги, координат центру ваги, кута встановлення противаги та її маси за допомогою програмних продуктів CAD-системи (SolidWorks).

Методологія визначення параметрів противаги для статичного балансування консольних борштанг розточування глухих отворів реалізується наступним чином. У програмному продукті CAD - системи (SolidWorks) будується 3D-модель борштанги без противаги у масштабі 1:1 (рис. 2). За допомогою опції CAD - системи визначають її масу та координати центру ваги у тривимірному просторі згідно прийнятих координат (рис. 3).



Рис. 2 – 3D-модель борштанги без противаги

Масові характеристики: Сборка 2
 Конфігурація: по замовчуванню
 Система координат: -- по замовчуванню --
 Маса = 10221.62 грамів
 Об'єм = 1302119.58 кубічні міліметри
 Площа поверхні = 127071.65 квадратні міліметри
 Центр ваги: (міліметри)
 X = 59.18
 Y = 52.93
 Z = 649.86
 Рис. 3 – Результати розрахунку маси та координати центру ваги

Створюють графічні проекції борштанги у CAD - системі і за допомогою опції постановки розміру визначають відстані розташування центру ваги відносно осей у вертикальній і горизонтальній проекції (рис. 4). Виходячи з креслення проекцій борштанги знаходимо відхилення центру ваги від осі в горизонтальній проекції та вертикальній проекції.

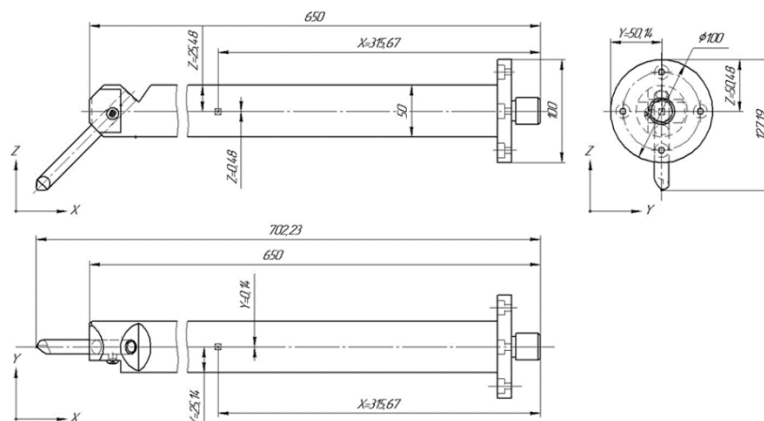


Рис. 4 – Креслення проекцій борштанги без противаги з визначеними відхиленнями координат центра ваги від вісі обертання

Згідно з схеми (рис. 5) визначають кут повороту центру мас від горизонтальної площини та відстань до нього. Радіус центра ваги противаги та конфігурацію її січення призначають, виходячи з розмірів стрижня борштанги з графічної проекції січення стрижня борштанги (рис. 6).

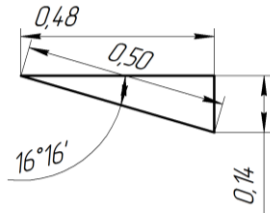


Рис. 5 – Кресленник схеми визначення радіуса та кута розташування центра ваги борштанги без противаги

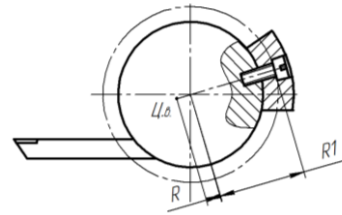


Рис. 6 – Кресленник схеми для визначення маси противаги за її конструктивними параметрами

Згідно з схеми (Рис. 6) проводять розрахунок маси противаги за рівнянням:

$$m_{\text{прот}} = m_{\text{сист.}} \frac{R}{R1}, \quad (1)$$

де $m_{\text{сист.}}$ – маса системи «стрижень борштанги-різець з кріпленням»;

$m_{\text{прот.}}$ – маса противаги;

R – відстань від осі борштанги до центра ваги системи «стрижень борштанги-різець з кріпленням»;

$R1$ – відстань від осі борштанги до центру ваги противаги.

Для вибраного конструктивно січення противаги будуємо графік залежності маси від довжини противаги. З графіка рис. 7 визначаємо довжину противаги за її масою. У нашому прикладі з розрахунку за формулою (1) вага противаги становить 185 грам. Використовуючи графік рис. 7 знаходимо довжину противаги, яка становить 85 мм.

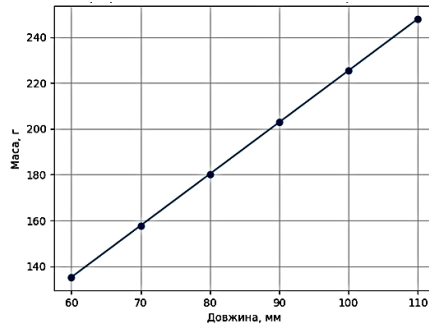


Рис. 7 – Графік залежності маси від довжини противаги за вибраним січенням

У CAD-системі будуємо 3D-модель противаги за її розмірами та за допомогою опції CAD-системи противагу встановлюють на борштангу по координатах центра мас та куту повороту центра мас від горизонтальної площини (рис. 8). Проводиться перевірка знаходження координат центра ваги борштанги з противагою за допомогою опції CAD-системи (рис. 9).

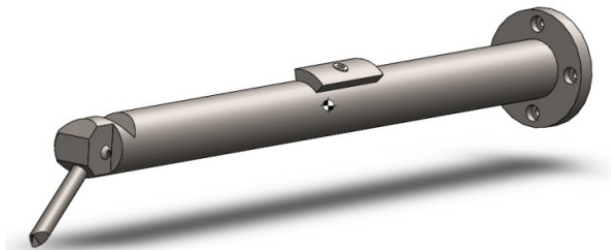


Рис. 8 – 3D-модель борштанги з встановленою противагою

Масові характеристики: Борштанга з противагою
Конфігурація: По замовчуванню
Система координат: Система координат деталі

Маса = 10400.45 грамів

Об'єм = 1327013.33 кубічні міліметри

Площа поверхні = 135850.99 квадратні міліметри

Центр ваги: (міліметри)

X = 386.60

Y = 00.00

Z = 0.00

Рис. 9 – Результати перевірки координат центра ваги борштанги з противагою за допомогою опції CAD-системи

Створюється кресленник необхідних проєкцій борштанги з противагою та визначеними розмірами для подальшого її виготовлення (рис. 10).

Проведемо аналіз кінематики руху борштанги в середовищі SolidWorks Motion з акцентом на дослідження траєкторії руху крайньої точки різця борштанги з противагою та без неї. Рух борштанги можна описати за допомогою рівнянь Ньютона-Ейлера, які враховують масу, інерцію, зовнішні сили та моменти, що діють на систему. Важливим аспектом працездатності спроектованої конструкції борштанги є аналіз кінематики руху крайньої точки різця під час роботи верстата. У таблиці 1 представлено основні етапи аналізу кінематики руху борштанги.

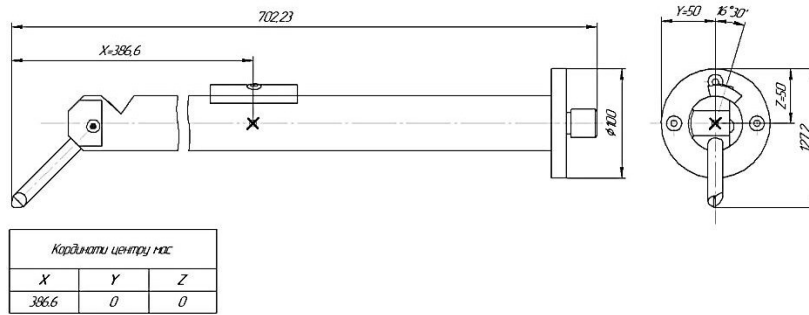


Рис. 10 – Креслення проєкцій борштанги з противагою та визначеними розмірами для її встановлення

Таблиця 1

Методика проведення дослідження

1	Побудова моделі	Виконати 3D модель збірки борштанги з різцем, задати матеріали та визначити масові характеристики, а також збалансували модель побудувавши противагу і встановивши її по координатах центра мас на збірку.
2	Визначення початкових умов	Встановити початкове положення борштанги та початкову швидкість $V = 0$ м/хв.
3	Встановлення руху борштанги	Задати тип і напрям руху борштанги, а саме обертання навколо своєї осі і частоту обертання (500 об/хв., 1000 об/хв., 1500 об/хв., 2000 об/хв.).
4	Встановлення точки аналізу	Вибрати крайню точку різальної кромки різця.
5	Запуск симуляції	Запустити симуляцію руху в SolidWorks Motion. Дослідження провести в 2 етапи з противагою та без противаги.
6	Аналіз результатів	Після завершення симуляції отримано графічну візуалізацію траєкторії руху крайньої точки різця та числові дані двох етапів дослідження. З графічної візуалізації спостерігається зміщення траєкторії руху при збільшені частоти обертання.

Провівши дослідження кінематики обертального руху вершини різця борштанги у SolidWorks Motion було отримано графічне відображення траєкторії руху вершини різця для борштанги без противаги та з противагою при різних частотах обертання та відповідно визначених швидкостей. Ткож при моделюванні руху борштанги отримано результати зміщення координат вершини різця у вертикальній та горизонтальній проєкціях (рис. 11, рис. 12).

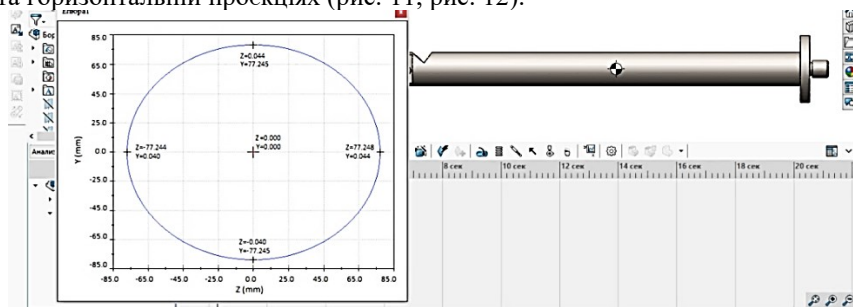


Рис. 11 – Графічна візуалізація у SolidWorks Motion траєкторії руху крайньої точки різця без противаги при частоті обертання 500 об/хв.

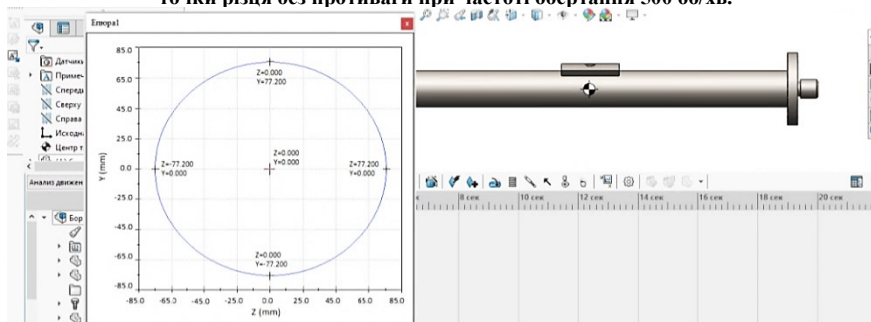


Рис. 12 – Графічна візуалізація у SolidWorks Motion траєкторії руху крайньої точки різця з противагою при частоті обертання 500 об/хв.

В результаті проведених досліджень та аналізу отриманих результатів було побудовано графіки зміщення координат вершини різця в залежності від числа обертів борштанги та відповідних швидкостей руху вершини різця, представлених на рис. 13 та рис. 14.

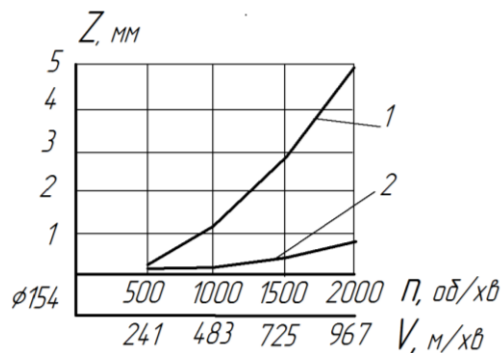


Рис. 13 – Графік зміщення вершини різця борштанги Ø 154 мм у горизонтальному напрямку від частоти обертання та відповідної швидкості: 1 – без противаги; 2 – з противагою

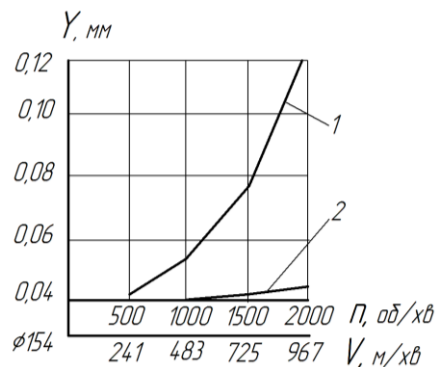


Рис. 14 – Графік зміщення вершини різця борштанги Ø 154 мм у вертикальному напрямку від частоти обертання та відповідної швидкості: 1 – без противаги; 2 – з противагою

Висновки

З проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. При збільшенні частоти обертання спостерігається значне відхилення траєкторії руху вершини різця від кола для борштанги, яка незбалансована, а для борштанги з дисбалансом спостерігається значно менше відхилення у горизонтальному напрямку 0,02 мм. при обертах n від 500 до 1000 об/хв. та 0,04 мм у вертикальному напрямку, що лежить у межах допуску на дану поверхню.

2. За результатами проведених досліджень зміщення вершини різця борштанги можна рекомендувати раціональні режими оброблення заготовки при розточуванні глухих отворів. Виходячи з допуску на радіальне биття поверхні отвору можна рекомендувати для борштанги, яка досліджувалась, наступні режими різання $V =$ від 240 до 480 м/хв.

3. Таким чином, застосування запропонованої методології визначення параметрів противаги для статичного балансування консольної борштанги в процесі її проектування та дослідження кінематики руху вершини різця при розточуванні глухих отворів за допомогою програмного продукту SolidWorks Motion, дає можливість скоротити витрати часу на проведення натурного визначення масових характеристик противаги та підвищити точність розрахунків відстані розташування центру ваги у вертикальній та горизонтальній проекції борштанги для конкретного її розміру.

Література

- Gahramanova, A. (2019). Locating centers of mass with image processing. *Undergraduate Journal of Mathematical Modeling: One + Two*, 10(1), Article 1, 1–24.
- Fasano, G., & Pintér, J. D. (2012). Development and optimization of the model for space engineering: Concepts, tools, developments and prospects. *Modeling and Optimization in Space Technology*, 73, 1–32. Springer.
- Блинов, И. А. (2019). Метод определения пространственного положения центра тяжести машин. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*, (2), 71–82. ISSN 2542-0542.
- Леонтьев, Д. М. (2015). Про розрахунковий спосіб визначення висоти координати центру ваги типових автомобілів. *Автомобильный транспорт*, (37), 101–107.
- Залога, В. О., Криворучко, Д. В., Шаповал, Ю. В., & Дрофа, К. А. (2017). Динамічне управління коливаннями при точінні. *Mechanics and Advanced Technologies*, (79), 100–107.
- Данильченко, Ю. М., & Петришин, А. І. (2012). Моделювання форм коливань механічної коливної системи «шпиндельний вузол-основа». *Надійійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, (30), 309–316.
- Reddeppa, N., Reddy, B. J., & Rao, H. S. (2021). Coal mill foundation – A finite element approach for study of dynamic analysis. *Engineering Science*, 6(4), 82–99. <https://doi.org/10.11648/j.es.20210604.14>
- Oborskyi, H., Orgiyan, A., & Balaniuk, A. (2023). Balancing spindles with tools for finishing and boring machines. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 1(67), 7–13. ISSN 2223-3814.
- Shen, C., Wang, G., Wang, S., & Liu, G. (2011). The imbalance source of spindle-tool system and influence to machine vibration characteristics. *2011 Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation*, Zhangjiajie, China, 1288–1291. <https://doi.org/10.1109/ICDMA.2011.317>
- Герасимов, А. И., & ін. (1989). Борштанга для обработки глубоких отверстий (А.с. 1493388 В23В 29/02). *Бюл. №26*.

11. Кукліч, В. І., & ін. (1985). Борштанга для обробки глибоких отверстий (А.с. 1174167 В23В 29/02). *Бюл. №31*.
12. Минков, М. А., & ін. (1976). Борштанга для обробки глибоких отверстий (А.с. 336890 В23В 29/02). *Бюл. №44*.
13. Каплунова, А. В., Михайловський, В. А., & Сірош, І. П. (1991). *Методика та приклади розв'язування задач з теоретичної механіки* (навчальний посібник). Київ: ДВСЛ.
14. Бондаренко, Л. М., Довбня, М. П., & Ловейкін, В. С. (2002). *Деформаційні опори в машинах*. Дніпропетровськ: Дніпро-VAL.
15. Бондаренко, Л. М., & Бондаренко, Б. М. (2009). Спосіб визначення маси противаги при статичному балансуванні (Патент на винахід №85520 МПК G01L 3/00). *Бюл. №2*.
16. Гороховський, В. О., & Гордєєв, А. І. (2024). Спосіб визначення координат центра ваги та кінематичних характеристик складного рухомого об'єкта. *Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference «X Ukrainian-Polish Scientific Dialogues» Actual Problem of Modern Science, Khmelnytsky - Bydgoszcz*, 290–293.
17. Гороховський, В. О., & Гордєєв, А. І. (2024). Визначення параметрів противаги для статичного балансування консольних борштанг розточування глухих отворів. *Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference «Innovative Development in the Global Science»*, Boston, USA, (186), 371–379.

References

1. Gahramanova, A. (2019). Locating centers of mass with image processing. *Undergraduate Journal of Mathematical Modeling: One + Two*, 10(1), Article 1, 1–24.
2. Fasano, G., & Pintér, J. D. (2012). Development and optimization of the model for space engineering: Concepts, tools, developments and prospects. *Modeling and Optimization in Space Technology*, 73, 1–32. Springer.
3. Blynov, Y. A. (2019). Metod opredeleniya prostranstvennoho polozheniya tsentra tiazhesty mashyn. *Vestnyk Kontsema VKO «Almaz – Antei»*, (2), 71–82. ISSN 2542-0542.
4. Leontiev, D. M. (2015). Pro rozrakhunkovy sposib vyznachennia vysoty koordynaty tsentru vahy typovykh avtomobiliv. *Avtomobylnyi transport*, (37), 101–107.
5. Zaloha, V. O., Kryvoruchko, D. V., Shapoval, Yu. V., & Drofa, K. A. (2017). Dynamichne upravlinnia kolyvanniamy pry tochinni. *Mechanics and Advanced Technologies*, (79), 100–107.
6. Danylchenko, Yu. M., & Petryshyn, A. I. (2012). Modeliuvannia form kolyvan mekhanichnoi kolyvnoi systemy «shpyndelnyi vuzol-osnova». *Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system*, (30), 309–316.
7. Reddeppa, N., Reddy, B. J., & Rao, H. S. (2021). Coal mill foundation – A finite element approach for study of dynamic analysis. *Engineering Science*, 6(4), 82–99. <https://doi.org/10.11648/j.es.20210604.14>
8. Oborskyi, H., Orgiyan, A., & Balaniuk, A. (2023). Balancing spindles with tools for finishing and boring machines. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 1(67), 7–13. ISSN 2223-3814.
9. Shen, C., Wang, G., Wang, S., & Liu, G. (2011). The imbalance source of spindle-tool system and influence to machine vibration characteristics. 2011 Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation, Zhangjiajie, China, 1288–1291. <https://doi.org/10.1109/ICDMA.2011.317>
10. Herasymov, A. Y., & ін. (1989). Borshtanha dlia obrabotky hlubokykh otversty (A.s. 1493388 V23V 29/02). *Biul. №26*.
11. Kuklich, V. I., & ін. (1985). Borshtanha dlia obrabotky hlubokykh otversty (A.s. 1174167 V23V 29/02). *Biul. №31*.
12. Mynkov, M. A., & ін. (1976). Borshtanha dlia obrabotky hlubokykh otversty (A.s. 336890 V23V 29/02). *Biul. №44*.
13. Kaplunova, A. V., Mykhailovskiy, V. A., & Sirosh, I. P. (1991). *Metodyka ta pryklady rozv'iazuvannia zadach z teoretychnoi mekhaniky* (navchalnyi posibnyk). Kyiv: DVSL.
14. Bondarenko, L. M., Dovbnya, M. P., & Loveikin, V. S. (2002). *Deformatsiini opory v mashynakh*. Dnipropetrovsk: Dnipro-VAL.
15. Bondarenko, L. M., & Bondarenko, B. M. (2009). Sposib vyznachennia masy protyvahy pry statychnomu balansuvanni (Patent na vynakhid №85520 MPK G01L 3/00). *Biul. №2*.
16. Horokhovskiy, V. O., & Hordieiev, A. I. (2024). Sposib vyznachennia koordynat tsentra vahy ta kinematychnykh kharakterystyk skladnoho rukhomoho obiekta. *Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference «X Ukrainian-Polish Scientific Dialogues» Actual Problem of Modern Science, Khmelnytsky - Bydgoszcz*, 290–293.
17. Horokhovskiy, V. O., & Hordieiev, A. I. (2024). Vyznachennia parametriv protyvahy dlia statychnoho balansuvannia konsolnykh borshtanh roztochuvannia hlukhykh otvoriv. *Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference «Innovative Development in the Global Science»*, Boston, USA, (186), 371–379.