

**ВІДГУК**  
**офіційного опонента на дисертаційну роботу**  
**Бичкова Миколи Ігоровича**  
**«Математичне моделювання формоутворюючих процесів**  
**при високошвидкісній обробці складнопрофільних деталей», що**  
**подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук**  
**за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання**  
**та обчислювальні методи**

**Актуальність обраної теми дисертаційної роботи.** Опис геометрії об'єктів машинобудівного виробництва реалізовано в CAD-системах із застосуванням сплайн-функцій. Моделювання процесів формоутворення цих об'єктів реалізується в САМ-модулі, які виконують побудову траєкторії переміщення інструменту і фіксують її у вигляді керуючої програми для обладнання з ЧПУ. Експлуатовані в даний час системи ЧПУ, в основному, для реалізації переміщень робочих органів обладнання використовують лінійну і кругову інтерполяції. Складний, вигнутий профіль траєкторії складається з великої кількості прямолінійних відрізків дуже малої довжини, тобто приймає кусочно-лінійний вид. Керуюча програма при такому поданні траєкторії для складних геометричних формах деталей може мати дуже значний обсяг (близько 1 000 000 кадрів), а організація високошвидкісної обробки за такою програмою стикається з багатьма проблемами. Тому виникла необхідність розробки математичної моделі процесу формотворчих переміщень робочих органів обладнання, що забезпечує вимоги стабільності контурній швидкості, точності формоутворення.

Дисертація присвячена математичному моделюванню формоутворення складнопрофільних об'єктів виробництва при високошвидкісній їх обробці, що в значній мірі сприяє зменшенню часу підготовки виробництва і скороченню технологічного часу безпосередньої обробки деталей. Виходячи з усього сказаного вище, можна зробити висновок, що тема дисертаційної роботи є актуальною. Вона спрямована на вирішення **наукового завдання**, яке полягає в удосконаленні існуючих та розробці нових математичних моделей і методів опису траєкторій руху органів формоутворення і їх кінематичних характеристик з обмеженнями, що накладаються обладнанням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Робота виконувалась в період 2006 – 2020 гг. В основу дисертації покладені матеріали, узагальнюючі дослідження, виконані автором в рамках бюджетних тем ІПМаш ім. А. М. Підгорного НАН України: «Формоутворення, його конструкторська і технологічна підготовка в машинобудуванні» (№ ДР 0106U008611), «Математичне та комп'ютерне моделювання геометричних і кінематичних особливостей траєкторій формоутворення при технологічній підготовці виробництва в машинобудуванні» (№ ДР 0111U001755), «Розробка нових методів адаптивного управління високошвидкісним технологічним обладнанням для підвищення ефективності і якості формоутворення деталей енергетичних

машин» (№ ДР 0115U001938). Результати роботи використовувалися на Харківському державному авіаційному виробничому підприємстві (ХДАВП) згідно з договорами № 346-28 «Розробка управлючого устрою ЧПУ і виготовлення дослідного зразка для модернізації верстатів типу ФП-7МН» від 09.06.08 р., № V-3-2012 «Розробка алгоритмів математичного та комп'ютерного моделювання геометричних властивостей траєкторії формоутворення, які забезпечують режими високошвидкісної обробки на верстатах з ЧПУ» від 16.01.12 р. У зазначених науково-дослідних роботах автор приймав участь як виконавець. Результати, отримані при виконанні даних робіт, були базовими для підготовки та подання дисертації.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** Основні положення і висновки дисертаційної роботи вважаю обґрунтованими. Робота ґрунтуються на загальних засадах теорії інтерполяції, апроксимації та математичного моделювання. Для побудови математичної моделі формоутворення використовувалися методи лінійної та векторної алгебри, аналітичної геометрії, теорії сплайн-функцій, методи розв'язання різницевих рівнянь. Достовірність отриманих в дисертаційній роботі результатів забезпечені коректністю постановки задач, результатами чисельного моделювання характеристик формотворчих рухів робочих органів обладнання і порівнянням їх з характеристиками переміщення верстатного обладнання. Достовірність підтверджена результатами виготовлення серійних деталей на верстатному обладнанні ХДАВП.

**Наукова новизна результатів дисертаційної роботи.** В межах вирішення завдань дисертаційного дослідження отримані такі основні наукові результати:

- вперше запропоновано модель аналітичного уявлення кожного сегмента неоднорідного раціонального В-сплайна (NURBS) у вигляді відношення поліномів з відомими коефіцієнтами, що забезпечує при високошвидкісній обробці (ВШО) виконання розрахунків менш ніж за  $0,2 T_n$  ( $T_n$  – час циклу) при значенні дискретності переміщення  $10^{-7}$  м;
- набув подальшого розвитку метод кубічної В-сплайн апроксимації точково-заданих кривих, який, на відміну від існуючих, дозволяє виконувати сполучення сплайнів по першим і другим похідним;
- отримали подальший розвиток S-образні математичні моделі зміни швидкості зони формоутворення шляхом її подання симетричною кривою, що складається з трьох ділянок, на кожній з яких враховано обмеження швидкості і прискорення;
- отримала подальший розвиток дворівнева модель формоутворюючих переміщень, що дозволило на порядок скоротити час розрахунків переміщення обладнання при ВШО в режимі реального часу.

**Наукове, практичне значення та реалізація результатів роботи.** Розроблену модель структури дворівневого пристрою числового програмного управління (ПЧПУ) для забезпечення високошвидкісних режимів обробки виробів реалізовано у вигляді дворівневої системи ЧПУ,

яку використано при модернізації обладнання. Реалізація розробленої моделі управління формоутворюючим обладнанням у вигляді комп'ютерних програм, захищених авторським свідоцтвом № 43077 від 26.03.2012, дозволила в 2,5 рази зменшити трудомісткість виготовлення серійних авіаційних деталей при обґрунтованості і забезпечені вимог до їх якості.

Результати дисертаційної роботи прийняті у виробництво на ХДАВП і використовуються в навчальному процесі Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ».

**Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях.** Результати дисертації опубліковані в 24 роботах, з них 14 статей і збірниках, затверджених ДАК МОН України, дев'яти тезах доповідей, і одному свідоцтві про реєстрацію авторського права на твір.

Апробація результатів дисертаційної роботи пройшла на 9 –ти конференціях молодих вчених і спеціалістів ПМаш ім. А. М. Підгорного НАН України «Сучасні проблеми машинобудування» (Харків, 2008, 2010, 2012, 2014), міжнародних конференціях «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки» (Харків, 2008, 2010, 2013, 2018, 2019).

Аналіз публікацій автора дозволяє зробити висновок, що основні результати дисертації найшли повне відображення в авторефераті та наукових фахових виданнях. Автореферат дисертації повною мірою відображає зміст роботи та отримані автором результати досліджень. Робота пройшла необхідну апробацію на наукових семінарах та конференціях.

**Оцінка змісту дисертації та її завершеності у цілому.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 123 найменувань на 11 сторінках. Повний обсяг дисертації становить 155 сторінки, основний текст – 129, в них 60 рисунків, 12 таблиць, та два додатки на 5 сторінках.

Основні положення і результати дисертаційних досліджень доповідалися на конференціях молодих вчених і спеціалістів ПМаш ім. А. М. Підгорного НАН України «Сучасні проблеми машинобудування» (Харків, 2008, 2010, 2012, 2014), міжнародних конференціях «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки» (Харків, 2008, 2010, 2013, 2018, 2019).

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, вказано об'єкт, предмет і методи дослідження, визначено наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів, наведено відомості про публікації за темою дисертації і про апробацію результатів дослідження, а також зазначено особистий внесок здобувача у наукові праці, написані у співавторстві.

**Перший розділ** присвячений огляду наукових праць за темою дисертації Визначено сучасний стан опису процесів формоутворення складнопрофільних деталей на сучасних підприємствах машинобудування. проблеми, обрано напрям досліджень і їх реалізація. Обґрунтовано необхідність розробки моделі характеристик таких процесів. Проведений

аналіз цієї моделі показав, що при високошвидкісній обробці складнопрофільних деталей не забезпечуються вимоги стабільності контурної швидкості, точності формоутворення. Час розрахункових процедур при ВСО перевищує допустимі обмеження. Тому для високошвидкісній обробці була запропонована математична модель формоутворення складнопрофільних виробів машинобудування. На основі проведеного аналізу виявлені актуальні завдання та сформульовано задачі дослідження.

*Другий розділ* присвячено математичному моделюванню формоутворюючих переміщень при високошвидкісній обробці. Модель включає до себе наступні складові: модель лінійних переміщень, модель переміщень по еліпсу, модель переміщень по кубічній В-сплайн кривій, модель переміщень по NURBS-кривій. Математична модель переміщень по еліпсу забезпечує високу стабільність контурної швидкості, відхилення від якої складають менше 1%. Розроблена модель є універсальною як для еліптичних, так і для кругових траєкторій. Виконання розрахунків переміщень по В-сплайновій траєкторії з використанням загальноприйнятих рекурентних виразів призводить до витрат часу, яке істотно перевершує встановлене обмеження. Було розроблено модель переміщення по міжузловому інтервалу кубічної В-сплайн траєкторії у вигляді степеневого полінома. Моделювання траєкторій переміщення зони формоутворення за допомогою сплайн-кривих дозволяє вирішити завдання модифікації керуючих програм (КП) обладнання з ЧПУ, що містять велику кількість лінійних кадрів, шляхом сплайн-апроксимації або сплайн-інтерполяції. Широке застосування NURBS-кривих в CAD/CAM системах вказує на необхідність їх використання при моделюванні формоутворюючих переміщень. Отримання аналітичних залежностей для диференціальних характеристик NURBS-кривої дозволяє виконати аналіз динамічних і кінематичних характеристик системи до початку процесів формоутворення. Це дає можливість попередньої перевірки виконання обмежень по швидкості, прискоренню і т.п., що забезпечує дотримання вимог якості формоутворення.

*У третьому розділі* подана математична модель процесу формоутворюючих переміщень і прискорення зони формоутворення.

Вимога забезпечення високої контурної швидкості привела до необхідності використання нелінійних режимів розгону і гальмування, серед різноманіття яких виявилося корисним використання S-образних законів. Цей підхід був реалізований в комп'ютерній програмі «S-control». Для отримання високої якості деталі, наприклад при чистовій обробці, необхідно забезпечити сталість контурної швидкості руху інструменту. Запропонована модель формоутворюючих переміщень на базі аналітичного уявлення сплайна у вузлових інтервалах забезпечує стабільність контурної швидкості в реальному режимі часу з її відхиленнями від  $10^{-3}$  до  $10^{-4}$  %. Аналіз стратегій при ВШО дозволив розробити метод регулювання подачі, що забезпечує максимальну її швидкість з плавним регулюванням, виходячи з критерію максимального знімання матеріалу; режим управління швидкістю для

забезпечення постійного навантаження на ріжучий інструмент при змінному зніманні матеріалу, виходячи з максимальної точності припуску; сталість контурної швидкості, виходячи з вимог до макро- і мікрорельєфу одержуваних поверхонь. Реалізація послідовності таких технологічних операцій при переміщенні по сплайн-кривій в реальному режимі часу не представляється можливою у зв'язку зі значними обсягами обчислень. Тому подібні перевірки і розрахунки при моделюванні доводиться виконувати заздалегідь для всієї КП, що вказує на необхідність поділу моделі процесу формоутворення на два етапи. На першому етапі проводиться попередній аналіз, розрахунки і підготовка КП до виконання. Тут виконується від 85% до 95% обсягу всіх розрахунків. Решта завдань моделювання (розрахунок подачі за час циклу, відстеження значення відсотка подачі і реакція на нього) виконуються на другому етапі в реальному режимі часу, їх реалізація не вимагає значних апаратних і часових витрат. Реалізація такого підходу привела до формування дворівневої моделі процесу формоутворення.

*У четвертому розділі* подано дворівневу математичну модель процесу формоутворення. На верхньому рівні виконується підготовка інформації для моделювання формоутворення і перевірка обмежень параметрів процесу. На нижньому рівні виконується моделювання контурної швидкості, формоутворюючих переміщень з використанням інтерполяційних залежностей, розрахунок динамічних характеристик, а також формування і передача завдання на цифро-аналоговий перетворювач. У розділі наведено опис важливого для практики процесу формоутворення на обладнанні з ЧПУ завдання – використання КП, що розроблені раніше і містять велику кількість лінійних кадрів, шляхом сплайн-апроксимації. Застосування сплайн-кривих дозволяє вирішити завдання модифікації КП. Розроблено методику кубічної В-сплайн апроксимації кривих, точково заданих декількома кривими з подальшим сполученням сплайнів по 1-й і 2-й похідним. Далі розглянуто методику В-сплайн апроксимації, що дозволяє створити послідовність сплайнів кривих третього ступеню. Методику засновано на використанні загального методу В-сплайн апроксимації, до якого виконано необхідні доповнення. Програмна реалізація алгоритму зміни швидкості «S-control», поряд з іншими математичними моделями, наведеними в роботі, послужила основою розробки пристроя ЧПУ АВІ-04, який використовувався при модернізації верстата моделі ФП-7 на ХДАВП. Достовірність розроблених моделей була оцінена в процесі тестування обладнання, що виконувалося шляхом виготовлення серійних деталей центроплана літака АН-148. За результатами експлуатації верстата після модернізації, технологічний час формоутворюючих операцій складнопрофільних деталей скоротився від 2,8 до 3,3 раз. Деталі були прийняті відділом технічного контролю цеху.

Додатки дисертації містять акти про впровадження результатів дослідження.

**Публікації та оприлюднення результатів.** Результати дисертації опубліковані в 24 роботах, з них 14 статей у наукових фахових виданнях,

дев'яти тезах доповідей і одному свідоцтві про реєстрацію авторського права на твір.

**Зауваження до дисертаційної роботи.** Щодо роботи є такі зауваження.

1. Для управління швидкістю в роботі використані S-образні закони управління, але їх переваги над багатьма іншими слабо продемонстровані.

2. З усього безлічі сплайнів автор виділив B-сплайнів і NURBS. Були обійті увагою інші види сплайн-кривих, які також використовуються в ЧПУ.

3. Відсутній опис інтерфейсу програми «S-Control», що не дозволяє оцінити можливість її застосування іншими розробниками.

4. Використання NURBS-інтерполяції призводить до виникнення розривів по похідним, що негативно позначається на управлінні процесами формоутворення.

5. При табличному завданні швидкості доцільно використовувати сплайн криві оскільки вони більш універсальні для опису законів зміни швидкості.

6. У вступі роботи в параграфі “**Мета і завдання дослідження**” зазначено “- розроблено математичну модель еліптичних/кругових формоутворюючих переміщень при ВШО;”, тоді як в автoreфераті написано “- розроблено математичні моделі лінійних і кругових формоутворюючих переміщень при ВШО складнопрофільних деталей;”.

7. У роботі не дано практичне застосування еліптичної траекторії, хоча в машинобудуванні існує клас задач, де її використання необхідно (моделювання процесів виготовлення поршнів і т.д.).

## ВИСНОВОК

Дисертаційна робота М.І. Бичкова «Математичне моделювання формоутворюючих процесів при високошвидкісній обробці складнопрофільних деталей» є завершеною науковою роботою, присвяченою вирішенню важливого наукового завдання, яке полягає в удосконаленні існуючих та розробці нових математичних моделей і методів опису траекторій руху органів формоутворення і їх кінематичних характеристик з обмеженнями, що накладаються обладнанням.

Робота не містить плагіату. По своєму змісту робота повністю відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи та профілю спеціалізованої вченої ради Д 64.051.09; результати та висновки дисертаційної роботи повністю відповідають меті та поставленим завданням.

Автoreферат достатньо відображає основні положення дисертаційної роботи, оформлення дисертації і автoreферату в цілому відповідає нормативним вимогам.

Вважаю, що дисертаційна робота Бичкова Миколи Ігоровича «Математичне моделювання формоутворюючих процесів при високошвидкісній обробці складнопрофільних деталей» з урахуванням її

актуальності, наукового та практичного значення одержаних результатів, обсягу і рівня публікацій цілком відповідає вимогам, поставленим до кандидатських дисертацій цн. 9, 11, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. №567 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМ №656 від 19.08.2015, №1159 від 30.12.2015, №567 від 27.07.2016) щодо кандидатських дисертацій, а її автор Бичков Микола Ігорович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент  
доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри теоретичної та  
прикладної системотехніки  
Харківського національного університету  
імені В.Н. Каразіна

*Угрюмов* /М.Л. Угрюмов/

