

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МИГОВИЧ АРТУР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.914.01-52-048.34(043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ
ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КОНТУРНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ
НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

Спеціальність 131 – Прикладна механіка
Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А. В. Мигович

Науковий керівник: Петраков Юрій Володимирович,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Мигович А.В. Оптимізація процесу контурного фрезеруванні на верстатах з ЧПК. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 – Прикладна механіка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2025.

Дисертація присвячена оптимізації процесу контурного фрезерування на верстатах із ЧПК з урахуванням технологічних і конструкторських обмежень. Запропоновано математичну модель, яка описує взаємодію інструмента й заготовки, а також методи управління режимом різання, що дають змогу визначати оптимальні параметри з урахуванням усіх необхідних обмежень і стабілізувати параметри процесу різання.

Розроблене програмне забезпечення автоматизує підбір оптимальних параметрів, підвищуючи продуктивність зберігаючи стабільність процесу. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність підходу, забезпечивши суттєве скорочення часу обробки, і навіть за складних контурів.

Зміст роботи складається з чотирьох розділів, у яких викладено та обґрунтовано основні результати дисертації.

У вступі представлено загальну характеристику дослідження, обґрунтовано його актуальність, а також розкрито зв'язок із науковими програмами, планами і темами. Сформульовано мету та завдання роботи, визначено об'єкт і предмет дослідження, наведено наукову новизну й практичну значущість здобутих результатів. Окремо висвітлено особистий внесок здобувача, а також подано відомості про апробацію, публікації, структуру й обсяг роботи.

У першому розділі наведено розгорнутий аналіз процесу контурного фрезерування, який застосовують для формування складних геометричних поверхонь у різних галузях.

Проаналізовано методи управління процесом різання за апіорними, поточними та апостеріорними даними. Розглянуто методи стабілізації характеристик різання, такі як швидкість видалення матеріалу (MRR), сила різання та потужність різання, а також наведено їх переваги та обмеження. Здійснено аналіз сучасних САМ-систем та їх модулів, що дозволяють автоматизувати процес контурного фрезерування, зокрема iMachining, Dynamic Motion та інші. Виявлено їхні обмеження у стабілізації та оптимізації процесу різання, що обґрунтовує потребу дослідженнях.

На основі огляду літератури сформульовано мету і задачі дослідження, спрямовані на оптимізацію процесу контурного фрезерування на верстатах з ЧПК.

У другому розділі наведено опис математичного апарата й алгоритми для створення цифрових масивів, які описують траєкторії формоутворення, контури заготовки та деталі, і є необхідною передумовою моделювання процесу контурного фрезерування.

Створено математичну модель процесу контурного фрезерування, яка дозволяє моделювати ключові характеристики процесу різання, зокрема швидкість видалення матеріалу (MRR) і сили різання.

Запропоновано прикладну програму, яка автоматизує розрахунки та візуалізує процес обробки контуру. Програма надає можливість прогнозувати характеристики різання, аналізувати ефективність різних режимів і створювати дані для подальшої стабілізації процесу різання за критерієм швидкості видалення матеріалу (MRR) та оптимізації процесу обробки.

У третьому розділі розроблено алгоритм управління режимом різання, який забезпечує стабілізацію процесу контурного фрезерування на верстатах з ЧПК за критерієм швидкості видалення матеріалу (MRR). Наведений алгоритм передбачає управління подачею, що дає змогу створити стабільні умови різання. На основі алгоритму створено прикладну програму, яка генерує управляючі програми G-кодів із можливістю дискретизації та адаптації до умов обробки.

Представлено моделювання процесу контурного фрезерування за різними стратегіями управління, зокрема SolidCAM і більш просунутим модулем iMachining, а також управлінням подачею за розробленим алгоритмом.

Результати експериментальних досліджень на верстаті ЧПК HAAS TM-OP, зі встановленим багатокомпонентним тензометричним датчиком, засвідчили ефективність нового підходу до управління процесом контурного фрезерування. Порівняно з програмою від SolidCAM та системою iMachining, розроблена стратегія управління подачею, орієнтована на стабілізацію швидкості видалення матеріалу (MRR), суттєво скорочує час операції.

У четвертому розділі представлено результати оптимізації процесу контурного фрезерування на верстатах з ЧПК. Сформульовано задачу оптимізації, яка передбачає мінімізацію часу обробки при дотриманні технологічних та конструктивних обмежень. Представлено розроблену математичну модель, яка описує взаємозв'язки між компонентами режиму різання та його впливом на різні параметри процесу обробки та показники якості поверхневого шару обробленої поверхні.

Наведено створену прикладну програму, яка автоматизує процес вибору оптимального режиму різання.

Результати експериментальних досліджень підтвердили адекватність математичної моделі сформульованої задачі оптимізації. Доведено, що нове оптимізоване управління суттєво скоротило цикл процесу контурного фрезерування порівняно з рішеннями SolidCAM, iMachining та управлінням для стабілізації швидкості видалення матеріалу. Продемонстровано можливість практичного впровадження розробленого підходу для прогнозування та вибору оптимальних режимів різання.

Ключові слова: контурне фрезерування, кінцеве фрезерування, програмування верстатів з ЧПК, управляюча програма, математична модель, режими різання, подача, швидкість різання, процеси оброблення різанням, моделювання процесу різання, оптимізація параметрів процесу різання, шорсткість поверхні.

ABSTRACT

Myhovich A.V. Optimization of the contour milling machining on CNC machines.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in speciality 131 - Applied Mechanics - National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to the optimisation of the contour milling process on CNC machines with regard to technological and design constraints. A mathematical model describing the interaction of the tool and workpiece, as well as methods for controlling the cutting mode, are proposed, which allow determining the optimal parameters taking into account all the necessary constraints and stabilising the parameters of the cutting process.

The developed software automates the selection of optimal parameters, increasing productivity while maintaining process stability. Experimental studies have confirmed the effectiveness of the approach, providing a significant reduction in machining time even with complex contours.

This thesis consists of four chapters, in which the main results of the thesis are presented and substantiated.

The introduction presents a general description of the study, substantiates its relevance, and reveals the connection with scientific programmes, plans and topics. The aim and objectives of the work are formulated, the object and subject of the study are defined, the scientific novelty and practical significance of the results obtained are presented. The personal contribution of the applicant is highlighted separately, as well as information on testing, publications, structure and scope of the work.

The first chapter provides a detailed analysis of the contour milling process, which is used to form complex geometric surfaces in various industries.

The methods of controlling the cutting process based on a priori, current and a posteriori data are analysed. Methods for stabilising cutting characteristics, such as

material removal rate (MRR), cutting force and cutting power, are considered, and their advantages and limitations are presented. An analysis of modern CAM systems and their modules that automate the process of contour milling, such as iMachining, Dynamic Motion, and others, is carried out. Their limitations in stabilising and optimising the cutting process have been identified, which substantiates the need for further research.

Based on the literature review, the aim and objectives of the study aimed at optimising the process of contour milling on CNC machines are formulated.

The second chapter describes the mathematical apparatus and algorithms for creating digital arrays that describe the shaping trajectories, contours of the workpiece and part and are a prerequisite for further modelling the contour milling process.

The paper presents the developed mathematical model of the contour milling process, which allows modelling key cutting characteristics, in particular, material removal rate (MRR) and cutting forces.

An application program that automates calculations and visualises the contour milling process is proposed. The programme makes it possible to predict cutting characteristics, analyse the effectiveness of different modes and generate data for further stabilisation of the cutting process in terms of material removal rate (MRR) and optimisation of the machining process.

In the third chapter, we develop a cutting mode control algorithm that ensures the stabilisation of the contour milling process on CNC machines according to the material removal rate (MRR) criterion. The algorithm provides for feed control, which makes it possible to create stable cutting conditions. Based on the algorithm, an application program has been created that generates G-code control programs with the ability to discretise and adapt to machining conditions.

The article presents the modelling of the contour milling process using various control strategies, including SolidCAM and the more advanced iMachining module, which also controls the feed according to the developed algorithm.

The results of experimental studies on a HAAS TM-0P CNC machine with a multi-component strain gauge have shown the effectiveness of the new approach to

controlling the contour milling process. Compared to the SolidCAM program and the iMachining system, the developed feed control strategy, focused on stabilising the material removal rate (MRR), significantly reduces the operation time.

Chapter 4 presents the results of optimising the contour milling process on CNC machines. The optimisation problem is formulated, which involves minimising the machining time while observing technological and design constraints. The developed mathematical model describing the relationships between the components of the cutting mode and its impact on various parameters of the machining process and the quality of the surface is presented.

The developed application program that automates the process of selecting the optimal cutting mode is presented.

The results of experimental studies have confirmed the adequacy of the mathematical model of the formulated optimisation problem. It is proved that the new optimised control has significantly reduced the cycle of the contour milling process compared to SolidCAM, iMachining and material removal rate (MRR) control solutions. The possibility of practical implementation of the developed approach for prediction and selection of optimal cutting modes is demonstrated.

Keywords: contour milling, end milling, CNC machine programming, CNC program, mathematical model, cutting modes, feed rate, cutting speed, machining processes, cutting process simulation, optimization of cutting parameters, surface roughness.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Petrakov, Y.V. and Myhovych A.V. 2020. IMachining technology analysis for contour milling. Mechanics and Advanced Technologies. 2(89) (Sep. 2020). DOI:<https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.89.202065>.

2. Мигович А. В., Петраков Ю. В. (2024). Моделювання контурного 2.5-D фрезерування на верстатах з числовим програмним керуванням. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. (1 (19)). 60–69. Опубліковано: 27.12.2024 DOI: [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2024.1\(9\).08](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2024.1(9).08).

3. Petrakov Y. V., Myhovych A. V. (2025). Stabilization of contour milling on CNC machines. Journal of Engineering Sciences (Ukraine), Vol. 12(1), pp. A1–A11. [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(1\).a1](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).a1)

4. Petrakov Y. V., Ohrimenko O. A., Sikailo M. O., Myhovych A. V. (2023). Cutting forces simulation for end milling. Journal of Engineering Sciences (Ukraine), Vol. 10(2), pp. A27–A33. DOI: 10.21272/jes.2023.10(2).a4

5. Petrakov, Y., Korenkov, V., Myhovych, A. (2022). Technology for programming contour milling on a CNC machine. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (1 (116)), 55–61. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255389>

6. СПОСІБ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБРОБЛЕННЯ НА ВЕРСТАТІ З ЧИСЛОВИМ ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ : пат. 157269 Україна : G05B 13/00. № у 2023 06220 ; заявл. 20.12.2023 ; опубл. 25.09.2024, Бюл. № 39. 4 с. Available from: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1819464/>

7. Petrakov, Yuriy & Myhovich, Artur. (2023). Milling with Feed Control on a Computer Numerical Control Machine-tools. International Scientific and Technical conference The Progressive Technics Technology and Engineering Education. 168-170. DOI:10.20535/2409-7160.2023.XXIII.279699

8. Петраков, Ю. В., Мигович, А. В., Охріменко, О. А., & Сікайло, М. О. (2023). Моделювання сили різання при кінцевому фрезеруванні. Процеси механічної XII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 50–52.

ЗМІСТ

СПИСОК СОКРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	12
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ	
МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	17
1.1 Огляд контурного фрезерування	17
1.2 Особливості контурного фрезерування	23
1.3 Методи управління процесами різання.....	25
1.4 Управління режимами різання для стабілізації процесу	29
1.5 Аналіз провідних САМ-систем і їх модулів.....	40
1.6 Оптимізація процесу контурного фрезерування.....	46
1.7 Висновки, мета і задачі дослідження	51
РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТУРНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ.....	
2.1 Передумови моделювання процесу контурного фрезерування	53
2.2. Математична модель визначення параметрів контурного фрезерування.....	60
2.3 Моделювання сили різання при контурному фрезеруванні	64
2.3.1 Математична модель визначення складових сили різання.....	65
2.3.2. Апробація результатів моделювання сили різання	71
2.4 Моделювання процесу контурного фрезерування	74
ВИСНОВКИ.....	76
РОЗДІЛ 3 СТАБІЛІЗАЦІЯ ШВИДКОСТІ ВИДАЛЕННЯ МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ПРОЦЕСУ КОНТУРНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ.....	
3.1 Проєктування нової управляючої програми	77
3.2 Моделювання контурного фрезеруванням при різних управліннях	81
3.3 Підготовка до проведення експерименту	93
3.4 Експериментальне дослідження та аналіз результатів.....	99
ВИСНОВКИ.....	105

РОЗДІЛ 4 ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КОНТУРНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК	106
4.1 Формулювання задачі оптимізації процесу контурного фрезерування	106
4.2 Автоматизація вирішення задачі оптимізації.....	117
4.3 Застосування програмного рішення для оптимізації режимів різання.....	120
4.4 Експериментальна перевірка оптимізованого управління	124
ВИСНОВКИ.....	125
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	127
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	129
ДОДАТОК А.....	141
ДОДАТОК Б	142

СПИСОК СОКРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЧПК	Числове Програмне Керування
ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
ANN	Artificial Neural Network
CAM	Computer-aided manufacturing
FFS	Force-Based Feedrate Scheduling
GA	Genetic Algorithm
HSM	High-Speed Machining
MRR	Material Removal Rate
NSGA-II	Nondominated Sorting Genetic Algorithm II
PSO	Particle Swarm Optimization
RSM	Response Surface Methodology

ВСТУП

Актуальність теми. Контурне фрезування є однією з найбільш універсальних і високопродуктивних операцій в обробленні матеріалів, що широко застосовується в таких галузях, як аерокосмічна, автомобілебудівна, а також у сфері швидкого прототипування та виготовлення штампів. Завдяки можливості обробки складних просторових форм, цей процес став незамінним для виготовлення деталей із підвищеними вимогами до точності та якості оброблених поверхонь.

Проте, контурне фрезування має суттєву особливість: квазістаціонарність. Зокрема, коли фреза переходить від обробки прямої ділянки контуру до обробки увігнутої чи опуклої дуги, відбуваються помітні відхилення у значеннях основних параметрів процесу – насамперед швидкості видалення матеріалу (MRR), сили та потужності різання. Це може призводити до погіршення шорсткості поверхні, зниження точності та зменшити стійкість різального інструмента.

Виробнича практика свідчить, що для уникнення негативних наслідків (припалів, поломок інструмента, вібрацій) технологи нерідко змушені підбирати режими різання, зосереджуючись на «найскладніших» ділянках контуру. Однак такий консервативний вибір загалом збільшує час обробки і, відповідно, зменшує продуктивність усього циклу фрезерної операції. З урахуванням того, що ефективність виробництва дедалі частіше визначається показниками економії ресурсів і часу, постає науково-технічна проблема розроблення підходів до оптимізації контурного фрезерування з урахуванням технологічних та конструкторських обмежень.

Отже, оптимізація процесу контурного фрезерування з метою підвищення продуктивності є надзвичайно актуальною задачею. Вирішення цієї задачі дасть змогу скоротити час виготовлення виробів, знизити собівартість виробництва, забезпечити необхідну точність утвореної поверхні деталі з наявними на виробництві ресурсами (верстатами, інструментами), що особливо важливо для високотехнологічних галузей і конкурентоспроможності підприємств.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертація виконувалася відповідно до плану наукових досліджень, проведених на кафедрі технології машинобудування Навчально-наукового механіко-машинобудівного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Мета і задачі дослідження. Розроблення методики і програмних засобів для оптимізації та стабілізації процесу контурного фрезерування на верстатах з ЧПК, що дасть змогу збільшити продуктивність фрезерної операції та забезпечить дотримання конструкторських вимог до виробу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Розробити математичну модель, що дасть можливість моделювати процес контурного фрезерування та визначати характеристику – швидкість видалення матеріалу (MRR);
2. Розробити спосіб стабілізації швидкості видалення матеріалу (MRR) для процесу контурного фрезерування;
3. Сформулювати задачу оптимізації для підвищення продуктивності процесу контурного фрезерування з урахуванням необхідних обмежень;
4. Розробити алгоритми та прикладні програми;
5. Провести експериментальну апробацію отриманих результатів.

Об'єкт дослідження – процес контурного фрезерування на верстаті з ЧПК.

Предмет дослідження – продуктивність операції контурного фрезерування на верстатах з ЧПК та якість отриманої поверхні.

Методи дослідження, що застосовані для вирішення поставлених задач:

Методологічною основою дисертаційної роботи є поєднання теоретичних та експериментальних підходів.

Теоретичні дослідження ґрунтуються на загальних принципах технології машинобудування, теорії різання матеріалів та різальних інструментів. Оптимізація режимів різання для контурного фрезерування на верстатах з ЧПК базується на математичному моделюванні процесу взаємодії заготовки та

інструмента в зоні різання, створених алгоритмах стабілізації процесу різання. Це забезпечило отримання формул, адаптованих для чисельного моделювання, і дало змогу розробити прикладні програми для автоматизації процесів.

Системний підхід було застосовано для опису структури технологічної підготовки виробництва. Процес підготовки представлено у вигляді блоків, що дозволило ідентифікувати ключові етапи: збір апіорної інформації та впровадження управляючих програм в G-кодах з оптимізованими режимами різання.

Розроблені математична модель, алгоритми й отримані висновки було підкріплено експериментальними дослідженнями, які засвідчили високу надійність та практичну придатність запропонованого підходу.

Наукова новизна отриманих результатів.

Розроблено новий підхід до оптимізації процесу контурного фрезерування на верстатах з ЧПК, що полягає у попередній стабілізації, оптимізації за критерієм максимальної продуктивності з дотриманням заданих обмежень.

Вперше створено математичну модель, яка враховує квазістаціонарність процесу, включаючи вплив кривизни контуру на детерміновану складову шорсткості поверхонь різних ділянок (прямих, увігнутих і опуклих дуг), а також обмеження, пов'язані з геометрією виробу, можливостями обладнання та інструмента. Ця модель стала базою для алгоритмів автоматизації, які оптимізують режими різання, забезпечуючи стабільність процесу та високу якість обробки.

Практичне значення одержаних результатів.

Прикладні програми забезпечують технологу-програмісту можливість швидко визначати режим різання, що мінімізує час обробки та забезпечує високу якість оброблених поверхонь при використанні наявного обладнання та інструментів. Використання розроблених рішень у виробництві значно підвищує продуктивність процесу контурного фрезерування, спрощує підготовку до його застосування та забезпечує адаптацію до сучасних технологічних вимог.

Особистий внесок здобувача.

Роботу виконано під науковим керівництвом доктора технічних наук, професора Петракова Ю.В. Основні результати, що становлять основу дисертації, здобувач отримав самостійно. У публікаціях, підготовлених у співавторстві, розробив математичні моделі та прикладні програми для моделювання процесів фрезерування, стабілізації й оптимізації, освоїв апаратні засоби для проведення експериментальних досліджень, провів та виконав аналіз отриманих даних.

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати дисертаційної роботи були представлені й одержали схвалення на:

1. Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Київ, Україна, 2023 р.).
2. Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю. «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент». (м. Житомир, Україна, 2023 р.).

Публікації. За результатами дослідження опубліковано 8 наукових праць, у тому числі 2 тези доповідей та 5 статті у наукових фахових виданнях України за спеціальністю 131 – Прикладна механіка, 2 статті проіндексовано у базах даних Web of Science та/або Scopus.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 103 найменувань та 2 додатки. Загальний обсяг роботи 142 сторінок, з яких 116 сторінок основного тексту, 11 сторінок використаних джерел та 2 сторінки додатків. Робота містить 90 рисунків, 1 таблицю.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ

МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Огляд контурного фрезерування

Найбільш поширеним та універсальним способом лезової обробки є фрезерування. Процес фрезерування ефективно застосовується для виготовлення поверхонь з широким спектром геометричних конфігурацій, де присутні прості плоскі форми та форми з більш складною геометрією. Серед безлічі фрезерувальних операцій контурне фрезерування (англ. Contour milling) або, як можна часто зустріти в англійських джерелах, профільне фрезерування (англ. Profile Milling) кінцевими фрезами (рис.1.1) вважається однією з найбільш розповсюджених операцій [1,2].

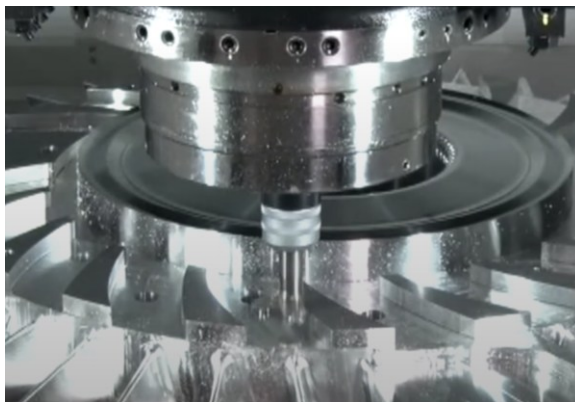


Рисунок 1.1 – Контурне фрезерування [1]

Контурне фрезерування кінцевими фрезами на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК) – це процес механічної обробки, де різальний інструмент видаляє матеріал переміщуючись відповідно до траєкторії по двох з трьох Декартових осей координат. Траєкторія, як правило, розробляється в САМ-системі (англ. Computer-aided manufacturing) та записується в управляючу програму для верстатів з ЧПК у формі низькорівневої мови програмування G-кодів.

Процес контурного фрезерування застосовується для створення конструктивних елементів зі складною геометрією таких як, відкриті та закриті кармани, зовнішні контури деталей. Також вказаний вид фрезерування використовується для формування внутрішніх та зовнішніх контурів, що містять в собі, як прямолінійні ділянки, так і дуги.

Завдячуючи зазначеним можливостям, фрезерування, як процес механічної обробки, використовується у різних сферах виробництва та є найбільш вигідним та ефективним методом обробки матеріалів, як композитних, так і металів у аерокосмічній, автомобілебудівній, машинобудівній та інших галузях.

Аерокосмічна промисловість містить в собі два напрями розвитку – авіаційний та космічний, що дає достатньо багато можливостей для застосування фрезерування в обох напрямках. До основних компонентів, що обробляються контурним фрезеруванням, належать елементи конструкції планера, такі як нервюри крила, шпангоути та деталі механізації крила, а також інші компоненти, включно з частинами двигуна [1, 2] (рис. 1.2).

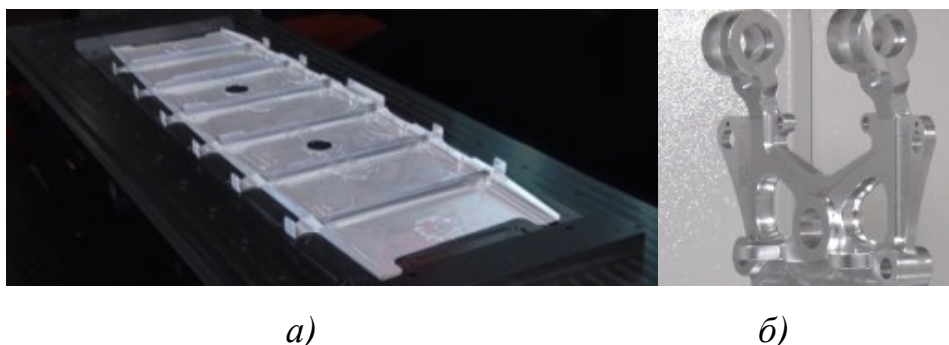


Рисунок 1.2 – Приклади отриманих деталей з використанням контурного фрезеруванням: а) нервюра крила літака; б) каркас сидіння [1]

Інші дослідження сучасної аерокосмічної промисловості [2] виявили тенденцію до використання монолітних компонентів для конструкцій планера літака, а не традиційних збірних конструкцій, що складаються з безлічі дрібних гнутих і штампованих деталей. Такі монолітні компоненти, включно з нервюрами, стрингерами, лонжеронами, виготовляють з екструдованих, штампованих чи кованих заготовок методом високошвидкісного фрезерування з

видаленням 90 – 95% маси вихідного матеріалу, приклад на рис. 1.3. Основною перевагою використання монолітних компонентів є досягнення ідеального балансу між міцністю і вагою за рахунок однорідності застосованих матеріалів, особливо алюмінієвих сплавів. Стандартною практикою є фрезерування карманів, яке здійснюється за допомогою високошвидкісної стратегії обробки. Цей процес вирізняється значними осьовими та радіальними глибинами різання, збільшеною подачею на зуб, а також високою швидкістю обертання шпинделя.



Рисунок 1.3 – Монолітний структурний компонент літака [2]

Також контурне фрезерування застосовують для виготовлення структур підсилених ребрами жорсткості. Такі структури носять назву ізогридних (англ. Isogrid) та відомі своєю легкістю і міцністю [3]. Зазвичай вони виготовляються із цільної заготовки шляхом фрезерування (рис. 1.4). Під час фрезерування формується сітка з трикутних карманів, стінки якої слугують ребрами жорсткості та підсилюють дно карману. Використовується термін ізогрид, оскільки структура функціонує як ізотропний матеріал з однаковими властивостями в будь-якому напрямку. Існує також подібна структура – ортогрідна або вафельна (англ. Orthogrid або Waffle grid), яка відрізняється прямокутною формою утворених карманів і на відміну від ізогридної, має різні властивості під різними кутами.

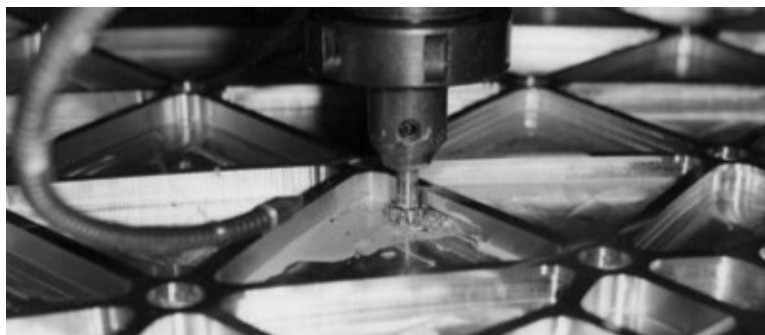


Рисунок 1.4 – Контурне фрезерування ізогрідної структури [4]

Наприкінці 1970-х, такі структури були запатентовані компанією McDonnell Douglas, яка наразі є частиною Boeing [3]. Одночасно вони з'явилися і у вітчизняній аерокосмічній сфері. Вони є дороговартісними у виготовленні. Саме тому їх використовують тільки для підсилення критичних місць в конструкції літаків (рис. 1.5, а) та гелікоптерів.

Найбільш використовуваним є контурне фрезерування саме в космічній техніці. Прикладом цього слугують перші ступені ракет сімейства: Дельта [5], Атлас [6] та частин першої ступені Системи космічних запусків [7], і адаптера між ракетою та космічним кораблем Оріон, що теж застосовує в своїй конструкції ортогональну структуру (рис. 1.5, б).



а)

б)

Рисунок 1.5 – Нервюра крила літака A330neo а) [8] та панель паливного баку ракети Вулкан б) [9]

Як і аерокосмічна промисловість, автомобілебудівна промисловість не може обійтися без використання фрезерування, зокрема контурного. Адже ця

галузь прагне до оптимізації та пришвидшення виробничих процесів, що є вирішальним для великосерійного виробництва, де необхідні висока точність і якість. Контурне фрезерування відіграє ключову роль у забезпеченні цих вимог, та потребує руху інструмента за складною траєкторією, що забезпечується завдяки використанню верстатів з ЧПК. Це дозволяє ефективно створювати як великосерійні партії деталей, так і унікальні прототипи.

Розміри партій у автомобілебудуванні часто вимірюються мільйонами деталей. Більшість деталей виготовляється методом лиття під тиском. Далі деталі піддаються обробці, включаючи контурне фрезерування для зняття кількох міліметрів припуску з поверхонь, які контактуватимуть з іншими компонентами. Точність є вирішальною складовою для таких компонентів, як блок двигуна, головка блоку циліндрів, система приводу, корпус коробки передач (рис. 1.6), зчеплення та інші важливі елементи [10].



а)

б)

Рисунок 1.6 – Деталі автомобіля: а) Корпус коробки передач автомобіля Renault Captur 2017 [11];

б) Фрезерування зовнішнього контуру корпусу коробки передач [12]

Контурне фрезерування на верстатах з ЧПК забезпечує низку переваг для автомобільної промисловості, включаючи швидкість, автоматизацію та повторюваність виробництва. Цей процес дозволяє автовиробникам не тільки швидко адаптуватися до змін у конструкції та вимогах до продукції, але й гарантувати високу якість і точність виготовлених деталей.

У сфері прототипування контурне фрезерування дозволяє створювати геометрично складні поверхні деталей з різноманітних матеріалів, як-от метали та пластмаси, що використовуються як усередині, так і ззовні автомобілів. Таке швидке прототипування є ключовим для розробки нових моделей, дозволяючи тестувати та вдосконалювати конструкцію перед початком масового виробництва.

Прикладом можуть слугувати прототипи, виготовлені з алюмінію литтям під тиском із подальшим застосуванням контурного фрезерування, як показано на рис. 1.7.



Рисунок 1.7 – Прототип автомобільної деталі [12]

Також, варто зазначити, що у сучасному світі виробництво товарів масового споживання та великих серій деталей неможливо уявити без використання прес-форм. Ці інструменти відіграють ключову роль у створенні предметів зі складною геометрією, що знайшли своє застосування в різних галузях промисловості: автомобільній, аерокосмічній, виробництві споживчих товарів, та інші.

Прес-форми розробляються з урахуванням специфічних цілей їх використання і можуть варіюватися за типом і призначенням. Серед найбільш розповсюджених можна виділити наступні [13]:

- компресійні прес-форми (англ. Compression molds): формують вироби з полімерів шляхом пресування, використовуються у виробництві різноманітних пластмасових деталей у багатьох галузях;

- прес-форми для гнуття (англ. Press mould): використовуються для формування деталей з листового метала (наприклад, кузови, двері, капоти), широко використовуються в автомобільній промисловості;
- форми для лиття під тиском (англ. Die casting): дають змогу отримувати високоточні деталі з металів і полімерів шляхом введення розплавленого матеріалу в форму під тиском;
- штампи для кування (англ. Forging Die): формують заготовку за допомогою удару й вимагають високої термічної та механічної стійкості.

Виготовлення таких штамів включає обробку матеріалів на верстатах з ЧПК до досягнення необхідної форми.

Під час чорнових операцій контурне фрезерування використовується для видалення значної кількості матеріалу за допомогою високопродуктивних режимів різання, формуючи при цьому ступінчасту структуру поверхні, що підготовлює форму для подальшої обробки.

На стадії чистових операцій цей процес дозволяє сформувати необхідні контури та домогтися високої точності прес-форми, що забезпечує високу якість кінцевого продукту.



а)

б)

Рисунок 1.8 – Контурне фрезерування форм для: а) лиття під тиском [14];
б) штампування [15]

1.2 Особливості контурного фрезерування

У роботі [16] розглянуто загальний підхід до контурного оброблення різними інструментами, зокрема фрезами та шліфувальними кругами. Основну

увагу приділено силовій взаємодії між інструментом та заготовкою, а також методам оптимізації процесу для досягнення високої продуктивності при збереженні якості обробленої поверхні.

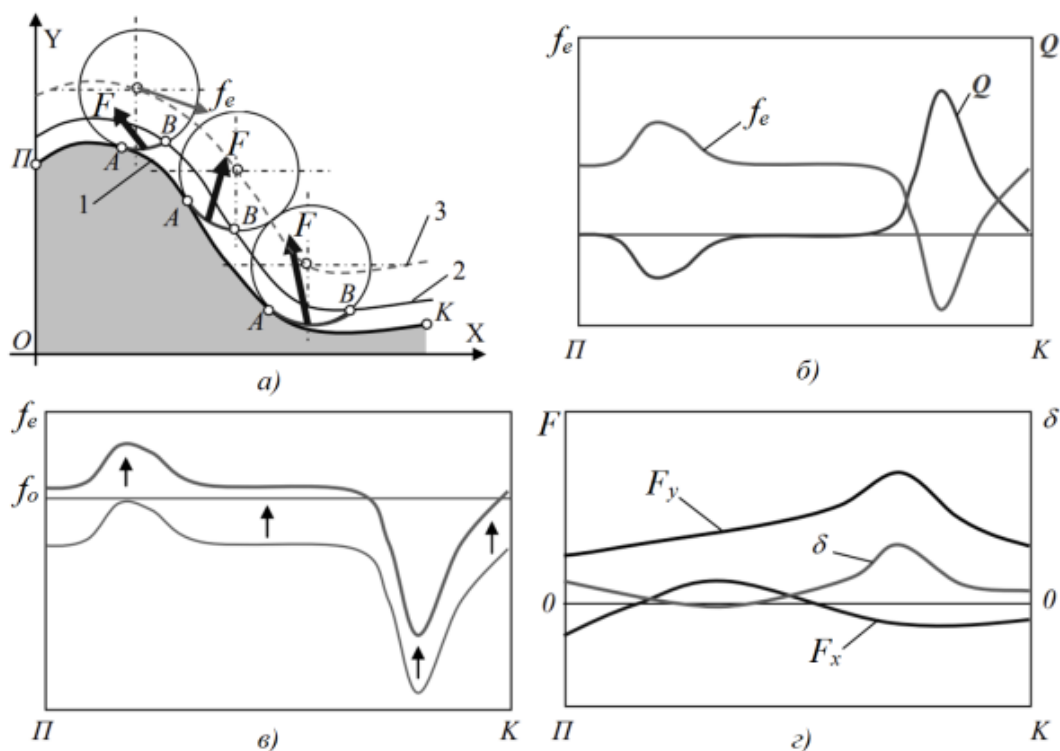


Рисунок 1.9 – Приклад управління при контурній обробці [16]

На (рис. 1.9, а) подано приклад контурного фрезерування з еквідистантним припуском (лінія 2) та траєкторією формоутворення 3. Автор застосовує механістичний підхід для оцінки силовій взаємодії між інструментом і заготовкою. Зміни довжини дуги контакту AB впливають на силу різання F у площині YOX , а швидкість видалення матеріалу Q змінюється залежно від місця інструмента на траєкторії (рис. 1.9, б).

Для стабілізації Q автор пропонує управляти подачею f_e вздовж еквідистант, що зменшує коливання характеристик різання. На (рис. 1.9, в) показано переведення цього закону подачі до оптимального рівня f_o , який мінімізує час обробки. Проте навіть після стабілізації швидкості видалення матеріалу сила різання лишається нестабільною через зміну напрямку вектору F та деформації в технологічній обробляючій системі, що потребує корекції траєкторії інструмента. Автор рекомендує багатокроковий підхід: спочатку

стабілізувати Q , далі зменшити час на операцію оптимізувавши режим різання і після цього забезпечити якість, ураховуючи жорсткість системи для зменшення похибки δ , що виникає при її деформації.

У [16] наведено послідовність технологічних рішень для збільшення продуктивності обробки різанням:

1. **Стабілізація умов різання:** підтримання стабільних умов різання є першочерговим завданням. Це включає забезпечення рівномірних параметрів процесу, таких як швидкість видалення матеріалу.

2. **Оптимізація процесу різання:** після стабілізації умов необхідно оптимізувати процес для мінімізації часу обробки. Це може включати корекцію швидкості різання та подачі для досягнення найкращої продуктивності без втрати якості.

3. **Корекція формоутворюючої траєкторії:** останнім кроком є корекція траєкторії руху інструмента, для забезпечення точності та якості оброблюваної поверхні, компенсуючи пружні деформації та інші впливи, які можуть призвести до похибок.

Таким чином, [16] робить важливий внесок у розуміння особливостей контурного фрезерування, пропонуючи практичні рекомендації для стабілізації та оптимізації процесу.

1.3 Методи управління процесами різання

Теорія автоматизованого управління виділяє два принципи дії (за помилкою, за збуренням) і три методи управління (апріорний, поточний, апостеріорний) [17]. Тому необхідно розглянути приклади їх застосування, як науковцями, так і розробниками САМ-систем та модулів до них:

Управління за апріорною інформацією. У [17, 18] описано метод, який базується на попередніх (апріорних) даних і не потребує втручання в роботу верстата (датчиків, контролерів). Порівняно з управлінням на основі поточної чи

апостеріорної інформації (що вимагають оперативних вимірювань або визначення жорсткості технологічної системи), такий підхід є простішим.

Метою управління за апіорною інформацією, наприклад, може бути стабілізація швидкості видалення матеріалу (MRR) [18].

У замкненій технологічній системі розглядають передатні функції процесу оброблення W_{np} і еквівалентної пружної системи W_{enc} . Використовуючи апіорні дані про заготовку, інструмент і траєкторію, задають бажану швидкість видалення матеріалу Q_{zl} , яку порівнюють із фактичною Q_ϕ (рис. 1.10) [18].

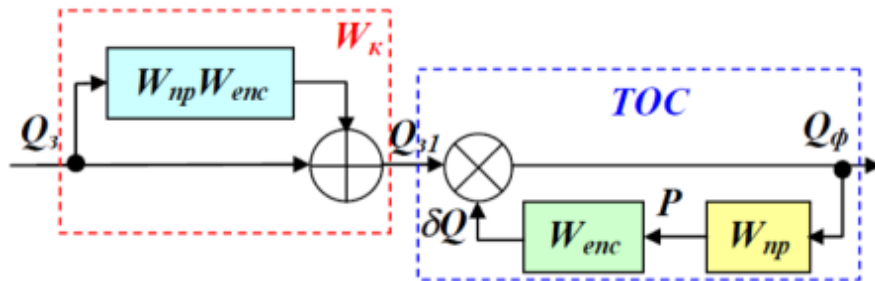


Рисунок 1.10 – Схема управління за апіорною інформацією [18]

Відповідно до схеми, маємо:

$$Q_\phi = Q_{zl} \frac{W_\kappa}{1 + W_{np}W_{enc}}. \quad (1.1)$$

Необхідно ввести коригуючий елемент із передатною функцією W_κ :

$$Q_{zl} = Q_z W_\kappa. \quad (1.2)$$

Підставляючи (1.1) у (1.2), отримуємо:

$$Q_\phi = Q_z \frac{W_\kappa}{1 + W_{np}W_{enc}}. \quad (1.3)$$

Щоб забезпечити $Q_\phi = Q_z$, приймається умова:

$$W_\kappa = 1 + W_{np}W_{enc} \quad (1.4)$$

Передатна функція (1.3) ілюструє з'єднання елементів на рис. 1.10. Для реалізації методу потрібен коригуючий елемент під час формування управляючої програми з урахуванням руху інструмента. Оскільки ця система керування розімкнена, результат залежить від точності апріорних даних [18].

Управління за поточною інформацією. Метод стабілізації процесу різання за поточними даними було апробовано ще у 1980-х [19], однак бракувало технічних ресурсів для промислового впровадження. Сучасний приклад – Omative System [19], де показники (наприклад, потужність двигуна шпинделя) фіксують у реальному часі, й відповідно коригують подачу. Завдяки цьому спершу задають постійну подачу, а в процесі різання вона збільшується, якщо навантаження менше очікуваного або навпаки. Система сумісна з ЧПК компаній Siemens, Fanuc, Heidenhain.

Схожий метод наведено в [18], де спеціально розроблений контролер слугував каналом зворотного зв'язку для адаптивного управління. Функціональна схема такої системи (рис. 1.11) передбачає використання певної змінної верстата (наприклад, потужності P) як цілі керування. Сама ж подача (F) автоматично коригується, щоб стабілізувати обраний параметр на заданому рівні під час оброблення [18].

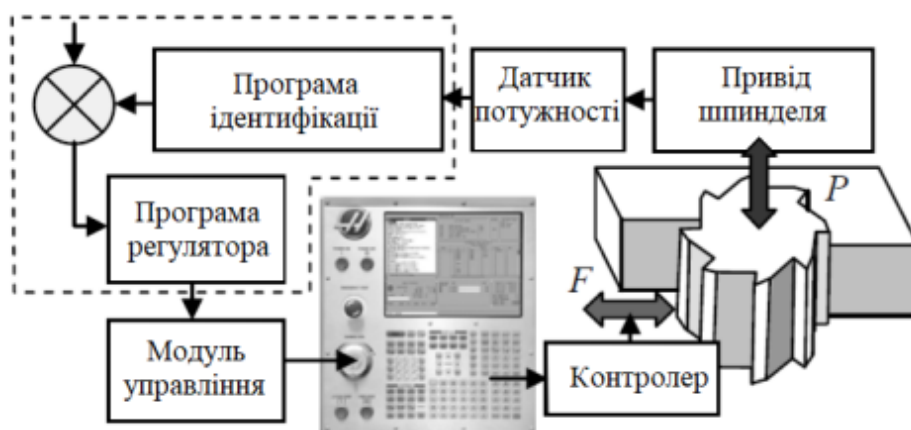


Рисунок 1.11 – Функціональна схема [19]

Блоки, виділені пунктиром, реалізовані у вигляді програмного забезпечення, яке взаємодіє з верстатом через стандартний інтерфейс, подібно до

ручного керування маховиком. Однак такий підхід вимагає втручання в будову верстата з ЧПК і має бути застосований до кожного верстату окремо, такий підхід є трудомістким та не універсальним.

Управління за апостеріорною інформацією. Такий метод здебільшого застосовують для підвищення точності завдяки корекції траєкторії формоутворення [18]. Головним чинником похибки на верстатах із ЧПК є деформація технологічної обробної системи (ТОС), тож у цьому підході визначають її вплив за підсумками вже виконаних операцій. Отримати точні дані про жорсткість ТОС безпосередньо під час оброблення складно, тому корекцію траєкторії виконують на основі вимірювань готових або частково оброблених деталей. Спрощені методи корекції «на радіус» тут не підходять [18, 20].

Структурна схема керування (рис. 1.12) на якому H_ϕ – фактична глибина різання, H_z – задана, H_{zl} – скорегована, δH – випадкова складова, δ – пружна деформація в еквівалентній пружній системі, що має передатну функцією W_{enc} , на яку діє відповідна складова P сили різання, що виникла в результаті процесу різання з передатною функцією W_{np} . В такій системі запізнення записується передатною функцією τ – час циклу, $be^{-\tau s}$, де b – коефіцієнт корекції, що включає в себе обробку та вимірювання деталі, s – оператор Лапласа [18].

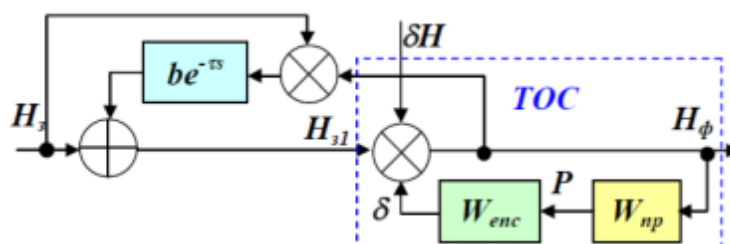


Рисунок 1.12 – Схема управління за апостеріорною інформацією [18]

Суть цього методу полягає в тому, що виміряну після оброблення координату H_ϕ порівнюють із заданою H_z (згідно з кресленням чи 3D-моделлю) через передатну функцію запізнення (1.5). На основі виявленої похибки коригують наступну позицію інструмента [20].

$$H_{zl} = (H_z - H_\phi)be^{-\tau s} + H_z \quad (1.5)$$

Такий метод можна реалізувати вручну або в автоматичному режимі [18]. Однак цей метод суттєво залежить від експериментальних даних, що робить його доволі витратним і трудомістким.

Із розглянутих методів управління процесом різання найдоцільнішим для оптимізації контурного фрезерування виявилось керування за апріорною інформацією. Цей підхід дає змогу визначити важливі параметри ще на етапі підготовки управляючої програми, беручи за основу відомі геометричні та технологічні характеристики. Завдяки цьому забезпечується оптимальний режим різання, що значно підвищує продуктивність і якість оброблення без потреби у додаткових датчиках чи складних вимірюваннях у процесі роботи.

1.4 Управління режимами різання для стабілізації процесу

Як відомо, контурне фрезерування виконується на верстатах з ЧПК по розроблених управляючих програмах в САМ-системах. Зараз всі САМ-системи здатні точно проєктувати геометричні траєкторії та перевіряти на відсутність необроблених ділянок чи потенційних зіткнень. Однак більшість з них не враховують динамічні зміни умов різання, які відбуваються при переміщенні фрези вздовж траєкторії формоутворення. Тому вибір режимів різання, таких як подача та швидкість різання, повністю лягає на плечі технолога-програміста. Цей підхід опирався на досвід технолога-програміста або рекомендації виробників інструментів, і не бере до уваги зміни умов різання по траєкторії формоутворення, особливо при формуванні складних поверхонь деталей. Зазвичай – це призводить до вибору режиму обробки, оптимального лише для “найгіршого випадку” на всій траєкторії, що негативно впливає на продуктивність обробки [21].

Неефективність такого підходу спонукає до розвитку нових технічних рішень, які б дозволяли автоматизувати налаштування режиму різання, виходячи з безпосередньо параметрів різання та особливостей оброблюваної поверхні.

Розробка систем, що дозволяють автоматично коригувати режим різання в залежності від змін у характеристиках процесу обробки, стала важливим напрямком у покращенні ефективності верстатів з ЧПК. Сучасні дослідження в цій сфері показують, що управління режимами різання (найчастіше подачею) може базуватися на трьох основних характеристиках процесу різання або їх комбінації:

Стабілізація швидкості видалення матеріалу (MRR). Швидкість видалення матеріалу (Material Removal Rate, MRR) є ключовою характеристикою продуктивності процесу різання. Чим вона вища, тим менше часу потрібно для завершення механічної обробки деталі. Ця характеристика визначає об'єм матеріалу, який видаляється за одиницю часу (зазвичай вимірюють у мм³/хв), і слугує показником ефективності обраного режиму різання. Цей показник (рис.1.13) включає складові режиму різання – хвилинну подачу (f) та параметри припуску: глибина (a_d) , ширина різання (a_w) [17, 18]:

$$MRR = a_d a_w f . \quad (1.6)$$

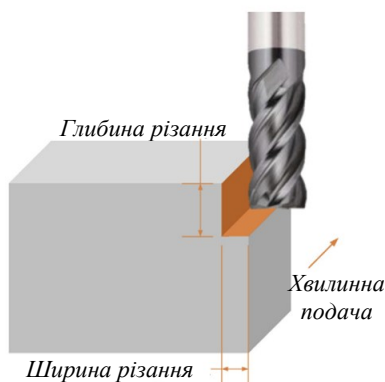


Рисунок 1.13 – Схема визначення швидкості видалення матеріалу (MRR) при фрезеруванні [17]

У дослідженні [24] запропоновано управління подачею в процесі фрезерування, засноване на моделюванні. Головною метою є збільшення продуктивності фрезерування через регулювання подачі на основі швидкості видалення матеріалу (MRR). Автори стверджують – це дозволяє знизити час

обробки майже в п'ять разів, зберігаючи стабільність сил різання. Основною перевагою цього методу є його здатність точно моделювати процес видалення матеріалу, враховуючи геометрію обробленої поверхні. Однак, недоліком є висока потреба в обчислювальних ресурсах та необхідність у подальшій валідації моделі на виробничих даних і те, що сили різання не мають лінійної залежності зі швидкістю видалення матеріалу (MRR), що може призвести до зниження якості утвореної поверхні.

Дослідження [25, 26] розкривають вплив управління подачею на стабілізацію швидкості видалення матеріалу (MRR) та силу різання, пропонуючи обмежити подачу для запобігання надмірно високим значенням сили різання. Автори представляють стратегію планування подачі для обробки поверхонь складної форми, спрямовану на підвищення продуктивності та покращення якості обробки.

Також вони порівнювали два підходи: управління подачею на основі швидкості видалення матеріалу (MRR) та сили різання. Управління подачею на основі цих підходів зображено на рис. 1.14, де 1 – управління подачею на базі швидкості видалення матеріалу (MRR); 2 – управління подачею на базі швидкості видалення матеріалу (MRR) з обмеженням по подачі за максимальною силою; 3 – управління подачею на базі сили різання; 4 – постійна подача. Експериментальні дослідження проведені в цих роботах показують значне зменшення часу на операцію обробки на 63%.

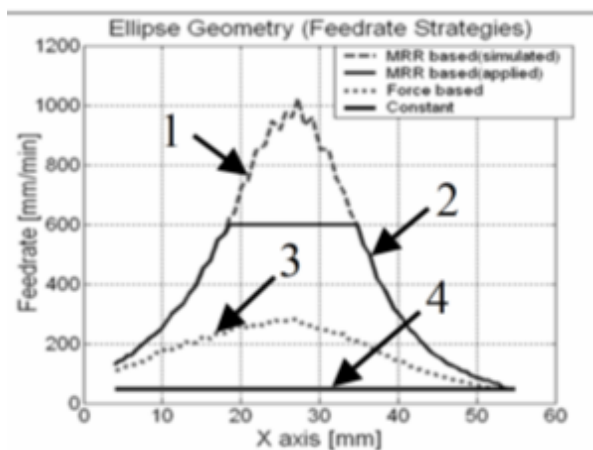


Рисунок 1.14 – Графік, що показує закони управління подачею [24, 25]

Автори відзначають, що управління подачею на основі швидкості видалення матеріалу (MRR) забезпечує найменший час обробки серед усіх розглянутих методів управління подачею. Однак цей підхід не завжди враховує всі фізичні властивості процесу різання, що може призвести до нестабільності сил різання під час обробки. Як приклад, наводяться утворені поверхні після застосування різних моделей управління подачею (рис. 1.15).

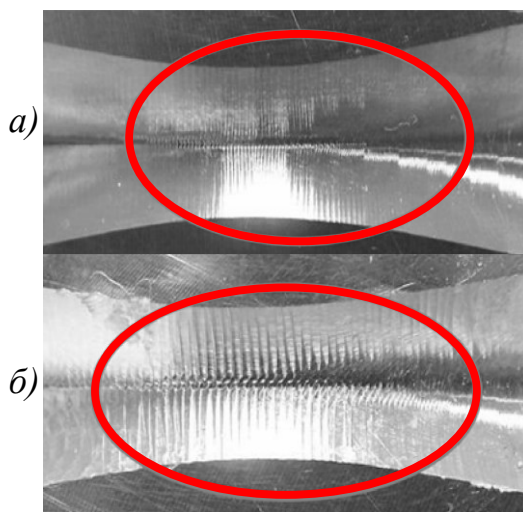


Рисунок 1.15 – Поверхня після обробки за різними моделями управління подачею: а) силою різання, б) швидкістю видалення матеріалу (MRR) [24]

Інше дослідження [27] представляє метод управління подачею для фрезерування відкритих поверхонь, що базується також на основі стабілізації швидкості видалення матеріалу (MRR). Метою цього дослідження є підвищення ефективності чорнового оброблення, забезпечення стабільності різання та високої ефективності видалення матеріалу.

Зазвичай для запобігання надмірно високих сил різання, які можуть призвести до швидкого зносу інструмента, вібрацій та низької якості утвореної поверхні, використовується постійна подача. Однак це знижує ефективність різання. Щоб вирішити цю проблему, автори пропонують регулювати подачу на основі аналогу швидкості видалення матеріалу (MRR), (площі контакту інструмента із заготовкою). За допомогою дискретного моделювання визначається площа контакту (рис. 1.16).

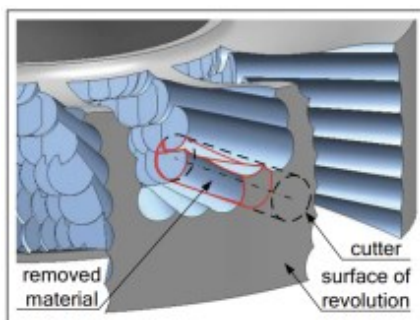


Рисунок 1.16 – Моделювання видалення матеріалу [27]

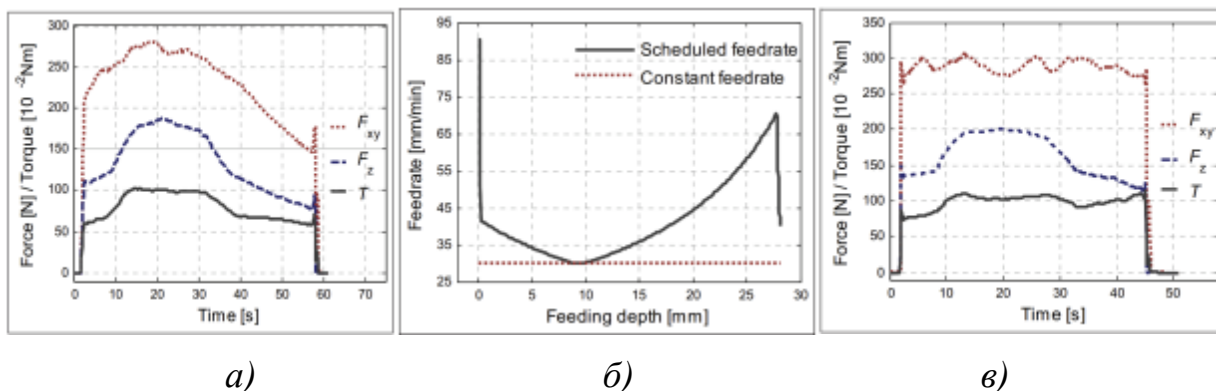


Рисунок 1.17 – Графіки: а) характеристика різання при постійній подачі; б) закон управління подачею; в) характеристика різання при управлінні подачею [27]

Експериментальні випробування показали (рис. 1.17), що запропонований метод управління подачею може зменшити час обробки на 23%. Хоча автори стверджують, що управління подачею призвело до стабілізації швидкості видалення матеріалу (MRR), можна спостерігати зміни сили різання і крутного моменту. Ці характеристики процесу різання та їх вплив на утворену поверхню не розглядаються в дослідженні.

Стабілізація сили різання. У роботі [25] розглядається стратегія планування подачі для обробки складних поверхонь, орієнтована на підвищення продуктивності та покращення якості. Автори пропонують метод управління подачею на основі сили різання (англ. Force-Based Feedrate Scheduling, FFS), який підтримує стабільність сили різання, регулюючи подачу залежно від її миттєвих значень.

В дослідженні сили різання знаходяться механістичним методом на основі геометрії при взаємодії фрези із заготовкою. Для сферичної фрези визначається

миттєва недеформована товщина стружки (рис. 1.18) за допомогою геометричного способу розробленого в дослідженні (1.7) [28]:

$$(t_c)_k = t_x \sin(\theta) \sin(\psi) \cos(\alpha) \pm t_x \cos(\psi) \sin(\alpha), \quad (1.7)$$

де $(t_c)_k$ – це товщина стружки (мм), t_x – подача на зуб (мм/зуб), θ – кут різання (град), ψ – кут положення ріжучого елемента (град), і α – кут нахилу (град).

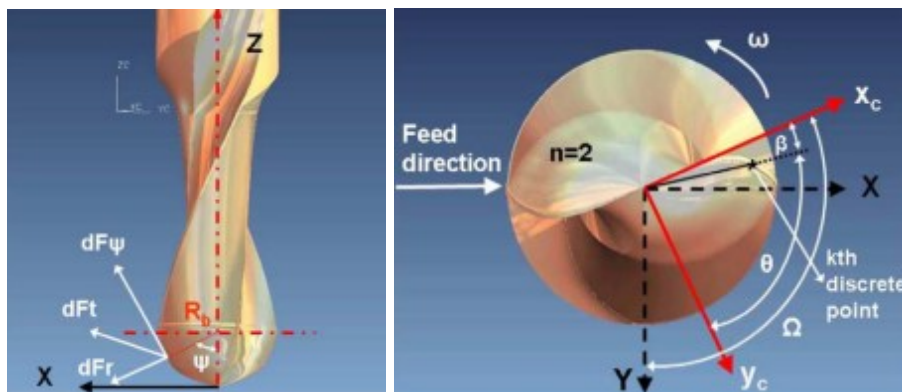


Рисунок 1.18 – Схема складових сили різання [25]

Площа контакту фрези із заготовкою визначається наступним чином (1.8):

$$dA_c = (t_c)_k (dz)_k. \quad (1.8)$$

З площі контакту dA_c (мм²) визначаються сили різання в радіальному, осьовому та тангенційному напрямках (r, ψ, t), наступним чином (1.9):

$$\begin{aligned} dF_r &= K_{rc} dA_c + K_{re} dz \\ dF_\psi &= K_{\psi c} dA_c + K_{\psi e} dz, \\ dF_t &= K_{tc} dA_c + K_{te} dz \end{aligned} \quad (1.9)$$

де $K_{rc}, K_{\psi c}, K_{tc}$ – це радіальні, осьові та тангенціальні коефіцієнти сил різання (Н/мм²), а $K_{re}, K_{\psi e}, K_{te}$ – це коефіцієнти сил на різальних кромках

відповідно (Н/мм²). Сили різання та коефіцієнти для різальних кромek визначаються за допомогою механістичної процедури калібрування, при якій ці коефіцієнти змінюються вздовж осі інструмента.

Звідси розраховуються сили різання по осям X, Y, Z (1.10):

$$\begin{bmatrix} dF_X \\ dF_Y \\ dF_Z \end{bmatrix}_{k,n} = A \begin{bmatrix} dF_r \\ dF_\psi \\ dF_t \end{bmatrix}_{k,n}, A = \begin{bmatrix} -\sin(\psi)\sin(\theta) & -\cos(\psi)\sin(\theta) & -\cos(\theta) \\ \sin(\psi)\cos(\theta) & \cos(\psi)\cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \end{bmatrix}_{k,n}. \quad (1.10)$$

Регулювання подачі здійснюється за допомогою формули (1.11):

$$f_{lim,i} = (F_{lim,i} - F_{1,i}) \frac{f_2 - f_1}{F_{2,i} - F_{1,i}} + f_1, \quad (1.11)$$

де $i=1,2...C$, C – загальна кількість точок на які поділена траєкторія інструмента, f_1 – початкова постійна подача, (мм/хв); f_2 – будь-який цілий множник f_1 , щоб отримати лінійне співвідношення для i -ої точки траєкторії. F_1 – максимальна результуюча сила, (Н) при подачі f_1 , F_2 – максимальна результуюча сила (Н) при подачі f_2 , $f_{lim,i}$ отримується, як нова запланована подача для i -ої точки траєкторії. Такий підхід дозволяє стабілізувати силу різання за допомогою управління подачею та зменшити час операції (рис. 1.19).

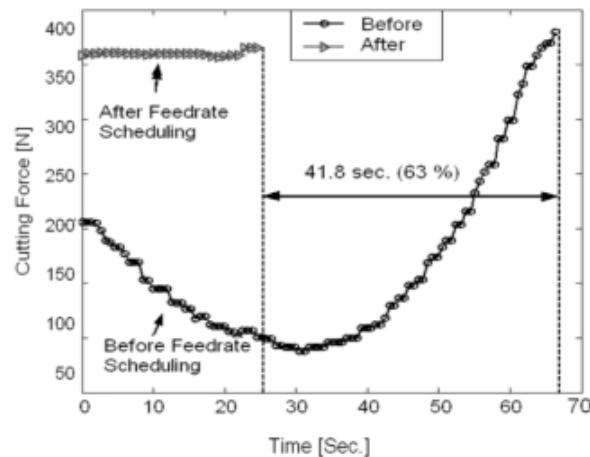


Рисунок 1.19 – Порівняння сил різання та часу обробки до і після регулювання подачі [25]

У наступному дослідженні [26] автори розширили свої результати, представлені в роботі [25], додавши до математичної моделі прогнозування сил різання моделі деформацій інструмента, за допомогою якої передбачають вплив вібрацій на утворену поверхню після фрезерування складних форм. Вони також продовжили використовувати FFS для зниження пікових навантажень і стабільного процесу обробки за силою різання.

У дослідженні [29] дослідники розробили математичну модель для прогнозування сил різання під час п'ятиосьового фрезерування сферичною фрезою. Ця модель дозволяє з високою точністю визначати область взаємодії інструмента з матеріалом і прогнозувати відповідні сили різання на основі методу граничного (англ. Boundary representation) моделювання. Хоча модель є ефективною з точки зору обчислювальної потужності, вона не передбачає стратегії управління подачею, що могло б стабілізувати процес і скоротити час обробки.

На основі результатів цього дослідження, у роботі [30, 31] була представлена покращена методика управління подачею для чорнкової обробки складних поверхонь у п'ятиосьовому фрезеруванні для деталі типу імпелер. Ця методика дозволяє регулювати подачу для кожного кадру управляючої програми, що призводить до зниження часу обробки порівняно з постійною подачею (рис. 1.20).

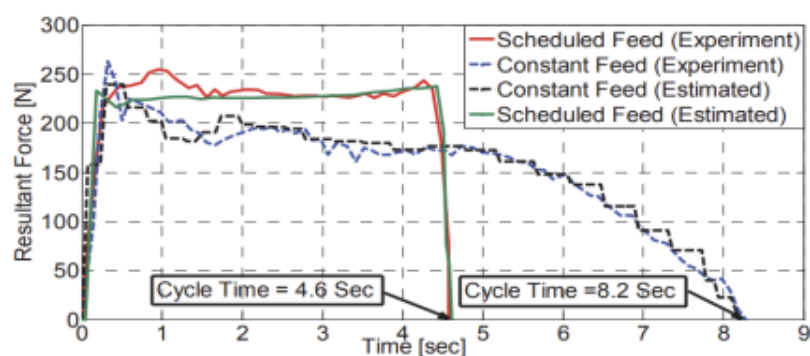


Рисунок 1.20 – Виміряні та змодельовані зусилля різання для постійної та запланованої подачі [31]

Проте, автори відзначають, що використання лише сили різання, як основного параметра для управління подачею може обмежувати потенціал зменшення часу операції, оскільки швидкість видалення матеріалу (MRR) є ключовим фактором продуктивності. Це підкреслює необхідність комплексного підходу, який би враховував як сили різання, так і швидкість видалення матеріалу (MRR).

У дослідженні [32] представлено комплексну стратегію управління подачею, для підвищення продуктивності, що враховує динамічні обмеження приводів верстату та механіку процесу різання (рис. 1.21). Використання моделі взаємодії інструмента та заготовки дозволяє підвищити точність прогнозування сил різання і за допомогою управління подачею на основі FFS скоротити час операції на 16%.

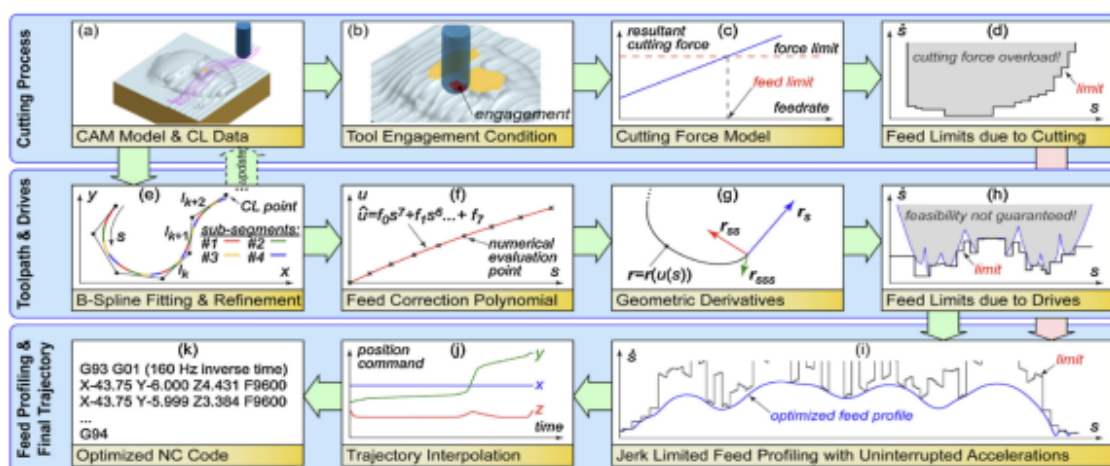


Рисунок 1.21 – Загальна схема управління подачею[32]

Хоча метод є ефективним, проте застосування FFS замість швидкості видалення матеріалу (MRR) викликає сумніви. Оскільки швидкість видалення матеріалу (MRR) є ключовою характеристикою продуктивності процесу різання.

Схожий підхід моделювання обробки на основі вокселів для деталі типу імпелер був використаний у роботі [33]. Також в цій роботі автори додали обмеження на максимально можливу подачу. Це дозволило дослідникам досягти подібних результатів скорочення часу на обробку на 16,2% – що підтверджує працездатність аналогічного методу запропонованого в [30, 31].

Інше дослідження [34] стабілізує процес обробки складних форм за допомогою управління режимами різання (обертами шпинделя та подачею). Завдяки цьому вдалося досягти стабільності сил різання. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність цього методу для підвищення стабільності процесу фрезерування складних контурів. Однак не зрозуміло, як таке управління режимом різання впливає на якість отриманої поверхні, стійкість інструмента та виробниче обладнання.

Дослідники в роботі [35] впровадили обмеження в свій метод управління подачею, подібно до [30]. У їхній системі, яка називається «Розумна система обробки» (англ. Smart Machining System), управління подачею базується на контролі сили різання. Максимальна та мінімальна сили різання використовуються як обмеження: якщо сила різання перевищує порогове значення, подача зменшується, а якщо сила нижча необхідної, подача збільшується для мінімізації часу обробки (див. рис. 1.22).

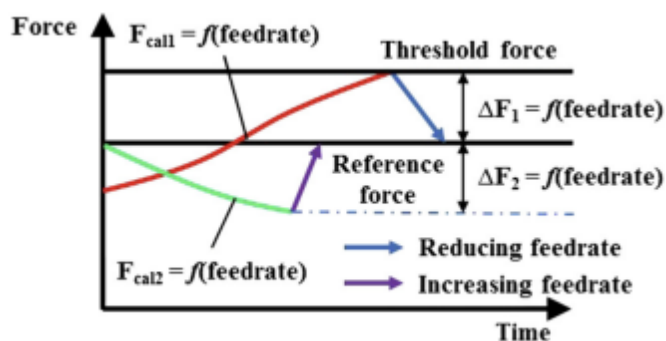


Рисунок 1.22 – Схема управління подачею при використанні обмежень на силу різання [30]

Цей підхід також спрямований на зменшення часу обробки та підвищення ефективності, що показали експериментальні результати, де час обробки було знижено на 26%.

Стабілізація потужності різання. Основною метою [36] є підвищення ефективності фрезерування через стабілізацію потужності шпинделя. Розроблена модель прогнозує потужність й регулює подачу так, щоб утримувати потужність

у межах $\pm 10\%$ від певного цільового значення. Це підвищило продуктивність обробки на 26,88% (рис. 1.23) у порівнянні з фрезерування з постійною подачею.

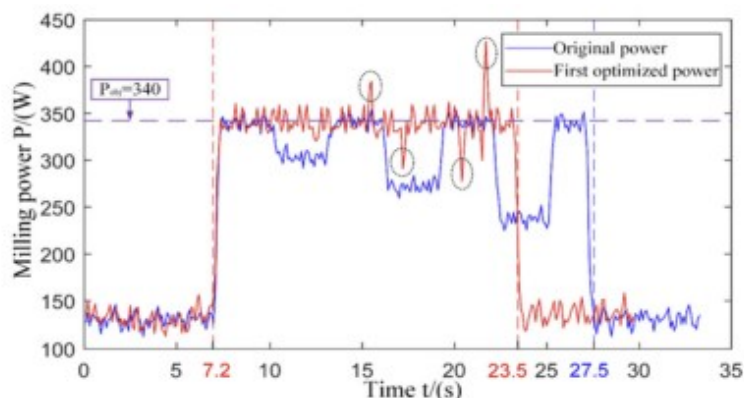


Рисунок 1.23 – Потужність різання при різних законах управління подачею [36]

Однак оброблювана поверхня не мала криволінійних ділянок контуру, а тільки різкі зміни припуску. Тому цей метод потребує подальшого доопрацювання.

У [37] описано управління процесом фрезерування із використанням штучної нейронної мережі (ANN), яка передбачає потужність різання з урахуванням глибини, ширини, подачі й швидкості різання. Система автоматично регулює подачу, запобігає перевантаженню інструмента й дає змогу скоротити час обробки, хоча й не враховує зміни параметрів процесу різання при обробці складних контурів.

Висновок. Аналіз робіт свідчить, що найефективнішим способом підвищити продуктивність контурного фрезерування є стабілізація швидкості видалення матеріалу (MRR) на максимально можливому рівні, оскільки цей параметр безпосередньо характеризує продуктивність. Стабілізація за силою різання дає менше зростання продуктивності, зате забезпечує стаке навантаження на інструмент та кращу якість обробленої поверхні (зменшуються вібрації та прогин інструмента). Стабілізація потужності різання теж не гарантує повної стабільності сили через нелінійні залежності, проте сприяє енергоефективності.

1.5 Аналіз провідних CAM-систем і їх модулів

Розуміючи необхідність управління процесом різання, провідні технологічні компанії розробили програмні продукти які, як стверджується, можуть автоматично визначати оптимальні режими різання. Проте, їхні можливості все ще мають певні обмеження. Зокрема, ці програми залежать від досвіду інженера-технолога та ручного введення ним параметрів обробки, часто не враховуючи змінні умови різання при обробці складних контурів, що не дозволяє досягти максимально можливої швидкості видалення матеріалу (MRR).

Крім того, більшості з цих програм бракує геометричних процедур для отримання важливої інформації для моделювання, а також механістичних силових моделей, необхідних для прогнозування фізичних характеристик і подальшому виборі режиму різання.

Вище наведені проблеми намагаються вирішити наступні CAM-системи і їх модулі:

– Модуль Vortex у складі Autodesk PowerMILL створює трохоїдальні траєкторії, щоб підтримувати заданий кут різання [38]. Розробники заявляють про скорочення часу обробки на 60% і збільшення стійкості інструмента завдяки тому, що на прямолінійних ділянках кут змінюється від 46° і може доходити до 91° на внутрішніх контурах (рис. 1.24) [19]. Це дає змогу збільшувати подачу та глибину різання (згідно з рекомендаціями виробників) [39].

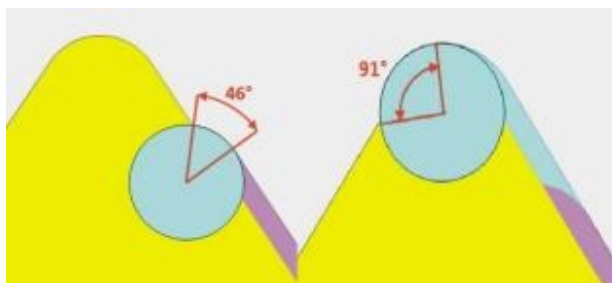


Рисунок 1.24 – Зміна кута різання при обробленні контуру деталі [19]

Якщо кут перевищує 91° , стратегія переходить на трохоїдальну траєкторію, що зазвичай застосовується у чорновій обробці й дає високу

швидкість видаленого матеріалу (MRR), зберігаючи кут різання у межах 46° – 91° [40]. Проте стабілізація кута не гарантує стабільності сили та потужності різання, оскільки між кутом і силою різання немає пропорційної залежності. Крім того, трохоїдальні переміщення можуть погіршувати шорсткість поверхні, а деякі верстати не здатні реалізувати такі траєкторії через обмеження приводів.

Для пристосування алгоритму до конкретних верстатів було створено Machine DNA [40], яка після динамічних випробувань надає дані для трохоїдальної траєкторії й рекомендує режим різання.

Використання значної кількості програмних продуктів для створення управляючих програм, а також їх недосконалість істотно ускладнюють практичне використання пропонованої технології.

– Vericut (CGTech, США) перевіряє G-коди на віртуальному верстаті, виявляючи можливі помилки та зіткнення інструмента [41]. Модуль OptiPath керує подачею, спираючись на принцип «чим більший об'єм видаленого матеріалу, тим менша подача», розбиваючи траєкторію з управляючої програми на сегменти й призначаючи для них нові значення подачі (рис. 1.25). Так зберігається оригінальна траєкторія інструмента.

Однак алгоритми OptiPath залишаються закритими, а опублікованих даних про його ефективність недостатньо для повної оцінки. До того ж програмне забезпечення не накладає додаткових обмежень (на максимальну силу різання, потужність, стійкість інструмента, тощо), тож повна безпека й відповідність виготовленої деталі конструкторським вимогам не гарантовані [19].

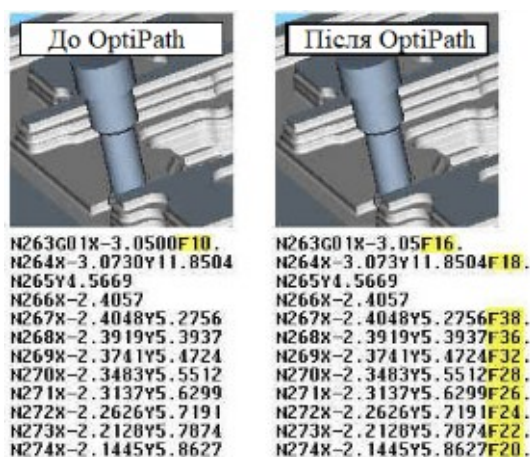


Рисунок 1.25 – До застосування OptiPath та після [41]

– Технологія iMachining реалізована в CAM-системах Siemens NX, SolidCAM [42] та формує складні морфінг-спіралі (рис. 1.26), відмінні від трохіодальних траєкторій Vortex. Стверджується, що такий підхід підвищує швидкість видалення матеріалу (MRR) та збільшує стійкість інструмента завдяки автоматичному регулюванню подачі для збереження допустимих кутів різання в діапазоні від 10° – 80° [43].



Рисунок 1.26 – Траєкторії руху інструмента морфінг спіралі [43]

Майстер-модуль iMachining враховує матеріал заготовки й характеристики верстата, базуючись на апіорній інформації про жорсткість технологічної системи (рис. 1.27) [19].

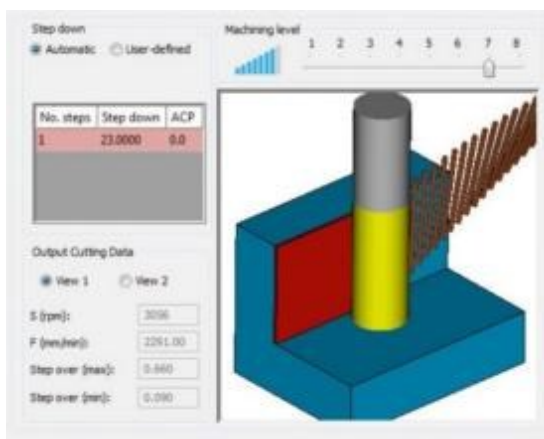


Рисунок 1.27 – Майстер-модуль iMachining [42]

Для досягнення оптимальних результатів передбачено вибір одного з декількох рівнів жорсткості, що потребує експериментальної перевірки. На практиці це може збільшити продуктивність [21], утім виключно стабілізація кута різання не забезпечує рівномірної сили та потужності, адже сила різання не є прямопропорційною куту. Крім того, морфінг траєкторії часом погіршують шорсткість, а деякі верстати не можуть виконувати подібні переміщення через технічні обмеження приводів.

– FeatureCAM від Autodesk [44] використовує простий підхід до управління подачею: моделювання траєкторії руху фрези для вимірювання навантаження на інструмент (сили різання) та вирівнювання цього навантаження шляхом регулювання подачі. На графіку праворуч, біла лінія відображає початкове навантаження на інструмент, а чорна лінія показує силу різання після коригування подачі [45], як показано на рис. 1.28.

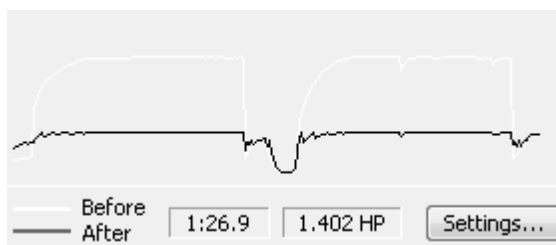


Рисунок 1.28 – Графік сили різання в програмному продукті FeatureCAM [45]

Розробники заявляють, що це управління дозволяє стабілізувати силу різання на траєкторії формоутворення, зменшити знос, як інструмента, так і

верстата, а також налаштувати подачу індивідуально для кожного кадру. Однак, використання сили різання, як критерію для управління подачею, не забезпечує максимальної продуктивності процесу різання в порівнянні з підходами, що базуються на використанні швидкості видалення матеріалу (MRR) [45].

– VegaCNC DATA-Optimize [46] – це програмне забезпечення, яке управляє режимами різання на основі швидкості видалення матеріалу (MRR) і одночасно адаптує управляючу програму до динаміки приводів верстата. Використовуючи процес «3D-векторного аналізу», програма створює нову управляючу програму базуючись на характеристиках приводів верстату, що забезпечують плавну роботу верстата та високу точність позиціонування. На рис. 1.29 траєкторія руху інструмента має різний колір, червоний символізує кадр управляючої програми з найменшою величиною подачі, тоді як синій кадр з найбільшою [45].

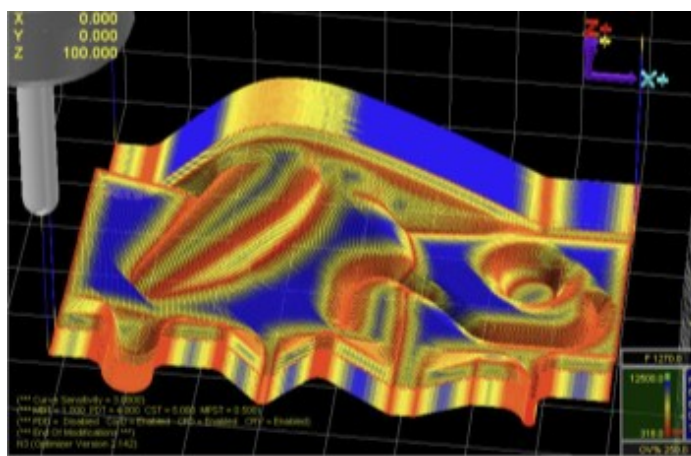


Рисунок 1.29 – Інтерфейс VegaCNC DATA-Optimize [47]

Хоча запропонований програмний продукт використовує обмеження, для створення управляючих програм, він не враховує таких характеристик процесу різання, як сила різання. Що може призвести до дефектів утвореної поверхні навіть з використанням динамічних обмежень верстата.

– Formtec NCSpeed [48] – це програмна система для моделювання та перевірки три та п'яти координатної обробки, що покращує процес різання з точки зору зменшення часу на операцію та безпеки. Програма дозволяє

верифікувати і перевіряти траєкторію руху фрези. Використовуючи моделювання для аналізу процесу різання, модуль NCSpeed розраховує об'єм матеріалу, який видаляє ріжучий інструмент, і відповідно регулює подачу: чим більше матеріалу, тим повільніша подача, і навпаки. Так, на рис 1.30 показана траєкторія руху інструмента, різні кадри на ній виділені різними кольорами, що відповідає назначеним подачам, червоний колір – в кадрі буде використовуватись максимально можлива подача, тоді як при синьому, подача буде значно знижена [45].

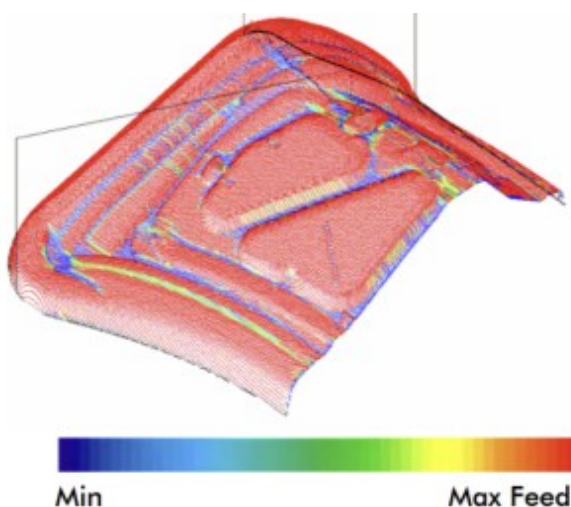


Рисунок 1.30 – Інтерфейс Formtec NCSpeed [49]

Недоліком є те що програма не визначає сил різання та немає необхідних обмежень для виготовлення поверхонь виробу відповідно до конструкторських вимог.

– BobCAD-CAM [50] головним чином зменшення часу на операцію механічної обробки здійснюється за рахунок прискорення холостих рухів на максимально можливі подачі. Також подача під час різання регулюється, щоб тримати швидкість видалення матеріалу (MRR) на певному рівні [45].

Хоча розробники заявляють про можливість управління подачею, не зрозуміло, як вони визначають певний рівень швидкості видалення матеріалу (MRR), і як таке управління подачею впливає на силу різання і якість утворених поверхонь.

– Predator CAM-система [51] використовує спосіб твердотільного

модельовання та булеві операції для більш точного визначення кількості знятого матеріалу. Це дозволяє визначити швидкість видалення матеріалу (MRR) при постійній подачі, а потім створити новий закон управління подачею, що дасть можливість тримати значення швидкості видалення матеріалу (MRR) на певному рівні при обробці [45].

Однак, незважаючи на те, що програма управляє подачею на основі швидкості видалення матеріалу (MRR), вона не враховує додаткові обмеження, на шорсткість утвореної поверхні або її точність обробки, максимальну силу різання, стійкість інструмента. Це може призвести до невідповідності отриманих виробів заданим конструкторським вимогам.

– VISI Machining 3D [52] і NCG CAM [53] уповільнює подачу при вході фрези в область, в якій збільшується об'єм видаленого матеріалу – це дозволяє інженеру-технологу назначати більш продуктивні режими різання для всієї траєкторії формоутворення [45].

Однак, зрозуміло, що уповільнення подачі не призведе до збільшення продуктивності процесу різання, хоча і вирішує деякі з проблем створення та використання управляючих програм на верстатах з ЧПК.

Висновок. Існуючі САМ-системи та їх модулі мають обмеження: не всі враховують зміни умов різання (швидкість видаленого матеріалу, сила різання) й значною мірою покладаються на досвід інженера-технолога. Хоча деякі системи підвищують продуктивність, їм бракує математичних моделей для стабілізації показників процесу різання. Створення моделі для визначення та регулювання швидкості видалення матеріалу (MRR) дасть змогу автоматизувати стабілізацію й подальшу оптимізацію процесу різання, зменшити роль людського фактору й підвищити продуктивність.

1.6 Оптимізація процесу контурного фрезерування

У сучасному машинобудуванні оптимізація процесів механічної обробки є однією з ключових задач, що сприяє підвищенню ефективності виробництва та

якості кінцевої продукції. Особливої важливості набувають дослідження зосереджені на оптимізації процесів обробки, зокрема контурному фрезеруванні, які визначають успіх в обробці складних деталей. Попри значні досягнення науковців у вдосконаленні методів управління процесами різання й стабілізації фрезерування, а також провідних технологічних компаній у розробленні САМ-систем, досі залишаються важливі невирішені питання щодо вибору оптимальних параметрів обробки. Однією з ключових проблем є необхідність розробки методів, які дозволяють автоматизувати процес оптимізації, мінімізувати вплив випадкових збурень і забезпечити стабільні умови обробки [17].

Постановка задачі оптимізації та критерії

Загалом під задачею оптимізації розуміють пошук найкращого розв'язку серед усіх можливих за одним чи кількома критеріями (для їх мінімізації або максимізації). У контексті фрезерування найчастіше критерії охоплюють продуктивність [63, 66, 69, 72, 74-79], стійкість інструмента [55, 58, 70], шорсткість обробленої поверхні [57-58, 69-70, 74, 79-80] та енергоефективність [59, 73, 77]. Як правило, дослідники включають у цільову функцію такі параметри, як подача, швидкість різання, глибина й ширина різання [55, 58-59, 66, 69-70, 73-74, 77].

Задачу можна формулювати, як однокритеріальну або багатокритеріальну. У першому випадку акцент робиться на досягненні найліпшого значення одного показника, нехтуючи іншими (наприклад, максимізація швидкості видалення матеріалу або мінімізація зносу інструмента). Прикладами однокритеріального підходу слугують [55, 57-59, 66, 69, 75-76], де кожна робота фокусується виключно на одному факторі. Натомість у багатокритеріальному формулюванні [37, 56, 60-62, 67-68, 70, 72-74, 77-80] доводиться одночасно враховувати кілька показників, що ускладнює пошук компромісів.

На практиці досить поширеним є однокритеріальний підхід із максимізацією обсягу зняття припуску (MRR), тоді як шорсткість, знос інструмента чи витрати енергії розглядають як обмеження. Якщо потрібне

одночасне поліпшення кількох характеристик, застосовують багатокритеріальні методи, які знаходять компроміс між різними вимогами.

Основні критерії в оптимізації фрезерування:

– Продуктивність. У працях [66, 69, 75-76] основу становить збільшення швидкості видалення матеріалу. Але у багатокритеріальних дослідженнях [37, 56, 60-63, 67-68, 72-73, 77-80] значне підвищення продуктивності потребує компромісів із такими показниками, як стійкість інструмента чи витрати енергії. Найчастіше цей критерій є найдоцільнішим саме в однокритеріальних задачах за наявності додаткових обмежень.

– Шорсткість обробленої поверхні (R_a). У роботах [57-58, 69, 71] мінімізується R_a як єдиний критерій, тоді як [70, 74, 79-80] поєднують його із зносом інструмента та швидкістю видалення матеріалу (MRR). Головний недолік R_a як критерію полягає в тому, що шорсткість зазвичай задана конструктором, тож її не завжди потрібно мінімізувати до граничних значень. Тому раціональніше вважати R_a обмеженням під час формулювання задачі оптимізації.

– Стійкість інструмента. У [55] це єдиний критерій, тоді як [70] додатково враховують шорсткість поверхні й продуктивність. На виробництві інструмент часто розглядають крізь призму обмеження (уникнення надмірного зносу), а не як самостійний критерій, що нерідко призводить до звуження поля пошуку за іншими показниками.

– Енергоефективність. У [58] основний критерій – мінімізація електроспоживання, а в [60-62, 73, 77, 79] її поєднують із продуктивністю й якістю поверхні. Втім, сукупне використання енергоефективності з продуктивністю є суперечливим, адже зменшення електроспоживання зазвичай негативно впливає на швидкість обробки, що зрештою підвищує собівартість. Тому енергоефективність доцільніше розглядати як обмеження, щоб не перевищувати конструктивні ліміти електродвигуна шпинделя чи приводів подачі.

Обмеження в задачах оптимізації

Згідно з аналізом дослідженнями [58, 62, 68, 75, 78], при формуванні задачі оптимізації фрезерування необхідно враховувати: потужність обладнання, максимально допустиму силу різання, стійкість інструмента, вимоги щодо шорсткості поверхні, конструктивні особливості верстата.

Порушення цих обмежень здатне призвести до надмірного зносу інструмента, пошкодження обладнання й погіршення якості виробу.

Сучасні методи вирішення задач оптимізації

Оптимізація фрезерування є критичною для забезпечення високої продуктивності й належної якості в машинобудуванні. Існують різні підходи, що дають змогу зменшувати енерговитрати, покращувати точність та мінімізувати зношування інструмента.

1. Штучні нейронні мережі (ANN). Ефективно розв'язують складні нелінійні задачі, моделюючи залежності між основними параметрами (подача, швидкість різання тощо) та результатами (шорсткість, сили різання). У [37] ANN використано для багатокритеріальної оптимізації чорнового фрезерування, у [54] – для прогнозування сили різання та керування подачею, а в [55], [56] – для зменшення зношування й енергоспоживання. Дослід [57] демонструє поєднання ANN із генетичними алгоритмами (GA) для розширення пошуку глобальних оптимумів. Недолік полягає в потребі великих об'ємів даних, ризику перенавчання й складному налаштуванні.

2. Генетичні алгоритми (GA). Наслідуючи еволюційні механізми, вони добре працюють у багатокритеріальних задачах і допомагають уникати локальних екстремумів. У [57] GA поєднали з ANN для мінімізації R_a , у [58] – оптимізували високошвидкісне сухе фрезерування з меншим енергоспоживанням, у [59] використовуючи NSGA-II поліпшили енергоефективність за певного зниження продуктивності, а в [60] знайшли баланс між економічною вигодою та продуктивністю. Дослід [61] використав GA для оптимізації енергоспоживання, шорсткості й продуктивності, а в [62]

зменшили викиди вуглецю. GA вимагають значних обчислювальних ресурсів і часу.

3. Метод Бокса-Вілсона (RSM). Методологія відгукової поверхні (Response Surface Methodology) – це статистичний підхід для моделювання взаємозв'язків між параметрами та результатами. У [63] його застосували для покращення швидкості видалення матеріалу під час обробки сталі AISI P20, у [64] – для енергоефективності. Робота [65] інтегрує RSM із методом Тагучі, досягаючи зниження витрат при збереженні якості, а [66, 67] беруть до уваги багатокритеріальну оптимізацію сил різання, швидкості, енергоспоживання й точності. Недолік RSM – необхідність у низці експериментів, що збільшує витрати.

4. Лінійне програмування та комбіновані алгоритми. Лінійне програмування ефективне, якщо цільова функція й обмеження мають лінійну форму (наприклад, мінімізація витрат або максимізація продуктивності). У складніших випадках застосовують гібридні методи (PSO, ANFIS тощо). У [65] поєднали метод Тагучі, RSM та PSO для мінімізації енерговитрат, у [68] розробили модель, що розраховує силу різання та оптимізує швидкість і подачу, а в [64] задіяли лінійне програмування, аби знизити енерговитрати без помітної втрати якості.

Перевагою лінійного програмування є його простота, ефективність та можливість оптимізації на основі моделювання процесу різання, що суттєво економить час і ресурси. У той же час комбіновані алгоритми, незважаючи на свою здатність вирішувати складні нелінійні задачі, часто вимагають великих обсягів експериментальних даних та є складнішими у впровадженні. Це ускладнює їх використання у виробничих умовах, де критично важливими є простота застосування, оперативність та економічна ефективність. Таким чином, для оптимізації процесів фрезерування в промисловості доцільніше використовувати лінійне програмування, яке забезпечує необхідну ефективність при менших вимогах до кількості даних.

1.7 Висновки, мета і задачі дослідження

За результатами проведеного аналізу літературних джерел, присвячених контурному фрезеруванню на верстатах з ЧПК, встановлено, що цей процес залишається важливою складовою у виготовленні деталей зі складною геометрією, особливо в таких галузях, як аерокосмічна, автомобільна, машинобудівна, а також у виробництві прес-форм, де вимагається висока точність та якість поверхонь отриманих деталей.

Роботи дослідників у сфері стабілізації показують необхідність застосування обмежень для врахування всіх необхідних конструкторських вимог оскільки сама стабілізація процесу різання за швидкістю видаленого матеріалу, силі чи потужності різання не призведе до збільшення продуктивності чи покращення якихось параметрів виготовленої деталі. В свою чергу існуючі САМ-системи здатні проєктувати геометричні траєкторії та перевіряти на відсутність необроблених ділянок, але не враховують динамічні зміни умов різання, що знижує продуктивність. Навіть в передових САМ-системах, як правило відсутнє моделювання процесу різання, або не враховуються конструктивні чи технологічні обмеження.

Це призводить до необхідності розробки нових підходів до стабілізації процесу різання та автоматизації призначення режиму різання. Доцільно для такої стабілізації використовувати метод управління різанням на основі апріорної інформації. Це передбачає моделювання, для якого необхідно врахувати відомі геометричні параметри деталі, інструмента і призначений режим різання. Основною характеристикою процесу різання є швидкість видалення матеріалу (MRR), яка включає всі енергетичні показники – силу, потужність, температуру тощо. Тому доцільно стабілізувати саме за цією характеристикою.

Після стабілізації процесу за швидкістю знімання матеріалу (MRR), логічним, наступним етапом є оптимізація процесу для подальшого підвищення продуктивності. Розглянуті методи вирішення задач оптимізації, такі як нейронні мережі, генетичні алгоритми, метод Бокса-Вілсона, а також комбіновані

алгоритми, мають свої переваги, але не завжди підходять для розв'язання задач динаміки для процесу контурного фрезерування. Їх основні недоліки полягають у складності реалізації, обмеженнях у практичному застосуванні та недостатній ефективності при врахуванні динамічних змін у процесі обробки. Оскільки, метод лінійного програмування позбавлений вище наведених недоліків його доцільно використовувати для розв'язку задачі оптимізації.

При формуванні задачі оптимізації слід використовувати критерій продуктивності, тобто мінімізувати час фрезерної операції. Також задача має бути сформульована, як однокритеріальна для уникнення компромісних рішень між конкуруючими критеріями.

Додатково, створення прикладної програми забезпечить автоматизацію процесу стабілізації та оптимізації процесу контурного фрезерування, що значно підвищить продуктивність та спростить практичне впровадження.

Виходячи з результатів аналізу літератури була сформульована мета і задачі досліджень.

Мета роботи – розроблення методики і програмних засобів для стабілізації та оптимізації процесу контурного фрезерування на верстатах з ЧПК, що дасть змогу збільшити продуктивність фрезерної операції та забезпечить дотримання конструкторських вимог до виробу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

- Розробити математичну модель, що дасть можливість моделювати процес контурного фрезерування та визначати характеристику – швидкість видалення матеріалу (MRR);
- Розробити спосіб стабілізації швидкості видалення матеріалу (MRR) для процесу контурного фрезерування;
- Сформулювати задачу оптимізації для підвищення продуктивності процесу контурного фрезерування з урахуванням необхідних обмежень;
- Розробити алгоритми та прикладні програми;
- Провести експериментальну апробацію отриманих результатів.

РОЗДІЛ 2

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТУРНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ

2.1 Передумови моделювання процесу контурного фрезерування

Контурне фрезерування виконується на верстаті з ЧПК за управляючою програмою, розробленою в будь-якій САМ-системі. Таким чином, вихідними даними для моделювання, стабілізації та подальшої оптимізації процесу різання є управляюча програма в G-кодах. Основою створення нової управляючої програми, яка враховує стабілізацію швидкості видалення матеріалу (MRR) та оптимізацію процесу, є цифрове моделювання взаємодії фрези із заготовкою в зоні різання. Необхідно перетворити траєкторію, записану в G-кодах вихідної програми, у масив точок, а також створити цифрові масиви для опису контурів заготовки та деталі. Це дозволяє виконати чисельне моделювання, представляючи контур заготовки у вигляді двовимірної воксельної моделі [81].

У системах ЧПК (DIN 66025/ISO 6983) траєкторії переміщення зазвичай описуються двома типами геометричних елементів: прямими відрізками та дугами кіл. На рис. 2.1 наведені всі можливі елементи контуру, що записуються в управляючій програмі для керування верстатом з ЧПК. Для зручності подання всі три типи траєкторій представлені в одній системі координат, причому початок (точка *A*) і кінець (точка *B*) ділянок позначені однаково [82].

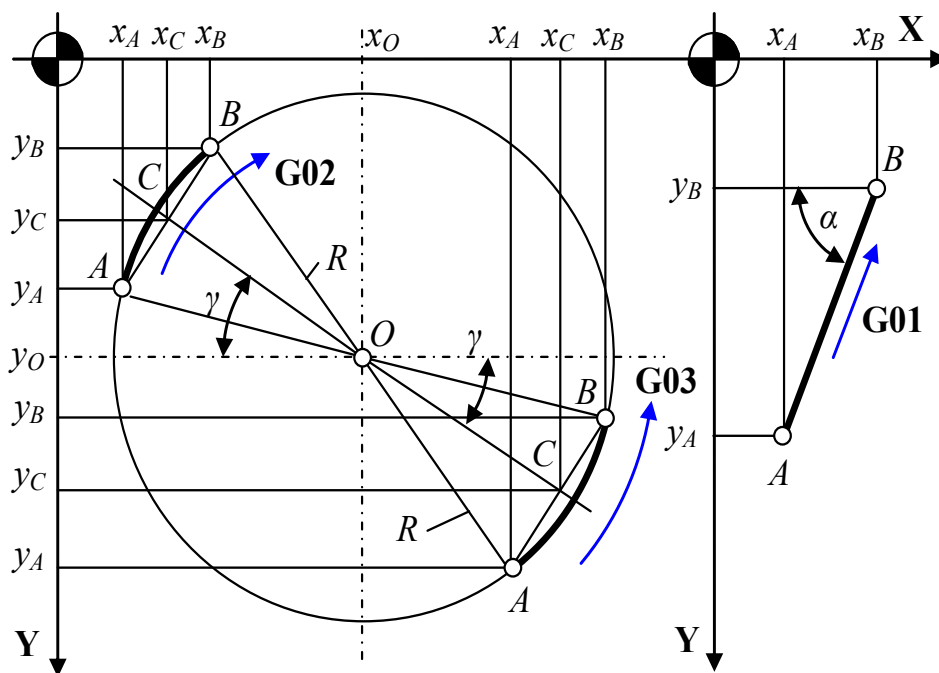


Рисунок 2.1 – Геометрія контуру [82]

Під час виконання команд G01, G02 або G03 центр фрези переміщується між точками A і B . Прямолінійні ділянки траєкторії визначаються на основі таких залежностей [82]:

$$\begin{cases} X[i] = x_A + hi \cos(\alpha) \\ Y[i] = y_A + hi \sin(\alpha) \end{cases}, \quad (2.1)$$

де x_A, y_A – координати початку, h – крок розрахунку.

Звідки α – кут нахилу прямолінійної ділянки траєкторії розраховується, як:

$$\alpha = \arctan \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}. \quad (2.2)$$

де x_B, y_B – координати кінця ділянки;

Розрахунок має виконуватись до умови $i \leq i_{max}$.

$$i_{\max} = \text{round}\left(\left(\sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}\right) / h\right). \quad (2.3)$$

Щоб створити масиви траєкторій для дуг кола, необхідно визначити координати їх центру. Використовуючи геометричні співвідношення, наведені на рис. 2.1, можна обчислити координати центру дуги для обох випадків (G02 і G03):

$$\begin{cases} x_O = x_C \pm CO \cos(\gamma) \\ y_O = y_C \pm CO \sin(\gamma) \end{cases}, \quad (2.4)$$

Знак «+» для команди G02, знак «-» для команди G03.

$$\gamma = \arctan \frac{x_B - x_A}{y_B - y_A}, \quad (2.5)$$

де $x_C = (x_B + x_A)/2$; $y_C = (y_B + y_A)/2$; $CO = \sqrt{R^2 - (AB/2)^2}$, $AB = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}$,

Масиви ділянок дуг визначаються за формулами, використовуючи координати центру дуги та кут φ_0 для відповідної ділянки:

$$\varphi_0 = \arctan \frac{y_A - y_C}{x_A - x_C}, \quad (2.6)$$

$$\begin{cases} X[i] = x_O + R \cos(\varphi_0 + \delta i) \\ Y[i] = y_O + R \sin(\varphi_0 + \delta i) \end{cases}, \quad (2.7)$$

де $\delta = h/R$ - крок вздовж розрахункового кута.

Розрахунок виконується до умови $i \leq i_{\max}$:

$$i_{\max} = \text{round}\left(\left(\arctan \frac{y_B - y_C}{x_B - x_C} - \varphi_0\right) / \delta\right). \quad (2.8)$$

Першим етапом моделювання процесу контурного фрезерування є створення алгоритмів та їх реалізація у вигляді модулів прикладної програми. Ключовим компонентом програми є модуль зчитування вихідної управляючої програми для верстата з ЧПК у форматі G-кодів. У цьому модулі «слова» та символи, записані в програмі, аналізуються та перетворюються на геометричні об'єкти: прямі лінії або дуги кола, які можуть бути спрямовані за годинниковою стрілкою чи проти неї. Кожному об'єкту присвоюються атрибути, що відповідають параметрам, зазначеним у G-кодах, включаючи координати, радіус і напрямок руху [82].

На основі розробленого математичного апарату створено перший модуль – прикладну програму, який демонструє свою функціональність на прикладі розрахунку цифрового масиву траєкторії формоутворення, призначеної для фрезерування контуру. Така траєкторія складається з прямих ділянок і спряжених дуг кола, які сполучаються між собою. Для створення управляючої програми використано пробну версію САМ-системи SolidCAM [83].

Узагальнений алгоритм, за яким працює прикладна програма, показано на рис. 2.2. Управляюча програма в G-кодах, завантажується, як текстовий файл (*.txt). В управляючих програмах для контурного фрезерування, як за правило, містяться коди прямої (G01) або/та дуги кола (G02, G03). При виявленні цих параметрів кожен рядок файлу перевіряють на наявність, або відсутність текстових змінних (*str*) і у випадку, якщо вони знайдені, проводять ідентифікацію за формою траєкторії, якщо ні, тоді перевіряється наступний рядок, шляхом додавання до номеру k і т.д. Функціонування алгоритму вважається закінченим при умові $k > N$, де N – кількість рядків у файлі. При ідентифікації прямої, проходить визначення наступних координат: початку $x_A[j]$, $y_A[j]$ та кінця $x_B[j]$, $y_B[j]$, коли дуга кола, то дані доповнюють радіусом $R[j]$. Де j – номер ідентифікованої ділянки траєкторії [83].

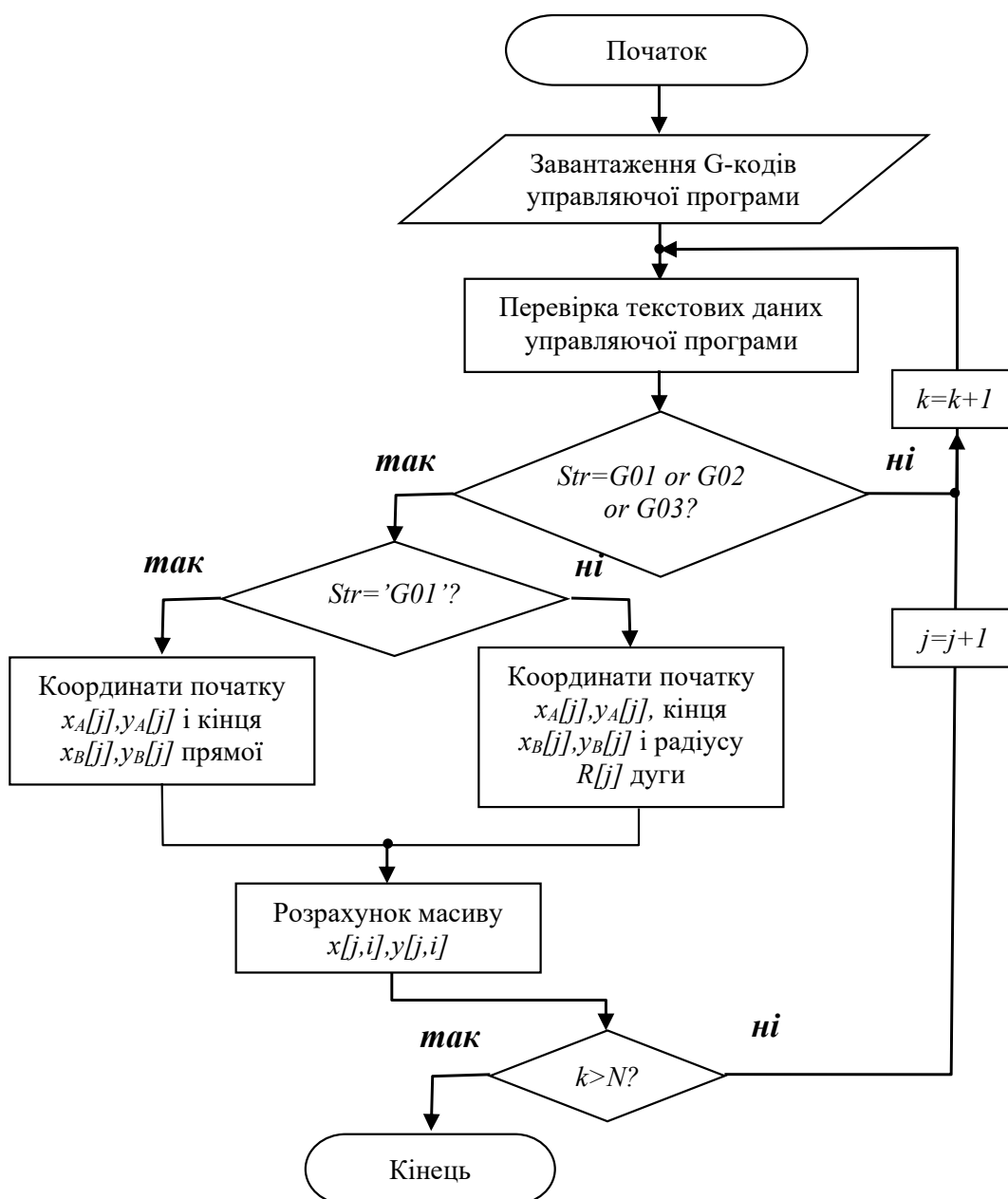


Рисунок 2.2 – Алгоритм програми [83]

На (рис. 2.3, а) наведені результати по закінченню анімації спроектованої управляючої програми. Фрезерування контуру 1 деталі здійснюється з прямокутної заготовки 2 за допомогою фрези 3. Траєкторія руху фрези як робоча, так і холоста позначені лініями 4. Спроектовану у САМ-системі SolidCAM управляючу програму у G-кодах було завантажено у розроблену програму у виді текстового файлу. В результаті створено файл в якому здійснено запис розрахованих цифрових масивів формоутворюючих траєкторій. Для

верифікації такі масиви показані в графічному виді в аналогічній системі координат (рис.2.3, б) [83].

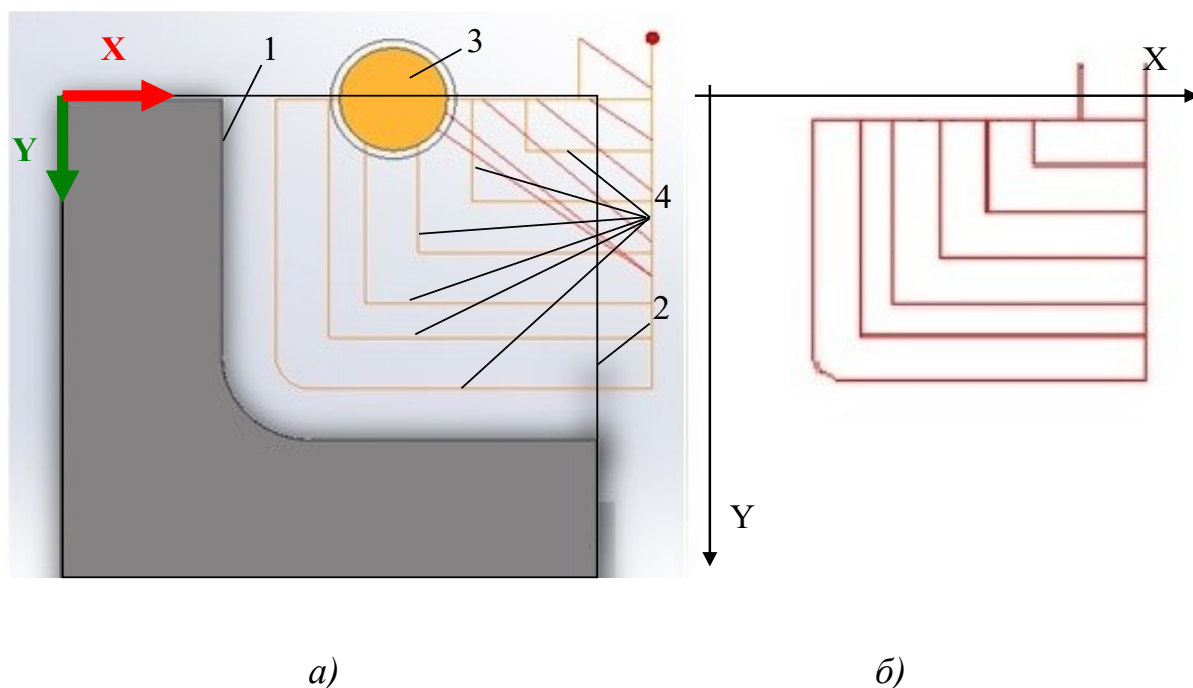


Рисунок 2.3 – Результати моделювання: а) САМ-система SolidCAM;
б) траєкторії за спроектованими цифровими масивами [83]

Порівняння результатів із траєкторіями, записаними в управляючу програму, підтверджує її коректне функціонування.

Для виконання моделювання процесу контурного фрезерування необхідно створити цифрові масиви точок, що описують контури деталі та заготовки. Ці масиви формуються на основі геометричних характеристик інструмента та припуску, зокрема діаметра фрези і глибини рівновіддаленого шару припуску.

Створення масиву контуру деталі (X_d, Y_d):

$$\begin{cases} X_d[i] = X[i] - R_m \sin \alpha_i \\ Y_d[i] = Y[i] - R_m \cos \alpha_i \end{cases} \quad (2.9)$$

де R_m - радіус фрези, α_i - кут нахилу контуру.

Та заготовки (X_w, Y_w), як еквідистантний контур до траєкторії формоутворення:

$$\begin{cases} X_w[i] = X_d[i] + H \sin \alpha_i \\ Y_w[i] = Y_d[i] + H \cos \alpha_i \end{cases} \quad (2.10)$$

де H – припуск.

На основі розроблених алгоритмів і програм створено нову прикладну програму в середовищі об'єктно-орієнтованого програмування (рис. 2.4), яка автоматизує розрахунок усіх необхідних масивів. Управляючу програму можна завантажити через команду «Завантажити G-коди» у головному інтерфейсі.

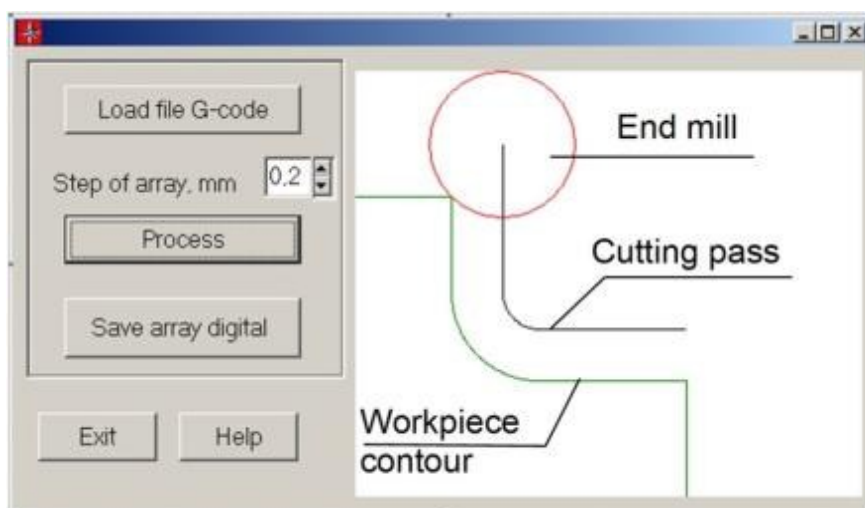


Рисунок 2.4 – Інтерфейс програми моделювання на початку процесу [81]

Отже, створення цифрових масивів траєкторій формоутворюючих рухів та контуру заготовки і деталі надає можливість здійснити моделювання процесу контурного фрезерування. Де, в свою чергу, буде реалізовано можливість визначення параметрів взаємодії фрези із заготовкою на кожному кроці процесу, під час зміни координат центру фрези за розрахованими цифровими масивами траєкторії формоутворення. Оскільки зазначені масиви, створені за допомогою управляючої програми, яка буде в подальшому використовуватись при фрезеруванні контуру на верстаті, з'являється можливість здійснити управління режимом різання (подачею та/або частотою обертання шпинделя разом), яке за

результатами моделювання у окремій прикладній програмі забезпечить стабілізацію процесу з можливістю подальшого здійснення його оптимізації.

2.2. Математична модель визначення параметрів контурного фрезерування

Усі отримані дані є необхідними й достатніми для виконання моделювання процесу різання. У ході моделювання, для визначення геометричних параметрів взаємодії фрези із заготовкою, застосовуються заздалегідь створені цифрові масиви. Розрахунки здійснюються для кожної точки масиву, що описує траєкторію формоутворення, відповідно до розробленого алгоритму (див. рис. 2.5). З урахуванням постійних змін у конфігурації заготовки, її контур на кожному кроці моделювання представлений як лінія, що включає: оброблений контур, контур частини поверхні фрези, а також фактичний контур заготовки, утворений на попередньому проході. На основі цих даних, розрахунок кута дуги різання на кожному етапі моделювання проводиться за формулою [82]:

$$\varphi_i = \arctan \frac{(y_s)_i - (Y[i])_i}{(x_s)_i - (X[i])_i} \pm \arctan \frac{(y_E)_i - (Y[i])_i}{(x_E)_i - (X[i])_i}, \quad (2.11)$$

де $X[i]$, $Y[i]$ – координати рівновіддалених точок; знак «+», коли $x_s < X[i]$ і $x_E > X[i]$, знак «-» у протилежному випадку.

Такий підхід дає змогу на кожному етапі моделювання оцінювати процес різання за параметрами кута дуги різання φ та іншими ключовими характеристиками, зокрема швидкістю видалення матеріалу (MRR) й силою різання.

Визначення аналога швидкості видалення матеріалу (MRR) виконується за залежностями, отриманими з аналізу геометричної взаємодії фрези та заготовки, як площа фігури $A_1B_1A_2B_2$, що утворюється при переміщенні фрези за траєкторією еквідистанти на величину подачі на зуб (ft) (рис. 2.5). Очевидно, що

площа такої фігури дорівнює площі фігури A_1CDA_2 , яка може бути визначена, як різниця площ секторів [81]:

$$S_{A_1CDA_2} = S_{OA_1A_2} + S_{OCD} = \frac{R_c^2 \alpha}{2} - \frac{(R_c \mp R_m H)^2 \alpha}{2}, \quad (2.12)$$

де R_c – радіус кривизни контуру, R_m – радіус фрези, H – глибина різання.

Враховуючи, що $f_t < R_m$, глибина різання може бути визначена через кут різання φ : $H = R_m(1 - \cos \varphi)$, а кут сектора: $\alpha = f_t / (R_c \pm R_m)$. У (2.12) знак « $-$ » для увігнутого контуру, знак « $+$ » для опуклого контуру [81].

У результаті нескладних алгебраїчних перетворень було отримано формулу для аналога швидкості видалення матеріалу (MRR), що відповідає площі фігури $A_1B_1A_2B_2$ [81]:

$$MRR = S_{A_1B_1A_2B_2} = \frac{2R_c R_m (1 - \cos(\varphi)) f_t \mp R_m^2 (1 - \cos(\varphi))^2 f_t}{2(R_c \mp R_m)}. \quad (2.13)$$

Аналіз отриманої формули підтверджує її універсальність, оскільки всі параметри, що до неї входять, можуть бути обчислені в процесі чисельного моделювання контурного фрезерування.

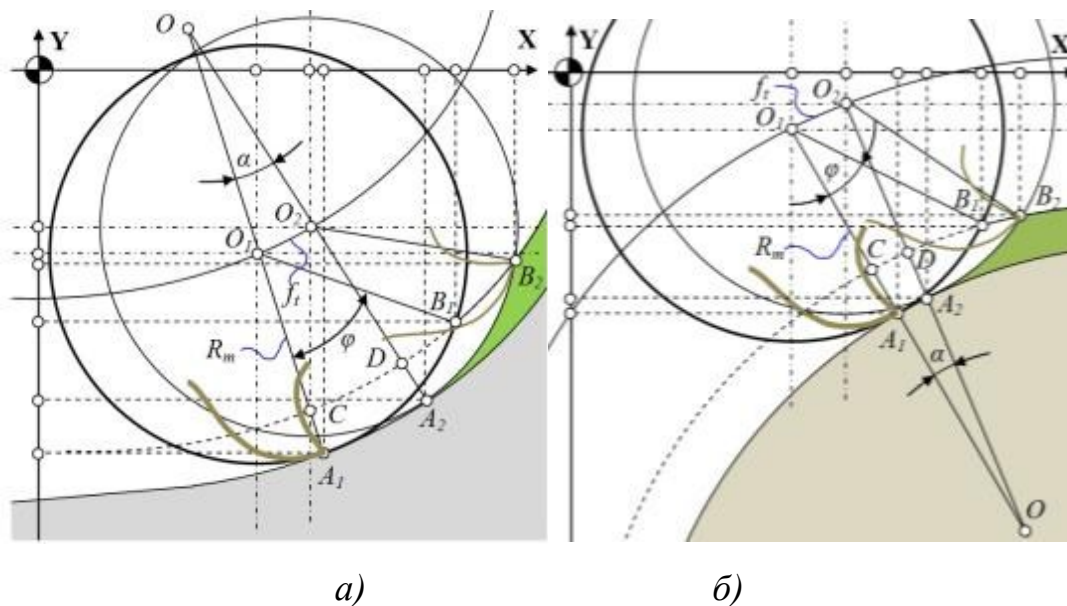


Рисунок 2.5 – Взаємодія фрези та заготовки: а) – обробка увігнутої поверхні;
б) – обробка опуклої поверхні [81]

Під час обробки прямолінійних контурів значення $R_c \rightarrow \infty$, що призводить до виникнення невизначеності типу ∞/∞ у формулі (2.13). Для усунення цієї невизначеності застосовується правило Лопіталя, після чого отримуємо:

$$MRR = S_{A_1 B_1 A_2 B_2} = R_m (1 - \cos(\varphi)) f_t, \quad (2.14)$$

що відповідає відомій формулі для окремого випадку обробки прямолінійної ділянки контуру.

Оскільки процес фрезерування за своєю природою є уривчастим, то умови різання доцільніше оцінювати за середньою силою різання, що корелюється зі швидкістю видалення матеріалу (MRR).

Такий підхід дозволяє визначити складову сили різання F_{xy} , яка залежить від швидкості видалення матеріалу (MRR) [82]:

$$F_{xy} = C_F (MRR)^n, \quad (2.15)$$

де коефіцієнт C_F і показник n ступеня визначаються за методикою, представленою в роботі [84].

Основою моделювання для визначення швидкості видалення матеріалу (MRR) під час контурного фрезерування є алгоритм ідентифікації взаємодії фрези із заготовкою (рис. 2.6) в зоні різання.

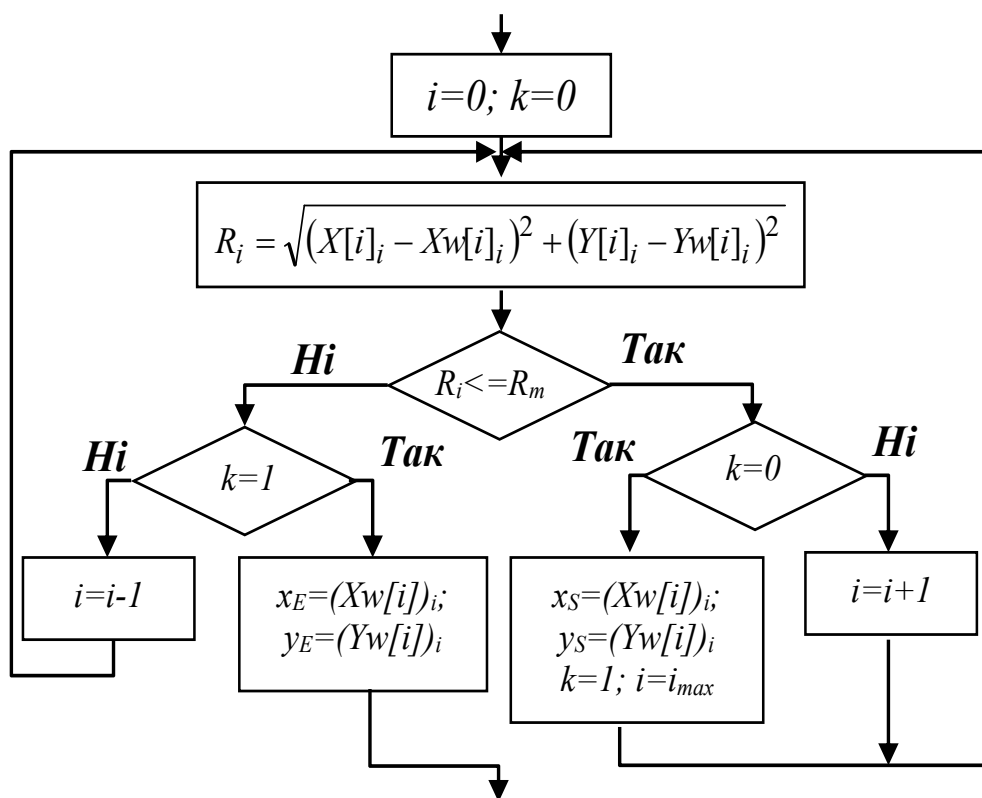


Рисунок 2.6 – Алгоритм взаємодії фрези із заготовки в зоні різання [82]

Згідно з алгоритмом, на кожному кроці моделювання (i – номер кроку) обчислюється значення R_i , що відповідає відстані від центру фрези до кожної точки масиву контуру заготовки. При $k=0$ відбувається порівняння з радіусом фрези R_m до моменту виконання заданої умови. Її виконання автоматично визначає координати точки S , яка є початковою точкою дуги різання. Далі, коли $k=1$, триває порівняння з радіусом фрези до виконання наступної умови. Це дозволяє автоматично визначити координати точки E , що є кінцевою точкою дуги різання.

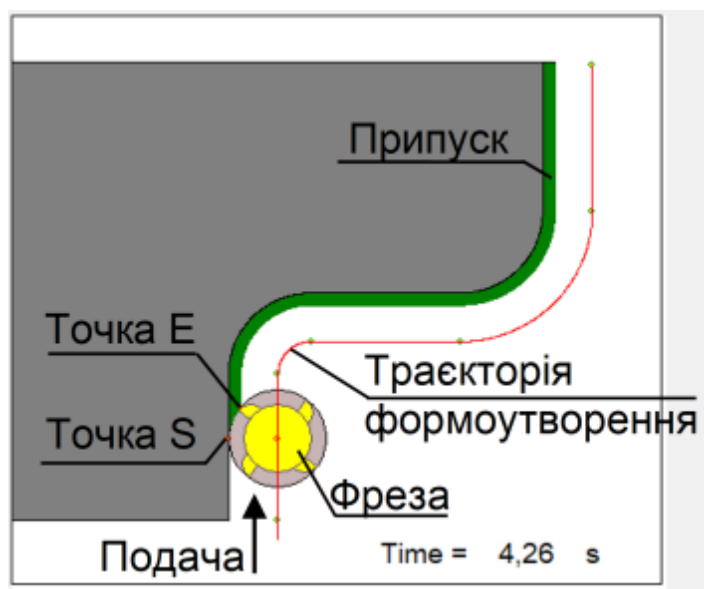


Рисунок 2.7 – Інтерфейс програми моделювання на початку процесу

У загальній частині алгоритму моделювання отримані координати точок S і E передаються контуру заготовки, який формується внаслідок видалення шару припуску (див. рис. 2.7) [82].

2.3 Моделювання сили різання при контурному фрезеруванні

Контурне фрезерування займає важливе місце серед технологічних операцій обробки деталей, зокрема у високотехнологічних галузях, таких як авіаційна та автомобільна промисловість. Однак підвищення інтенсивності процесу нерідко спричиняє небажані явища, зокрема вібрації, прискорений знос інструмента або навіть його пошкодження, що негативно впливає на якість утвореної поверхні. Головною причиною таких проблем є сила різання, яка впливає на обробну систему під час процесу. Вона спричиняє зміни в умовах різання, формуючи замкнуту систему взаємодії між інструментом і процесом [85].

Моделювання сил різання відіграє ключову роль у прогнозуванні стабільності процесу та оптимізації режимів обробки. Це особливо важливо для операцій контурного фрезерування, де умови різання постійно змінюються

залежно від траєкторії формоутворення. Сила різання є важливим фактором, що впливає на якість утвореної поверхні, тому її точне прогнозування має ключове значення для покращення стабільності процесу різання та забезпечення належних умов обробки, особливо під час роботи з тонкостінними деталями та матеріалами із малою жорсткістю [85].

Розробка математичної моделі, яка дозволяє передбачати значення сил різання та її складові за осями, є ключовим етапом у моделюванні процесу контурного фрезерування. Така модель забезпечить точне прогнозування сил різання, що є основою для вибору оптимальних режимів обробки, підвищення стабільності процесу та якості оброблених деталей.

2.3.1 Математична модель визначення складових сили різання

Математична модель процесу фрезерування повинна бути побудована з урахуванням механістичного підходу до розрахунку сили різання шляхом визначення геометричних параметрів недеформованої стружки кожним зубом по довжині його різання. Пропонується скласти модель геометричними співвідношеннями схеми на рисунку 2.8, де показано розгорнення лез фрези вздовж осьової координати [85].

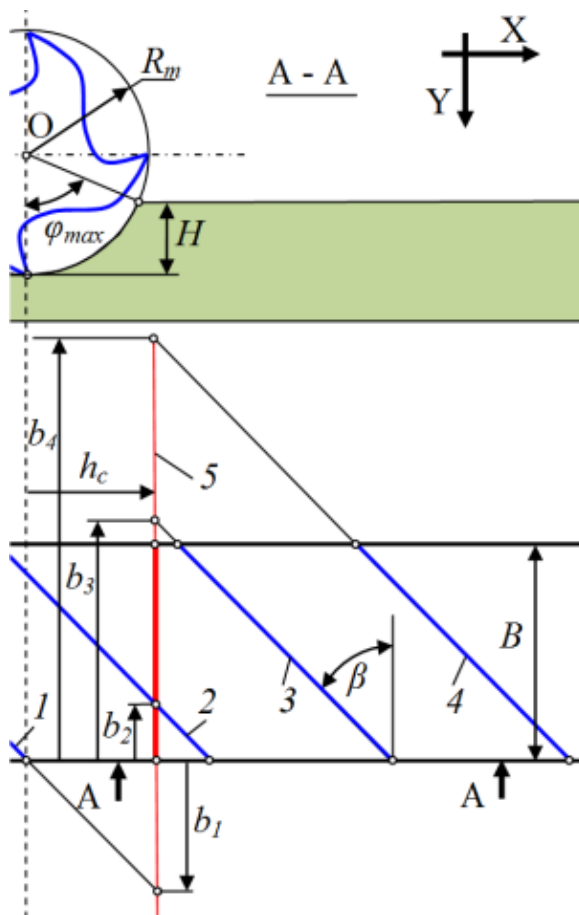


Рисунок 2.8 – Схема для визначення геометричного зачеплення зубів фрези та заготовки [85]

На схемі показано положення різальних кромки фрези, яка має чотири зуба по ширині різання B - лінії 1, 2, 3 і 4. Леза взаємодіють із заготовкою в діапазоні дуги різання [85]:

$$\varphi_{max} = \arccos \frac{R_m}{R_m - H}, \quad (2.16)$$

де R_m - радіус фрези; H - глибина різання.

На розгортці зона обмежена лінією 5 на відстані $h_c = R_m \cos(\varphi)$ від початку різання.

Положення зубів на розгортці зміниться, коли фреза буде повернута на кут φ , а різальні кромки визначаються відстанню від лінії А-А початку заготовки по ширині B [85]:

$$b_j = (\varphi + \varphi_z j - \varphi_{max}) R_m / \operatorname{tg}(\beta), \quad (2.17)$$

де φ_z – кут між зубцями фрези; β – гвинтовий кут нахилу канавок; j – кількість зубців.

На рисунку 2.7 такі відстані для фрези з чотирма зубами позначені b_1, b_2, b_3 і b_4 . Для визначення сили різання та її складових доцільно використовувати формули чисельного інтегрування. Таким чином, окружна сила різання може бути визначена як сума сил, що діють на різальні кромки і за кожною кромкою на елементарних відстанях δB та її складових по осях координат [85]:

$$F_y = \sum_j^z \sum_{i=1}^n C_P(a_i)^k \delta B_i \cos(\varphi + \varphi_z j - \gamma - \beta), \quad (2.18)$$

$$F_x = \sum_j^z \sum_{i=1}^n C_P(a_i)^k \delta B_i \sin(\varphi + \varphi_z j - \gamma - \beta), \quad (2.19)$$

де C_P, k – емпіричні коефіцієнти та експоненти; a_i – товщина стружки на ділянці зуба фрези; δB_i – ширина елементарної ділянки; γ – передній кут різальної кромки; z – кількість різальних кромок; n – кількість ділянок по ширині фрезерування.

За наведеною нижче формулою визначається товщина стружки на кожній ділянці:

$$a_i = f_t \sin \varphi_i, \quad (2.20)$$

де f_t – подача на зуб фрези; φ_i – кут дуги різання у відповідному перерізі.

Тут умовно, з достатньою точністю, дуга різання замінюється дугою кола радіусом R_m фрези. Тому величина кута дуги різання в кожному перерізі залежить від кута повороту фрези. Режим різання при моделюванні розглядається в залежності від:

$$f_t = \frac{f}{zn_s}, \quad (2.21)$$

де f – подача хвилинна; n_s – частота обертання фрези. Емпіричний коефіцієнт C_P та експонента k в формулах (2.18) та (2.19) залежать від матеріалу

заготовки. Для підвищення адекватності ці дані можуть бути скориговані з урахуванням геометрії різальної кромки.

Оскільки запропонований підхід передбачає застосування чисельних методів, для виконання розрахунків було розроблено алгоритм (рис. 2.9), який є основою прикладної програми моделювання. Алгоритм спрямовує розрахунки на основі аналізу позначки відстані b у двох напрямках, де використовуються формули для визначення складових сили різання, але з різними значеннями параметрів [85].

Алгоритм забезпечує моделювання фрезерування як попутне, так і зустрічне з ідентичними за структурою процедурами.

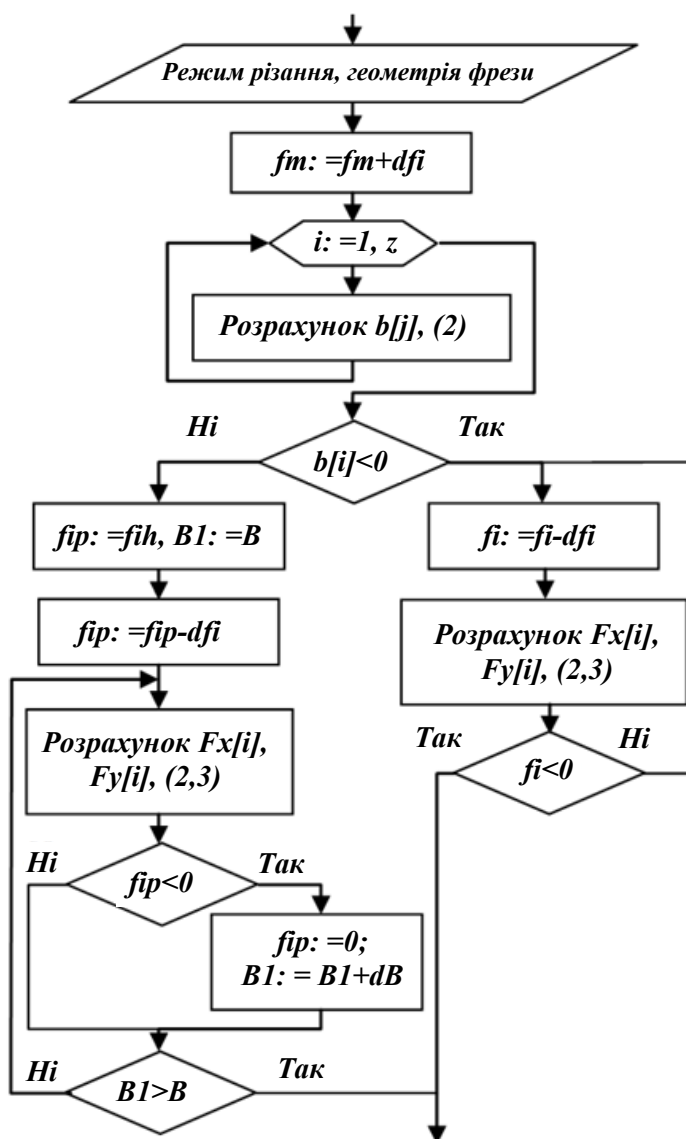


Рисунок 2.9 – Алгоритм моделювання сили різання [85]

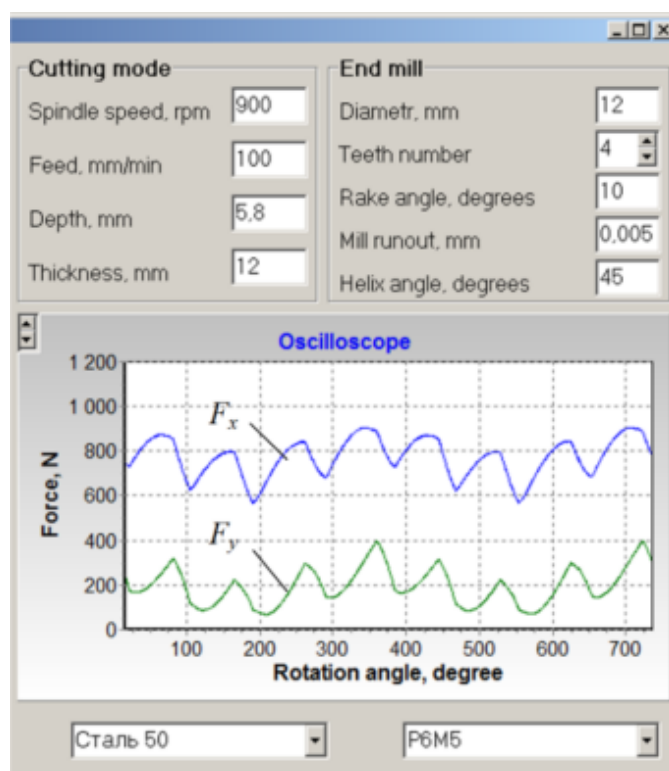
Такий підхід до моделювання дозволяє розглядати вплив фрези на процес фрезерування як зміну глибини різання за гармонійним законом [85]:

$$H_h = H - \delta h \sin(\varphi), \quad (2.22)$$

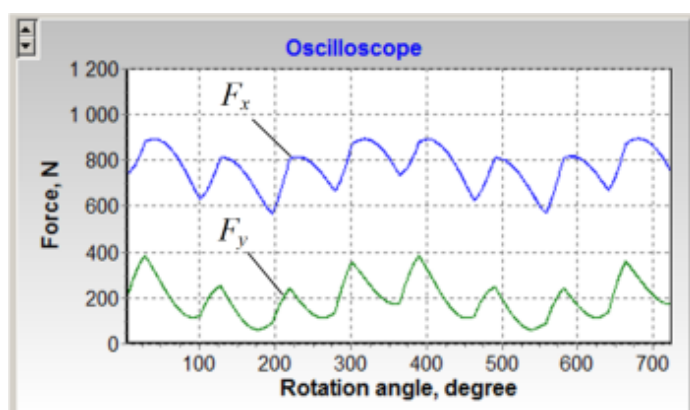
де δh – величина биття.

В алгоритмі прийняті латинські позначення ідентифікаторів змінних замість грецьких, які використовувались у формулах: fm – кут повороту фрези; dft – крок зміни кута; ft – кут, що визначає межі розрахунків при $b[i] < 0$; fip – кут, що визначає межі розрахунків при $b[i] > 0$; fih – кут, що відповідає глибині різання на довжині; dB – крок розрахунку довжини кромки на довжині.

Алгоритм представляє розрахунки, які виконуються при моделюванні зустрічного фрезерування. Аналогічні дії передбачені для моделювання складових сили різання при попутному фрезеруванні. Для автоматизації процесу моделювання було створено прикладну програму, інтерфейс якої представлено на рисунку 2.10. Вихідні дані, що визначають режим різання і параметри фрези, вводяться у відповідних вікнах інтерфейсу. Матеріал заготовки та інструмент вибираються з випадючого списку у вікнах в нижній частині вбудованого віртуального осцилографа. В результаті моделювання у вікні віртуального осцилографа поступово з'являються графіки складових сили різання в залежності від кута повороту, з виконанням розрахунків на основі зміни кута повороту фрези. За характером зміни графіків і різницею у формі складових сили різання при фрезеруванні, зустрічне і попутне, можна спостерігати биття фрези [85].



а)



б)

Рисунок 2.10 – Інтерфейс програми моделювання: а) – фрезерування зустрічне;
б) – фрезерування попутне [85]

Слід зазначити, що емпіричний коефіцієнт C_p та експонента k у формулах складових сили різання (2.18)-(2.19) визначалися за довідковими даними і були адаптовані аналогічно [85].

2.3.2. Апробація результатів моделювання сили різання

Остаточне підтвердження отриманих результатів було отримано під час експерименту. Відповідні експерименти були проведені при фрезеруванні заготовки зі сталі 50 кінцевою фрезою Ø12 мм, матеріал P6M5 з покриттям TiAlCrN, твердість HRC 65. Фреза має чотири спіральні канавки з нахилом 45°. Заготовка була закріплена на столі трикомпонентного динамометра MCS 10-005-3C німецької фірми HBM (рис. 2.11) [85].



Рисунок 2.11 – Робоча зона експерименту[85]

Трикомпонентні динамометричні датчики підключені до підсилювачів HBM SlipX BM40, під'єднаних до ПК з відповідним програмним забезпеченням для запису сигналів. Експерименти проводилися на верстаті XYZ VMC 1010 з системою ЧПК Siemens 810D. Експерименти проводилися під час фрезерування заготовки з частотою обертання шпинделя 900 об/хв і 420 об/хв. Причому ширина і глибина фрезерування гарантували одночасне різання декількома різальними кромками для перевірки адекватності функціонування створеного алгоритму фрезерування на тих же режимах [85].

Для порівняння отриманих експериментальних і модельних результатів обидва цифрові файли були завантажені в спеціальну програму, в якій шляхом зміни експериментальних осцилограм на необхідний кут було забезпечено максимальний збіг графіків за фазою (рис. 2.12).

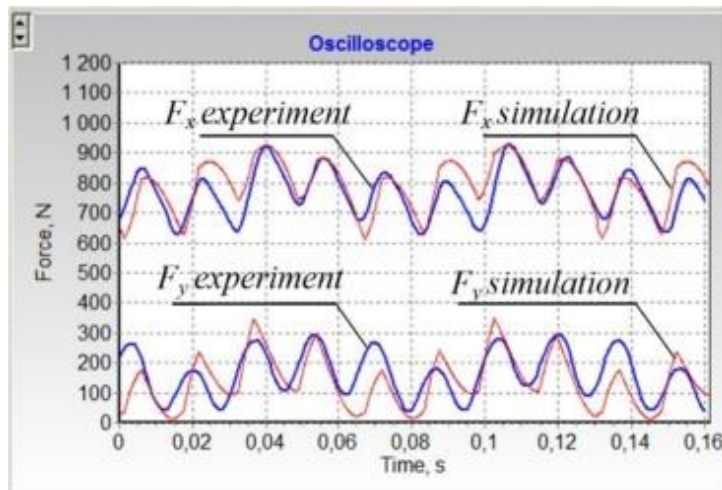


Рисунок 2.12 – Розрахункові та експериментальні складові сил різання при подачі 100 мм/хв та частоті обертання фрези 900 об/хв [85]

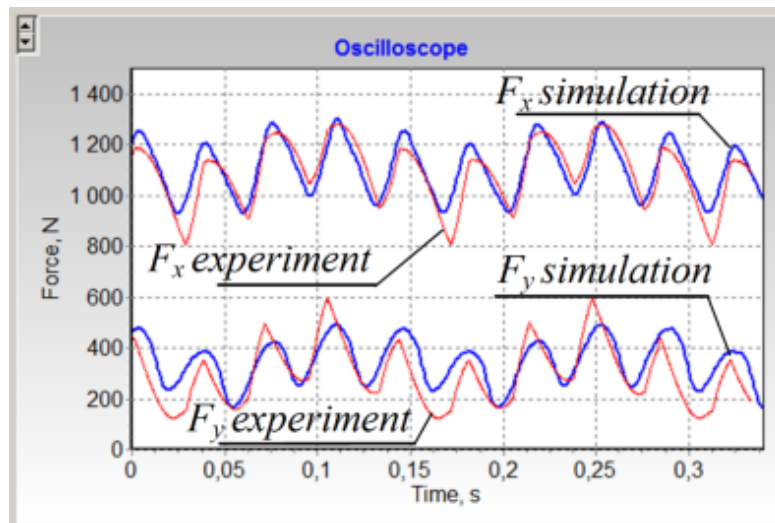


Рисунок 2.13 – Розрахункові та експериментальні складові сил різання при подачі 75 мм/хв та частоті обертання фрези 420 об/хв [85]

При таких маніпуляціях абсолютне значення і форма осцилограм залишаються незмінними для збереження автентичності експериментальних даних. Крім того, відповідно до режиму різання, горизонтальна шкала перетворюється на часову. На рисунках 2.12 і 2.13 показані графіки складових сили різання для двох обертів фрези.

Аналіз отриманих результатів показує досить добрий збіг експериментальних і теоретично прогнозованих складових сили різання на різних режимах, що в цілому підтверджує адекватність розробленої моделі. Середні значення складових сили різання за даними експериментів і моделювання повністю збігаються, що підтверджує правильність вибору емпіричного коефіцієнта C_p та експоненти k у формулах (2.18) і (2.19) [85].

Розроблена модель забезпечує новий підхід до моделювання процесу контурного фрезерування, враховуючи ключові геометричні та технологічні параметри. Завдяки інтеграції сучасних методів розрахунку, модель дозволяє аналізувати сили різання в різних умовах обробки, забезпечуючи точність і універсальність для широкого спектра застосувань.

Використання прикладного програмного забезпечення дозволяє моделювати процеси різання з високою деталізацією та врахуванням специфічних умов, характерних для контурного фрезерування. Вбудовані інструменти для візуалізації результатів сприяють кращому розумінню процесу та надають можливість оперативного коригування параметрів.

Результати підтверджують перспективність розробленого підходу та його значущість для оптимізації технологічних процесів у промисловості, де висока точність і якість обробки є критичними. Модель створює основу для подальших досліджень і вдосконалення технологій різання.

Отже, розроблена математична модель сили різання при контурному фрезеруванні дозволяє моделювати процес за різних режимів різання та геометрії заготовки. Створено прикладну програму, що прогнозує процес фрезерування з урахуванням сили різання для уникнення аварій, таких як злами інструмента. Запропонований алгоритм моделювання може бути використаний

для створення динамічної моделі процесу фрезерування. Отримані результати підтверджено комп'ютерним моделюванням та експериментом фрезерування.

2.4 Моделювання процесу контурного фрезерування

Щоб реалізувати розроблену математичну модель для визначення швидкості видалення матеріалу (MRR) і середньої сили різання, а також алгоритми формування цифрових масивів, було створено прикладну програму. В якості прикладу застосування цієї програми взято контур із двох прямих відрізків, поєднаних дугою кола. На рис. 2.14, а показано розрахунково-технологічну схему, яка відображає траєкторію фрези під час обробки контуру із прямолінійними ділянками, з'єднаними коловою дугою. Товщина припуску на заготовці залишається (еквідистантною) рівномірною (3 мм). В управляючій програмі (рис. 2.14, б), сформованій для верстата з ЧПК, застосовуються координати шляхів руху центру фрези та рекомендовані режими обробки з [81] для фрези Ø20 мм, яка призначена для вуглецевої сталі з припуском 3 мм і початковою товщиною 10 мм. Згідно з цими даними, шпиндель має частоту обертання 2000 об/хв, а подача становить 450 мм/хв [81].

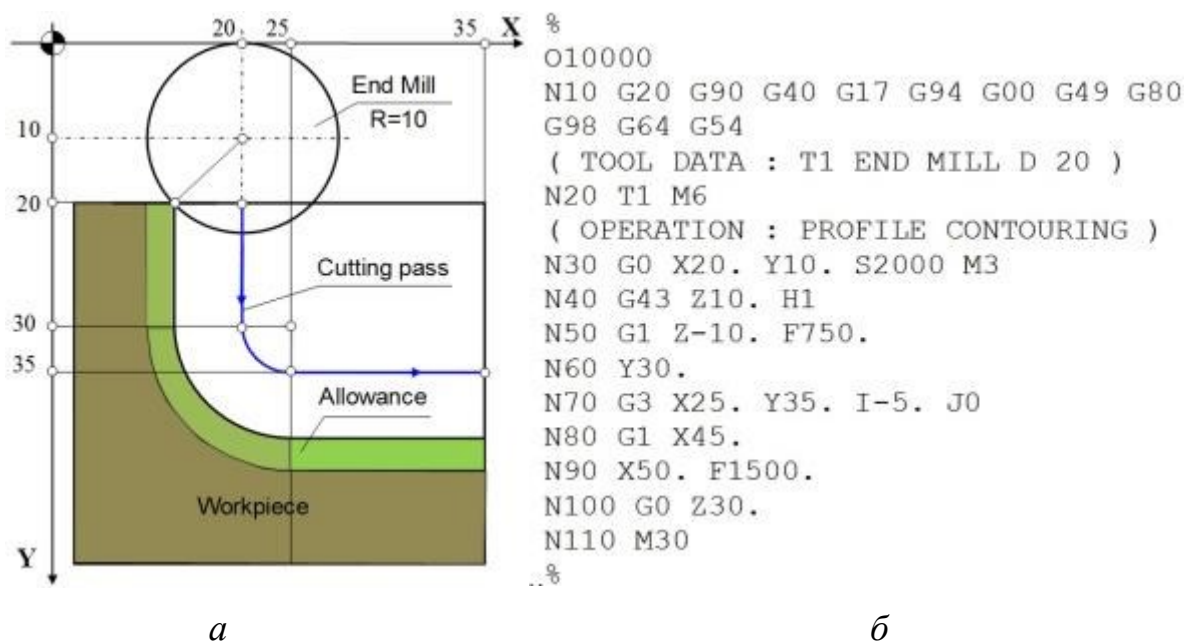


Рисунок 2.14 – Контур деталі для фрезерування: *а* – розрахункова схема;

б – текст управляючої програми [81]

Згідно із розробленим алгоритмом було сформовано цифрові масиви, які описують як траєкторію формоутворення, так і контури заготовки та деталі. Це дає змогу виконувати повноцінне моделювання контурного фрезерування. Завдяки чисельному підходу програма на кожному кроці моделювання визначає області перетину між цифровою моделлю заготовки й інструментом, аналізуючи процес формоутворення в динаміці.

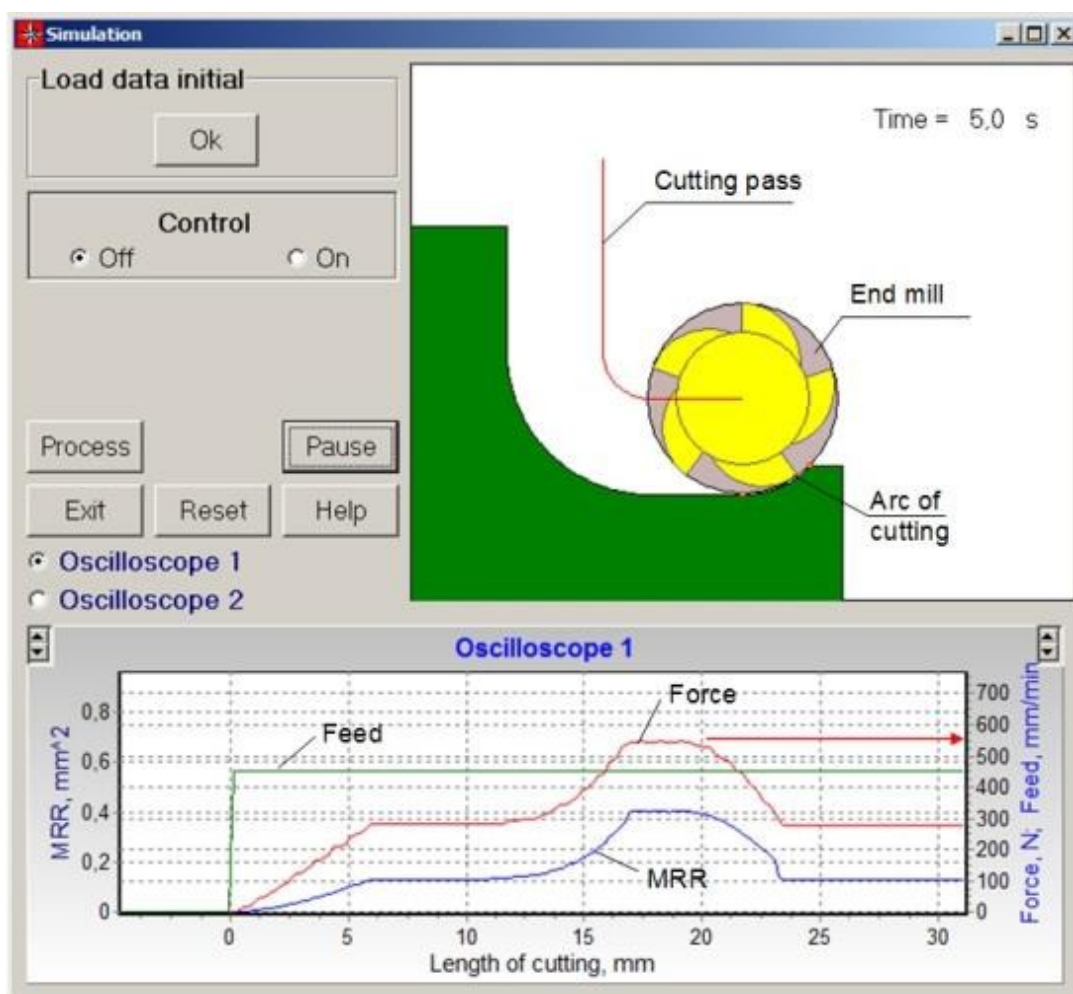


Рисунок 2.15 – Інтерфейс програми моделювання [81]

Для відстеження часу моделювання, що наближено відповідає реальній тривалості операції, інтерфейс містить спеціальний індикатор. Під час візуального відтворення процесу фрезерування одночасно демонструються на осцилографі основні параметри, зокрема швидкість видалення матеріалу (MRR) і середня сила різання, які розраховуються згідно з розробленою математичною моделлю. В прикладі (рис. 2.15) обробка припиняється через 6,4 с, після чого

користувач отримує змогу зберегти розраховані показники, зокрема швидкість видалення матеріалу (MRR), що є ключовою величиною для оцінювання ефективності різання в подальших етапах [81].

ВИСНОВКИ

1. Розроблено математичний апарат та алгоритми для створення цифрових масивів, які описують траєкторію формоутворення, контур заготовки та деталі. Ці масиви є передумовою для моделювання процесу контурного фрезерування, забезпечуючи точне представлення геометричних параметрів взаємодії інструмента та заготовки.

2. Створено математичну модель процесу контурного фрезерування, яка дозволяє моделювати основні характеристики різання, включаючи швидкість видалення матеріалу (MRR) та сили різання. Ця модель базується на отриманих цифрових масивах і забезпечує надійну основу для аналізу процесу.

3. Розроблено модель, здатну передбачати силу різання, що заснована на механістичному підході. Результати моделювання порівняні з реальним експериментальними значеннями та показали високу ефективність прогнозування.

4. Розроблено прикладну програму, яка автоматизує розрахунки та візуалізує процес формування контуру. Програма дозволяє прогнозувати характеристики різання, оцінювати ефективність різних режимів обробки та створювати дані для подальшого проєктування програм для управління процесом контурного фрезерування на верстатах з ЧПК.

РОЗДІЛ 3

СТАБІЛІЗАЦІЯ ШВИДКОСТІ ВИДАЛЕННЯ МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ПРОЦЕСУ КОНТУРНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ

Запропоновано нову концепцію технології стабілізації процесу контурного фрезерування, яка включає структуру управління, спрямовану на забезпечення стабільності обробки. Основою цієї структури є створення управляючої програми в G-кодах, що дозволяє стабілізувати процес різання (рис. 3.1) [82].

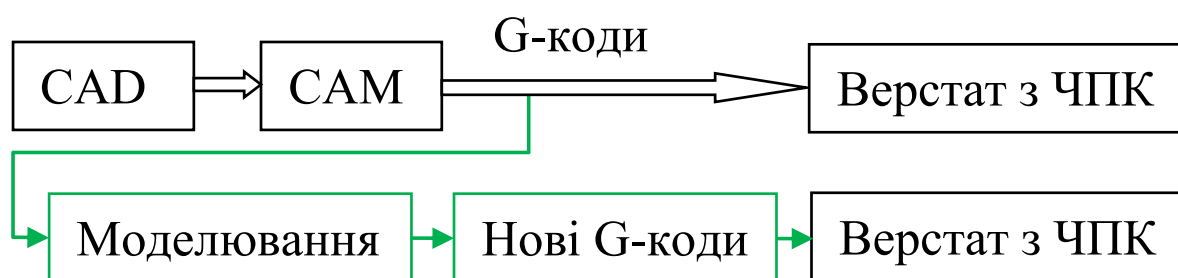


Рисунок 3.1 - Структура підготовки виробництва [82]

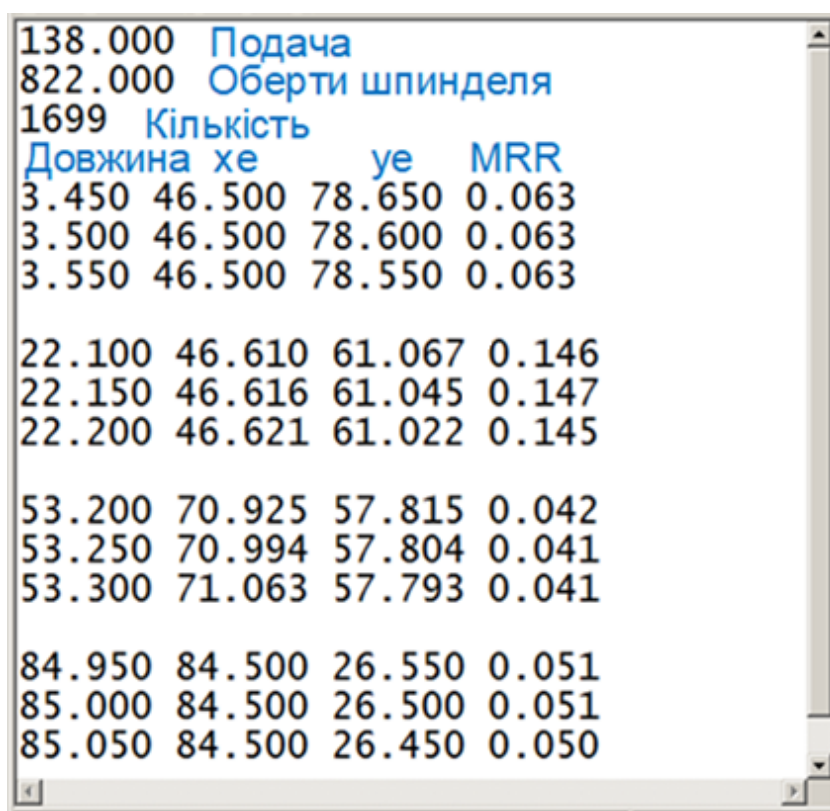
Ключовим компонентом структури є процедура моделювання, яка дозволяє визначати основний параметр процесу різання – швидкість видалення матеріалу (MRR). На основі результатів моделювання формується цифровий масив, що перетворюється на нову управляючу програму для верстата з ЧПК. Ця програма реалізує спроектоване управління шляхом регулювання подачі та/або частоти обертання шпинделя відповідно до умов обробки.

3.1 Проектування нової управляючої програми

Відповідно до існуючої технології підготовки виробництва на верстаті з ЧПК, представлені дані є кінцевим результатом, який передбачає подальше виконання операції у виробничих умовах. Тому такі дані, а саме управляючу програму в G-кодах, необхідно взяти за вихідну інформацію для проектування

нової управляючої програми також в G-кодах, що забезпечує стабілізацію умов обробки по контуру [81].

На рис. 3.2 показано фрагменти файлу, збереженого в результаті моделювання процесу контурного фрезерування. Файл було сформовано під час моделювання з кроком 0,05 мм вздовж траєкторії формоутворення, а останній стовпчик файлу містить значення швидкості видалення матеріалу (MRR), розраховані під час моделювання. Для узгодження отриманих результатів з довідковими даними [86] для подальших розрахунків було прийнято одиничну ширину обробки. Тому значення швидкості видалення матеріалу (MRR), записане у файлі, в 5 разів менше [82].



138.000	Подача		
822.000	Оберти шпинделя		
1699	Кількість		
Довжина	хе	уе	MRR
3.450	46.500	78.650	0.063
3.500	46.500	78.600	0.063
3.550	46.500	78.550	0.063
22.100	46.610	61.067	0.146
22.150	46.616	61.045	0.147
22.200	46.621	61.022	0.145
53.200	70.925	57.815	0.042
53.250	70.994	57.804	0.041
53.300	71.063	57.793	0.041
84.950	84.500	26.550	0.051
85.000	84.500	26.500	0.051
85.050	84.500	26.450	0.050

Рисунок 3.2 – Фрагмент файлу моделювання процесу контурного фрезерування [82]

Цей файл використовується, як початковий, у спеціально розробленій програмі для створення первинного цифрового управляючого файлу, що слугує основою для проєктування нової управляючої програми в G-кодах. Для розробки такого файлу з управлінням було створено прикладну програму, інтерфейс якої

наведено на рис. 3.3. Вона забезпечує стабілізацію процесу різання по всьому контуру. У розділі «Формування управління» передбачена можливість вибору розподілу управління між складовими режиму різання: подачею та обертами шпинделя. Такий підхід значно підвищує гнучкість у призначенні режиму різання, що дозволяє максимально враховувати всі виробничі потреби.

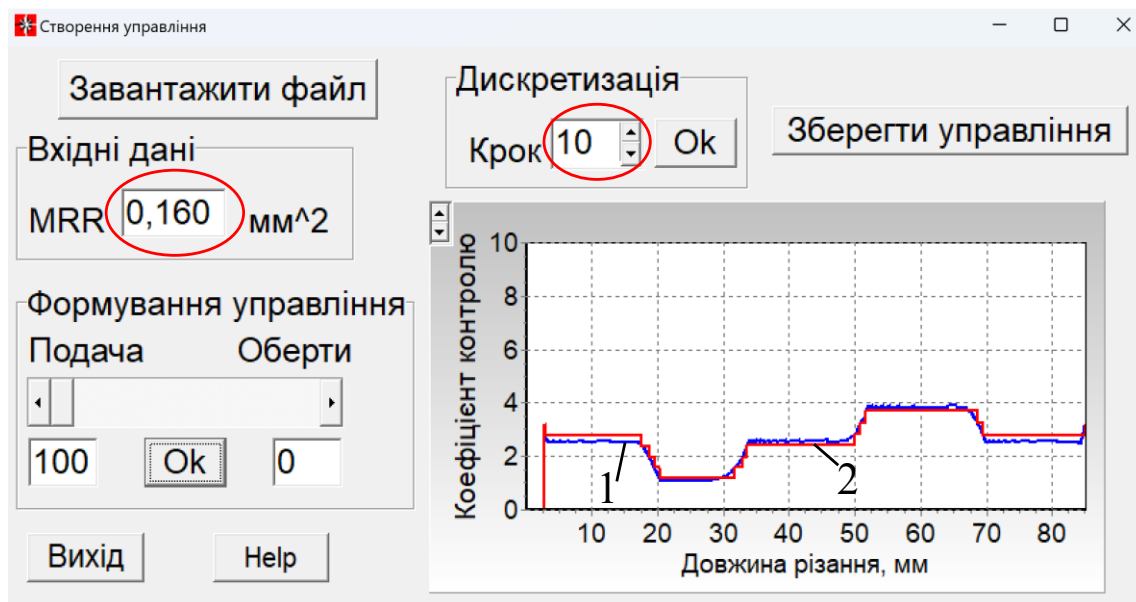


Рисунок 3.3 – Інтерфейс програми проектування команд управління

Файл, що утворений після проведення моделювання завантажується в програму, вибирається крок дискретизації. У графічному вікні програми графік 1 представляє завантажений файл моделювання, а графік 2 – файл розрахунку управління після дискретизації завантаженого файлу відповідно до обраного кроку дискретизації (10%) [81]. Потім формується управління і результат може бути збережений у вигляді цифрового файлу, фрагмент якого показана на рис. 3.4.

Стабілізація процесу різання за критерієм швидкості видалення матеріалу (MRR) забезпечується управлінням подачею, масив значень якої розраховується в певній точці за формулою [82]:

$$f_i = f_c \frac{MRR_{max}}{MRR_i}, \quad (3.1)$$

де f_c – подача (мм/хв), задана у вихідній управляючій програмі ЧПК, MRR_{max} – максимальне значення під час моделювання (мм²), MRR_i – поточне значення під час моделювання (мм²).

При застосуванні розподілу управління між компонентами режиму різання: подачею та обертами шпинделя використовується наступна послідовність.

Розрахунки відбуваються на основі формули (3.1). Для визначення нового режиму різання скоригована подача розраховується:

$$fk_i = f_l - \Delta f_i k_c, \quad (3.2)$$

де f_l – перше значення з розрахованого масиву f_i , k_c – коефіцієнт корекції подачі, що задається у програмі повзунком, $\Delta f_i = f_l - f_i$ – відхилення від середнього значення подачі.

Нові значення для обертів шпинделя розраховується за формулою:

$$S_i = \frac{fk_i MRR_i S_c}{MRR_{max} f_c}, \quad (3.3)$$

де S_c – оберти, задані у вихідній управляючій програмі (об/хв).

Фрагмент створеного файлу наведено на рис. 3.4, де представлені координати точок перемикання (x_e , y_e) та відповідні значення подачі в цих точках. В цьому прикладі частота обертання шпинделя залишається незмінною. Кількість точок перемикання визначається обраним кроком дискретизації. У сформованому масиві можна виділити максимальні та мінімальні значення подачі (на рис. 3.4, вони позначені еліпсами), які узгоджуються зі змінами швидкості видалення матеріалу (MRR), отриманими під час моделювання.



15			
xe	ye	Подача	Оберти
46.500	79.350	519.513	822.000
46.500	79.050	453.393	822.000
46.500	64.300	383.640	822.000
46.500	63.250	315.653	822.000
46.500	62.400	246.897	822.000
46.504	61.812	180.700	822.000
49.590	58.105	249.366	822.000
50.194	58.012	315.653	822.000
50.573	58.000	383.640	822.000
66.673	58.000	453.393	822.000
67.673	58.000	519.513	822.000
68.639	57.999	593.729	822.000
84.469	42.993	519.513	822.000
84.500	42.089	453.393	822.000
84.500	26.550	519.513	822.000

Рисунок 3.4 – Фрагмент файлу для проєктування управління подачею [82]

Під час запуску програми в полі початкових даних автоматично з'являється максимальне значення швидкості видалення матеріалу (MRR), записане в завантаженому файлі моделювання (виділено червоним еліпсом на рис. 3.4). Це значення можна змінювати, збільшуючи або зменшуючи швидкість видалення матеріалу (MRR) в порівнянні з базовим. Отримані результати є основою для проєктування управляючої програми в G-кодах, оскільки вони визначають точки перемикання режиму різання, що забезпечує стабілізацію процесу різання за критерієм швидкості видалення матеріалу (MRR).

3.2 Моделювання контурного фрезеруванням при різних управліннях

Одним із перших етапів підготовки обробки на верстаті з ЧПК є створення цифрової моделі деталі в CAD/CAM-системі. На основі цієї моделі формується управляюча програма, яку можна попередньо протестувати в спеціалізованому

програмному середовищі для моделювання процесу, а згодом перевірити експериментально на реальному обладнанні.

Для порівняння різних підходів було обрано контур, що містить повний набір елементів: прямі ділянки, опуклі та увігнуті сегменти (рис. 3.5). Подібна геометрія охоплює увесь спектр можливих траєкторій, оскільки більшість САМ-систем інтерполюють складні контури за допомогою сукупності прямих відрізків і дуг кіл.

Оцінювати ефективність розробленого управління й зіставляти його результати з «розумною обробкою» (SolidCAM, Siemens NX) доцільно саме у згаданому програмному забезпеченні для моделювання. Водночас слід наголосити, що остаточні висновки базуються переважно на підсумках натурних експериментальних досліджень, оскільки лише випробування в реальних умовах дає повне уявлення про працездатність та переваги обраного рішення.

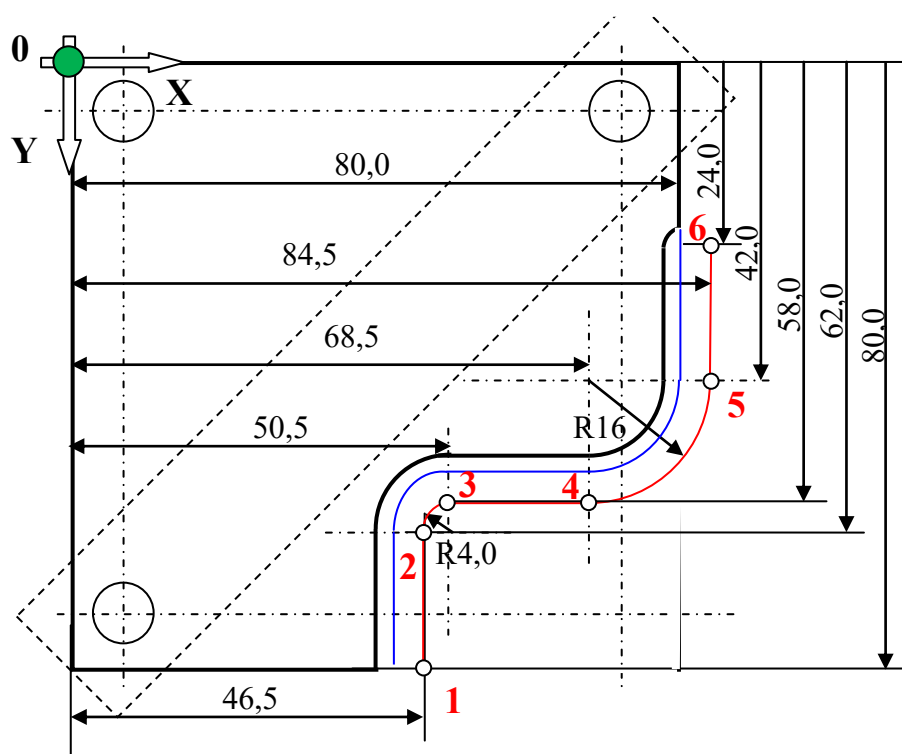


Рисунок 3.5 – Контур деталі для обробки [82]

Для отримання такої деталі в середовищі SolidCAM було розроблено управляючу програму, що містить команди G01, G02 і G03, призначені для задання траєкторії переміщення інструмента. Режим різання – подача й частота

обертання шпинделя, встановлено відповідно до рекомендацій виробника [82] для кінцевої фрези Ø12 мм (P6M5, чотири зуби, спіральний кут 45°), яка застосовується для фрезерування сталі Ст 3. Саме ці G-коди з незмінними параметрами різання на всій довжині контуру було взято за базовий варіант для зіставлення результатів різних стратегій управління під час контурного фрезерування (див. рис. 3.6).

```
%
O1000
G90 G17 G40 G80 G00
M06 T1 ( )
G00 G54 G90 X46.5 Y80. S822 M03
G43 H1 Z70.
S822
Z50.
Z2.
G01 Z-5. F138.
G01 Y62.
G02 X50.5 Y58. R4.
G01 X68.5
G03 X84.5 Y42. R16.
G01 Y24.
G00 Z50.
M05
G00 G28 G91 Z0
G00 G28 G91 X-15.0 Y0.
G90
M06 T1
```

Рисунок 3.6 – Управляюча програма в G-кодi, розроблена в SolidCAM [82]

Під час моделювання у віртуальному осцилографі (рис. 3.7) відображаються зміни основних параметрів обробки: значення хвилинної подачі (138 мм/хв) та частоти обертання шпинделя (822 об/хв) позначено лініями 1 і 4 (права шкала), а швидкість видалення матеріалу (MRR) та сила різання – лініями 2 і 3 (ліва шкала). У ході моделювання фреза рухається вздовж заданої траєкторії, послідовно знімаючи припуск із заготовки. На цій траєкторії (див. рис. 3.7) позначено контрольні точки, що відповідають початку та завершенню кожного кадру управляючої програми, записаної у G-кодах.

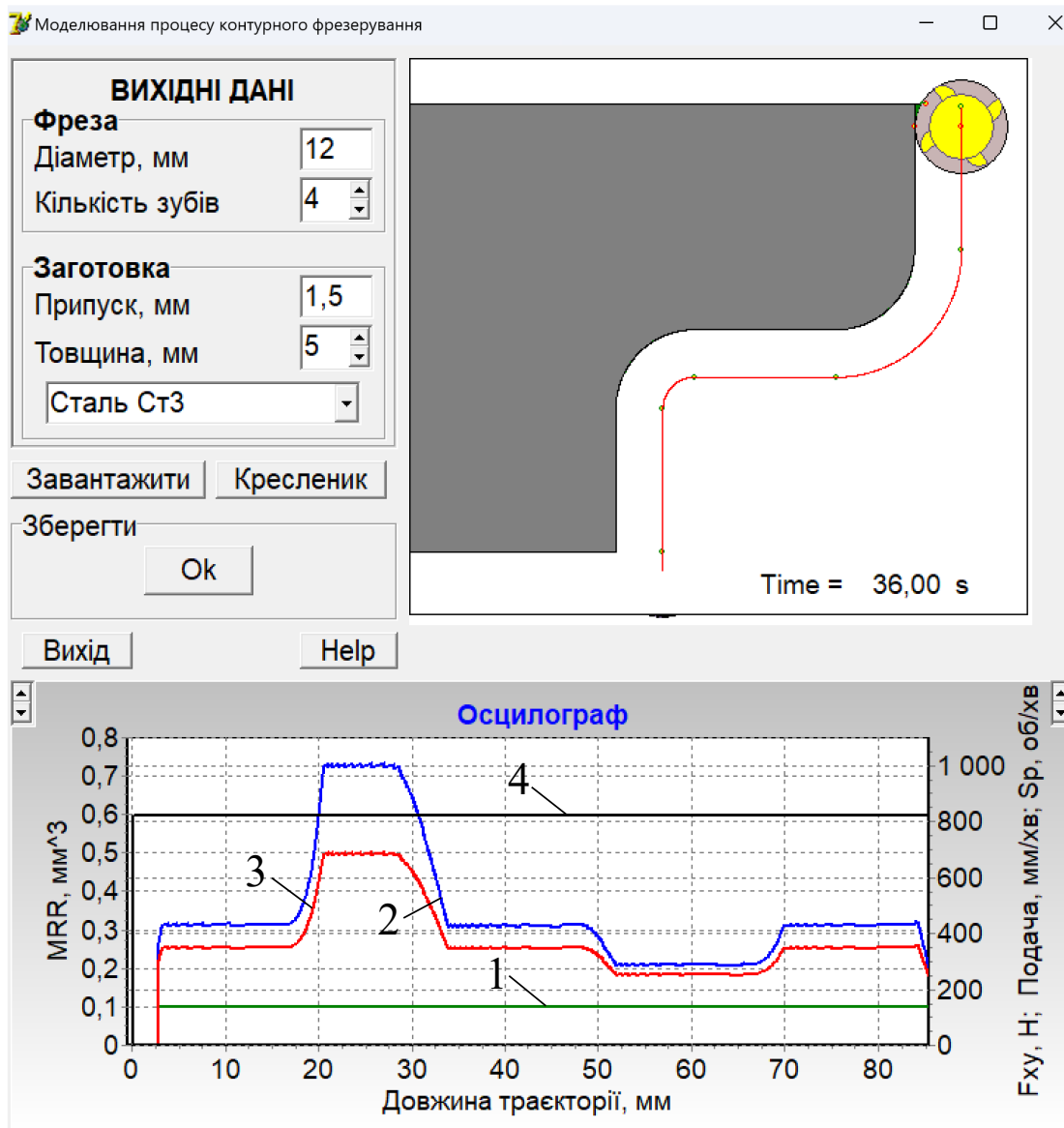


Рисунок 3.7 – Результати моделювання процесу фрезерування, розробленої в SolidCAM

Аналіз отриманих осцилограм засвідчив значну нестаціонарність процесу: на увігнутих відрізках контуру сила різання та швидкість видалення матеріалу (MRR) зростають у 2,4 раза, а на опуклих – зменшуються в 1,4 раза відносно прямих ділянок. Такі коливання негативно впливають на якість оброблюваної поверхні й змушують знижувати режими різання по всій довжині контуру, що доводить необхідність стабілізації MRR на кожному етапі обробки.

В подальшому запропоновано оцінити процес фрезерування заданого контуру із використанням управління подачею за допомогою технологій, що

об'єднані під загальною назвою iMachining. Для моделювання застосовувалася управляюча програма в G-кодах (рис. 3.8), створена в останній версії програмного забезпечення 2024 року, із зафіксованим часом обробки 18,4 с. Як видно (рис. 3.9), характер змін швидкості видалення матеріалу (MRR) та сили різання зазнав змін, причому діапазон коливань під час контурного фрезерування суттєво зменшився (порівняно з рис. 3.3).

%	X50.5 Y-58. R4. F140.454
O1011 (iMachining)	G01 X65.3696 F309.186
G21 (mm)	X67.7174 F311.474
G90 G17 G40 G80 G00	X68.5 F312.784
	G03 X84.3994 Y-43.7914 R16. F481.
M06 T6 (TOOL 6 - DIA 12.)	X84.5 Y-42. R16.
G00 G54 G90 X46.5 Y-100.0 S822	G01 Y-27.6991 F309.186
M03	Y-24.00 F162.292
G43 H6 Z100.	G01 X96.5 Y-24.
S822	G00 Z100.
Z50.	M05
Z2.	G90 G00 X0. Y0.
G01 Z-5.5 F138.	G90 G00 Z0.
G01 X46.5 Y-100.0 F309.186	M30
Y-64	%
Y-63. F308.	
Y-62. F305.	
G02 X48.8932 Y-58.3369 R4.	
F136.979	
X49.5181 Y-58.1224 R4. F133.843	
X50.1697 Y-58.0137 R4. F133.826	

Рисунок 3.8 – Управляюча програма в G-кодi, розроблена в SolidCAM iMachining

Однак, при заході фрези на увігнуту ділянку і виході з опуклого контуру, процес різання втрачає стабільність: у цих зонах швидкість видалення матеріалу (MRR) і сила різання суттєво перевищують показники, характерні для прямолінійних ділянок [82].

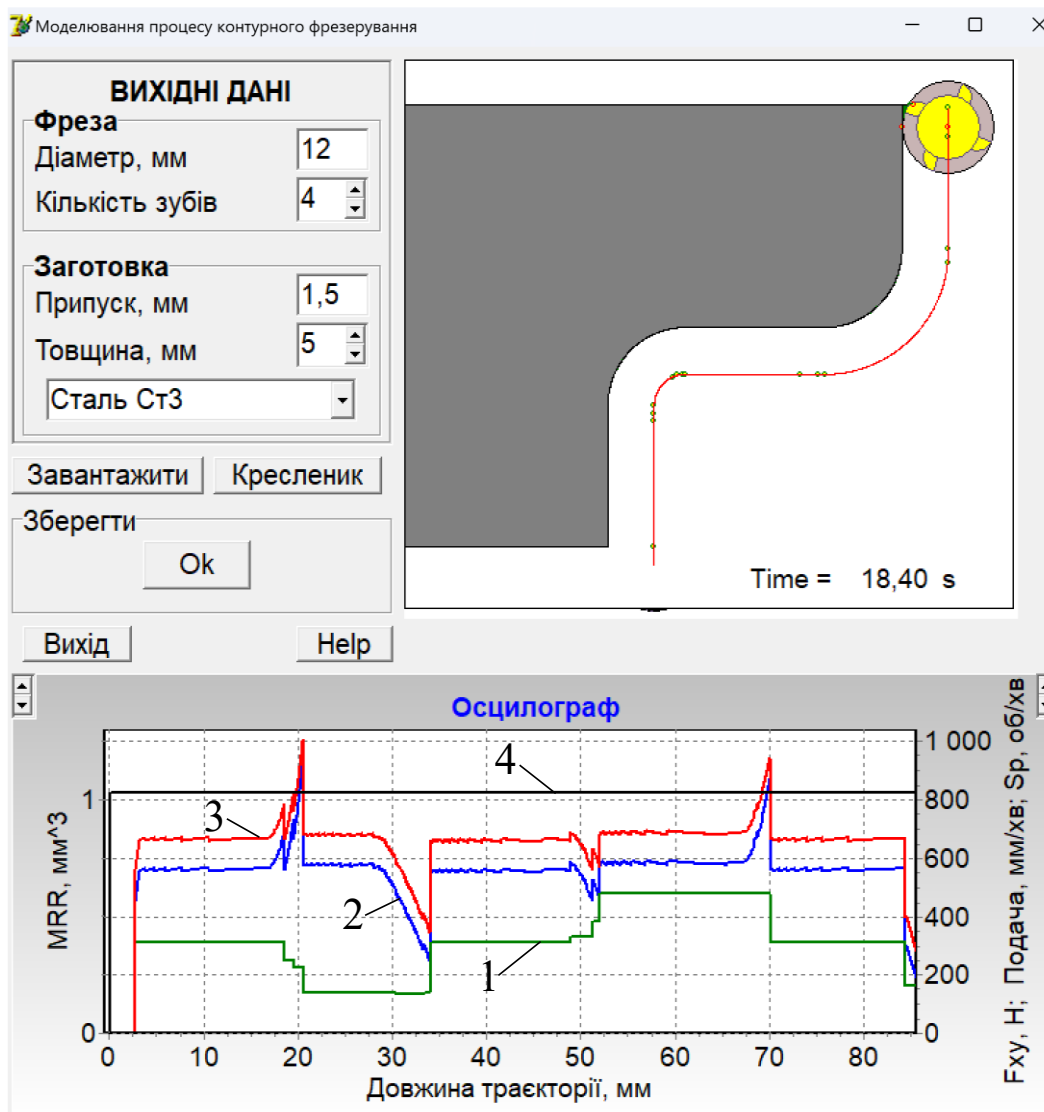


Рисунок 3.9 – Результати моделювання процесу фрезерування з використанням технології iMachining від 2024 року

Також значне зниження інтенсивності фрезерування при виході з увігнутої ділянки не може відповідати заявленій концепції стабілізації.

Зіставлення одержаних даних із попередньою версією тієї ж програми [21] свідчить про те, що алгоритм проєктування, який вважається «ноу-хау» компанії, був суттєво модернізований порівняно з початковими реалізаціями, оскільки на практиці призводив до значних відхилень процесу різання від заданого значення сили різання. У попередній версії управління формувалося відповідно до геометрії траєкторії формування, за критерієм стабілізації так званої «контурної подачі» [82, 87].

Для оцінки ефективності попередніх версій алгоритму було проведено дослідження, спрямоване на аналіз роботи iMachining зразка 2019 року. Це дослідження охоплювало аналіз алгоритмів за допомогою яких створюється управління процесом різання в iMachining. Метою було виявлення ключових відмінностей та потенційних недоліків ранніх версій алгоритму.

У рамках дослідження були проаналізовані заявлені властивості технології iMachining за допомогою віртуального експерименту, що включав моделювання контурного фрезерування заготовки, контур якої складається з двох прямих, поєднаних дугою кола. Оскільки технологія використовує метод управління, заснований на апіорній інформації, основною метою експерименту було отримання характеристик процесу різання шляхом моделювання та їх подальша оцінка. Моделювання проводилося чисельними методами і визначало основну характеристику процесу фрезерування – швидкість видалення матеріалу (MRR) та середню силу різання.

Для експерименту була використана пробна версія SolidCAM із модулем iMachining. За допомогою цього модуля була розроблена програма управління фрезеруванням контуру деталі 1 фрезою 2 (рис. 3.10, а), а також створені відповідні G-коди (рис. 3.10, б) [21].

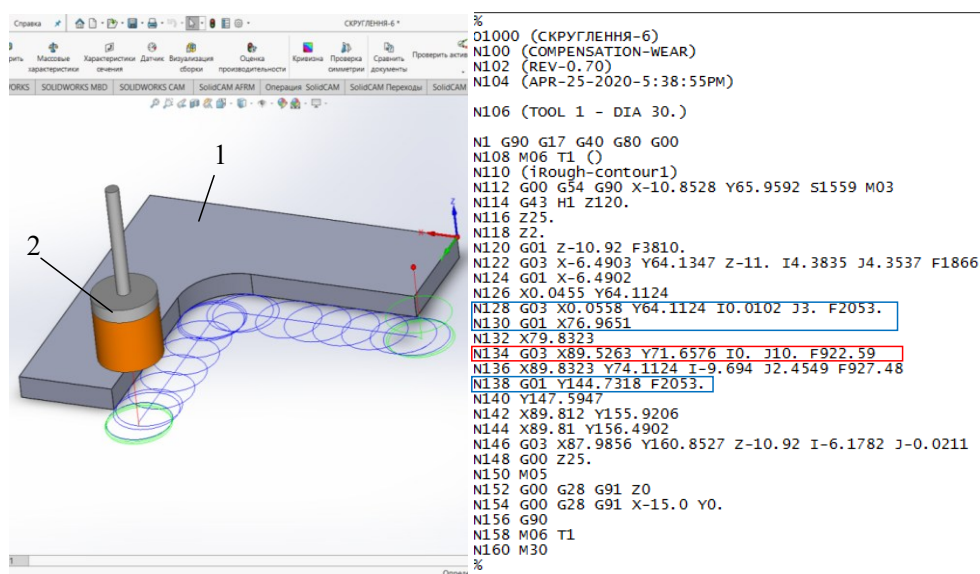


Рисунок 3.10 – Результати проектування та створення управляючої програми в iMachining SolidCAM: а) інтерфейс моделювання; б) G-код, що міститься у програмі управління [21]

Вибрано вихідні дані: заготовка – матеріал Сталь 30, радіус контуру заготовки 25мм, припуск 1,5мм, товщина 10мм, кінцева фреза Ø30мм, 6 зубців, кут нахилу леза 30°, суцільна Solid carbide A20.

Результати моделювання показують, що зміни в умовах різання, які провокують відповідну реакцію силових характеристик, не збігаються з геометричними характеристиками, за якими розроблена управляюча програма у модулі iMachining. Зміна умов обробки відбувається раніше, ніж центр інструмента починає рухатися за дугою (рис. 3.11). І, як впливає з програми управління iMachining у G-кодах (див. Рис. 3.10, б), саме ці точки приймаються як контрольні точки при розробці подачі [21].



Рисунок 3.11 – Результати моделювання процесу фрезерування з контролем подачі за допомогою технології iMachining [21]

Програма управління передбачає різке зменшення значення подачі в кадрах N 134 (див. рис. 3.10, б) з 2053 мм/хв до 922 мм/хв, а потім різке її збільшення. Зрозуміло, що приводи верстата виконуватимуть такі команди відповідно до їх динамічних характеристик. Щоб визначити фактичну зміну подачі на верстаті, можна уявити модель приводу у вигляді аперіодичного елемента першого порядку [21]:

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1}, \quad (3.4)$$

де s - оператор Лапласа, k - коефіцієнт підсилення, T - постійна часу.

Реакція такого приводу на ступінчатий сигнал управління представлений перехідною характеристикою зміни подачі $F(t)$ [21]:

$$F(t) = \Delta F \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (3.5)$$

де ΔF – зміна подачі.

Рух по траєкторії формування визначається інтегральною залежністю [21]:

$$L(t) = \int F(t) dt. \quad (3.6)$$

Спільне рішення рівнянь (3.5) та (3.6) дає залежність зміни швидкості подачі від функції координати l переміщення вздовж траєкторії формоутворення. Рішення зручно виконувати чисельно. Результати представлені на рис. 3.12. Поетапна зміна подачі у файлі управління G-кодом відбувається в точках А і В, а фактична зміна, враховуючи динаміку приводу при $T = 0,03$ с, позначається 1. Результати моделювання у створеній програмі з цим елементом управління показані на рис. 3.11, де прийняті однакові позначення графіків з попередніми [21].

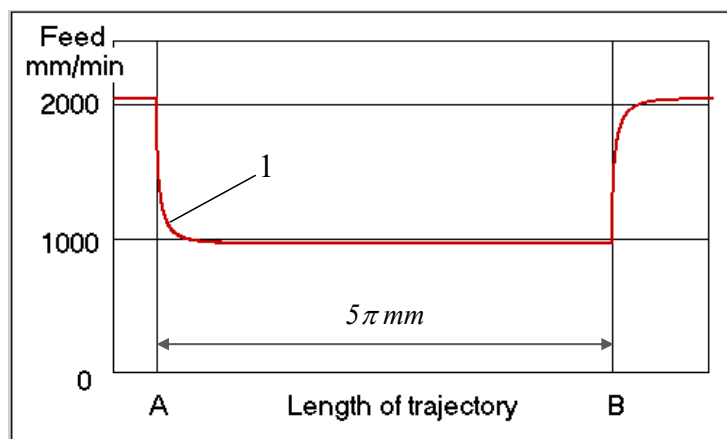


Рисунок 3.12 - Графік фактичної зміни подачі [21]

Згідно з результатами моделювання (рис. 3.12), подібний підхід до управління процесом різання не гарантує його стабілізації: на ділянках, позначених еліпсами, спостерігаються різкі коливання сили різання, що в реальних умовах можуть зумовити дефекти на обробленій поверхні. Причиною є вибрана стратегія, яка прив'язує очікувані зміни умов різання виключно до геометрії траєкторії. Водночас, аналіз моделювання свідчить, що подібні зміни починаються раніше й тривають довше, ніж передбачено алгоритмом [21].

Стратегія iMachining спрямована на розв'язання згаданих проблем, надаючи технологу-програмісту змогу вибирати рівень агресивності обробки з урахуванням реальних умов виробництва (рис. 3.13). Це рішення дозволяє враховувати жорсткість технологічної системи, але водночас вимагає ітераційного підбору оптимального рівня обробки на основі результатів експериментальної обробки на верстаті з ЧПК.

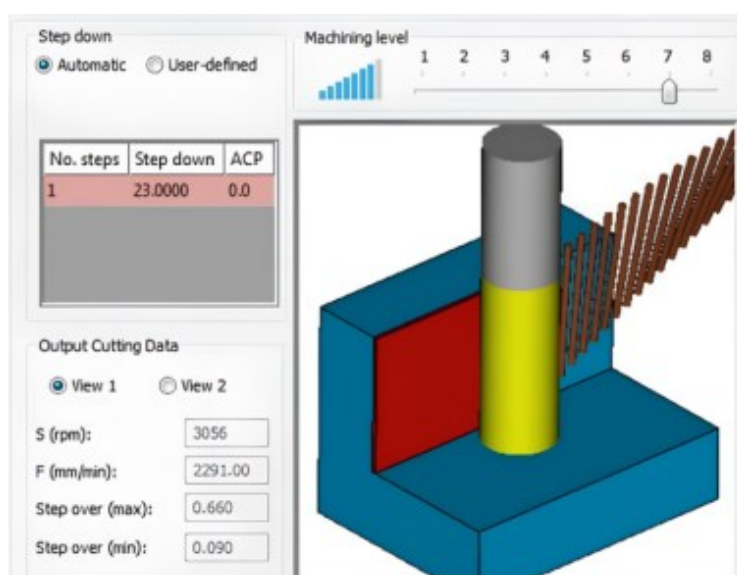


Рисунок 3.13 – Врахування жорсткості технологічної обробної системи при проєктуванні управляючої програми [21]

Зменшення рівня «агресивності обробки» [21] призводить до зниження режимів обробки, а отже, і подачі. Це негативно впливає на продуктивність, оскільки зростає час обробки. Таким чином, основним завданням, при використанні технології iMachining, є пошук оптимального співвідношення між стабільністю процесу різання та підтриманням високої продуктивності.

Очевидно, що управління розроблене в iMachining 2019 року призводить до значних відхилень сили різання на початку входу в увігнуту частину поверхні. Такі недоліки спонукали компанію розробити деякі зміни кроку перед входом фрези в такі ділянки (див. рис. 3.9) в iMachining 2024. Таким чином, можна попередньо констатувати, що алгоритм проектування «розумного» управління компанії, все ще не передбачає моделювання процесу зняття припуску, що пропонується в даному дослідженні, і не дозволяє досягти стабілізації процесу різання по всій траєкторії [82].

Щоб оцінити ефективність розробленої технології, насамперед потрібно створити управляючу програму в G-кодах. Цей процес реалізують, спираючись на отримані результати в спеціалізованому програмному забезпеченні (інтерфейс показано на рис. 3.3, а відповідний цифровий файл – на рис. 3.4). На етапі проектування зручно одразу перевіряти результат, завантажуючи створений G-код, виконуючи моделювання та вносячи корективи в координати точок перемикання або в управляючі сигнали – подачу чи оберти шпинделя (див. рис. 3.14).

%	G02 X50.5 Y-58. R4. F334.
O1013 (KPI-F100-160-4)	G01 X66.876 Y-58. F387.
G90 G17 G40 G80 G00	G01 X68.5 Y-58. F494.
G21 (mm)	G03 X83.5 Y-47.568 R16. F580.
M06 T6 (TOOL 1 - DIA 12.)	G03 X84. Y-45.969 R16. F583.
G00 G54 G90 X46.5 Y-100. S822 M03	G03 X84.35 Y-44.186 R16. F540.
G43 H6 Z100.	G03 X84.5 Y-42. R16. F450.
S822	G01 X84.5 Y-25. F387.
Z50.	G01 X84.5 Y-24. F305.
Z2.	G01 X96.5 Y-24.
G01 Z-5.5 F138.	G00 Z100.
G01 X46.5 Y-100.0 F305.	M05
G01 X46.5 Y-79.1 F305.	G90 G00 X0. Y0.
G01 X46.5 Y-64.45 F387.	G90 G00 Z0.
G01 X46.5 Y-63.3 F322.	M30
G01 Y-62.55 F248.	%
G01 Y-62. F198.	
G02 X48.5 Y-58.536 R4. F162.	
G02 X49.5 Y-58.127 R4. F198.	
G02 X50. Y-58.031 R4. F262.	

Рисунок 3.14 – Управляюча програма в G-кодi з управлінням подачею

Результати моделювання процесу контурного фрезерування з управлінням подачею, реалізованим за розробленою технологією, представлені на рис. 3.15. Позначення осцилограм аналогічні тим, що використовувалися на попередніх рисунках. Максимальні та мінімальні значення подачі відповідають розрахунковим даним, представленим на рис. 3.4 (позначені еліпсами). Лінія 1 відображає розрахований закон управління подачею, а лінія 2 – швидкість видалення матеріалу (MRR) у процесі різання.

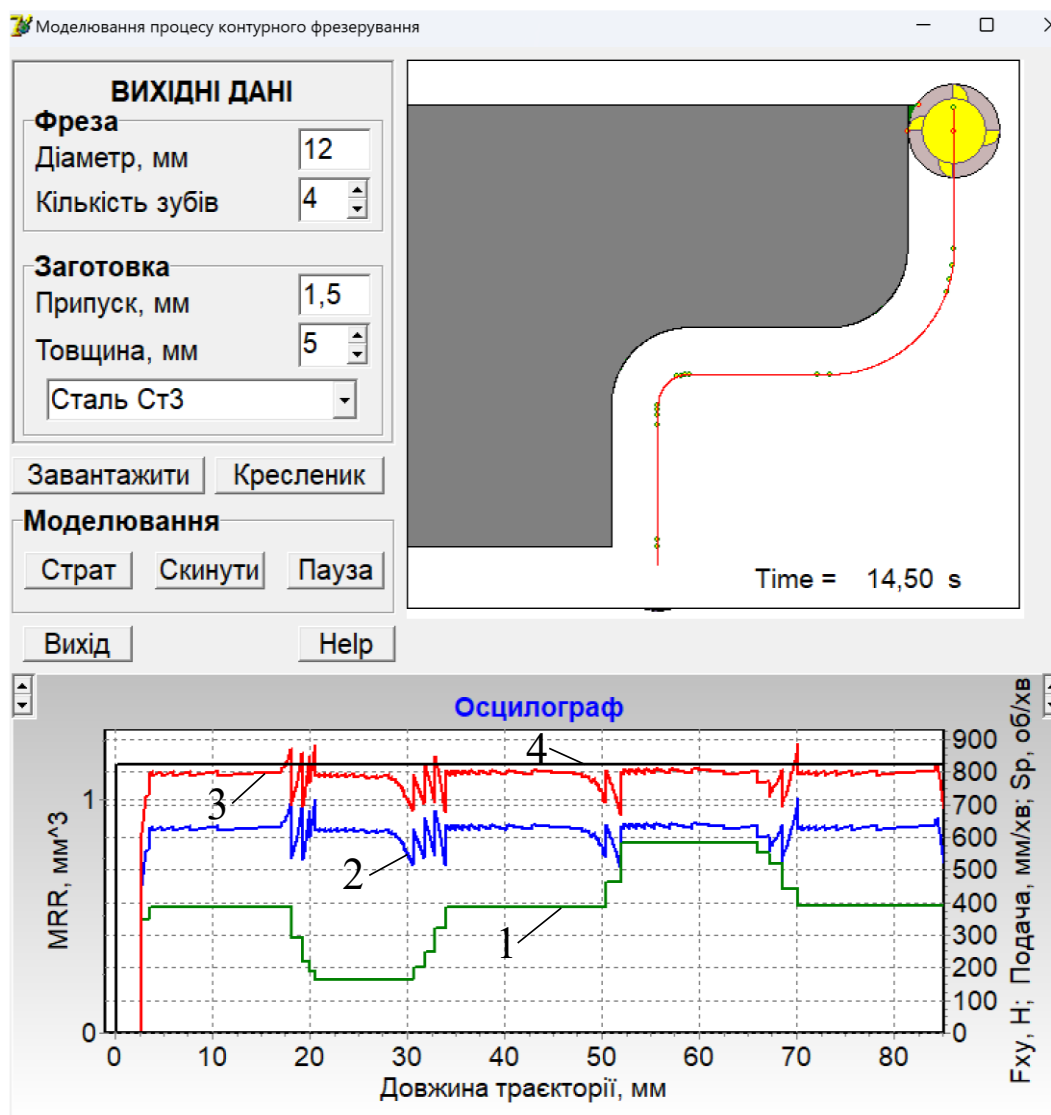


Рисунок 3.15 – Результати моделювання процесу фрезерування з управлінням подачею

Проектування управляючої програми за запропонованим методом вимагає додаткових обчислень для визначення координат точок перемикання. Зокрема,

це включає розрахунок геометричних координат точок на дузі траєкторії формоутворення, які потім коригуються на основі результатів моделювання. Коливання характеристик процесу зумовлені ступінчастою зміною подачі, запрограмованою у спроектованій управляючій програмі згідно з вибраним під час проєктування кроком дискретизації. Розрахунковий час виконання операції становить 14,5 с.

3.3 Підготовка до проведення експерименту

Для проведення експериментів використовували фрезерний верстат з ЧПК HAAS TM-0p. Зовнішній вигляд верстату ЧПК наведений (рис. 3.16), його головні характеристики в таблиці 3.1.



Рисунок 3.16 – Верстат ЧПК, Haas TM-0P (Toolroom Mills) [88]

Таблиця 3.1 – Характеристики верстата з ЧПК HAAS TM-0p

Параметр	Значення
Переміщення по осі X	762 мм
Переміщення по осі Y	305 мм
Переміщення по осі Z	406 мм
Розмір столу (Д × Ш)	863 × 260 мм
Максимальне навантаження столу	136 кг
Конус шпинделя	ISO 40
Діапазон швидкостей шпинделя	0–6000 об/хв
Максимальна потужність шпинделя	5,6 кВт
Тип зміни інструмента	Інтегрований карусельний (опція)
Кількість позицій у магазині (опція)	10
Система ЧПК	Haas
Габарити (Д × Ш × В)	1524 × 1397 × 2092 мм (приблизно)
Маса (залежить від опцій)	~907 кг
Максимальна швидкість робочої подачі	10,2 м/хв
Швидкі переміщення (X, Y, Z)	10,2 м/хв
Максимальна тяга приводів (X, Y, Z)	8896 Н

На рис. 3.17 наведено загальний вигляд експериментальної установки: на робочому столі верстата закріплено багатокomпонентний тензoметричний датчик HBM (Germany) MCS 10-005-3C, на якому розміщена заготовка. Така компоновка дає змогу фіксувати сили різання під час процесу контурного фрезерування.

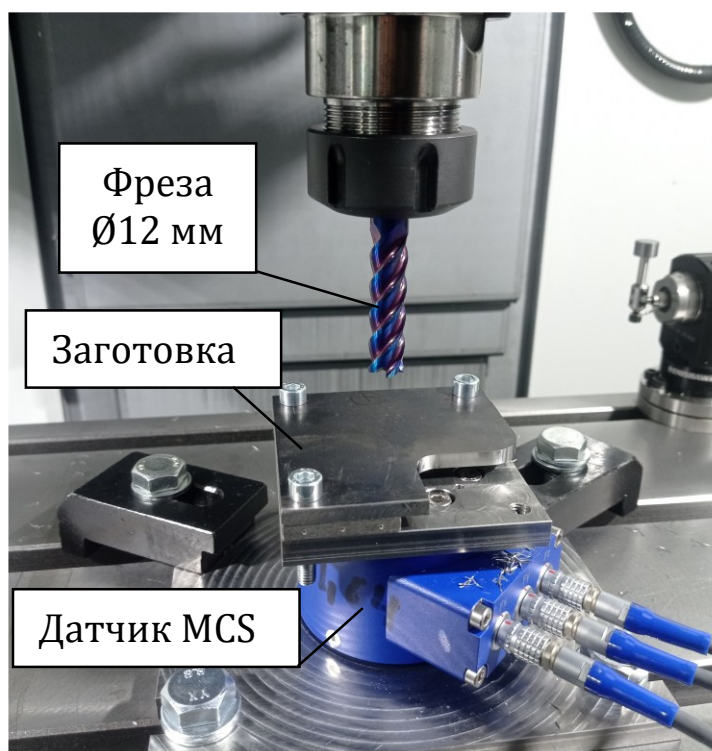


Рисунок 3.17 – Заготовка та тензометричний датчик HBM MCS 10-005-3C на столі верстата з ЧПК [82]

Для підсилення сигналу з тензометричного датчика використовували підсилювачі HBM (Germany) ClipX BM40 (рис. 3.18) приєднані до осей, за якими проводилось вимірювання відповідних компонентів сили різання.



Рисунок 3.18 – Підсилювачі сигналу HBM ClipX BM40

Отримані сигнали з динамометра передавались до підсилювачів, а далі – на ноутбук (рис. 3.19) та зберігались у форматі Excel. Такий підхід не вимагав спеціального калібрування, адже записи у файлах Excel відповідають реальним значенням сили різання.

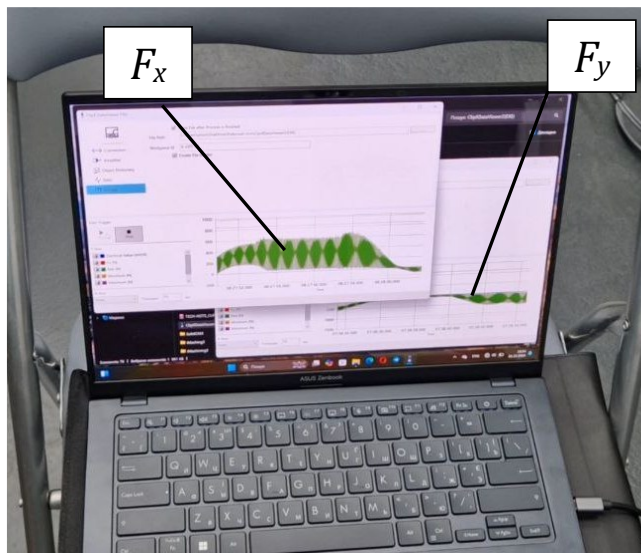


Рисунок 3.19 – Ноутбук із програмним забезпеченням для реєстрації та збереження F_x і F_y

Для оцінки ефективності управляючих програм проведено серію експериментів з фрезерування контуру заготовки, утвореного прямими, увігнутими та опуклими дугами кіл (рис. 3.20)

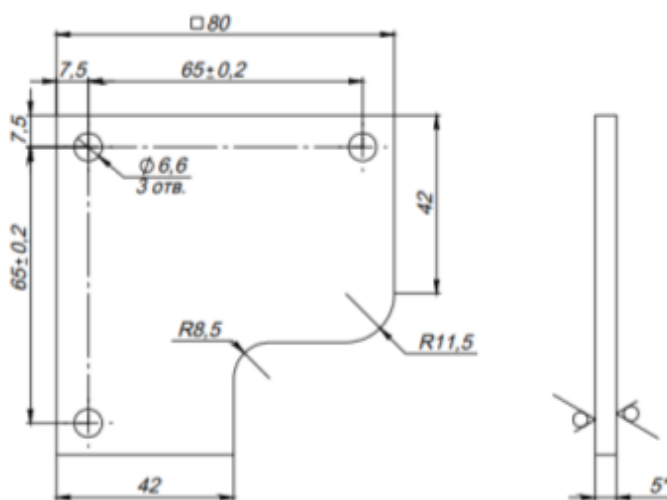


Рисунок 3.20 – Експериментальна заготовка з еквідистантним припуском ($H=1,5$ мм)

Така форма контуру охоплює всі можливі контури реальних деталей. Фрезерування виконувалось на спеціально підготовленій заготовці для

забезпечення рівновіддалених припусків по всьому контуру, що забезпечує однакові умови різання в експериментах. Для цього фрезерування в кожному експерименті проводилось за два проходи [82]. У першому проході обробка виконувалась фрезою Ø8 мм, 4 зуба, кут нахилу спіральної канавки 35° для підготовки рівновіддаленого припуску ($H=1,5$ мм), а після зміни інструмента на фрезу Ø12 мм, 4 зуба, кут нахилу гвинтової канавки 45° , матеріал швидкорізальна сталь Р6М5, з напиленням $TiAlCrN$ (рис. 3.21) контур оброблявся за розробленою програмою без зняття заготовки зі столу.



Рисунок 3.21 – Кінцева фреза, вигляд: а) зліва б) з торця

Оскільки виробник не надав інших геометричних характеристик фрези, було проведено вимірювання: Передній кут (γ): На рис. 3.22 представлено вимірювання переднього кута інструмента, який становить 6° .



Рисунок 3.22 – Вимірювання переднього кута (γ) кінцевої фрези

Задній кут (α): На рис. 3.23 показано вимірювання заднього кута, який складає 6° .



Рисунок 3.23 – Вимірювання заднього кута (α) кінцевої фрези

Скруглення різальної кромки (r) (рис. 3.24), становить 0,01 мм.



Рисунок 3.24 – Вимірювання радіуса скруглення різальної кромки кінцевої фрези

Система координат деталі виставляється, по перетину 3 площин (рис. 3.25).

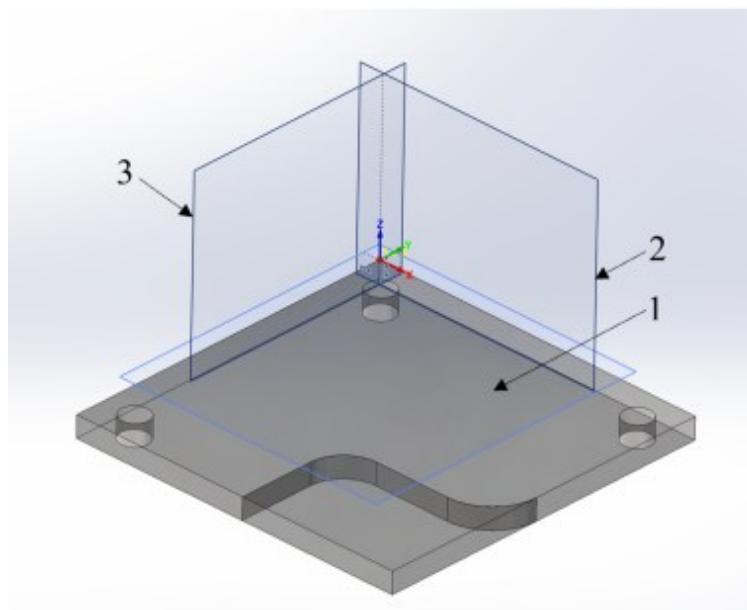


Рисунок 3.25 – Прив'язка системи координат до заготовки та деталі

Це забезпечило прив'язку управляючої програми до фактичного розташування заготовки і гарантувало рівновіддалений (еквідистанційний) припуск в експерименті.

3.4 Експериментальне дослідження та аналіз результатів

Оскільки сила різання безпосередньо пов'язана зі швидкістю видалення матеріалу (MRR), вирішено оцінити стабільність процесу різання за середньою горизонтальною складовою сили різання. На рисунку 3.26 наведено осцилограми складових F_x та F_y сили різання під час фрезерування контуру деталі за програмою, розробленою в SolidCAM. Помітна значна нестабільність складових, а в зоні обробки увігнутої частини контуру (виділена прямокутником на рисунку 3.27) осцилограми складових, незважаючи на малу ширину різання (5 мм), не досягають нуля.

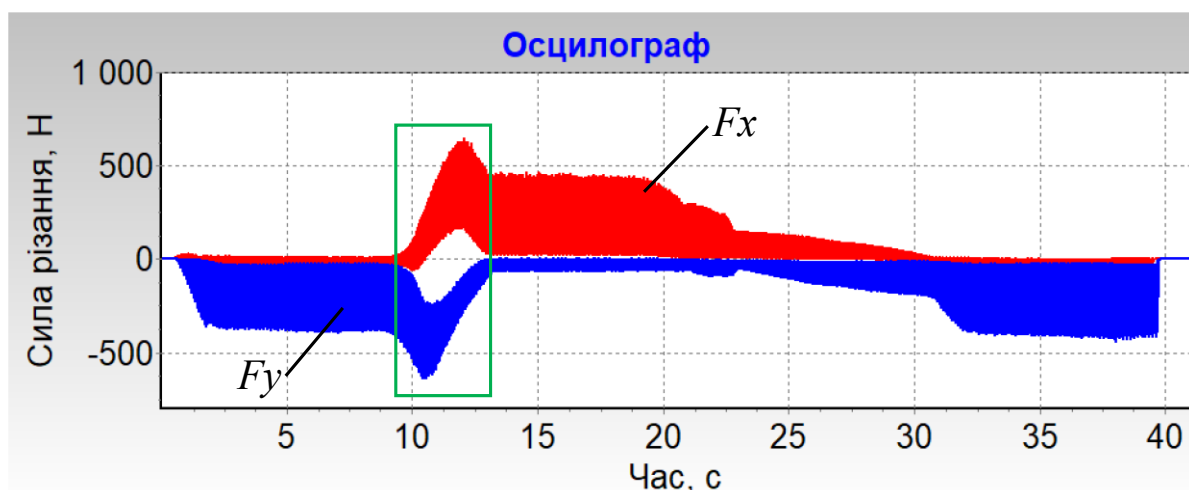


Рисунок 3.26 – Осцилограми зі складовими F_x і F_y сили різання під час контурного фрезерування за допомогою програми SolidCAM [82]

Горизонтальна складова сили різання показана на рис. 3.27. Вона була розрахована як сила F_{xy} за формулою:

$$F_{xy} = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2}, \quad (3.7)$$

де F_x , F_y - значення складових сили різання.

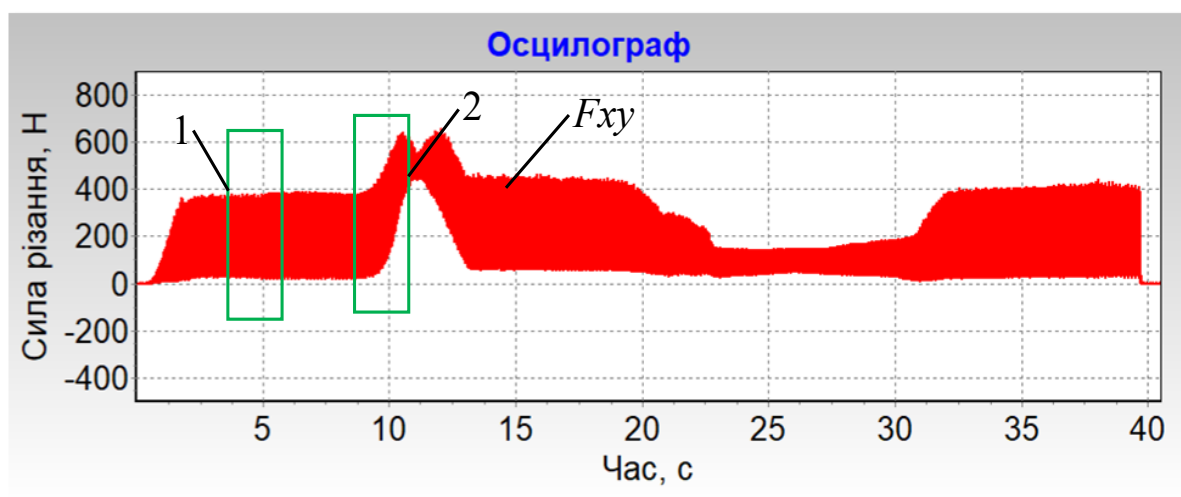


Рисунок 3.27 – Осцилограми сили різання F_{xy} під час контурного фрезерування за допомогою програми SolidCAM

На прямолінійних ділянках контуру 1 (рис. 3.27) спостерігаються зміни сили різання, як це видно зі збільшеного фрагмента осцилограми (рис 3.28). Сила різання досягає максимального значення близько 390 Н, після чого поступово зменшується майже до 0 Н. Це пояснюється роботою одного зуба фрези.

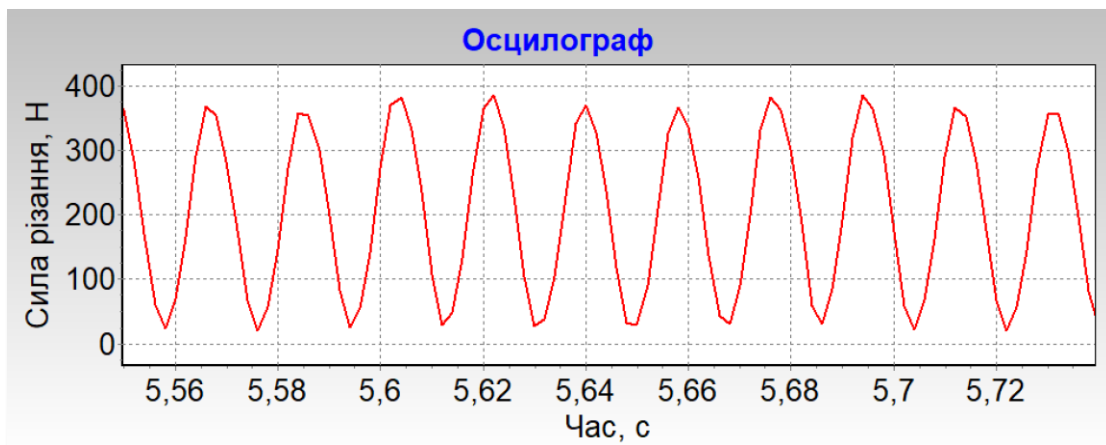


Рисунок 3.28 – Осцилограма сили різання на прямолінійних ділянці контуру

Під час обробки увігнутої ділянки контуру 2 (рис. 3.27) значення сили різання суттєво зростає: максимальне – досягає 620 Н, а мінімальне становить приблизно 350 Н (рис. 3.29). Такі зміни пов'язані з кривизною оброблюваної поверхні, що збільшує площу контакту кожного зуба фрези із заготовкою, а також із одночасною роботою кількох зубів фрези.

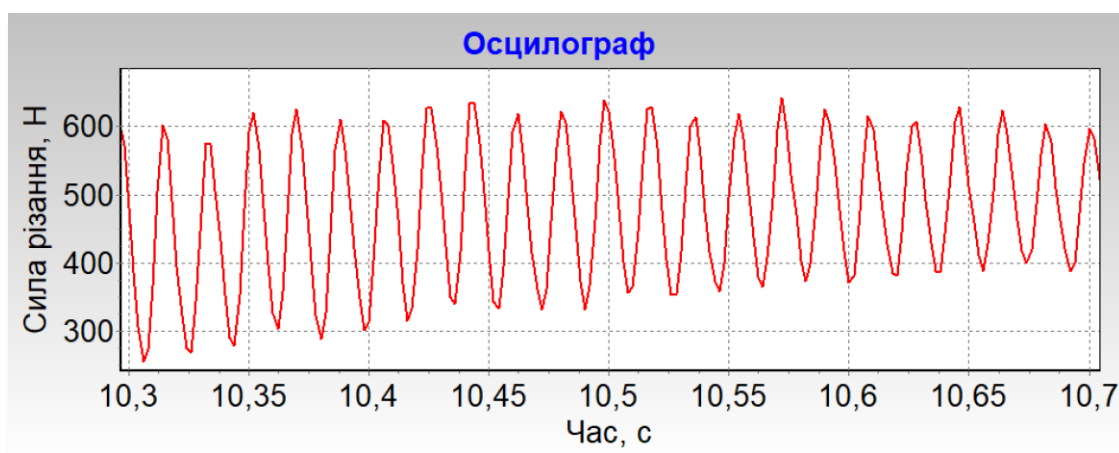


Рисунок 3.29 – Осцилограма сили різання на увігнутій ділянці контуру

Повний цикл обробки становить 38 с під час фрезерування управляючою програмою розробленою в SolidCAM. В подальшому доцільно порівнювати різні

управління за середнім значенням сили різання. Розраховане значення середньої сили різання ($F_{xy_{avr}}$) для управляючої програми, розробленої в SolidCAM наведено на рис. 3.30.

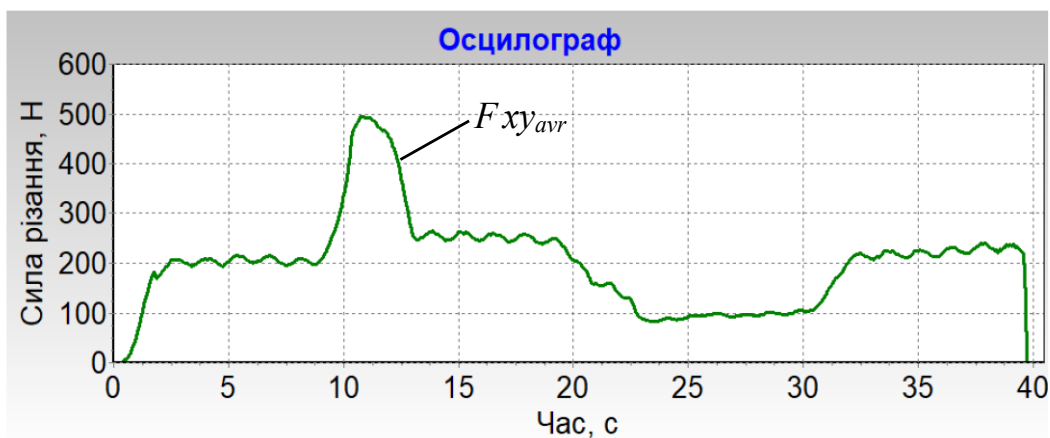
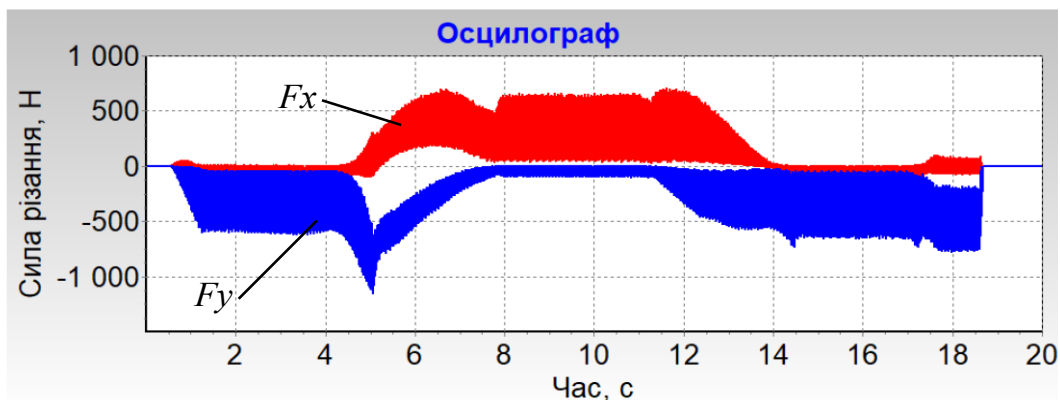


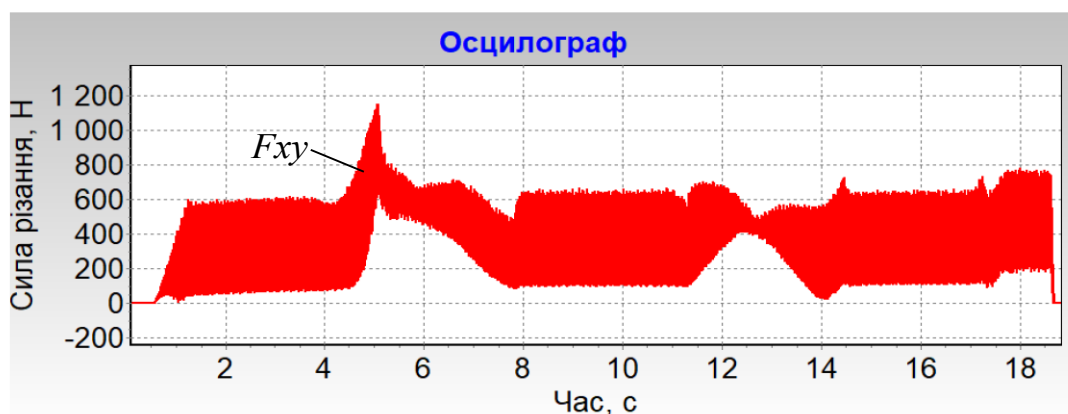
Рисунок 3.30 – Осцилограма середньої горизонтальної складової сили різання $F_{xy_{avr}}$ при контурному фрезеруванні з використанням програми SolidCAM [82]

Отримані експериментальні результати повністю підтверджують закономірності процесу контурного фрезерування, виявлені під час моделювання (див. рис. 3.2). Зрозуміло, що такий процес не може вважатися стабільним і призводить до необхідності його стабілізації.

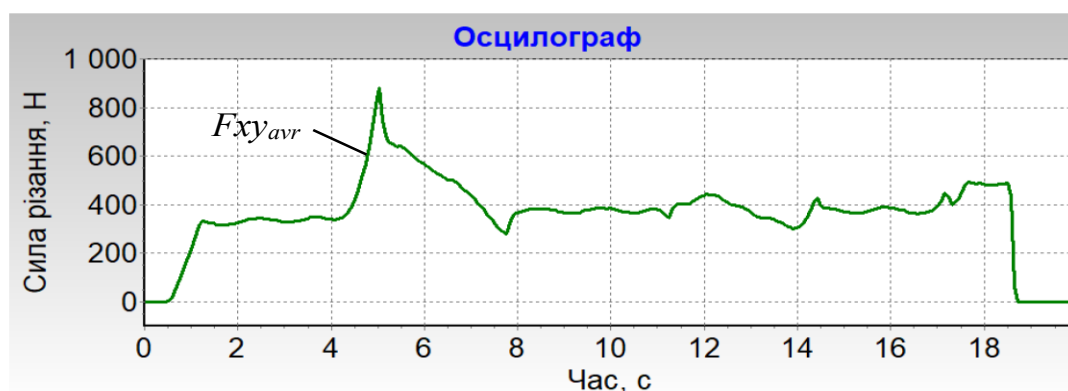
Наступний експеримент був виконаний при контурному фрезеруванні з використанням САМ-програми системи SolidCAM у версії iMachining від 2024 року. На (рис. 3.31, а) наведено осцилограми складових сили різання, а на (рис. 3.31, в) – середнє значення горизонтальної складової сили різання.



а)



б)



в)

Рисунок 3.31 – Результати контурного фрезерування з використанням програми iMachining: а) осцилограми складових сили різання; б) осцилограми сили різання F_{xy} ; в) осцилограма середньої горизонтальної складової сили різання F_{xyavr}

Очевидно, що, незважаючи на значне підвищення продуктивності обробки (час циклу 18 с), не вдалося забезпечити стабілізацію процесу різання по всьому контуру. Тут також спостерігається адекватність результатів моделювання.

На рис. 3.32 наведено результати фрезерування контуру деталі за новою програмою, спроектованою за розробленою технологією, що має управління подачею.

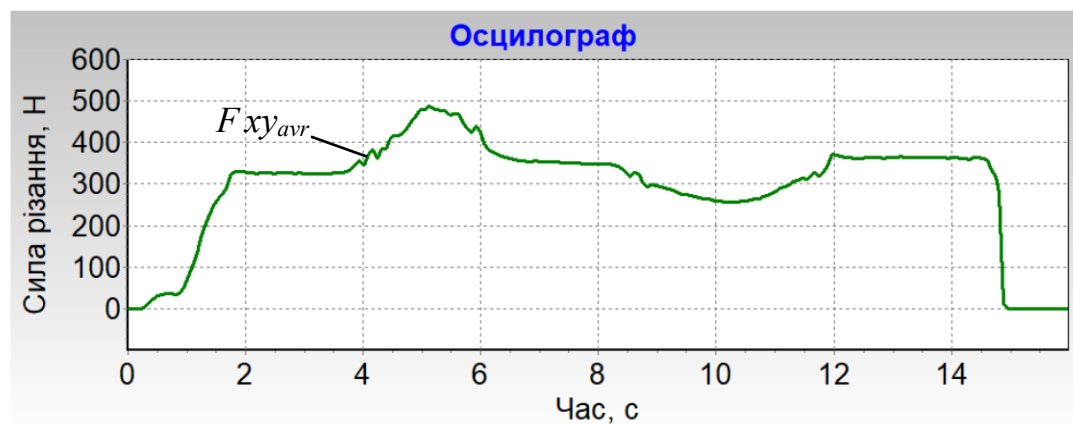
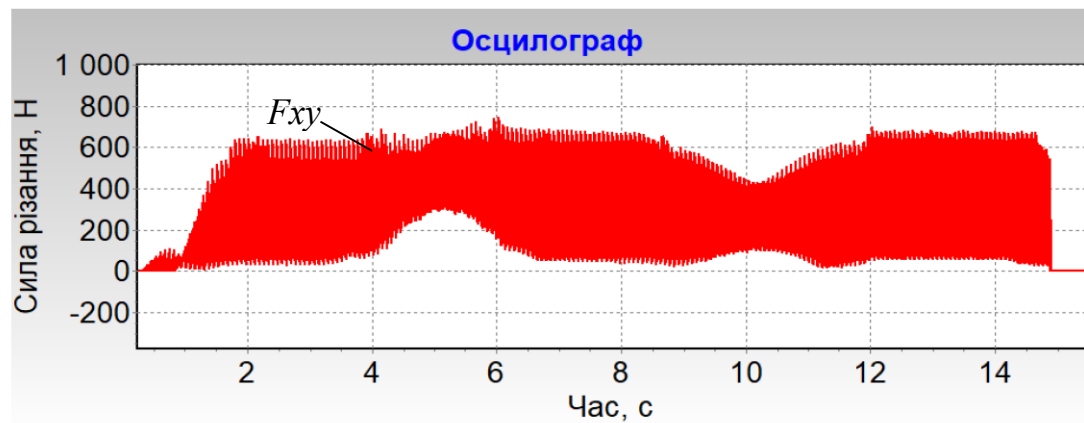
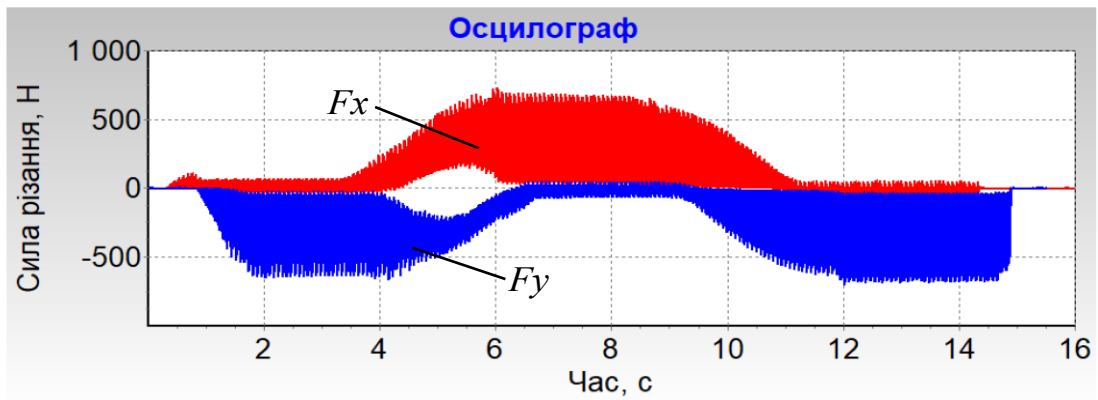


Рис. 3.32 – Результати контурного фрезерування за новою програмою:
 а) осцилограми складових сили різання; б) осцилограми сили різання F_{xy} ;
 в) осцилограма середньої горизонтальної складової сили різання F_{xyavr}

Очевидно, що вдалося суттєво стабілізувати процес контурного різання, забезпечити стабільність середньої сили різання та скоротити час циклу до 14 с, що перевищує розробки iMachining майже в 1,3 рази.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено алгоритм управління режимом різання, який забезпечує стабілізацію процесу контурного фрезерування на верстатах з ЧПК за критерієм максимального значення швидкості видалення матеріалу (MRR). Алгоритм передбачає управління подачею та обертами шпинделя для створення стабільних умов різання.

2. Реалізовано розроблений алгоритм у вигляді прикладної програми, яка дозволяє назначати різні стратегії управління. Результати моделювання продемонстрували, що час виконання операції складає: програма, розроблена в SolidCAM, забезпечує час циклу 36 с, iMachining — 18,4 с, управління подачею за представленим алгоритмом скорочує час до 14,5 с.

3. Проведені дослідження з реальним фрезеруванням контрольного контуру показали, що стабілізація швидкості видалення матеріалу (MRR) за допомогою нової управляючої програми дає найкращий результат: час циклу скорочується до 14 с, тобто в 1,3 раза менше, ніж при iMachining (18 с), і в 2,5 раза менше, ніж у SolidCAM (36 с). Таким чином, розроблена технологія підтверджує свою ефективність на практиці.

4. Представлений підхід створює основу для подальшого оптимізації процесу контурного фрезерування, спрямованої на підвищення продуктивності та дотримання необхідних технологічних та конструкторських обмежень.

РОЗДІЛ 4

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КОНТУРНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

Попередня стабілізація процесу різання на основі швидкості видалення матеріалу (MRR) дає змогу не лише істотно зменшити коливання характеристик різання, а й, за потреби, підвищити швидкості видалення матеріалу (MRR) до певного рівня, що може підвищити продуктивність контурного фрезерування. Однак, і більшість дослідників, і сучасні САМ-системи з «розумними» модулями здебільшого зосереджуються на окремих аспектах (наприклад, стабілізації кута чи сили або потужності різання), і не беруть до уваги всю сукупність конструкторських і технологічних обмежень, потрібних для визначення оптимальних режимів різання. Тому залишається ряд проблем, пов'язаних із дотриманням конструкторських вимог, обмежень на інструмент та обладнання, що використовуються у виробництві.

Отже, навіть після впровадження управління для стабілізації процесу різання існує потенціал для подальшого підвищення продуктивності на окремих ділянках обробки. Це можливо за умови врахування відповідних обмежень, які дозволяють адаптувати режими різання до наявних виробничих умов або змінювати їх відповідно до конструктивних вимог.

4.1 Формулювання задачі оптимізації процесу контурного фрезерування

Оптимізація режиму контурного фрезерування може бути визначена, як задача пошуку найкращих значень параметрів управління – подачі хвилинної f і частоти обертання шпинделя S , які відповідають усім технологічним і конструктивним обмеженням та забезпечують мінімальний час виконання технологічної операції t_0 . Такий підхід відноситься до однокритеріальних задач оптимізації, для розв'язання яких доцільно застосовувати методи лінійного

програмування. При цьому, формування системи обмежень і створення зручного та ефективного інструменту для реалізації таких задач є одним із ключових викликів сучасного виробництва.

Математична модель, яка використовується для вирішення цієї задачі, розробляється на основі класичних залежностей теорії різання. Вона представлена у вигляді системи рівнянь і нерівностей, які описують зв'язки між управляючими параметрами, технологічними обмеженнями та обраним критерієм оптимальності. Такий підхід дозволяє враховувати основні аспекти процесу фрезерування, включаючи обмеження на міцність інструмента, якість оброблюваної поверхні та допустиму потужність обладнання, що робить модель ефективним інструментом для оптимізації режимів різання [17].

Отже, сформульована задача оптимізації має такий вигляд:

Критерій: продуктивність процесу контурного фрезерування на верстаті з ЧПК.

Оціночна функція для критерію максимальної продуктивності:

$$f = S f_t \rightarrow \max, \quad (4.1)$$

оскільки основний час обробки $t_o = L / (f_t S n) \rightarrow \min$, де L – довжина обробки, n – кількість зубів.

Введені обмеження:

Обмеження за максимально допустимою силою різання.

Під час фрезерування, особливо при контурному обробленні, необхідно брати до уваги сили різання, що змінюються через кривизну оброблюваного контуру. Важливим обмеженням у таких умовах є максимально допустима сила різання $F_{xy \max}$. Дотримання цього обмеження дає змогу одночасно запобігти поломкам інструмента, деформаціям тонкостінних заготовок і забезпечити безпечне застосування вимірювальних приладів (тензодатчиків тощо).

Спираючись на рівняння (2.17) і (2.18), можна визначити компоненту сили різання F_{xy} . Для зменшення громіздкості розрахунків зручно подати її у спрощеній формі:

$$F_{xy} = C_p f_t^k \sin(\varphi)^k b, \quad (4.2)$$

де ширина стружки $b=B/\cos(\gamma)$, B – ширина різання, γ – кут нахилу гвинтової канавки фрези.

Звідси обмеження на максимальну силу різання $F_{xy \max}$ можна виразити, як:

$$f_t = \left(\frac{F_{xy \max}}{\sin(\varphi)^k C_p b} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (4.3)$$

Обмеження за максимально допустимою потужністю фрезерування.

Шпиндель верстата має забезпечити достатній крутний момент для ефективного різання, протистоячи тангенціальній складовій сили різання. Миттєвий крутний момент M (Н/м) враховує тангенціальну силу [21, 87], що діє на кожен зуб інструмента. Він обчислюється як сума добутків радіуса фрези і тангенціальної сили для кожного зуба:

$$M = R_m F_t, \quad (4.4)$$

де R_m – радіус фрези, F_t – тангенціальна сила різання і наближено складає $F_t=0,7 \cdot F_{xy}$.

Величина крутного моменту важлива для точного визначення необхідної потужності різання P (кВт), що знаходиться з добутку крутного моменту і частоти обертання:

$$P = \frac{2\pi MS\eta}{60000}, \quad (4.5)$$

де S – частота обертів шпинделя (об/хв), η – коефіцієнт ефективності.

Підставивши (4.4) в (4.5) можна отримати:

$$P = \frac{2\pi S R_m 0,7 F_{xy} \eta}{60000}. \quad (4.6)$$

Звідси при підстановці формули (4.2) можна отримати обмеження на максимальну потужність шпинделя P_{max} :

$$Sf_t = \left(\frac{60000 P_{max} \eta}{2\pi R C_p b \sin(\varphi)^k 0,7} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (4.7)$$

Обмеження за визначеною шорсткістю поверхні.

Реальний профіль поверхні, сформований після фрезерної операції, складається з двох основних складових: детермінованої, яку можна розрахувати геометрично, та випадкової, що залежить від таких факторів, як вібрації технологічної оброблювальної системи, утворення й відрив наростів матеріалу, зношення різальних лез інструмента та інших впливів [17]. Через складність прогнозування випадкових складових запропоновано використовувати, як обмеження в задачі оптимізації лише детерміновану складову шорсткості, далі R_z . Такий підхід може у перспективі дозволити прогнозувати шорсткість утвореної поверхні під час впровадження так званих «безвібраційних» режимів різання [89].

Призначення «безвібраційних» режимів різання дозволить зменшити вплив випадкових складових на утворену шорсткість поверхні, роблячи її більш передбачуваною [89]. Це створює можливість застосування емпіричних

поправочних коефіцієнтів, що імітують вплив випадкової складової. У поєднанні з детермінованою складовою, така методика забезпечить максимально точне наближення до реальної шорсткості поверхні. Це дасть змогу формувати більш точні та обґрунтовані обмеження для задачі оптимізації.

Під час фрезерування відбуваються два основних рухи: обертальний та поступальний. У результаті точки різальних лез формують траєкторії, які мають вигляд трохоїди – модифікованої версії циклоїди [69]. Висота трохоїди відповідає діаметру фрези, а відстань між її витками визначається шляхом, який проходить оброблювана деталь за один оберт фрези.

Кожен зуб фрези залишає свою траєкторію, яка зміщена від попередньої на величину подачі на зуб (f_t). За умов високої частоти обертання шпинделя трохоїда набуває форми, близької до дуги кола. У таких випадках її можна апроксимувати колом, діаметр якого дорівнює діаметру фрези.

Висота піка нерівності, що визначає детерміновану складову шорсткості R_z поверхні під час фрезерування, розраховується на основі геометричних співвідношень. Ці співвідношення відображені на рисунках 4.1, 4.2 та 4.3, де показано обробку поверхонь із різною кривизною.

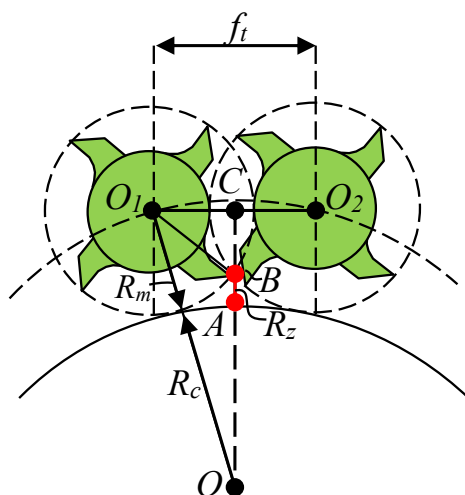


Рисунок 4.1 – Схема визначення детермінованої частини шорсткості на опуклій дугі

Враховуючи, що центр фрези слідує за заданою траєкторією із встановленою хвилинною подачею, то подачу на зуб можна наближено уявити,

як прямий відрізок, між центрами фрези, що рухається O_1O_2 (рис. 4.1, 4.2 та 4.3).
Таке припущення є прийнятним завдяки малій величині подачі на зуб. Отже, детермінована складова шорсткості поверхні R_z , яка утворюється після обробки опуклої дуги, можна визначити як довжину відрізка AB :

$$AB = OC - OA - BC, \quad (4.8)$$

де відрізки OC , OA та BC можна знайти як:

$$OC = \sqrt{(OO_1)^2 - (O_1C)^2} = \sqrt{(R_c + R_m)^2 - (f_t / 2)^2},$$

$$OA = R_c,$$

$$BC = \sqrt{(O_1B)^2 - (O_1C)^2} = \sqrt{(R_m)^2 - (f_t / 2)^2};$$

Звідси:

$$R_z = \sqrt{(R_c + R_m)^2 - (f_t / 2)^2} - R_c - \sqrt{(R_m)^2 - (f_t / 2)^2}, \quad (4.9)$$

де, R_m – радіус фрези, R_c – радіус кривизни.

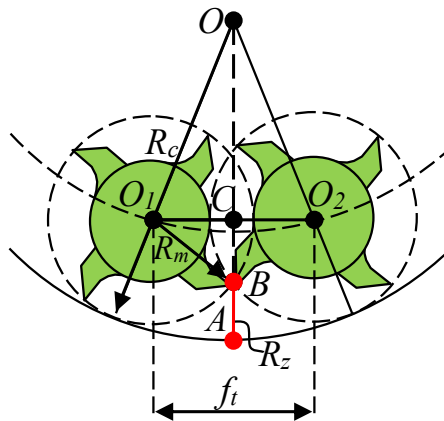


Рисунок 4.2 – Схема визначення детермінованої частини шорсткості на увігнутій дугі

Аналогічний підхід використовується для визначення детермінованої складової шорсткості R_z на увігнутих дугах, як показано на рис. 4.2, де R_z визначається як довжина відрізка AB :

$$AB = -OC + OA - BC, \quad (4.10)$$

де відрізки OC , OA та BC :

$$OC = \sqrt{(OO_1)^2 - (O_1C)^2} = \sqrt{(R_c - R_m)^2 - (f_t / 2)^2},$$

$$OA = R_c,$$

$$BC = \sqrt{(O_1B)^2 - (O_1C)^2} = \sqrt{(R_m)^2 - (f_t / 2)^2};$$

Звідси:

$$R_z = -\sqrt{(R_c - R_m)^2 - (f_t / 2)^2} + R_c - \sqrt{(R_m)^2 - (f_t / 2)^2}. \quad (4.11)$$

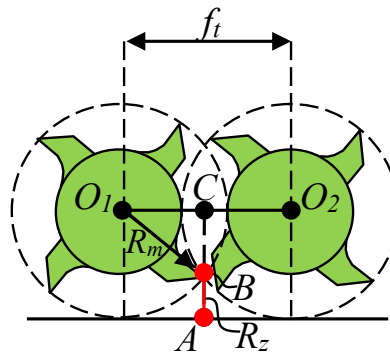


Рисунок 4.3 – Схема визначення детермінованої частини шорсткості на прямій ділянці контуру

У випадку прямої ділянки оброблюваного контуру детермінована складова шорсткості R_z знаходиться, як значення відрізка AB (Рис. 4.3):

$$AB = AC - BC, \quad (4.12)$$

де відрізки AC і BC :

$$AC = R_m,$$

$$BC = \sqrt{AC^2 - (O_1C)^2} = \sqrt{R_m^2 - (f_t / 2)^2},$$

Звідси:

$$R_z = R_m - \sqrt{R_m^2 - (f_t / 2)^2}. \quad (4.13)$$

Провівши алгебраїчні перетворення формул (4.10), (4.11) і (4.12), можна визначити подачу на зуб (f_{tRZ}), що відповідає певному заданому значенню детермінованої складової шорсткості R_z :

– для опуклої ділянки контуру:

$$f_{tRZ} = 2 \sqrt{R_m^2 - \left(\frac{(R_c + R_m)^2 - R_m^2 - (R_z + R_c)^2}{2(R_z + R_c)} \right)^2}, \quad (4.14)$$

– для увігнутої ділянки контуру:

$$f_{tRZ} = 2 \sqrt{R_m^2 - \left(\frac{(R_c - R_z)^2 + R_m^2 - (R_c - R_m)^2}{2(R_c - R_z)} \right)^2}, \quad (4.15)$$

– для прямої ділянки контуру:

$$f_{tRZ} = 2 \sqrt{2R_m R_z - R_z^2}, \quad (4.16)$$

Це дозволяє встановити обмеження на параметр R_z для різних сегментів траєкторії формоутворення, забезпечуючи відповідність якості оброблюваної поверхні:

$$f_t \leq f_{tRZ}. \quad (4.17)$$

Обмеження за визначеною стійкістю інструмента.

Знос інструмента суттєво впливає на якість обробленої поверхні та загальну ефективність процесу. Для контролю критичного зносу зазвичай визначають критерій стійкості інструмента, який вимірюється тривалістю його ефективної роботи. Сучасні емпіричні моделі оцінювання стійкості базуються насамперед на дослідженнях Фредеріка В. Тейлора [90], опублікованих ще 1907 року. У його роботі було встановлено ключову залежність стійкості інструмента від швидкості різання. Згодом цю залежність розширювали та уточнювали, додаючи додаткові змінні (наприклад, подачу, глибину різання або аналог товщини стружки) [91–95].

Проведення випробувань на визначення стійкості інструмента та критерії зносу регламентовано стандартом ISO 8688 (частини 1 та 2) [96-97]. Відповідно до цього стандарту основним критерієм вважають досягнення на задній поверхні інструмента максимального зносу $VB_{max} = 0,3$ мм по всій осьовій глибині різання.

У дослідженнях [98] йдеться про фрезу з швидкорізальної сталі P6M5 без покриття, проте в цій роботі застосовуватиметься фреза з покриттям $TiAlCrN$, яке здатне значно поліпшити стійкість у порівнянні з аналогом без покриття.

Навіть при контурному фрезеруванні вирішальну роль у зносі зазвичай відіграє швидкість різання. Водночас слід брати до уваги і зміну робочих характеристик на ділянках з різною кривизною (наприклад, при фрезеруванні дуг). У таких випадках доцільно користуватися показником товщини стружки h_s , який відображає зміни умов різання на різних сегментах контуру. Так для коректного визначення часу стійкості під час контурного фрезерування варто використати модифіковану емпіричну залежність [99].

Згідно з результатами досліджень [98-100], коефіцієнти у модифікованій формулі Тейлора доцільно дещо відкоригувати, щоб врахувати змінні, які виникають під час обробки поверхонь зі змінною кривизною, а також ефект від покриття $TiAlCrN$.

$$V h_c^p T^m = C, \quad (4.18)$$

де V – швидкість різання (м/хв), h_c – товщина стружки (мм), T – стійкість інструмента (хв), C , m , p – емпіричні коефіцієнти.

Підставивши значення, що відповідають швидкості різання та товщині стружки, отримуємо обмеження за стійкістю інструмента:

$$Sf_t = \left(\frac{C \sin(\varphi)^p (\pi D)^m}{1000^m T} \right)^{\frac{1}{mp}}. \quad (4.19)$$

Обмеження по точності за максимально допустимим прогином фрези в межах допуску.

Під час фрезерування на інструмент впливає сила різання, яка часто призводить до його прогину. Це може негативно вплинути на точність обробленої поверхні, вносячи значні похибки у форму виробу. Така проблема особливо актуальна під час контурного фрезерування, коли зміна контуру обробки призводить до зміни умов різання, включаючи силу різання.

Важливість розрахунку похибки, що вноситься прогином інструмента, зростає під час оптимізації контурного фрезерування, де встановлюються обмеження на точність утвореної поверхні.

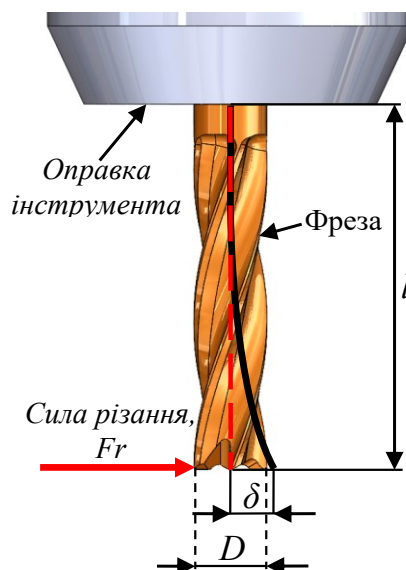


Рисунок 4.4 – Схема розрахунку прогину фрези

Схема, яка використовується для розрахунку прогину фрези зображена на рис. 4.4. Фрезу зазвичай розглядають, як консольно закріплену балку [101, 102], яка піддається впливу нормальної складової сили різання F_n на кінці, найвіддаленішому від точки кріплення (оправки) l . В цьому контексті, жорсткість оправки та шпинделя припускається значно вищою, тому їхній прогин зазвичай не враховується в розрахунках.

Прогин фрези δ може бути розрахований за допомогою формули для статичного навантаження консольно закріпленої балки:

$$\delta = \frac{F_n l^3}{3EI}, \quad (4.20)$$

де F_n – нормальна компонента сили різання, (Н), l – відстань від точки прикладення сили до торця оправки, в якій закріплена фреза, (м), E – модуль Юнга матеріалу інструмента, (Па), I – момент інерції поперечного перерізу інструмента.

Для врахування гвинтоподібних канавок у фрезі при визначенні моменту інерції поперечного перерізу знаходиться ефективний діаметр, що складає 75-85% від зовнішнього [13, 103]. В такому випадку момент інерції буде розраховуватись:

$$I = \frac{\pi(0,8D)^4}{64}. \quad (4.21)$$

Для формул (4.20) і (4.21) записавши всі константи в одну змінну отримаємо $k=64/(3\pi E)$. Відповідно враховуючи задані конструктором обмеження на відхилення форми, які можна зв'язати з найбільшим доступним прогином інструменту δ_{max} , можна отримати:

$$\delta = k \frac{F_n l^3}{(0,8D)^4} \leq \delta_{max}. \quad (4.22)$$

Підставивши формулу для знаходження $F_n=0,3F_x$ отримуємо обмеження для подачі на зуб:

$$f_t = \left(\frac{\delta_{max} (0,8D)^4 3\pi E}{64 \sin(\varphi)^k C_p b l^3 0,3} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (4.23)$$

Експлуатаційні обмеження.

Металорізальний верстат, що використовується для обробки, накладає певні конструктивні обмеження на параметри різання, які можуть бути використані під час обробки. Ці обмеження визначаються характеристиками верстата та його можливостями і включають:

- діапазон повздовжніх подач (мм/хв):

$$f_{min} \leq f \leq f_{max}, \quad (4.24)$$

де f_{min} — мінімальна допустима подача (мм/хв), f_{max} — максимальна допустима подача (мм/хв).

- діапазон частот обертання шпинделя (об/хв):

$$S_{min} \leq S \leq S_{max}, \quad (4.25)$$

де S_{min} — мінімальна допустима частота обертання шпинделя (об/хв), S_{max} — максимальна допустима частота обертання шпинделя (об/хв).

4.2 Автоматизація вирішення задачі оптимізації

На основі сформованої задачі оптимізації та всіх формул і нерівностей, що використовуються для введення обмежень, розроблена прикладна програма інтерфейс якої наведено на (рис. 4.5).

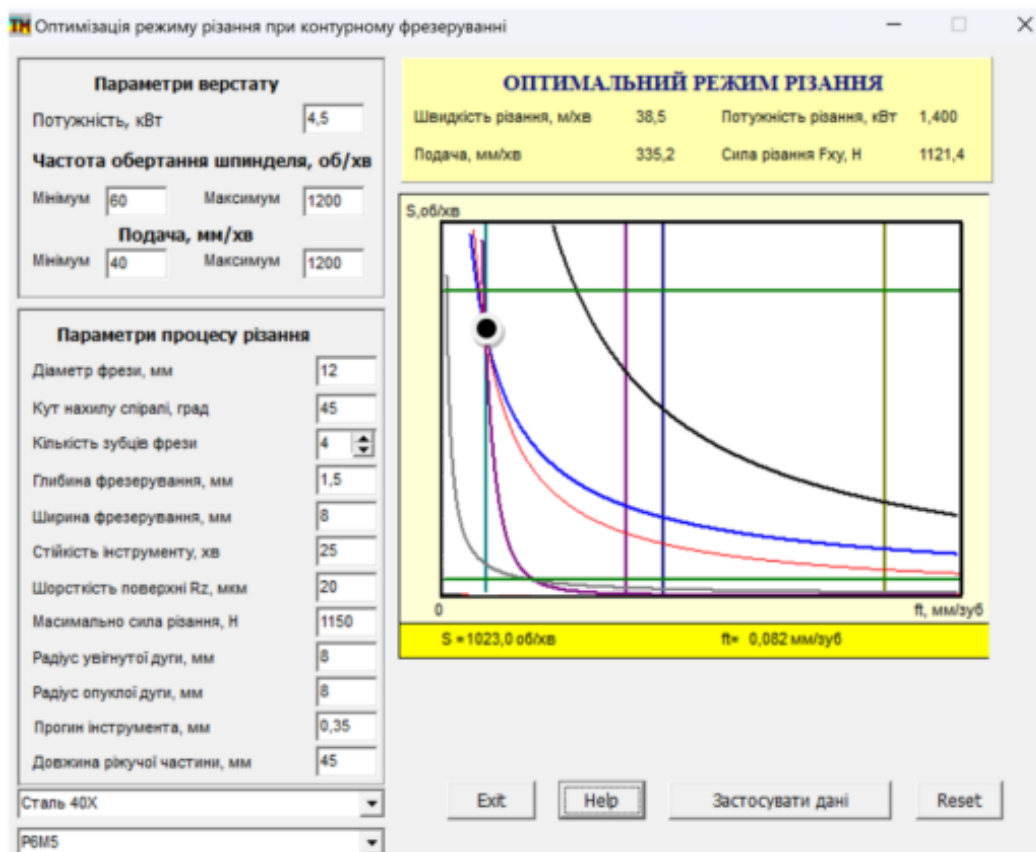


Рисунок 4.5 – Інтерфейс програми для оптимізації процесу контурного фрезерування

Програма відображає зліва розділи в які вноситься вхідна інформація, це «Параметри верстату», до них належить максимально допустима потужність шпинделя, також експлуатаційні обмеження верстата: максимальні і мінімальні значення подачі стола верстата та оберти шпинделя.

Нижче на інтерфейсі знаходиться область «Параметри процесу різання», що включає в себе інформацію про інструмент: діаметр, кут нахилу гвинтової канавки, кількість зубів фрези, довжина різальної частини фрези від точки зони різання до зони закріплення в оправці.

Параметри припуску: глибина різання (варто зазначити, що для визначення глибини різання на ділянках дуг контуру, що обробляється використовується формула $H=Rm-(1-\cos\varphi)$, де φ – кут різання, що попередньо знаходиться за допомогою розробленої процедури чисельного моделювання) та ширина різання.

Наступними ідуть значення, що використовуються для встановлення обмежень, такі як: стійкість інструмента, значення детермінованої складової шорсткості утвореної поверхні (для її розрахунку введені радіуси, що описують кривизну оброблюваного контуру), максимально допустима сила різання та максимально допустимий прогин інструмента.

Також, необхідно ввести матеріал фрези та заготовки, що дасть можливість визначати найбільш точні значення сил різання та потужності шпинделя при створенні обмежень.

Після вводу необхідних даних і натискання «Застосувати дані», з'являється графік з обмеженнями в якому осі Y відповідає значення частоти обертів шпинделя верстата, а X подача на зуб (рис. 4.6).

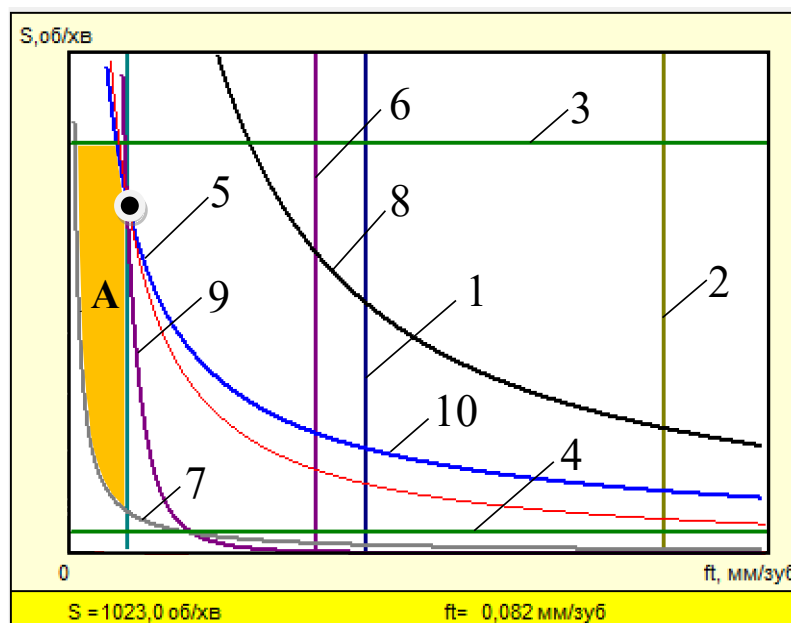


Рисунок 4.6 – Створений графік прикладною програмою

На графіку (рис. 4.6) лінії відповідають обмеженням: 1, 2 – детермінована складова шорсткості на увігнутій та прямій ділянці контуру, мкм; 3, 4 – максимальні і мінімальні оберти шпинделя, об/хв; 5 – максимальна сила різання, Н; 6 – максимально допустимий прогин інструмента δ_{max} , мм; 7, 8 – мінімальна і максимальна подача, мм/хв; 9 – потужності, кВт; 10 – стійкість інструмента, хв.

Прямі і гіперболи на графіку відсікають область A , що є областю допустимих значень при виборі частоти обертання шпинделя і подачі на зуб.

Відповідно вирішенням задачі оптимізації, а саме задоволення критерію на максимальну продуктивність процесу контурного фрезерування при врахуванні всіх необхідних обмежень є точка, що найбільш віддалена від початку координат графіка і також має найвище значення по осі Y (див. рис. 4.6).

Відповідно вибравши таку найбільш віддалену точку від початку координат в області допустимих значень A , можна визначити оптимальний режим різання, що і є розв'язком задачі оптимізації процесу контурного фрезерування (див. рис. 4.7).

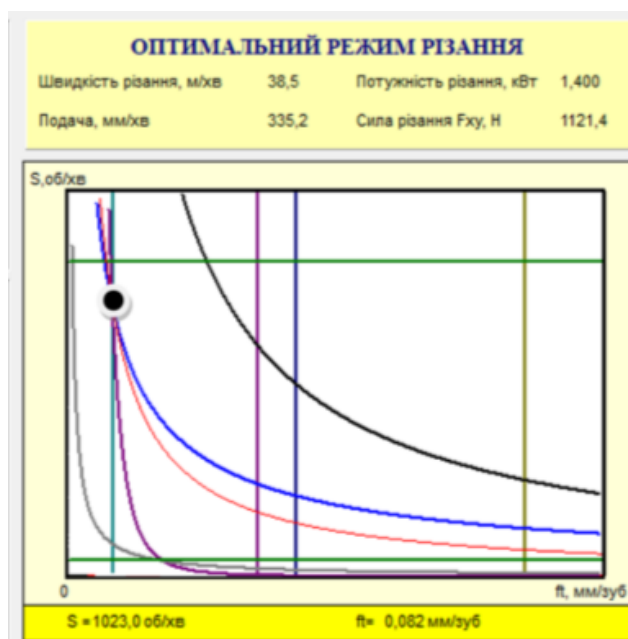


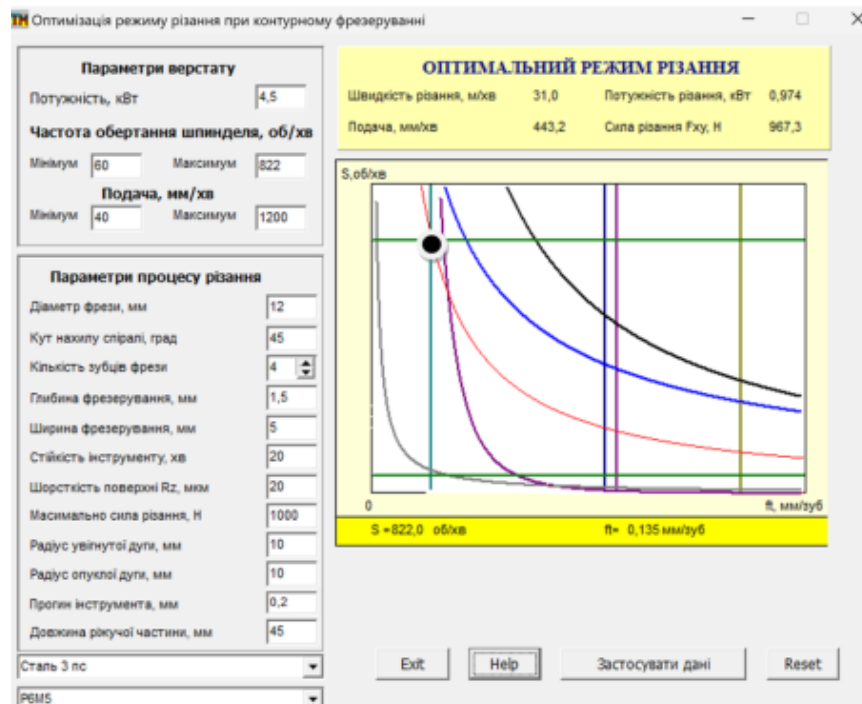
Рисунок 4.7 – Розв'язок задачі оптимізації для визначення оптимальних режимів різання

Прикладна програма у вікні «Оптимальний режим різання», визначає швидкість різання, подачу хвилинну та значення потужності різання (кВт) та сили різання (Н).

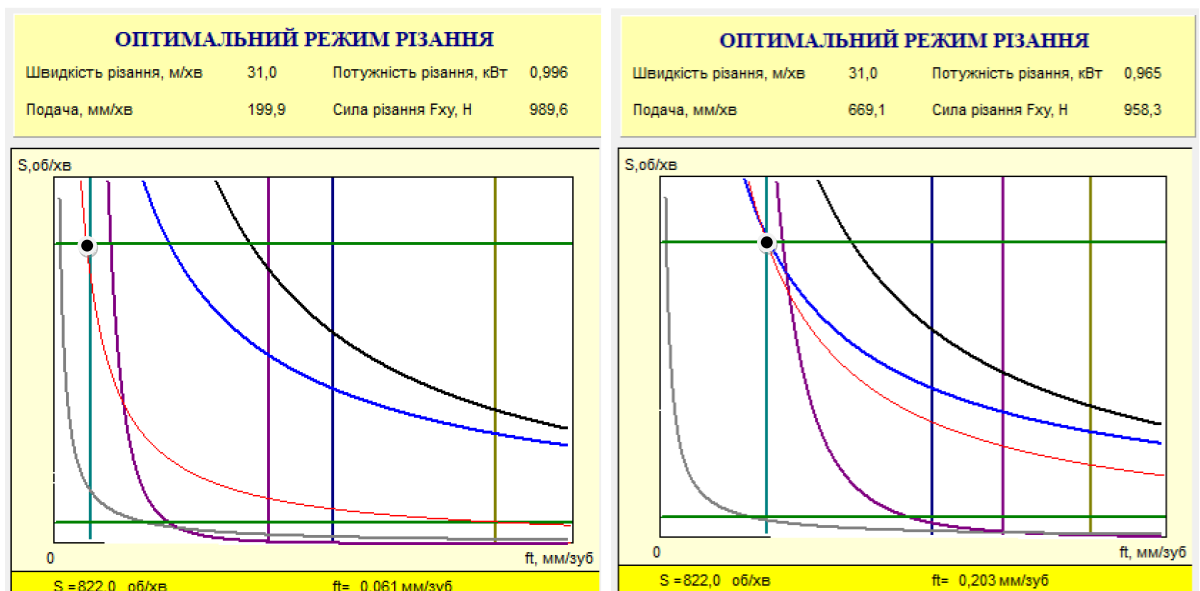
4.3 Застосування програмного рішення для оптимізації режимів різання

Для прикладу, застосування розробленої програми використано управляючу програму, що записана в G-кодах, яка має управління подачею та стабілізує швидкість видалення матеріалу (MRR) на певному рівні (рис. 3.13).

Для кожного кадру такого G-коду застосована оптимізація, для призначення режимів різання, що забезпечать найбільшу продуктивність при врахуванні усіх обмежень. Нижче наведені приклади застосування програми для основних ділянок оброблюваного контуру: прямої, дуги увігнутої та опуклої (див. рис. 4.8)



а)



б)

в)

Рисунок 4.8 – Визначення оптимальних режимів різання для ділянки контуру:

а) прямої; б) увігнутої; в) опуклої

Після визначення оптимальних режимів різання для всіх кадрів, на основі нового управління, створено управляючу програму в G-кодах (рис. 4.9).

%	
O1014 (KPI-F-opt)	G02 X50.5 Y-58. R4. F363.
G21 (mm)	G01 X66.876 Y-58. F443.
G90 G17 G40 G80 G00	G01 X68.5 Y-58. F523.
M06 T6 (TOOL 6 - DIA 12.)	G03 X83.5 Y-47.568 R16 F670.
G00 G54 G90 X46.5 Y-100. S822 M03	G03 X84. Y-45.969 R16. F618.
G43 H6 Z100.	G03 X84.35 Y-44.186 R16. F583.
S822	G03 X84.5 Y-42. R16. F495.
Z50.	G01 Y-24. F443.
Z2.	G01 X96.5 Y-24.
G01 Z-5.5 F138.	G00 Z100.
G01 X46.5 Y-100.0 F392.	M05
G01 X46.5 Y-79.1 F392.	G90 G00 X0. Y0.
G01 X46.5 Y-64.45 F443.	G90 G00 Z0.
G01 X46.5 Y-63.3 F333.	M30
G01 Y-62.55 F253.	%
G01 Y-62. F220.	
G02 X49. Y-58.292 R4. F200.	
G02 X49.5 Y-58.127 R4. F242.	
G02 X50. Y-58.031 R4. F286.	

Рисунок 4.9 – Управляюча програма записана в G-кодах з оптимізованими режимами різання

Як можна бачити, застосування оптимізації збільшено значення подачі в усіх кадрах управляючої програми в G-кодах.

На основі цієї управляючої програми, записаної в G-кодах, проведено моделювання за допомогою попередньо розробленої прикладної програми, інтерфейс якої наведено на (рис. 4.10).

В порівняння з (рис 3.14), значення на осцилографі 2 – швидкості видаленого матеріалу та 3 – сили різання збільшилося, хоча й можна констатувати, що таке збільшення відповідає заданим обмеженням.

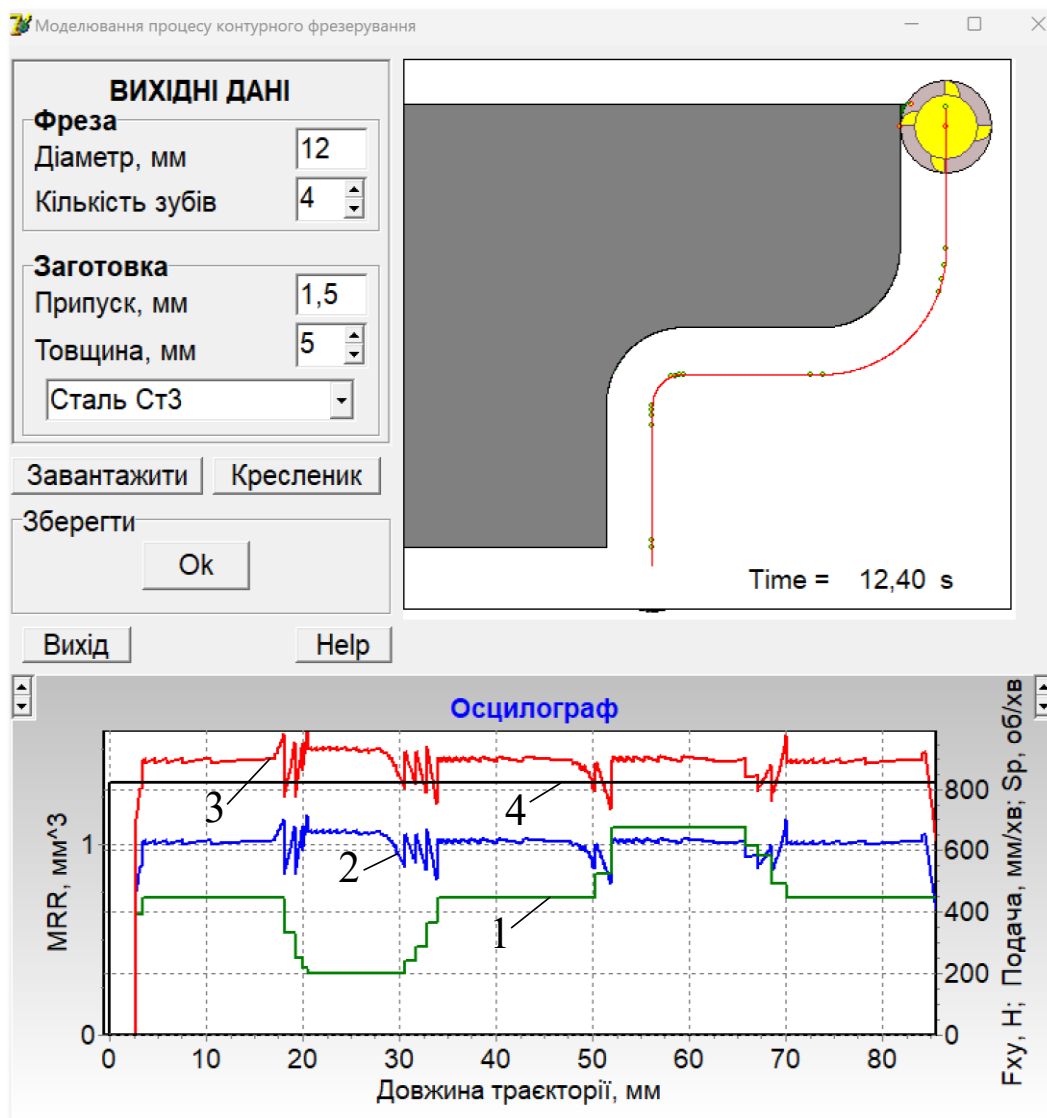


Рисунок 4.10 – Результати моделювання процесу фрезерування з оптимізованим управлінням

Моделювання управляючої програми, записаної в G-кодах з оптимальними режимами різання, показує збільшення продуктивності, адже в порівнянні з управлінням подачею час на операцію зменшився в 1,17 раза відповідно та складає 12,4 с. Варто зазначити, що у порівнянні з управлінням розробленим в SolidCAM та модулі iMachining основний машинний час операції значно зменшився відповідно майже в 2,9 та 1,5 разів.

4.4 Експериментальна перевірка оптимізованого управління

Під час експериментального дослідження контурного фрезерування, з оптимальним режимом різання, зі стійки верстата з ЧПК (рис. 4.11) фіксувалися дані про потужність різання.



Рисунок 4.11 – Інтерфейс стійки верстата з ЧПК Haas TM-OP [105]

Ці дані відображалися в реальному часі, а також записувалися у форматі відео. Для аналізу отриманих відомостей було використано спеціально розроблену комп'ютерну програму, яка дала змогу розшифрувати зібрану інформацію (рис. 4.12).

Frame	Timestamp (s)	Load (%)	P (kW)	S (rev/min)	F (mm/min)
frame_0354.png	11,80264775	37	1.3	821	203
frame_0355.png	11,83598856	37	1.4	821	203
frame_0356.png	11,86932938	37	1.4	821	203
frame_0357.png	11,90267019	37	1.4	821	203
frame_0358.png	11,936011	37	1.4	821	203
frame_0359.png	11,96935182	38	1.4	822	203
frame_0360.png	12,00269263	38	1.4	822	203

Рисунок 4.12 – Фрагмент розшифрованої інформація з відео

На основі отриманої інформації було створено графік (рис. 4.13), що ілюструє зміну потужності різання при застосуванні оптимізованого управління.

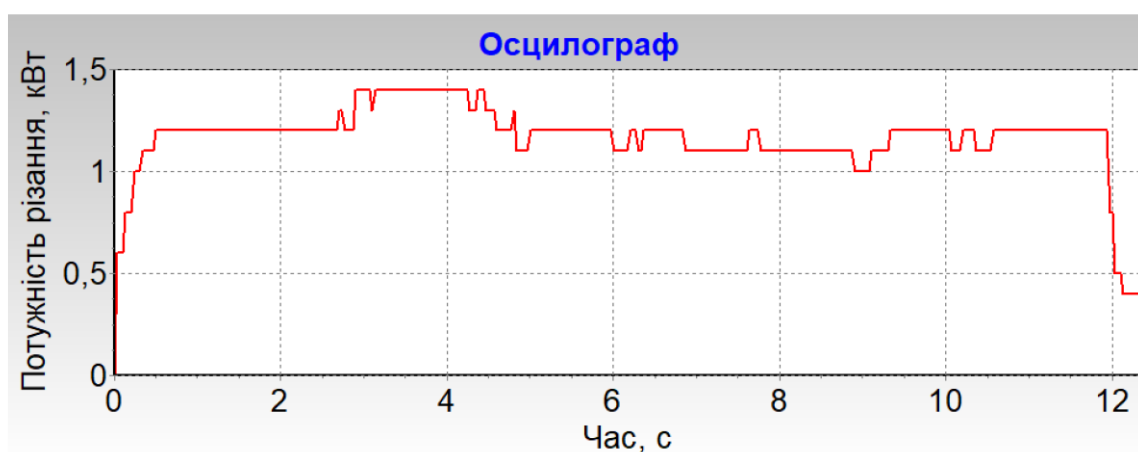


Рисунок 4.13 – Результати контурного фрезерування за програмою з оптимізованим управлінням

Оскільки потужність різання тісно пов'язана із силою різання, оцінювати стабільність процесу можна і за цим показником. Такий підхід не потребує окремих вимірювальних приладів, адже відповідні дані надає сама стійка верстата з ЧПК.

На найскладнішій ділянці траєкторії (увігнута дуга) максимальна сила різання, зафіксована динамометром, становила 943 Н, тоді як за управлінням розробленим модулем iMachining, вона сягала 1154 Н (рис. 3.31, б). Це підтверджує ефективність розробленої управляючої програми з оптимальним режимом різання, адже час циклу скоротився приблизно в 1,4 рази порівняно з iMachining.

Таким чином, оптимізоване управління дозволило суттєво зменшити загальну тривалість операції. За результатами експерименту (рис. 4.13), весь цикл обробки триває лише 12,3 с, а величини сили та потужності різання не перевищують встановлених обмежень (див. рис. 4.8).

ВИСНОВКИ

1. Сформульовано задачу оптимізації для процесу контурного фрезерування на верстатах із ЧПК. Критерієм оптимізації визначено максимальну продуктивність з урахуванням технологічних і конструкторських

обмежень. Розроблено математичну модель, що дає змогу обирати режими різання, які задовольняють усі встановлені вимоги.

2. Створено алгоритми та прикладні програми. На основі сформульованої задачі оптимізації розроблено прикладну програму, яка автоматизує процес вибору оптимальних режимів різання. Завдяки інтерфейсу програми можна вводити вхідні параметри й обмеження та отримувати графічне відображення допустимих областей для подальшого визначення оптимального набору параметрів.

3. Моделювання продемонструвало ефективність запропонованих рішень. Використання розробленої програми суттєво скорочує тривалість операцій і дотримується накладених обмежень.

4. Експериментальні дослідження оптимізованого управління підтвердили, що час обробки можна скоротити до 12,3 с (замість 36 с у SolidCAM чи 18 с в iMachining). Це приблизно в 3,09 рази швидше, ніж базовий процес, і в 1,46 рази швидше, ніж застосування iMachining. Водночас показники сили та потужності різання залишаються в допустимих межах. Відсутність складних вимірювальних систем (зокрема, завдяки моніторингу потужності різання) спрощує впровадження методики у виробництво. Експериментальні дослідження також довели узгодженість результатів моделювання з реальними умовами обробки, що підкреслює універсальність і практичну ефективність розробленої моделі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблено комплекс методів та програмні засоби для оптимізації процесу контурного фрезерування за критерієм максимальної продуктивності, що дає змогу суттєво скорочувати тривалість операції, дотримуючись усіх необхідних обмежень.

Отримані результати в дисертаційній роботі:

1. Розроблено математичну модель, яка враховує специфіку контурного фрезерування. Модель дозволяє точно ідентифікувати процес при різних умовах різання, оцінювати швидкість видалення матеріалу (MRR) та прогнозувати основні силові характеристики. Реалізація моделі в прикладній програмі дозволила автоматизувати процес проектування нового оптимального управління для стабілізації процесу фрезерування.

2. Запропоновано новий підхід до стабілізації швидкості видалення матеріалу, який базується на управлінні подачею. Цей підхід дозволив знизити коливання сил різання, забезпечуючи стабільність характеристик обробки, що є критично важливим для оптимізації процесу. Реалізовані алгоритми стабілізації інтегровані в комплекс прикладних програм, що автоматизують процес управління режимами різання. Застосування управління подачею скоротило час циклу операції на 64% порівняно з SolidCAM і на 22% порівняно з iMachining.

3. Сформовано однокритеріальну задачу оптимізації процесу контурного фрезерування за критерієм продуктивності. Введені обмеження враховують конструкторські вимоги до виробу та технічні можливості виробничого обладнання й інструмента. Задача вирішується методом лінійного програмування. Для практичної реалізації задачі створено прикладну програму, яка автоматизує вибір оптимального режиму різання. Такі режими забезпечили скорочення часу обробки на 67% у порівнянні з SolidCAM, на 31% у порівнянні з iMachining, на 12% у порівнянні з управлінням подачею для стабілізації швидкості видалення матеріалу (MRR) (14 с). Це значно підвищило продуктивність обробки.

4. Розроблено алгоритми стабілізації та оптимізації процесу контурного фрезерування, інтегровані у прикладні програми. Програми дозволяють автоматично визначати режими різання, що забезпечує зручність у практичному застосуванні та надає можливість впровадження розроблених рішень у виробничі процеси.

5. Експериментально підтверджено ефективність запропонованих рішень. Отримані результати експериментів підтвердили прогнози математичних моделей. Застосування оптимізованого режиму різання дозволило скоротити час обробки, забезпечуючи при цьому дотримання всіх необхідних вимог до деталі та стабільності процесу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Mazak's machine tools are used to process various aircraft parts // Офіційний сайт компанії Yamazaki Mazak [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://english.mazak.jp/machines/by-industry/airplane/>
2. Norberto López de Lacalle, L., Campa, F. J., & Lamikiz, A. (2011). Milling. Modern Machining Technology, 213–303. DOI:10.1533/9780857094940.213
3. Huybrechts, Steven M.; Hahn, Steven E.; Meink, Troy E. (July 5–9, 1999). [GRID STIFFENED STRUCTURES: A SURVEY OF FABRICATION, ANALYSIS AND DESIGN METHODS](#) (PDF). Proceedings of the 1999 International Conference on Composite Materials. Paris, France. Retrieved Jan 10, 2020. The McDonnell-Douglas Corporation (now part of The Boeing Company) holds the patent rights for development of the first aluminum isogrid.
4. Garrick, A. J. H., Toumpis, A. I., & Galloway, A. M. (2021). Developing a novel manufacturing method to produce stiffened plate structures. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 112(9-10), 2805–2813. DOI:10.1007/s00170-020-06525-x
5. McDonnell Douglas Astronautics Company (1973). Isogrid Design Handbook (PDF) (Technical report). NASA. p. 1.0.002 (12/252). NASA CR-124075. URL: https://femci.gsfc.nasa.gov/isogrid/NASA-CR-124075_Isogrid_Design.pdf
6. Atlas V 500 series". United Launch Alliance. Archived from the original (PDF) on 2016-04-09. URL: https://www.ulalaunch.com/docs/default-source/rockets/atlasv-cutaway.pdf?sfvrsn=3bf92929_4
7. Nasa's space launch system. Reference guide. URL: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2021/12/sls_reference_guide_2022_web_0.pdf
8. Airbus starts manufacturing the first A330neo // Офіційний сайт компанії Aeroflap [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://en.aeroflap.com.br/airbus-comeca-a-fab/>

9. Vulcan // Офіційний сайт компанії ULA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ulalaunch.com/rockets/vulcan-centaur>
10. Gearbox - Renault Captur 2017 // Офіційний сайт компанії ASM Auto Recycling [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://parts.asm-autos.co.uk/find-auto-parts/year/2017/make/RENAULT/model/CAPTUR/itemTypeCode/TRANS_GEARBOX/sku/MjgwNzU2OC1hbTAx/
11. Офіційний сайт компанії Starrag [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.starrag.com/en-us>
12. CNC Milling and Die Casting Car Parts // Офіційний сайт компанії Chongqing Jin Te Rui Machine Co., Ltd. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.jtrmachine.com/products/cnc-milling-and-die-casting-car-parts>
13. Coromant, S. Die & Mould Making. Application Guide. URL: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4379935/mod_resource/content/2/Die_and_Mould.pdf
14. Die mold applications: Hard Milling for Die Mold // Офіційний сайт компанії Yasda Precision America Corp. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://yasda.com/diemold.html>
15. Forging Tooling: What is Forging Tooling & Dies? // Офіційний сайт компанії CFS Forge [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.steelforging.org/forging-tooling/>
16. Петраков Ю. В. Перспективи розвитку інформаційних технологій в машинобудуванні України / Ю. В. Петраков // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування: збірник наукових праць. – 2011. – № 63. – С. 258–263. – Бібліогр.: 7 назв.
17. Петраков, Ю. В. (2011). Розвиток САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ. Січка. 220 с.
18. Петраков Ю.В. Напрями розвитку САМ-систем / Ю.В. Петраков, В.В. Писаренко, О.С. Мацківський // Журнал інженерних наук. 2015. Т. 2, № 2. С. А7-А13. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSU_tekh_2015_2_2_4.

19. Мигович, А. В. (2021). Стабілізація умов контурного фрезерування на верстаті з ЧПК.
20. Петраков Ю. В. Корекція траєкторій формоутворення за апостеріорною інформацією / Ю. В. Петраков, Д. К. Щуплецов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. - 2015. - № 1. - С. 37-40. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2015_1_8.
21. Petrakov Y. V., Myhovich A. V. (2020) IMachining technology analysis for contour milling. Journal of Mechanical Engineering NTUU “Kyiv Polytechnic Institute”. 2(89). 114-120. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.89.202065>. http://journal.mmi.kpi.ua/article/view/202065/pdf_166
22. Nie, Z., Lynn, R., Tucker, T., & Kurfess, T. (2019). Voxel-based analysis and modeling of MRR computational accuracy in milling process. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. DOI:10.1016/j.cirpj.2019.07.003
23. Jacso A, Szalay T, Jauregui JC, Resendiz JR. A discrete simulation-based algorithm for the technological investigation of 2.5D milling operations. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2019;233(1):78-90. DOI:[10.1177/0954406218757267](https://doi.org/10.1177/0954406218757267)
24. Karunakaran, K. P., & Shringi, R. (2008). A solid model-based off-line adaptive controller for feed rate scheduling for milling process. Journal of Materials Processing Technology, 204(1-3), 384–396.
25. Erdim, H., Lazoglu, I., & Ozturk, B. (2006). Feedrate scheduling strategies for free-form surfaces. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46(7-8), 747–757. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2005.07
26. Erdim, H., Lazoglu, I., & Kaymakci, M. (2007). Free-form surface machining and comparing feedrate scheduling strategies. Machining Science and Technology, 11(1), 117–133. DOI:10.1080/10910340601172206
27. Liang, Y., Zhang, D., Ren, J., & Xu, Y. (2014). Feedrate scheduling for multi-axis plunge milling of open blisks. Proceedings of the Institution of Mechanical

Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 229(9), 1525–1534. DOI:10.1177/0954405414555741

28. Imani, B. M., Sadeghi, M. H., & Elbestawi, M. A. (1998). An improved process simulation system for ball-end milling of sculptured surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(9), 1089–1107. DOI:10.1016/s0890-6955(97)00074-6

29. Boz, Y., Erdim, H., & Lazoglu, I. (2011). Modeling Cutting Forces for Five Axis Milling of Sculptured Surfaces. *Advanced Materials Research*, 223, 701–712. DOI:10.4028/www.scientific.net

30. K., S. E. L., Erdim, H., & Lazoglu, I. (2012). Offline Force Control and Feedrate Scheduling for Complex Free Form Surfaces in 5-Axis Milling. *Procedia CIRP*, 1, 96–101. DOI:10.1016/j.procir.2012.04.015

31. Mamedov, Ali & Lazoglu, Ismail & Layegh, Ehsan & Erdim, Huseyin. (2014). Process Optimization via Feedrate Scheduling in Milling. DOI:10.1007/978-3-642-20617-7_16762.

32. Erkorkmaz, K., Layegh, S. E., Lazoglu, I., & Erdim, H. (2013). Feedrate optimization for freeform milling considering constraints from the feed drive system and process mechanics. *CIRP Annals*, 62(1), 395–398. DOI:10.1016/j.cirp.2013.03.084

33. Zhang, X., Yu, T., & Wang, W. (2014). Modeling, simulation, and optimization of five-axis milling processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74(9-12), 1611–1624. DOI:10.1007/s00170-014-6075-1

34. Vavruska, Petr & Bartos, Filip & Pesice, Matej. (2023). Effective feed rate control to maintain constant feed per tooth along toolpaths for milling complex-shaped parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 128. 1-18. DOI:10.1007/s00170-023-12143-0.

35. Park, H.-s., Qi, B., Dang, D.-V., & Park, D. Y. (2018). Development of smart machining system for optimizing feedrates to minimize machining time. *Journal of Computational Design and Engineering*, 5(3), 299–304. DOI:10.1016/j.jcde.2017.12.004

36. Wu, B., Zhang, Y., Liu, G., & Zhang, Y. (2021). Feedrate optimization method based on machining allowance optimization and constant power constraint. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(9-10), 3345–3360. DOI:10.1007/s00170-021-07381-z
37. Xie, J., Zhao, P., Hu, P., Yin, Y., Zhou, H., Chen, J., & Yang, J. (2021). Multi-objective feed rate optimization of three-axis rough milling based on artificial neural network. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(5-6), 1323–1339. DOI:10.1007/s00170-021-06902-0
38. Vortex. Product Documentation / Autodesk Help. URL: <https://help.autodesk.com/view/PWRM/2019/ENU/?guid=GUID-FD08A473-9992-4E0D-A283-A4946A2BA0BB>
39. Vortex (PartMaker, Advanced Surface Manufacturing, area clearance). Product Documentation / Autodesk Help. URL: <https://help.autodesk.com/view/FCAM/2024/ENU/?guid=GUID-28DDC1DA-3259-4AD9-BE27-B6C4E6416AA8>
40. Vortex machining. Product Documentation | Autodesk Help. URL: <https://help.autodesk.com/view/PWRM/2025/ENU/?guid=GUID-77122AF8-A489-43EB-A542-E21EAA660A0D>
41. Products - Vericut USA. Vericut USA (CGTech). URL: <https://www.cgtech.com/products/product-line/100-optipath.html>
42. SolidCAM. CAM-Software - Nahtlos integriertes CAM | SolidCAM. URL: <https://www.solidcam.com/>
43. iMachining 2D. iMachining for NX. URL: <https://www.imachining4nx.com/imachining-nx-info/imachining-2d/>
44. To optimize feed rates. Product Documentation | Autodesk Help. <https://help.autodesk.com/view/FCAM/2024/ENU/?guid=GUID-D327815B-841A-4D1A-AFFD-516E780DA4D6>
45. Kurt, M., & Bagci, E. (2011). Feedrate optimisation/scheduling on sculptured surface machining: a comprehensive review, applications and future

directions. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 55(9-12), 1037–1067. doi:10.1007/s00170-010-3131-3

46. VEGA. URL: <http://www.vegacnc.com/>

47. THE FUTURE OF HIGH SPEED MACHINING HAS ARRIVED.....
Vega Data-View. URL: <https://vegacnc.com/wp-content/uploads/2017/12/DView.pdf>

48. Formtec GmbH. URL: <http://www.formtec.de/>

49. NCspeed optimising the Die Surface milling process for a large Stamping Die. FORMTEC, 1–4. <https://www.formtec.de/info/NCspeedReportFord.pdf>

50. Powerful and Affordable CAM Software. BobCAD-CAM. <https://bobcad.com/>

51. Predator Software | DNC, MDC, OEE, PDM, RCM, Virtual CNC & Tracker | Manufacturing Automation. Predator Software. <https://www.predator-software.com/>

52. CAD CAM Manufacturing Software | Hexagon. <http://www.vero-software.com/>

53. NCG CAM Solutions Ltd. NCG CAM Solutions Ltd. <http://www.ncgcam.com/>

54. Nguyen, T.-T., Nguyen, T.-A., & Trinh, Q.-H. (2020). Optimization of Milling Parameters for Energy Savings and Surface Quality. Arabian Journal for Science and Engineering, 45(11), 9111–9125. DOI:10.1007/s13369-020-04679-0

55. Li, Fei & Liu, Jun. (2021). Optimization of milling process parameters and prediction of abrasive wear rate increment based on cutting force experiment. Advances in Mechanical Engineering. 13. 168781402110399. DOI:10.1177/16878140211039972.

56. Li, L., Liu, F., Chen, B., & Li, C. B. (2013). Multi-objective optimization of cutting parameters in sculptured parts machining based on neural network. Journal of Intelligent Manufacturing, 26(5), 891–898. DOI:10.1007/s10845-013-0809-z

57. Kant, G., & Sangwan, K. S. (2015). Predictive Modelling and Optimization of Machining Parameters to Minimize Surface Roughness using

Artificial Neural Network Coupled with Genetic Algorithm. *Procedia CIRP*, 31, 453–458. DOI:10.1016/j.procir.2015.03.043

58. Sun, Han & Li, Liang & Yan, Chunping & Song, Lei & Huang, Yigong & Zhou, Chao. (2022). Optimization of High-speed Dry Milling Process Parameters Based on Improved ELM and Genetic Algorithm. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 7. 272-283. DOI:10.54097/hset.v7i.1082.

59. Chen, X., Li, C., Tang, Y., Li, L., & Li, H. (2021). Energy efficient cutting parameter optimization. *Frontiers of Mechanical Engineering*. DOI:10.1007/s11465-020-0627-x

60. Xiao, Y., Jiang, Z., Gu, Q., Yan, W., & Wang, R. (2021). A novel approach to CNC machining center processing parameters optimization considering energy-saving and low-cost. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 535–548. DOI:10.1016/j.jmsy.2021.03.023

61. Nguyen, T.-T. (2019). Prediction and Optimization of Machining Energy, Surface roughness, and Production Rate in SKD61 Milling. *Measurement*. DOI:10.1016/j.measurement.201

62. Tian, C., Zhou, G., Lu, F., Chen, Z., & Zou, L. (2020). An integrated multi-objective optimization approach to determine the optimal feature processing sequence and cutting parameters for carbon emissions savings of CNC machining. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1–17. DOI:10.1080/0951192x.2020.1775303

63. Daniyan, I. A., Tlhabadira, I., Daramola, O. O., & Mpofu, K. (2019). Design and Optimization of Machining Parameters for Effective AISI P20 Removal Rate during Milling Operation. *Procedia CIRP*, 84, 861–867. DOI:10.1016/j.procir.2019.04.301

64. Altıntaş, R. S., Kahya, M., & Ünver, H. Ö. (2016). Modelling and optimization of energy consumption for feature based milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(9-12), 3345–3363. DOI:10.1007/s00170-016-8441-7

65. Li, C., Xiao, Q., Tang, Y., & Li, L. (2016). A method integrating Taguchi, RSM and MOPSO to CNC machining parameters optimization for energy saving. *Journal of Cleaner Production*, 135, 263–275. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.06.097
66. Daniyan, I. A., Tlhabadira, I., Phokobye, S. N., Siviwe, M., & Mpofu, K. (2019). Modelling and optimization of the cutting forces during Ti6Al4V milling process using the response surface methodology and dynamometer. *MM Science Journal*, November 2019. DOI:https://doi.org/10.17973/MMSJ.2019_11_2019093
67. Yan, J., & Li, L. (2013). Multi-objective optimization of milling parameters – the trade-offs between energy, production rate and cutting quality. *Journal of Cleaner Production*, 52, 462–471. DOI:10.1016/j.jclepro.2013.02.030
68. Петраков, Юрій & Мацківський, Олександр. (2016). Optimization of end mills periphery milling. *Journal of Mechanical Engineering the National Technical University of Ukraine Kyiv Polytechnic Institute*. 1. 88. DOI:10.20535/2305-9001.2016.76.61261.
69. Anh, He & Tuan, Trinh & Quang, Nguyen & Luan, Nguyen & Truong, Tran & Dung, Nguyen. (2021). Optimization of Milling Process by Taguchi-PSI Method. *E3S Web of Conferences*. 309. 01019. DOI:10.1051/e3sconf/202130901019.
70. Maiyar, L. M., Ramanujam, R., Venkatesan, K., & Jerald, J. (2013). Optimization of Machining Parameters for end Milling of Inconel 718 Super Alloy Using Taguchi based Grey Relational Analysis. *Procedia Engineering*, 64, 1276–1282. DOI:10.1016/j.proeng.2013.09.208
71. Vookoti, Uma & Rao, K. & P., Satish. (2022). Optimization of machining characteristics during helical milling of AISI D2 steel considering chip geometry. *Independent Journal of Management & Production*. 13. 750-770. DOI:10.14807/ijmp.v13i2.1617.
72. Lam, Khanh. (2021). Study on multi-objective optimization of X12M steel milling process by reference ideal method. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2021. 89-104. DOI:10.21303/2461-4262.2021.001737.

73. Li, C., Xiao, Q., Tang, Y., & Li, L. (2016). A method integrating Taguchi, RSM and MOPSO to CNC machining parameters optimization for energy saving. *Journal of Cleaner Production*, 135, 263–275. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.06.097
74. Tzeng, Y. F., & Chen, F. C. (2005). Optimization of the High-Speed CNC Milling Process Using Two-Phase Parameter Design Strategy by the Taguchi Methods. *JSME International Journal Series C*, 48(4), 775–784. DOI: <https://doi.org/10.1299/jsmec.48.775>
75. Wu, B., Zhang, Y., Liu, G., & Zhang, Y. (2021). Feedrate Optimization Method Based on Machining Allowance Optimization and Constant Power Constraint. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(9–10), 3345–3360. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07381-z>
76. Erkorkmaz, K., Layegh, S. E., Lazoglu, I., & Erdim, H. (2013). Feedrate Optimization for Freeform Milling Considering Constraints from the Feed Drive System and Process Mechanics. *CIRP Annals*, 62(1), 395–398. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.084>
77. Yan, J., & Li, L. (2013). Multi-objective Optimization of Milling Parameters – The Trade-offs Between Energy, Production Rate and Cutting Quality. *Journal of Cleaner Production*, 52, 462–471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.030>
78. Lee, Y., Resiga, A., Yi, S., & Wern, C. (2020). The Optimization of Machining Parameters for Milling Operations by Using the Nelder–Mead Simplex Method. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(3), 66. DOI:10.3390/jmmp4030066.
79. Jia, Shun & Wang, Shang & Zhang, Na & Cai, Wei & Liu, Yang & Hao, Jian & Zhang, Zhongwei & Yang, Yang & Sui, Yang. (2022). Multi-objective parameter optimization of CNC plane milling for sustainable manufacturing. *Environmental Science and Pollution Research*. 1-22. DOI: 10.1007/s11356-022-24908-3.
80. Moshat, S., Datta, S., Bandyopadhyay, A., & Pal, P. (2010). Optimization of CNC end milling process parameters using PCA-based Taguchi method.

International Journal of Engineering, Science and Technology, 2(1). DOI:10.4314/ijest.v2i1.59096

81. Petrakov, Yuriy & Korenkov, Volodymyr & Myhovich, Artur. (2022). Technology for programming contour milling on a CNC machine. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2. 55-61. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.255389.

82. Petrakov Y. V., Myhovich A. V. (2025). Stabilization of contour milling on CNC machines. Journal of Engineering Sciences (Ukraine), Vol. 12(1), pp. A1–A11. [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(1\).a1](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).a1)

83. Petrakov Y.V., Myhovich A.V. (2021) Design of digital arrays of shape-forming trajectories - a prerequisite for contour milling simulation. Innovations of Youth in Mechanical Engineering. 3. 398-401. DOI: <https://doi.org/10.20535/2708-3926.2021.3.229929>

84. Petrakov, Y., Ohrimenko, O., Glagyskyi, M. (2024). Forecasting the cutting force in end milling. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (1 (129)), 80–87. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.303791>

85. Petrakov Y. V., Ohrimenko O. A., Sikailo M. O., Myhovich A. V. (2023). Cutting forces simulation for end milling. Journal of Engineering Sciences (Ukraine), Vol. 10(2), pp. A27–A33. DOI: 10.21272/jes.2023.10(2).a

86. Machining handbook - 2-part EN URL:<https://www.hoffmann-group.com/GB/en/houk/know-how/machining-handbook/e/61245/>

87. iMachining for SiemensNX. Reference Guide. URL: https://topsolutions.com.vn/wp-content/uploads/2018/01/iMachining_NX_Reference_Guide.pdf

88. TM-0P. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.haascnc.com/machines/vertical-mills/toolroom-mills/models/tm-0p.html>

89. Petrakov, Yuri & Okhrimenko, Oleksandr & Sapon, Serhii & Sikailo, Maksim & Fedorynenko, Dmytro. (2024). Determination of Chatter-Free Cutting Mode in End Milling. Journal of Engineering Sciences. 11. A1-A11. DOI: 10.21272/jes.2024.11(2).a1.

90. Taylor, F. W. (1906). On the art of cutting metals. American society of mechanical engineers. 23 (3). 350 c.
91. Woldman, Norman Emme, 1899-1969, Gibbons, Robert C. (1951). Machinability and machining of metals. New York : McGraw-Hill. pp. 47–53.
92. Svahn, O. E. (1949). Machining properties and wear of milling cutters. Teknologie Doktor Dissertation, Royal Instituetete of Technology.
93. Gilbert, W. W. (1950). Machining theory and practice. American Sociaty for Metals, Cleveland, Ohio. 465 c.
94. Colding, B. N. (1959). A Wear Relationship for Turning, Milling and Grinding: Machining Economics. Avhandlingar, Kungliga Tekniska Högskolan. 212 c. URL: <https://books.google.com.ua/books?id=WWsTAQAAIAAJ>
95. Colding, B. N. (1961). Machinability of metals and machining costs. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1(3), 220–248. DOI: [https://doi.org/10.1016/0020-7357\(61\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0020-7357(61)90005-1)
96. ISO 8688-2:1989(en) (1989 Травень) Tool life testing in milling — Part 1: Face milling. URL: <https://www.iso.org/standard/16091.html>
97. ISO 8688-2:1989(en) (1989 Квітень) Tool life testing in milling — Part 2: End milling. URL: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:8688:-2:ed-1:v1:en>
98. Schmitz, T. L., Smith, K. S. (2019). Machining Dynamics. Frequency Response to Improved Productivity. 2. 382 c. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93707-6>
99. Johansson, D., Hägglund, S., Bushlya, V., Ståhl, J.-E. (2017). Assessment of Commonly used Tool Life Models in Metal Cutting. Procedia Manufacturing, 11, 602–609. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.154>
100. Alhadeff, Lisa & Marshall, M. & Slatter, Tom. (2019). The influence of tool coating on the length of the normal operating region (steady-state wear) for micro end mills. Precision Engineering. 60. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2019.07.018](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.07.018).
101. Nghiep, T.N., Sarhan, A.A.D., Aoyama, H. (2018) Analysis of Tool Deflection Errors in Precision CNC End Milling Of Aerospace Aluminum 6061-T6

alloy. Measurement. 125. 476-495. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.05.011>.

102. Stephenson, D.A., Agapiou, J.S. (2005) Metal Cutting Theory and Practice. Manufacturing engineering and materials processing. CRC Press. 68 (2). 864 c. URL: <https://books.google.com.ua/books?id=PvK72Ymaj10C>

103. Coromant, S. Metal Cutting Technology training handbook. URL: <https://www.scribd.com/document/317281556/Sandvik-Metal-Cutting-Technology-Training-Handbook>

ДОДАТОК А



ДОДАТОК Б

УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 125701

Комп'ютерна програма «Система автоматизованої підготовки управляючих програм для процесів контурного фрезерування на верстатах з ЧПК»

(під, назва твору)

Автор (співавтори) Мигович Артур Володимирович, Петраков Юрій Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності), псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать повністю Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Берестейський, 37, м. Київ-56, 03056

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) фізичної особи / найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 16 квітня 2024 р.

Директор Державної організації «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій»


Олена ОРЛЮК

