

УДК 621.91.01:621.923

Ефективність цифрового виробництва в машинобудуванні

Петраков Ю.В.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

***Анотація.** Представлений аналіз розвитку САМ-систем для проектування управляючих програм верстатів з ЧПК. Доведено, що управління процесом різання повинно здійснюватись за наступним алгоритмом – спочатку стабілізація процесу, потім його оптимізація і нарешті (якщо необхідно) корекція траєкторії формоутворення на останньому, фінішному проході. Оскільки САМ-системи здійснюють управління за апріорною інформацією, то їх ефективність цілком залежить від адекватності такої інформації. Тому, спираючись на принцип, закладений в методі управління за апріорною інформацією, можна стверджувати, що немає альтернативи алгоритму проектування управляючих програм за результатами попереднього моделювання процесу формоутворення різанням з визначенням його головної характеристики, якою є швидкість зрізування припуску.*

***Ключові слова:** верстати з ЧПК, САМ-системи, стабілізація; оптимізація; корекція.*

Сучасне машинобудівне виробництво просто немислиме без систем числового програмного управління, що узагальнюється під назвою цифрового виробництва. Винахідником першого верстату з числовим програмним управлінням був Джон Персонс, який працював в компанії свого батька Parsons Inc, що виробляла пропелери вертольотів. Він запропонував верстат, який керувався за програмою, що вводилася з перфокарт. До речі, вперше використання управління за двійковим кодом, що вводився з перфокарт, застосовувалося Жаккардом на ткацькому верстаті ще у 1801 році.

В 1949 році ВПС США профінансували Parsons Inc розробку верстату для контурного фрезерування складних деталей авіаційної техніки. Однак, компанія не змогла самостійно виконати проект і звернулася в лабораторію сервомеханіки Массачусетського технологічного інституту (МІТ). Співпраця Parsons Inc з МІТ продовжувалась до 1950 року, коли МІТ з компанією з виробництва фрезерних верстатів Hydro-Tel, заключив самостійний контракт з ВПС США на створення фрезерного верстату з числовим програмним управлінням (СNC). Перший верстат з CNC був представлений у 1952 році, але він був занадто складним і тому не дуже придатним до використання у виробничих умовах.

Перший серійний пристрій CNC був створений компанією Bendix Corp. у 1954 році і з 1955 року почало встановлюватись на верстати.

Таким чином, поява у другій половині ХХ сторіччя верстатів з числовим програмним управлінням (ЧПУ) без сумніву ознаменувало початок технологічної революції в машинобудуванні. Такому революційному зрушенню, яке було викликане необхідністю виготовляти все більш складні деталі в авіації, суднобудуванні, двигунобудуванні тощо, передували досягнення в електроніці, обчислювальній техніці, сервоприводах. Все це і було втілене у новому революційному засобі матеріального виробництва – верстаті з ЧПУ.

На початку застосування верстатів з ЧПУ їх потенційні можливості майже не використовувались. Причиною такого стану була відсутність інженерного програмного забезпечення, здатного автоматизувати процес підготовки управляючих програм для верстатів з ЧПУ. Створення САD/САM/САЕ-систем можна вважати початком розвитку справжнього цифрового виробництва в машинобудуванні.

Історію розвитку таких систем умовно розділяють на три етапи, кожен приблизно протягом 10 років. Спочатку в 70-х роках минулого сторіччя були розроблені програмні продукти, здатні автоматизувати процес створення креслень – так звані САД-системи (Computer Aided Design). У 80-х роках поряд з 2D системами з'явилися системи 3D моделювання, на базі яких САМ-системи (Computer Aided Manufacturing) автоматизували створення управляючих програм для верстатів з ЧПУ. Далі, з 90-х років починається об'єднання систем за типом і складністю вирішуваних завдань, ступенем охоплення проектно-технологічної і виробничої сфери підприємств. Наразі на ринку «високих технологій» присутні різноманітні САПР, що пристосовані під конкретне виробництво, навіть конкретну деталь, або спеціалізовані системи для конкретного виробництва. Спостерігається тенденція до створення хмарних САМ-систем, які передбачають розміщення в «хмарах» баз даних, різального інструменту, технологій, віртуальних моделей верстатів, оснастки тощо.

При використанні САМ-систем на виробництві було помічено, що найбільші проблеми виникають саме при обробленні складних поверхонь деталей, де умови різання значно змінюються за формоутворюючими траєкторіями. Крім того, спроектовані автоматично управляючі програми не завжди забезпечують оптимальний режим різання, безвібраційне оброблення, тобто потенційні можливості верстатів з управління процесом різання використовуються далеко не в повній мірі. Така ситуація заважає конкуренції на ринку і тому наразі можна констатувати, що найбільш «просунені» САМ-системи розвиваються в напрямку усунення зазначених вище проблем.

Доведено [1], що управління процесом різання повинно здійснюватись за наступним алгоритмом – спочатку стабілізація процесу, потім його оптимізація і нарешті (якщо необхідно) корекція траєкторії формоутворення на останньому, фінішному проході. Відомо, що управління будь яким процесом можливо за трьома методами, що розрізняються за часом надходження інформації [2], яка використовується для проектування команди: апріорна, поточна або апостеріорна інформація. Оскільки САМ-системи здійснюють управління за апріорною інформацією, то їх ефективність цілком залежить від адекватності такої інформації.

Перші спроби стабілізувати процес різання при фрезеруванні складних поверхонь були здійснені в САМ-системі Vericut фірми CGTech (USA) [3, 4], PowerMill-2013 фірми Delcam через запатентовану технологію Vortex [5]. Проте, технологія управління подачею запропонована фірмою CGTech не була алгоритмізована, а технологія Vortex, орієнтована на використання трохіодальних траєкторій для стабілізації кута різання при контурному фрезеруванні, вимагала додаткових випробувань перед використанням [6] з метою визначення динамічних характеристик конкретного верстату.

Останнім часом з'явилися нові напрямки розвитку САМ-систем, що рекламують оптимізацію процесу оброблення. Вони об'єднуються під назвою iMachining технологій, що означає інтелектуальне оброблення. Однак під оптимізацією часто представляють проблему вибору найкоротших траєкторій формоутворення, що зводиться до вирішення задачі комівояжера [7].

Усвідомлюючи, що вирішення задачі оптимізації процесу різання вимагає використання даних про верстат, а саме, про жорсткість технологічної обробної системи (ТОС), а на етапі проектування управляючої програми такі дані, як правило, невідомі, фірма SolidCAM вводить в САМ-систему умову апріорного вибору одного з 8-ми рівнів передбачуваної жорсткості ТОС. Однак очевидно, що таке рішення має передбачати ітеративний пошук оптимального рівня за результатами реального оброблення на конкретному верстаті з ЧПУ [8, 9]. Як показав аналіз технологічних рішень в iMachining [10] SolidCAM вони не досягають мети повної стабілізації процесу різання і його оптимізації за класичним визначенням.

Наразі розпочаті дослідження з удосконалення існуючих САМ-систем на базі нових підходів, які розглядають процес оброблення різанням на верстаті з ЧПК як складну кіберфізичну систему. В роботі [11] представлений програмний модуль «*NeuroModule UG*» для САМ-системи NX. Стверджується, що модуль дозволяє доповнювати штатні можливості САМ-системи NX процедурою автоматизованого формування траєкторій руху інструменту для високошвидкісного фрезерування широкого класу деталей авіаційної промисловості, таких як шпангоут, лонжерон, нервюра, які містять велику кількість технологічних елементів типу «кишеня».

Проте, було помічено, що навіть при таких оптимальних траєкторіях виникають значні зміни сили різання, що свідчить про відсутність стабілізації процесу різання. Пропонується просто обмежувати силу різання деякою максимально можливою величиною, що безумовно не можна кваліфікувати як оптимальне рішення.

Крім того, пропонується інтеграція САМ-систем з додатковим програмним забезпеченням – Vericut – для візуалізації і контролю процесу механічної обробки з метою визначення місць можливих «зарізів», «недообробки» тощо [12].

Представлена [13] технологія динамічних траєкторій Mastercam (починаючи з Mastercam X8), яка стала втіленням нового підходу до проектування траєкторій інструментів зовсім іншого рівня ефективності. При проектуванні використовується набір правил, що настроюються, для аналізу процесу врізання інструменту і видалення матеріалу. За якими алгоритмами проектується траєкторія руху, як визначаються її динамічні характеристики, що безпосередньо впливають на ефективність залишається за кадром.

Звичайно, в одному огляді сучасних тенденцій розвитку САМ-систем для забезпечення ефективності цифрового виробництва в машинобудуванні всі напрямки інновацій охопити неможливо. Проте, спираючись на принцип, закладений в методі управління за апріорною інформацією, можна стверджувати, що немає альтернативи алгоритму проектування управляючих програм за результатами попереднього моделювання процесу зрізування припуску з визначенням його головної характеристики, якою є швидкість зрізування припуску.

Проведений аналіз існуючих на ринку високих технологій САМ-систем підтверджує, що їх ефективність цілком залежить від повноти виконання умов запропонованого алгоритму управління – стабілізація умов різання, потім оптимізація процесу різання і, якщо необхідно, корекція траєкторії формоутворення на останньому, фінішному проході.

Розроблені на кафедрі технології машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського методики моделювання довели свою ефективність при проектуванні управляючих програм для точіння, фрезерування і шліфування [14, 15, 16]. Причому управління для стабілізації процесу різання доцільно проводити за впливом, що є найбільш чутливим (наприклад за подачею), або ж одразу за двома впливами (за подачею і частотою обертання). Задачу оптимізації бажано зводити до однокритеріальної (максимум продуктивності), а вимоги за якістю оброблення відносити до обмежень. Наразі, користуючись можливостями, що представляють деякі фірми-розробники САМ-систем, з'являється можливість створити власні додатки до таких систем. Наприклад, функція ESPRIT Microsoft Visual Basic® для застосунків дозволяє автоматизувати вирішення різних виробничих завдань та інтегрувати власні розробки в інтерфейс ESPRIT [17].

Efficiency of digital manufacturing in mechanical engineering

Petrakov Y.V.

Annotation. The analysis of the development of CAM systems for the design of control programs for CNC machines is presented. It has been proven that the control of the cutting process should be carried out according to the following algorithm - first, the stabilization of the process, then its optimization, and, finally, (if necessary) the correction of the forming trajectory at the last, finishing pass. Since CAM systems perform control based on a priori information, their effectiveness depends entirely on the adequacy of such information. Therefore, based on the principle inherent in the control method based on a priori information, it is shown that there is no alternative to the design algorithm of control programs based on the results of preliminary simulation of the shaping process by cutting with the determination of its main characteristic, which is the Material Removal Rate.

Key words: CNC machine-tools; CAM-systems; stabilization; optimization; correction of machining trajectories.

Эффективность цифрового производства в машиностроении

Петраков Ю.В.

Аннотация. Представлен анализ развития САМ-систем для проектирования управляющих программ станков с ЧПУ. Доказано, что управление процессом резания должно выполняться по следующему алгоритму – вначале стабилизация процесса, потом его оптимизация и, наконец, (если необходимо) коррекция траектории формообразования на последнем, финишном проходе. Поскольку САМ-системы осуществляют управление по априорной информации, то их эффективность целиком зависит от адекватности такой информации. Поэтому, опираясь на принцип, заложенный в методе управления по априорной информации, показано, что нет альтернативы алгоритму проектирования управляющих программ по результатам предварительного моделирования процесса формообразования резанием с определением его главной характеристики, которой является скорость среза прутка.

Ключевые слова: станки с ЧПУ, САМ-системы, стабилизация; оптимизация; коррекция.

Список літератури

1. Петраков Ю.В., Драчев О.И. Автоматическое управление процессами резания / Старый Оскол: ТНТ, 2019. – 408с. http://javalibre.com.ua/paper_books/book/754463
2. Петраков Ю.В. Методы управління процесами різання. Вісник ЖДТУ №2 (80), Житомир, 2017.- С.124-134; <http://vtn.ztu.edu.ua>
3. Ходоровский Д., Копцевич П. Опыт использования программного комплекса NX + VERICUT в ОАО "ОКБМ Африкантов" при изготовлении импеллеров // CADmaster №2, 2010. – С. 36-40. https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_52_06.html
4. Vericut CGTeh https://boundarysys.com/wp-content/uploads/2019/03/VERICUT_Brochure_70.pdf
5. Евченко К., Пинчук А. PowerMill 2013: стратегия Vortex и новые возможности для программирования пятиосевой обработки //ж. САПР и графика № 11, 2012. – С. 88 - 91. <https://sapr.ru/article/23449>
6. Machine DNA Profiler — новая технология оптимизации управляющих программ для станков с ЧПУ от компании Delcam // ж. САПР и графика № 6, 2012. – С. 80 – 81. <https://sapr.ru/article/23078>
7. SolidCAM iMachining // <https://www.solidcam.com/ru/imachining/traektorii-imachining/>
8. Модуль iMachining // ж. Высокие технологии. Сайт <http://vys-tech.ru/2018/02/02/imachining/>
9. iMachining 3D. Логическое развитие технологи // ж. CADmaster, № 2, 2012. – С. 52-58. https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_69_10.html
10. Мигович А. В., Петраков Ю. В. Технології iMachining для верстатів з ЧПК // Інновації молоді в машинобудуванні (Youth Innovations in Mechanical Engineering). За заг. ред. Данильченко Ю. М. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – № 2. – 518 с., С. 455-461. http://imm-mmi.kpi.ua/proc/article/view/201962/pdf_168
11. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Колчин П.В., Кузьмишина А.М, Аносов М.С.. Искусственный интеллект и кибер-физические механообрабатывающие системы в цифровом производстве. Нижегородский

- государственный технический университет им. Р. А. Алексеева, Москва, 2018, 329 с. https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/org_structura/instit_fakul_kaf_shkoly/ips/novye_vozmozhnosti_dlya_kazhdogo/cifrovizatsyya_mashinostr_proizv/mon_ii_i_kiberfiz_mehobr_sist_v_cifr_proizv.pdf
12. Чуркин М.Г., Поздышев А.И., Мальцев И.В. Разработка управляющих программ в системе SIEMENS NX для обработки сложных пространственных конструкций агрегатов летательных аппаратов // Машиностроение и автоматизация Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева № 2(109), 2015.- С.113-122 <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-upravlyayuschih-programm-v-sisteme-siemens-nx-dlya-obrabotki-slozhnyh-prostranstvennyh-konstruktsiy-agregatov-letatelnyh>
 13. Липсте И. Динамические траектории *Mastercam* // CAD/CAM/CAE Observer #7 (91) / 2014. С.50-54. <http://www.cadcamcae.lv/N91/50-54.pdf>
 14. Петраков Ю.В., Мацкивский А.С. Моделирование системы адаптивного управления на токарном станке С ЧПУ // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Вип. № 38, 2016. – С. 12-17. http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/reliability_instrument/archieve
 15. Петраков Ю. В., Мацківський О. С. Оптимізація периферійного фрезерування кінцевими фрезами // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія: Машинобудування. - 2016. - № 1. - С. 88-94. http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_mash_2016_1_14
 16. Petrakov Y. Control of grinding polygonal surfaces // Mechanics and Advanced Technologies #3 (81), 2017. – С. 34-39. https://www.researchgate.net/publication/322135495_Control_of_grinding_polygonal_surfaces
 17. ESPRIT на предприятиях Украины. Опыт внедрения и использования // Технический Центр «ВариУс» https://varius.com.ua/stati/stat_esp/24836-2/