International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

МЕТОДИ ЗА АВТОМАТИЗИРАНО ПРОЕКТИРАНЕ НА НЕСПЕЦИАЛИЗИРАНИ ФРЕЗОВИ ИНСТРУМЕНТИ

Ралица Тодорова[1], Христо Метев[2], Христо Якимов[3]

[1,2,3] Технически университет – Габрово, България
кореспондиращ автор: hmetev@tugab.bg

METHODS FOR THE AUTOMATED DESIGN OF NON-SPECIALIZED MILLING TOOLS

Ralitsa Todorova[1], Hristo Metev[2], Hristo Yakimov[3]

[1,2,3] Technical University – Gabrovo, Bulgaria
Corresponding author: hmetev@tugab.bg

Abstract
There are a number of methods for designing cutting tools of various types and purposes, including computer-aided design (CAD) systems. Industrial technologies include CAD systems, which occupy a unique place among software products. Among the distinctive features of modern design systems, it should be noted that they have a strictly specific area of application, and their "true" users are a limited number of highly trained specialists. This report systematizes and analyzes methods for the automated design of cutting tools. A flowchart of an algorithm for the automated design of non-specialized milling tools is proposed.

Keywords: Automated modeling, CAM sistems, CAD sistems, cutting tool, milling tool.

ВЪВЕДЕНИЕ

Ефективността на съвременното производство в контекста на концепцията *Индустрия 4.0* до голяма степен зависи от бързината на технологичната подготовка и качеството на използваната инструментална екипировка. Фрезоването остава един от най-разпространените процеси за формообразуване в машиностроенето. Въпреки че пазарът изисква все по-голям обем от специализирани инструменти, *неспециализираните (стандартните) фрезови инструменти* продължават да съставляват основния дял от инструменталното стопанство на предприятията поради своята универсалност и икономическа целесъобразност.

Традиционните методи за проектиране на стандартни фрези, базирани на последователно изчертаване на всеки размерен ред по таблични данни от стандартите (ISO, DIN, БДС) са свързани със значителен разход на време и висок риск от субективни грешки. С навлизането на съвременните методи за автоматизирано проектиране (CAD) и компютърно подпомагано инженерство (CAE), фокусът се измества към създаването на интелигентни системи, които автоматизират рутинните проектантски процедури.

Интегрирането на *параметричното моделиране* и *системите, базирани на знания (Knowledge-Based Engineering - KBE),* позволява геометричните параметри на режещата част (преден и заден ъгъл, стъпка, ъгъл на винтовата линия и др.) да се изчисляват динамично. Това не само съществено съкращава цикъла на проектиране, но и осигурява директна

Print ISSN: 1313-230X, Online ISSN: 3033-1404

връзка с производствените CAM системи за многоосни CNC инструментални машини. В допълнение, съвременният подход изисква виртуална проверка на якостните и динамичните характеристики на инструмента чрез метода на крайните елементи (FEM) още на етап проектиране, както и възможностите за бързо прототипиране[1].

Поради тази причина, изследването на методите за пълна или частична автоматизация при проектирането на неспециализирани фрези е актуална научно-приложна задача с директен ефект върху ефективността на инструменталната индустрия, както и разширяване на възможностите за автоматизация на конкретния инструмент, и изграждане на интелигентност в машината [2].

Целта на настоящата работа е да се систематизират и предложат ефективни методи за автоматизирано параметрично проектиране на неспециализирани фрезови инструменти, чрез които да се съкрати времето за тяхното конструиране и да се гарантира технологичната и експлоатационната им надеждност.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Компютърно подпомогнатите системи за проектиране (CAD) могат да поддържат инженерна работа на три нива: проектиране, анализ и комуникация. Разработват се и се тестват различни нови инструменти, в това число инструменти с един режещ ръб, като всяка технология трябва да бъде подкрепена от избор на съответната геометрия на режещите инструменти и режещи материали [3-5].

Напредък в тази област е интелигентното компютърно проектиране и компютърно подпомаганото производство (CAD/CAM), интеграция и генериране на инструменти, анализирайки тяхната еволюция в парадигмите на Industry 4.0 [6].

- **Класификация на програмните продукти за автоматизирано програмиране.**

Програмните продукти за автоматизирано програмиране на режещи инструменти се класифицират по критерии, базирани на техните функционалности, сложност и индустриални приложения

➢ ***Според нивото на автоматизация и интелигентност.***

- *Ръчно/Полуавтоматично програмиране (G-code).*

Програмистът въвежда кода ръчно или с помощта на базови помощни средства. Изисква дълбоки познания по машинен език (G-code/M-code) и е подходящо за прости операции.

- *Графично CAM програмиране.*

Използва визуален интерфейс, където потребителят избира инструменти, стратегии на рязане и геометрия. Софтуерът генерира G-кода автоматично. Това е най-разпространеният метод за средна и висока сложност.

- *Интелигентно/Автоматизирано програмиране (AI-driven).*

Използва алгоритми за изкуствен интелект и машинно обучение за автоматичен избор на инструменти, оптимизация на траекториите и минимизиране на човешката намеса. Тези системи често включват функции за “feature-based recognition” (разпознаване на геометрични особености).

- *Програмиране на базата на шаблони (Template-based).*

Използва предварително валидирани параметрични шаблони, свързани с конкретни операции, което ускорява генерирането на програми за стандартни детайли.

➢ ***Според функционалноста и интеграцията.***

- *CAD (Computer Aided Design)* .

CAD по своята дефиниция означава съвкупност от технически и програмни средства (хардуер и софтуер), служещи за оптимално решаване на всички задачи при конструирането на изделия. С CAD системите основно се решават задачите

за описание на геометрията на детайлите, възлите и изделията като цяло.

В днешно време CAD системите се използват за създаване на двуизмерни и триизмерни цифрови модели, различни симулации и анализи на инженерни проблеми. Като намаляват времето за проектиране и грешките, те предоставят надеждна документация, която поддържа жизнения цикъл на продукта и не на последно място симулация на процеса [7,8].

Под термина конструиране се разбират дейностите по компановка (сглобяване) на изделие от съставните му детайли, както и проектирането на самите детайли. Конструирането има за цел получаването на нови или подобряване на вече съществуващи изделия. Резултат от тези дейности са геометрични и технологични данни, служещи за описание на проектираните изделия (чертежи, резултати от изчисления, материали, допуски и др.), данни за производството (спецификации), експериментални резултати (напр. протоколи от измервания), както и допълнителна текстова информация (напр. технически описания, ръководства за обслужване, поддържане, монтаж и ремонт).

- *CAE (Computer Aided Engineering).*

CAE включва всички изчислителни задачи, които се решават в рамките на процеса конструиране.. От една страна това са всички изчисления по време на конструирането (размерни вериги, конструктивни параметри, якостни, деформационни и др. изчисления, включително по метода на крайните елементи (FEM) и др. Съществено за продуктовата синергия, е че между CAD и CAE съществува тясна и неотделима връзка, тъй като в много случаи генерираният чрез дадена CAD продукт е в тясна връзка с CAE модула

- *CAP (Computer Aided Planning).*

По същество CAP това означава "технологична подготовка на производството" и включва технологично проектиране, планиране и специфициране на производството и монтажа, изготвяне на управляващи програми за NC-машини и роботи и др.

- *CAQ (Computer-Aided Quality Assurance).*

CAQ означава *Компютърно подпомагано осигуряване на качеството*. Това е специализиран софтуер, който се използва за планиране, контрол и инспекция на качеството на продуктите и производствените процеси съгласно стандарти като ISO 9001 и IATF 16949.

- *CAM (Computer Aided Manufacturing).*

Програмните продукти от клас CAM преобразуват данните от CAP, като такива в данни за директно управление на машини с ЦПУ, роботи, транспортни и складови системи и др.

CAM = CAP + CAQ.

- *CIM (Computer Integrated Manufacturing)*

CIM означава интегрирано приложение на компютърни системи в цялостната проектна и производствена дейност. Като структурата *CIM* добива вида:

CIM = CAD + CAE + CAP + CAQ + CAM.

- **Методи за геометрично моделиране**

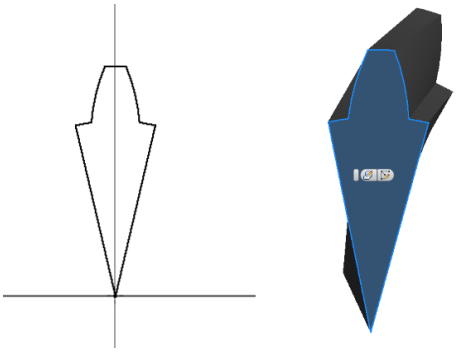
Сам по себе си генерирания модел на инструмента е източник на информация за автоматизирано изготвяне на чертежи, анализ и инженерни пресмятания, изобразяване на екрана от различни гледни точки, проектиране на технологичен процес за изработването му, включително управляващи NC програми за машини с ЦПУ.

Основните методи за моделиране са:

- *Двумерно моделиране (2D).*

Изграждането на моделите се основава на принципите на градивната геометрия чрез контурите на проекциите на обектите в двумерна X-Y координатна система (фиг.1). Тези контури се състоят от прости геометрични примитиви, като сами по себе си се генерират автоматич-

но от програмните продукти на CAD системата по зададени параметри (напр. координати на характерни точки, дължини, радиуси, шрифтове и др.).



***Фиг. 1**. Проекция на зъб на фрезови инструмент*

- *Повърхнинно моделиране* (*Surface Modeling)*.

При повърхнинното моделиране се моделират отделните функционални повърхнини на инструмента (предна, задна, фаски) и след това се свързват в общо тяло. Този метод е изключително точен и позволява перфектно управление на предните и задните ъгли на инструмента във всяка точка от режещия ръб.

- *Обемно моделиране. (Solid Modeling).*

При обемното моделиране обекта има не само дефинирани геометрични но и материални характеристики. Конструктивни елементи на обемния модел са точки, контурни елементи и повърхнини. Точката се получава от пресичането на три контурни елемента, контурният елемент принадлежи на две повърхнини, а повърхнините ограничават обем.

За разлика от 2D моделите и повърхнините модели (*Surface Modeling*), обемният модел дефинира както външната, така и вътрешната форма на обекта. Това означава, че тялото е "масивно" и софтуерът може автоматично да изчисли неговото тегло, обем, център на тежестта и инертни моменти**.**

Обемното моделиране на фрезови инструменти изисква изключително висока точност и прицизност поради сложната им геометрия (винтови канали, специфични предни и задни ъгли, режещи ръбове). Използват се следните основни метода за обемно моделиране.

Параметрично моделиране (Features - based). Използва аналитични уравнения и точни параметри (диаметър, брой зъби, ъгъл на винтовата линия и др.). Промяната на един параметър автоматично преизчислява целия инструмент.

Използват се елементи като повърхнини, отвори и др. наречени *Features* (фичърси). В основата на метода е автоматизирано проектиране на технологични процеси и NC-програми, при които на тези "Features" се присвояват не само геометрични свойства.

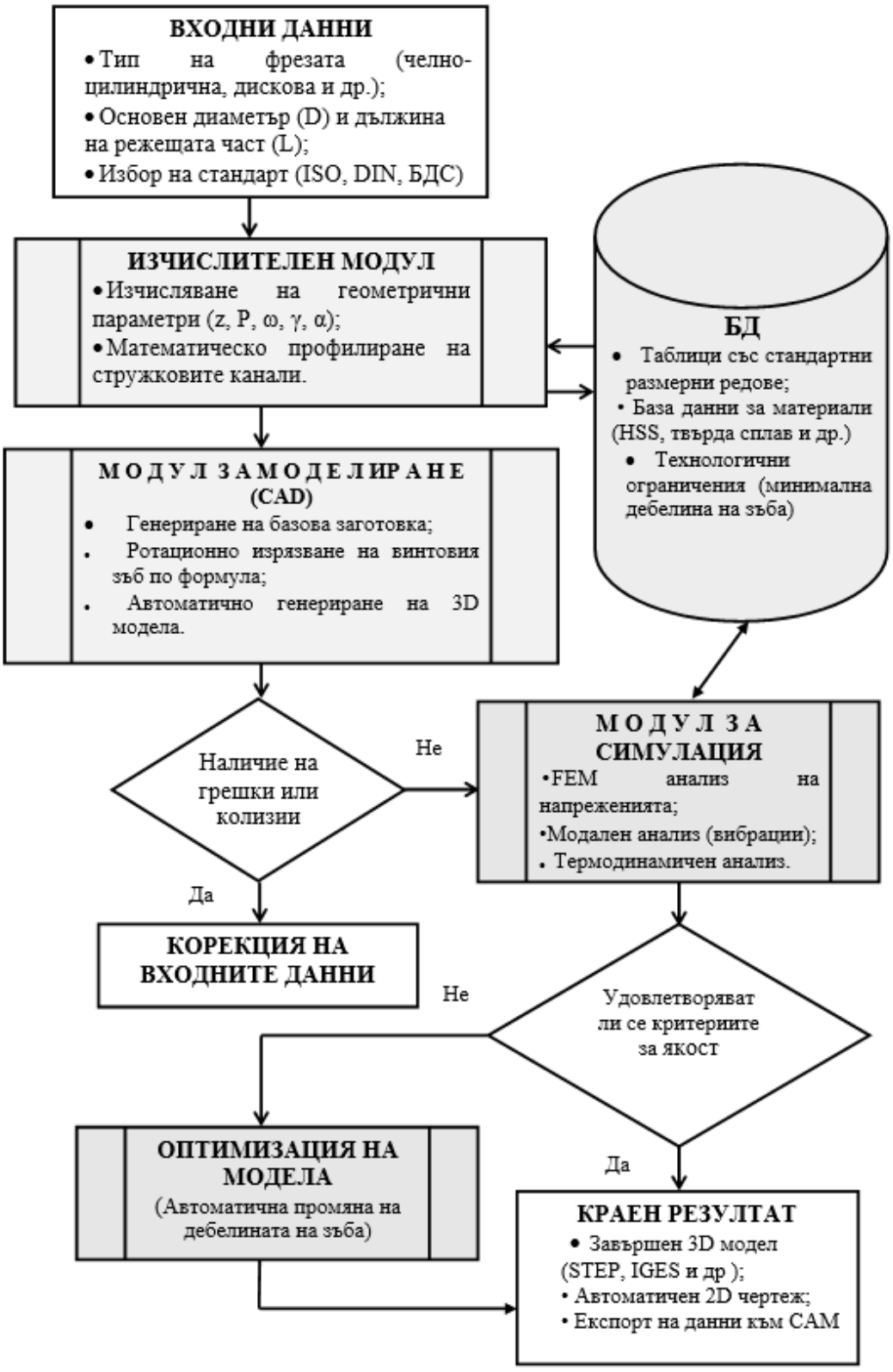
Сканиране по траектория (Swept/Loft Cut). Използва се за генериране на сложни повърхнини, като напр. на винтовите канали на фрезите. Дефинира се 2D профила на канала, който се "прекарва" и завърта по спирална (хеликоидална) крива.

Моделиране на сглобената единица (Assembly). Тялото на инструмента и режещите пластини се моделират като отделни детайли и се сглобяват чрез геометрични връзки.

- **Етапи при автоматизирано проектиране на фрезови режещи инсрументи**

Процесът на автоматизирано проектиране на фрезови инструменти (фиг. 2) преминава през няколко етапа, при които чрез CAD/CAE система се решават специфични задачи, свързани с профилирането на инструмента [9].

За автоматизираното проектиране на неспециализирани фрезови инструменти алгоритъмът обикновено следва ключови стъпки, които могат да бъдат представени като блок-схема (фиг.3).



Фиг. 3 *Блок-схема на алгоритъм за автоматизирано проектиране на фрезови инструменти*

Основните етапи включват:

– генериране на зъбен или друг вид профил на обработвания детайл;

– дефиниране на профила на зъба или междузъбието на обработвания детайл;

– създаване на скриптов файл за автоматизиране на последващите операции;

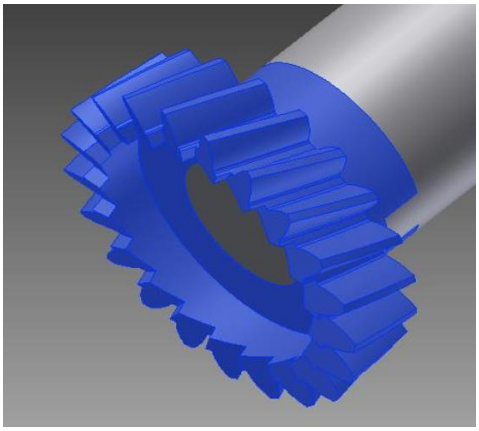
– дефиниране на профила на зъба или междузъбието на инструмента;

– извършване на необходимите корекции на профила;

– създаване на тримерен (3D) модел на инструмента;

– разработване на техническата документация.

Тази последователност осигурява постепенно преминаване от геометричното описание на обработвания детайл към окончателното проектиране и документиране на инструмента.



***Фиг. 2**. Примерен 3D модел на фрезови инструмент, моделиран в софтуерна среда*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В доклада са систематизирани и анализирани основните методи и софтуерните продукти при автоматизирано проектиране на неспециализирани фрезови инструменти. Предложеният алгоритъм дава възможност да се съкрати времето за конструиране на инструментите и да се гарантира технологичната и експлоатационната им надеждност.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Masood S. Intelligent rapid prototyping with fused deposition modelling Rapid Prototyping Journal, 2 (1) (1996), pp. 24-33

[2] Ramesh R., Jyothirmai S., Lavanya K. Intelligent automation of design and manufacturing in machine tools using an open architecture motion controller Journal of Manufacturing Systems ,Date: January 2013, Pages: 248-259, Volume: Volume 32, Issue 1

[3] Robertson D., Allen T.J. CAD system use and engineering performance. IEEE Transactions on Engineering Management. vol. 40, Issue: 3, August 1993. DOI: 10.1109-/17.233189.

[4] T. Mikolajczyk., H. Latos, T. Paczkowski, D. Y. Pimenov, T. Szynka. Using CAD CAM system for manufacturing of innovative cutting tool. Procedia Manufacturing. (2018) 22, p. 160-165.

[5] R. Dubovska, J. Jambor, J. Majerik. Implementation of CAD/CAM System CATIA V5 in Simulation of CNC Machining Process. Procedia Engineering, (2014) 69, p. 638-645.

[6] M. Simonič, I. Palčič, S. Klančnik. Advancing Intelligent Toolpath Generation: A Systematic Review of CAD–CAM Integration in Industry 4.0 and 5.0. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering 71. (2025) 9-10, p. 328-336.

[7] D. Vezyuv, S. Georgiev I. Nikolaev. Application and Development of CAD/CAM Technologies in the Modern Metalworking Industry. Journals Engineering Proceedings. vol. 122, Issue 1 10.3390/engproc2026122022.

[8] Sofias, K., Kanetaki, Z., Stergiou, C., Kantaros, A., Jacques, S., Ganetsos, T. Implementing CAD API Automated Processes in Engineering Design: A Case Study Approach. Appl. Sci. 2025, 15, 7692.

9] Yakimov H. Processing of tooth profiles on CNC machines. Dissertation for the acquisition of the educational and scientific degree "doctor", Gabrovo, 2023.

Докладът се публикува във връзка с резултатите от изпълнение на дейностите по проект № НИП2026-9/02.03.2026г. „Изследване на възможностите за повишаване на ефективността на технологични процеси в машиностроенето“.