

TRENDY VÝVOJA CNC OBRÁBANIA A CAM SYSTÉMOV

doc. Ing. Peter Ižol, PhD.

Ing. Michal Demko

Katedra technológií, materiálov a počítačovej
podpory výroby
SjF TU v Košiciach
Mäsiarska 74
040 01 Košice
peter.izol@tuke.sk
michal.demko@tuke.sk

doc. Ing. Marek Vrabel', PhD.

Ing. Jozef Brindza

Prototypové a inovačné centrum SjF
SjF TU v Košiciach
Park Komenského 12A
042 00 Košice
marek.vrabel@tuke.sk
jozef.brindza@tuke.sk

Abstract

The article describes expected trends in the development of numerically controlled machine tools and CAM programming systems. In the field of machines, trends are focusing on deeper integration with information technology and the use of artificial intelligence. The development of programming systems is aimed at simplifying and speeding up the creation of NC programs. The common goal of the new approaches is more flexible production processes that respond faster to customer requirements.

Key words: CNC machine tool, CAM system, development trends

ÚVOD

Pre súčasný trh so strojárskymi výrobkami sú charakteristické požiadavky na skrátenie dodacích lehôt a na zníženie cien pri neustále sa zmenšujúcej sériovosti. Výrobné podniky tak musia nachádzať flexibilnejšie pracovné postupy s rýchlejšími reakciami na menší objem práce. Tieto ciele sú dosiahnuteľné len s pomocou nových technológií a poznatkov.

CNC stroj je najčastejšie vnímaný ako samostatný výrobný prostriedok, slúžiaci na dosiahnutie produkčných cieľov a pracujúci v definovaných krokoch – upevní sa polotovar, spustí sa program, nástroje zhotovia tvary dielca dráhami riadenými počítačom a na záver sa odoberie hotový dielce. V súčasnosti je ale CNC stroj platformou, ktorá dokáže zefektívniť každý z týchto krokov, môže nahradiť ďalšie zaradenia a vie spolupracovať s okolím.

TRENDY V CNC TECHNIKE

Stavba a konštrukcia strojov

Požiadavky na skrátenie vývoja a dostupné ceny strojov vedú k uplatňovaniu konceptu modularity a stavebnicovosti v ich konštrukcii. Rôzne stroje zdieľajú napr. rovnakú platformu (lôžko, stojan), na ktorú sú usadzované potrebné moduly, ako vretenníky, suporty, stoly a pod. [1]. Tento prístup znižuje výrobné náklady a umožňuje konfigurovať stroj podľa požiadaviek odberateľa.

Vážnou výzvou dnešnej doby je znižovanie energetickej náročnosti prevádzky strojov. Stroje disponujú tzv. power save módom, znižuje sa spotreba tlakového vzduchu, zavádza sa proporcionálne ovládanie niektorých pomocných agregátov ako hydraulické čerpadlo alebo čerpadlo emulzie. Pri stavbe sa využívajú komponenty s vyššou energetickou účinnosťou.

Ďalším trendom je zvyšovanie univerzálnosti strojov prostredníctvom multifunkčnosti. Príkladom je integrácia operácií brúsenia na sústruhy a frézovačky, čo je umožnené neustálym zvyšovaním otáčok vretien novo vyvíjaných strojov.

Zvyšovanie technických parametrov strojov

V súvislosti s rozširujúcim sa využívaním vysokorýchlostného obrábania sa očakáva ďalší nárast maximálnych otáčok vretien obrábacích strojov a zvyšovanie rýchlostí posuvu pri zvyšujúcej sa presnosti polohovania.

Požiadavky na presnosť strojov sa neobmedzujú na statickú geometrickú presnosť. Dôležitejšia je pracovná presnosť, pre zvyšovanie ktorej sa využíva kompenzácia tepelných deformácií, vibrácií a vŕľ v pohybových mechanizmoch. Podľa [2] dôsledné využívanie kompenzácií znižuje chyby pri obrábaní o 60 až 80%.

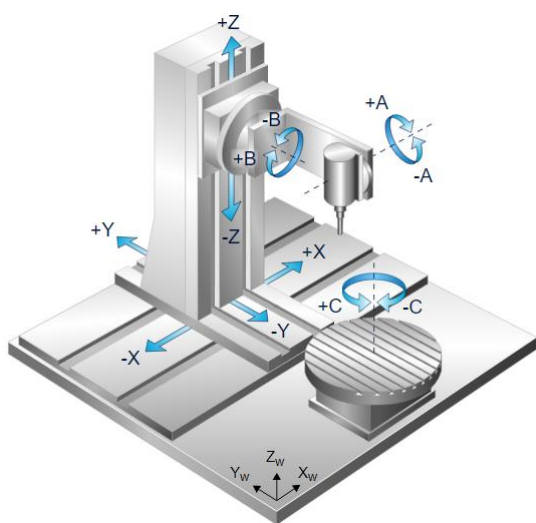
Realizácia uvedených trendov je podmienená zvýšením výpočtovej rýchlosti a výpočtovej kapacity počítačovej časti riadiacich systémov strojov.

Výrobcovia strojov a príslušenstva sa zároveň snažia skracovať neproduktívne časy, vznikajúce napr. pri obslužných činnostiach. Prejavuje sa to skracovaním času, potrebného na výmenu nástroja alebo času potrebného na upnutie a uvoľnenie obrobku.

Viacosové obrábanie

Donedávna predstavovali 3-osé frézovacie stroje a sústruhy s poháňanými nástrojmi základný výrobný prostriedok. Kvôli zvyšujúcej sa náročnosti dielcov, ale aj kvôli zlepšujúcej sa

cenovej dostupnosti, sú pri frézovaní v súčasnosti štandardom 5-osé stroje. Začínajú sa nasadzovať 6-osé frézovacie stroje, realizujúce tri rotačné pohyby oproti dvom doterajším. Koncept XYZ-AC (resp. AB, BC) je teda nahradený konceptom XYZ-ABC – obr. 1. Vzhľadom na rastúcu zložitosť vyrábaných dielcov a prísnejšie tolerancie sa predpokladá, že rozširovanie viacosového CNC obrábania bude pokračovať. Redukuje sa tým aj počet potrebných ustavení dielca, čo znižuje počet úkonov, skracuje výrobný čas a znižuje priestor pre chyby. To sa premieta do úspory nákladov. Rozširovanie sa viacosových strojov zároveň plošne znižuje ceny jednoduchších CNC strojov, čím sa táto technológia stáva dostupnejšou pre malých výrobcov.



Obr. 1 Pohyby realizované 6-osím frézovacím strojom [3]

Ovládanie a riadenie strojov

Súčasnne riadiace systémy využívajú architektúru otvorenú okolitému svetu, čo umožňuje implementovať dodatočné hardvérové aj softvérové zdroje a funkcie. Softvér riadiaceho systému tak nie je jediným softvérom používaným na strojoch. Významní výrobcovia strojov využívajú vlastné užívateľské rozhrania, umožňujúce integrovať okrem riadiaceho systému aj ďalšie softvéry. Príkladom je systém CELOS (výrobca strojov DMG Mori Seiki) alebo TOS control (TOS Varnsdorf). Systémy umožňujú zobrazovať elektronické dokumenty rôznych typov, vrátane technologických postupov a videonávodov. Ich súčasťou sú aj rôzne aplikácie ako kalkulačky rezných podmienok, sledovanie zaťaženia uzlov stroja či komunikácia cez počítačové siete. Užívateľské rozhranie umožňuje inštalovať prehliadače CAD súborov a dokonca kompletné CAD/CAM softvéry. Samozrejmosťou sa stávajú softvérové aktualizácie, možnosť dopĺňovania nových funkcií či prispôbenie systému na mieru

podľa požiadaviek prevádzkovateľa stroja. Displeje na ovládacích paneloch strojov sa postupne zväčšujú a často sú dotykové. Stali sa hlavným rozhraním pre komunikáciu medzi obsluhou a strojom.

Neustále sa vylepšuje adaptívne riadenie, založené na monitorovaní reznej sily, výkonu vretena a posuvových mechanizmov a na sledovaní prúdu, napätia a iných veličín. Použitie známych algoritmov umožňuje identifikovať sily pôsobiace na nástroj, zisťovať jeho opotrebenie, predikovať jeho poškodenie a vyhodnocovať stabilitu obrábacieho procesu. Na základe získaných údajov sa v reálnom čase upravujú rezné podmienky tak, aby sa zvýšila efektívnosť výroby, upravila presnosť obrábania resp. drsnosť povrchu a zvýšila bezpečnosť prevádzky stroja.

Súčasťou riadiacich systémov je v stále väčšej miere aj autodiagnostika – automatická diagnostika a kontrola CNC systému a mechanických častí stroja.

Umelá inteligencia

Umelá inteligencia (AI - Artificial Intelligence) sa presadzuje v mnohých odvetviach priemyslu. Pri výrobe na CNC obrábacích strojoch sa využíva strojové učenie napr. na detekciu výkonových, akustických a iných signálov, ktoré sú porovnávané s indikátormi určujúcimi vyhovujúci alebo nevyhovujúci výsledok. Umelá inteligencia navrhne výmenu nástroja, úpravu rezných podmienok či pracovného prostredia. Jej použitie stavia adaptívny riadiaci systém na vyšší stupeň.

Rozširuje sa ovládanie strojov hlasom a presadzujú sa aj iné nové formy komunikácie medzi strojom a obsluhou.

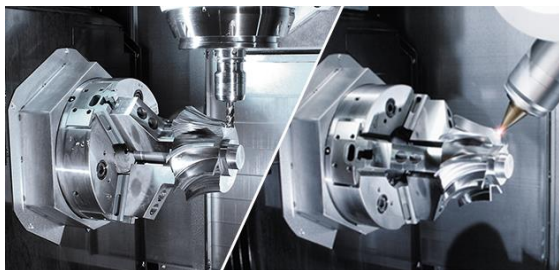
Predpokladá sa úspešné využitie umelej inteligencie pri prediktívnej údržbe CNC strojov, opäť ako vyšší stupeň autodiagnostiky. Zatiaľ čo preventívna údržba sa zameriava na plánované prehliadky a opravy, aby sa znížila pravdepodobnosť neočakávaných porúch strojov, cieľom prediktívnej údržby je upozorniť používateľov na problémy skôr, ako sa vyskytnú.

Ďalšou oblasťou nasadenia sú školenia obsluhy strojov. Je predpoklad, že až 100 % školení bude realizovať umelá inteligencia.

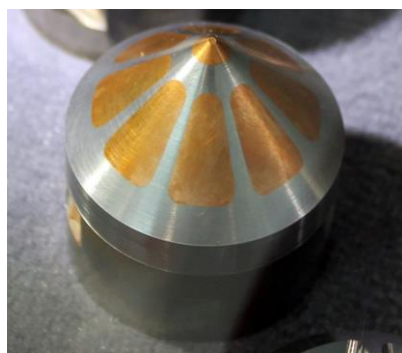
Vplyv aditívnej výroby

Typickým polovýrobkom pri výrobe na obrábacích strojoch sú nadelené hutnícke polotovary, odliatky či výkovky. S rozvojom priemyselnej 3D tlače sa začínajú používať ako polovýrobky aj výtlačky z 3D tlačiarňí. Výrobe finálnych dielcov na týchto zariadeniach zatiaľ bráni nízka presnosť a v niektorých prípadoch dlhší čas výroby. Na trhu rastie počet strojov, kombinujúcich obrábanie a aditívnu výrobu. Tieto hybridné stroje zlučujú výhody oboch technológií a umožňujú pri jednom upnutí vytvoriť tvarovo

a prvkovo zložitý dielec – obr. 2. Využíva sa aj možnosť kombinovať dva materiály – teleso základného polotovaru je z jedného materiálu a nanáša sa iný materiál – obr. 3.



Obr. 2 Pracovný priestor hybridného stroja – vľavo frézovanie, vpravo pridávanie materiálu [4]



Obr. 3 Dielec z dvoch materiálov zhotovený na hybridnom stroji [5]

Pre aditívnu časť sa používa technológia tavenia prášku alebo drôtu laserovým lúčom (LMD – Laser Metal Deposition) alebo drôtu taveného elektrickým oblúkom (WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing).

Využívanie robotov

Výhodou použitia robotov pri obrábaní je jeho veľký operačný priestor a široké možnosti polohovania nástroja voči obrobku, zabezpečené využívaním väčšieho počtu riadených pohybov v porovnaní s CNC strojmi. Samotný robot súčasne zaberá malý priestor v porovnaní so štandardným obrábacím centrom. Nevýhodou je nižšia tuhosť a presnosť, čo roboty predurčuje k obrábaniu ľahkoobrobiteľných materiálov a k úberom malými prierezmi triesok.

Roboty sa ale uplatňujú aj ako spolupracujúce zariadenia. Ich využitie pri obrobkovej alebo nástrojovej manipulácii umožňuje realizovať bezobslužnú prácu strojov [6]. Objavujú sa aj stroje s robotom integrovaným v pracovnom priestore stroja – obr. 4.



Obr. 4 CNC sústruh s integrovaným robotom [7]

Novým trendom je kolaboratívna robotika. Kolaboratívne roboty sú schopné nielen pracovať vedľa ľudí ale priamo s nimi spolupracovať na spoločnej úlohe. Očakáva sa, že táto technológia pomôže zvýšiť produktivitu pracovníkov a zároveň z dlhodobého hľadiska zníži náklady znížením pravdepodobnosti ľudskej chyby.

Priemyselný internet vecí

Pripájanie CNC strojov do počítačových sietí nie je novou skutočnosťou. Tento koncept je dlhé roky využívaný pri DNC riadení. Vývoj informačných technológií umožnil realizovať priemyselný internet vecí (IIoT - Industrial Internet of Things). Pripojiť je možné nielen stroje, ale aj spolupracujúce alebo integrované prvky či zariadenia, ako sú snímače, monitorovacie systémy, upínače nástrojov (obr. 5) a pod. Zariadenia, využívajúce internet na príjem a odosielanie údajov, umožňujú využívať nové funkcie, ako je vzdialené sledovanie prebiehajúcich operácií a prevádzkových parametrov strojov, vyhodnocovanie vyťaženia strojov, sledovanie stavu nástrojov a ďalšie. Zhromaždené údaje sa dajú využiť na vytváranie prediktívnych modelov, predpovedajúcich výrobu nepodarku, poruchu stroja alebo servisný zásah. Takáto predikcia pomáha udržiavať kvalitu a stabilné tempo výroby, predlžovať životnosť strojov a prináša úspory súvisiace s prestojmi a údržbou.



Obr. 5 Upínač frézovacích nástrojov vybavený snímačom a tablet s aplikáciou pre sledovanie zaťaženia nástroja [8]

Výroba ako služba

Výroba ako služba (MaaS - Manufacturing-as-a-Service) je stále častejšie využívaným konceptom. Podniky, ktoré potrebujú výrobnú kapacitu, ale nechcú vlastniť výrobné stroje, si predplatia službu ponúkanú vlastníkmi potrebných zariadení. Pri tomto prístupe platí predplatiť iba za výrobnú kapacitu, ktorú potrebuje. Podnikom to pomáha znížiť súvisiace náklady a tým zefektívniť ich procesy. MaaS môže slúžiť aj ako záloha konvenčnej vnútropodnikovej výroby napríklad pri prestojoch spôsobených opravami alebo poruchou stroja.

Rozvíja sa aj nový obchodný model a to prenájom strojov na určitú dobu. Stroj je dodávateľom nainštalovaný a po určitej dobe (napr. po splnení zákazky prevádzkovateľom) je demontovaný a odvezený.

Rozšírená a virtuálna realita

Z praktického hľadiska je pre používanie rozšírenej reality pri CNC obrábacích strojoch niekoľko dôvodov [9]:

- náročnosť používania CNC strojov, hlavne pre začínajúcich operátorov;
- nie vždy vyhovujúca ergonómia, keď sa operátor musí pohybovať medzi oknom stroja a panelom ovládania;
- okno pracovného priestoru je často znečistené procesnou kvapalinou, obsluha sa musí spoliehať len na informácie zobrazené na obrazovke panelu;
- zabezpečenie komplexnej a správne načasovanej údržby.

Prostriedky rozšírenej reality umožnia vykonávať simuláciu obrábania na skutočnom stroji bez nutnosti mať k dispozícii model samotného stroja a modely príslušenstva. Systém môže pomôcť operátorom pri nastavení bezkolíznych upnutí obrobkov a nástrojov, pri stanovení bezpečných vzdialeností pre rýchloposuvy a pod.

V oblasti programovania sa predpokladá súčinnosť s umelou inteligenciou, pričom samotný proces programovania bude prebiehať gestami, napr. ukazovaním na plochy resp. prvky, ktoré sa majú zhotoviť. Voľba nástroja, stratégie a rezných podmienok sa zrealizuje na základe znalostí, získaných predchádzajúcou výrobou dielcov [10].

Virtuálna realita umožní simulovať činnosť strojov pri zavádzaní výroby alebo pri výrobných operáciách, ktoré sa ukázali ako kritické. Predpokladá sa napríklad využitie virtuálneho výrobného procesu pre nájdenie čo najefektívnejšieho spôsobu prevádzky strojov.

Digitálne dvojčky

Digitálne dvojčka CNC stroja je jeho virtuálna kópia, v ktorej je zahrnutá aj komplexná kinematika, geometria a riadiaci systém. Po načítaní

NC programu napr. z CAM systému sa kód a cykly načítajú a správajú rovnako, ako by to bolo na reálnom stroji [11]. To umožňuje vykonať reálnejšie simulácie a ladiť NC program bez blokovania skutočného stroja.

Predpokladá sa využitie digitálnych dvojčiek aj pri plánovaní výrobných procesov, riadení prevádzok, posudzovaní spôsobilosti výroby, prediktívnej údržbe a pod.

Zvyšujúca sa dostupnosť prevádzkových údajov v reálnom čase umožňuje digitálne dvojčka neustále dopĺňať poznatkami o prevádzke a stave stroja. To je možné vďaka snímačom, ktoré sa v stále väčšej miere v strojoch vyskytujú.

Zoraďovanie nástrojov a meranie v stroji

Správne údaje o rozmeroch nástroja sú nevyhnutné pre presné zhotovenie dielca na CNC stroji. Meranie a zoraďovanie nástrojov sa uskutočňuje na samostatnom zariadení alebo pomocou nástrojovej sondy, integrovanej v konštrukcii stroja – obr. 6. Výhodou inštalácie v CNC stroji je, že nástroj môže byť automaticky kontrolovaný počas práce na dielcoch. Integrovaná nástrojová sonda môže podľa stanovených príkazov v NC programe identifikovať zlomené alebo opotrebované nástroje.

Už takmer štandardnou súčasťou strojov sú aj meracie (obrobkové) sondy. Výsledkami ich meraní je možné ovplyvniť realizovaný NC programov. Ich softvérové vybavenie umožňuje zhotoviť protokol z merania dielca, ktorý slúži ako doklad o kvalite výroby pre zákazníka. Nahrádza sa tým činnosť špecializovaného meracieho pracoviska. Môžu poskytnúť aj spätnú väzbu pre väčšinu moderných CAM softvérov.



Obr. 6 Nástrojová sonda na CNC frézovačke

Nástroje na obrábanie

Obrábacie nástroje patria k najdôležitejším komponentom v procese CNC obrábania. Vplyv použitých nástrojov na rýchlosť výroby, náklady a kvalitu dielcov je veľký.

Vývoj nástrojov prebieha neustále, je zameraný na rezné materiály, povlaky a geometriu

reznej časti. Vylepšujú sa spôsoby upínania a zdokonaľujú sa aj spôsoby ich výroby. Hľadajú sa nové geometrie nástrojov, stále viac pozornosti sa venuje aj mikrogeometrii rezných klinov, ktorá vo veľkej miere ovplyvňuje kvalitu obrobeného povrchu a trvanlivosť nástroja. Súčasná úroveň počítačového modelovania procesov obrábania vrátane tvorby triesok pomocou metód konečných prvkov umožňuje optimalizovať rezné časti nástrojov podľa špecifikovaných požiadaviek [12].

Rastúcou mierou sa presadzujú nástroje pre suché obrábanie, znižujúce dopady na životné prostredie a zároveň znižujúce výrobné náklady.

Výroba nástrojov aditívnou technológiou s využitím vnútorných mriežkových štruktúr môže znížiť hmotnosť nástrojov až o 30%. Technológia zároveň umožňuje optimalizovať kanály prívodu chladiacej kvapaliny k rezným klinom [13].

TRENDY V CAM SYSTÉMOCH

V minulosti boli CAM systémy využívané hlavne výrobcami foriem, elektród, lisovacích a iných tvarových nástrojov, prípadne pri príprave výroby zložitých dielcov. Dnes sa používajú aj pri programovaní výroby bežných dielcov. Umožňuje to nielen cenová dostupnosť, ale aj rýchlosť práce, daná užívateľsky prívetivejším ovládaním, čiastočnou automatizáciou niektorých činností a rozširujúcimi sa možnosťami pri podpore neustále sa vyvíjajúcich technológií.

Je badateľný trend odklonu od samostatných CAM systémov, ktoré sú závislé na rozhraniach k CAD produktom druhých strán. Väčšina dodávateľov CAM systémov už poskytuje integrované možnosti modelovania.

Väčšina realizovaných zmien má evolučný charakter. Príkladmi sú zlepšujúca sa jednoduchosť používania, rýchlejšie generovanie dráh nástroja, spoľahlivejšia predikcia kolízií, nové resp. inovované stratégie obrábania či zdokonalenie simulácií a analýz.

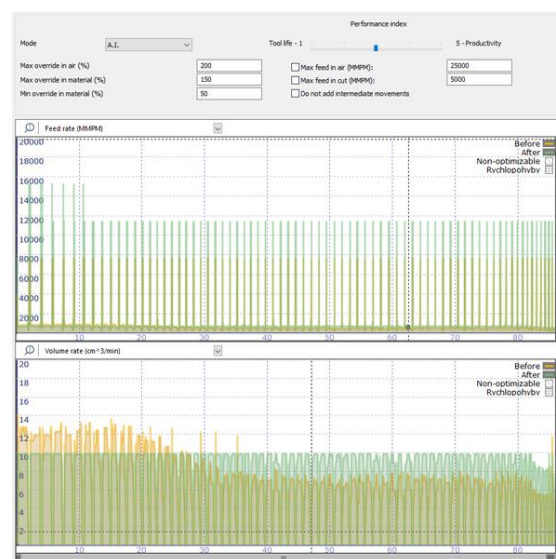
Dôležitou sa stáva podpora súborov STL (STereoLithography) v súvislosti s rozvojom 3D tlače, ktorá využíva tento formát.

Vo zvýšenej miere sa využívajú verifikačné a optimalizačné softvéry, umožňujúce kontrolovať a do vysokej miery optimalizovať NC kód, čím sa zefektívňuje výrobný proces.

Trendom je využívanie modulov pre obrábanie založené na znalostiach (KBM - Knowledge-based Machining). Využívajú sa znalosti, nahromadené predchádzajúcim programovaním a výrobou dielcov. Súčasťou tohto modulu je často aj automatické rozpoznávanie prvkov (AFR - Automatic Feature Recognition). Funkcia rozdelí dielec na technologické prvky, ako sú dutiny, drážky či otvory. Každý prvok má svoje geometrické vlastnosti ako je priemer, výška, hĺbka, objem alebo plocha. Použitie rozpoznávania prvkov minimalizuje potrebu rozmerových analýz

a manipulácie s geometriou pri príprave NC programu technologom - programátorom. Procesy, ktoré boli predtým uložené v databáze KBM, sa potom môžu použiť na zhotovenie prvku. CAM softvér môže automaticky stanoviť nástroje a rezné podmienky. Takéto prvkovo založené navrhovanie obrábania umožňuje systému vytvárať dráhy nástrojov bez ľudského zásahu, ale podľa vopred určeného ľudského uvažovania. Dôsledkom je výrazné zjednodušenie NC programovania, jeho zrýchlenie a oveľa jednoduchšie použitie.

Princíp znalostného obrábania prerastie do používania umelej inteligencie v CAM systémov, čo umožní ďalej zvyšovať ich výkon. Umelá inteligencia sa implementuje aj do doplnkových softvérov, používaných pri programovaní CNC strojov. Príkladom je softvér pre optimalizáciu NC kódu – obr. 7.



Obr. 7 Prostredie softvéru Eureka pri úprave hodnôt posuvu a objemového úberu materiálu v režime AI

Málo súčasných CAM systémov podporuje hybridné stroje, zlučujúce subtraktívnu a aditívnu výrobu. Vzhľadom na rozširujúci sa počet nasadených strojov sa predpokladá vývoj aj v tejto oblasti.

Ďalšie rozvíjajúce sa trendy:

- Realistickejšie znázornenie procesov v simuláciách pre dosiahnutie spoľahlivejších a použiteľnejších výsledkov. Podmienkou je vývoj lepších vizualizačných prostriedkov.
- Vylepšovanie generovaných dráh nástroja, podmienené zlepšením v oblasti efektívnosti a rýchlosti výpočtov.
- Plynulá vysokorýchlostná simulácia.
- Simulácia aj zložitých strojov ako štandard.
- Znižovanie počtu rozhodnutí, ktoré musí urobiť programátor.
- Presadzovanie princípu „správne na prvýkrát“. Základnou myšlienkou je obmedzenie počtu

realizovaných variantov NC programu pred vypracovaním použiteľnej verzie.

- Prepojenie CAD a CAM systémov, pri ktorom CAM softvér automaticky upozorní CAD konštruktéra, keď je navrhnutý prvok modelu obtiažne výrobitelný. Systém navrhne spôsoby prepracovania prvku pre zjednodušenie obrábania.

Hlavnou hnacou silou pri vývoji softvérov pre NC programovanie je snaha zlepšiť produktivitu používateľov používaním softvéru, ktorý sa ľahšie učí a používa, je automatizovanejší a viac integrovaný s konštrukčným softvérom.

ZÁVER

Technologické trendy sa menia veľkou rýchlosťou, pričom vývoj v samotných technológiách, vrátane obrábania, je veľmi prudký. Vývoj a pokroky vo výrobných i digitálnych technológiách odsunuli do úzadia tradičnú výrobu a stali sa základom toho, čo sa presadzuje ako Priemysel 4.0. Technologické ako internet vecí, umelá inteligencia, kybernetické systémy či tzv. veľké dáta posúvajú výrobný priemysel smerom k inteligentnej výrobe prostredníctvom prepojenia inteligentných komponentov vo výrobnej hale. Tieto trendy umožňujú výrobcovi rýchlejšie sa prispôbovať prebiehajúcim zmenám.

PodĎakovanie

Článok vznikol s podporou projektov VEGA 1/0219/18 „Vývoj inteligentného monitorovacieho systému pre produkciu nezameniteľných dielcov s nulovou chybovosťou“ a KEGA 048TUKE-4/2020 „Web based training pri podpore experimentálnej zručnosti v technologickom skúšobníctve“.

Literatúra

- [1] Kolář, P. – Smolík, J.: Aktuální trendy v oboru obráběcích strojů. MM Průmyslové spektrum, č. 6, 2022, str. 12 - 13.
- [2] HVR MAG: The four trends of CNC machine in 2023. Dostupné na: <https://www.hvrmagnet.com/blog/the-four-trends-of-cnc-machine-in-2022/> (19.7.2022).
- [3] Beckhoff: KIN_TYP_82 – 6-axis kinematics with C workpiece table. Dostupné na: https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tf5240_kinematic_transformation/292834187.html&id=2517239738843531316 (11.7.2022).
- [4] Mazak: Additive Manufacturing. Dostupné na: <https://www.mazakeu.co.uk/AM/> (11.7.2022).
- [5] Schulz, B.: Hermle Combines Metal Powder Application Process with Five-Axis Machining. Dostupné na: <https://www.additive-manufacturing.media/articles/hermle-combines-metal-powder-application-process-with-five-axis-machining> (11.7.2022).
- [6] Dvořák, R.: Přidaná hodnota obráběcích strojů. MM Průmyslové spektrum, č. 5, 2022, str. 40 - 41.
- [7] Misan: Vestavěné roboty obsluhují CNC obráběcí stroje OKUMA. Dostupné na: <https://www.strojirenstvi.cz/vestavene-roboty-obsluhují-cnc-obrabeci-stroje-okuma> (23.8.2022).
- [8] Schunk: Inteligentný s dvojnásobnou silou: nový iTENDO². Dostupné na: https://schunk.com/sk_sk/novinky/highlights/oznamenia/article/102605-inteligentny-s-dvojnásobnou-silou-novy-itendo2/ (11.7.2022).
- [9] Chardonnet, J-R., Fromentin, G., Outeiro, J.: Augmented reality as an aid for the use of machine tools. Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/322901113_Augmented_reality_as_an_aid_for_the_use_of_machine_tools (20.7.2022).
- [10] Kiswanto, G., Ariansyah, D.: Development of Augmented Reality (AR) for Machining Simulation of 3-axis CNC Milling. ICACSI 2013, str. 143 - 148.
- [11] Marek, J. a kol.: Konstrukce CNC obráběcích strojů. MM publishing, 385 s. Praha, 2019.
- [12] Iscar: The Logic of Development. Dostupné na: <https://www.iscar.com/newarticles.aspx/lang/en/newarticleid/10414> (19.7.2022).
- [13] Hider, J.: 3D Printing Lightweights Large Cutting Tools. Dostupné na: <https://www.mmsonline.com/articles/3d-printing-lightweights-large-cutting-tools> (20.7.2022).