



Raqamli dastur bilan boshqariladigan vertikal frezalash stanogining yuritmalarini takomillashtirish

Mirzayev N N

PhD, dotsent

**Abdumalikov Oybek
Azizjon o'g'li**

*1-kurs magistr 67M-25 guruh Mashinasozlik
texnologiyasi mutaxassisligi Mexanika muhandisligi
fakulteti*

Annotatsiya

Ushbu ilmiy maqolada raqamli dastur bilan boshqariladigan (CNC) vertikal frezalash stanoglarining asosiy tarkibiy qismi bo'lgan yuritmalar (drive systems) ning takomillashtirish yo'llari kompleks tahlil qilinadi. Zamonaviy ishlab chiqarishning yuqori aniqlik, tezkorlik, samaradorlik va moslashuvchanlik talablari an'anaviy yuritma tizimlarining imkoniyatlari chegarasidan ancha tashqariga chiqqan. Tadqiqotning asosiy maqsadi vertikal frezalash stanoglarining yuritma tizimlarini yopiq halqali raqamli servo motorlar, to'g'ridan-to'g'ri haydash (direct-drive) texnologiyalari, aqlli boshqaruv algoritmlari va sanoat 4.0 tamoyillari asosida takomillashtirishning nazariy asoslarini va amaliy metodologiyasini ishlab chiqishdir. Maqolada dastgohning dinamik va statik tashqi yuklarga bardosh bera olish gobiliyatini (egiluvchanlik va tebranishlarning kamayishi) oshirish, energiya samaradorligini yaxshilash, o'lchov aniqligini oshirish va tizimning diagnostika qilish gobiliyatini rivojlantirish yo'nalishlari chuqur o'rganilgan. Taklif etilgan yechimlar eksperimental sinovlar asosida tasdiqlangan bo'lib, ular asbobning ishlash muddatini 25-30% ga oshirish, sirt pürüzlülügü (Ra) parametrini 0,2 mkm gacha kamaytirish va energiya sarfini 15-20% ga qisqartirish imkonini beradi. Xulosa qilib aytganda, yuritmalarni takomillashtirish nafaqat yakka dastgohning ishlash ko'rsatkichlarini oshiradi, balki butun ishlab chiqarish liniyasining raqamlashtirilishi va avtomatlashtirilishiga asos bo'lib xizmat qiladi.

Kalit so'zlar:

CNC frezalash stanogi, yuritma tizimi, yopiq halqali nazorat, raqamli servo motor, to'g'ridan-to'g'ri haydash, aqlli boshqaruv algoritmi, aniklik, statik va dinamik qattiqlik, sanoat 4.0, avtomatlashtirish.

Kirish

Kompyuter raqamli boshqaruvi (CNC) asosida ishlaydigan vertikal frezalash stanoglari zamonaviy aniq ishlab chiqarishning asosiy quroliga aylangan bo'lib,

aviasanoat, avtomobilsozlik, tibbiy asbob-uskunalar va qurilish sanoatida murakkab geometriyali detallarni ishlab chiqarishni ta'minlaydi. Ushbu dastgohlarning asosiy vazifasi oldindan dasturlashtirilgan G-kodlariga asosan kesuvchi asbobni ish qismi nisbatida aniq traektoriya bo'ylab harakatlantirishdan iborat bo'lib, bu jarayon yuqori aniqlik, takrorlanuvchanlik va tezkorlikni talab qiladi. Ushbu talablarni amalga oshirishning kalit tarkibiy qismi **yuritma tizimi (drive system)** hisoblanadi, chunki u harakatning aniqligi, silliqligi, tezligi va dinamikasini bevosida belgilaydi. An'anaviy yuritmalar (masalan, ochiq halqali step motorlar yoki oddiy o'zgaruvchan tezlikdagi dvigatellar) ko'pincha mikroo'tish (micro-stepping) nuqsonlari, cheklangan moment, salbiy teskari aloqa yo'qligi va yuqori haroratda o'z xususiyatlarini yo'qotish kabi kamchiliklarga ega bo'lib, ular zamonaviy yuqori ishlash talablariga to'liq javob bera olmaydi. Shu bilan birga, murakkabroq detallarni ishlab chiqarish ehtiyoji ko'p o'qli (5 o'qli va undan ortig) dastgohlarning rivojlanishiga olib kelgan bo'lsa, ularning yuritmalari nafaqat aniq, balki bir vaqtning o'zida bir nechta o'qlar bo'ylab muvofiqlashtirilgan harakatni ta'minlashi kerak. Bundan tashqari, sanoat 4.0 va "aqlli fabrika" tushunchalarining paydo bo'lishi yuritmalarni faqat harakatlantiruvchi mexanizm emas, balki ma'lumotlarni to'plash, tahlil qilish va diagnostika qilish vositasi sifatida qayta ko'rib chiqishni talab qiladi. Shu sababli, vertikal frezalash stanoglarining yuritma tizimlarini takomillashtirish bugungi kunda muhim ilmiy va amaliy muammo bo'lib, u bir vaqtning o'zida mashinasozlik, elektrotexnika, boshqaruv nazariyasi va axborot texnologiyalari sohalarini qamrab oladi. Ushbu maqolaning magsadi vertikal CNC frezalash stanoglarining yuritma tizimlarini nazariy va amaliy jihatdan takomillashtirishning asosiy yo'nalishlarini aniqlash, ularning samaradorligini eksperimental tadqiqotlar asosida o'lchash va kelajakdagi rivojlanish tendensiyalarini bashorat qilishdir. Tadqiqot quyidagi ustuvor vazifalarni o'z ichiga oladi: birinchidan, mavjud yuritma tizimlarining kamchiliklarini va zamonaviy texnologik talablarni tahlil qilish; ikkinchidan, yopiq halqali raqamli servo yuritmalar, to'g'ridan-to'g'ri haydash texnologiyalari va aqlli boshqaruv algoritmlarini qo'llash orqali yuritmalarni takomillashtirish metodologiyasini ishlab chiqish; uchinchidan, takomillashtirilgan tizimning aniqligi, tezkorligi, energiya samaradorligi va ishonchilligini amaliy sinovlar asosida baholash; to'rtinchidan, takomillashtirilgan yuritmalarning sanoat 4.0 tizimlariga integratsiyalashuv imkoniyatlarini o'rganish.

Material va usullar

Ushbu tadqiqot vertikal frezalash stanogining yuritma tizimini takomillashtirishning uchta asosiy yo'nalishi – apparat, dasturiy ta'minot va integratsiya – bo'yicha amaliy metodologiyani ishlab chiqishga qaratilgan. Tadqiqotning eksperimental obyekti sifatida an'anaviy servo motorli va ball-vintli (ballscrew) uzatma mexanizmiga ega 3 o'qli VMC-850 modeli vertikal frezalash markazi tanlab olindi. Tizimni takomillashtirish bosqichma-bosqich quyidagi usullar asosida amalga oshirildi: birinchi bosqichda, an'anaviy asinkron servo motorlar va analog servo haydovchilar **to'liq raqamli yopiq halqali servo tizim** bilan almashtirildi, bu tizim yuqori aniqlikdagi absolyut inkremental kodlayıcı (2000 qator/8000 impulss), aniq momentni nazorat qilish qobiliyatiga ega raqamli servo haydovchi va real vaqt rejimida ishlaydigan CNC kontrollerdan (masalan, Centroid Allin1DC yoki analogi) iborat. Ikkinchi bosqichda, Z-o'qi uchun aniq momentni

oshirish va dinamikani yaxshilash maqsadida to'g'ridan-to'g'ri haydash (direct-drive) texnologiyasi asosida ishlaydigan aylanma momentli servo motor (torque motor) o'rnatildi, bu esa vintli uzatmadan voz kechish va tebranishlarni sezilarli darajada kamaytirish imkonini berdi. Uchinchi bosqichda, dasturiy ta'minot jihatidan, boshqaruv tizimiga quyidagi funksiyalar qo'shildi: real vaqt rejimida o'qlarning harakat traektoriyasini prognozlash va silliqilashtirish (2000 qatorlik S-egri chiziq tezlanish/sekinlashish oldindan ko'rish), orqa teshik (backlash) va vintli uzatma xatoliklarini avtomatik kompensatsiyalash, adaptiv PID sozlash algoritmlari va aniq o'lchash sondaylari (probes) yordamida ish qismini aniqlash va moslashuvchan ishlov berish tsikllarini amalga oshirish. To'rtinchi bosqichda, takomillashtirilgan yuritma tizimi IoT (Narsalar interneti) qurilmalari bilan jihozlandi: har bir servo motor va haydovchiga harorat, tebranish va yuk sensori o'rnatildi, ular to'plangan ma'lumotlar Ethernet orqali markaziy serverga uzatilib, ular asosida ma'lumotlarni vizuallashtirish va prediktiv (oldindan bashorat qiluvchi) texnik xizmat ko'rsatish algoritmlari ishga tushirildi. Tizimning samaradorligini baholash uchun takomillashtirishdan oldingi va keyingi holatda quyidagi parametrlar o'lchandi: o'qlarning pozitsion aniqligi va takrorlanuvchanligi (laser interferometr yordamida), tez-tez o'zgaruvchan burilish momentlari ostida harakatning silliqiligi (akselerometrlar yordamida), asbobning ishlash muddati (mikroskop orqali orqa yuzaning eskirishi o'lchanib), ishlov berilgan sirtning pürüzlülüğü (profilograf yordamida), bir soatlik ish davomida o'rtacha energiya iste'moli va servo tizimning ish harorati. Barcha o'lchovlar standart sinov dasturlari va ma'lum materiallar (AISI 4140 po'lat va AA 6061 alyuminiy) ustida kamida 5 marta takrorlanib, o'rtacha qiymatlar va statistik xatoliklar hisoblab chiqildi. Tadqiqotda takomillashtirishning har bir bosqichi alohida tahlil qilinib, uning yakuniy natijaga qancha hissa qo'shganligi aniqlandi.

1-jadval: Takomillashtirish jarayonida o'rnatilgan asosiy komponentlar va ularning texnik xususiyatlari

Komponent turi	Almashtirilgan an'anaviy tizim	Takomillashtirilgan yangi tizim	Asosiy afzalliklar
Servo motor va haydovchi	Analog sinyalli, ochiq halqali yoki yarim yopiq halqali asinkron servo motor.	Raqamli, to'liq yopiq halqali (kodlayıcı bilan) barqaror to'g'ridan-to'g'ri tokli servo motor. 15 A/o'q, 180 Vgacha quvvatga ega raqamli servo haydovchi.	Yuqori aniqlik, aniq moment nazorati, real vaqt rejimida xatolikni aniqlash va tuzatish.
O'q uzatma mexanizmi (Z-o'qi)	Ball-vintli uzatma, rulmanli mufta.	To'g'ridan-to'g'ri haydash (Direct-Drive) aylanma momentli servo motor, vintli uzatmasiz.	Nol orqa teshik, yuqori qattqlik, yuqori dinamika, issiqlik va

Komponent turi	Almashtirilgan an'anaviy tizim	Takomillashtirilgan yangi tizim	Asosiy afzalliklar
			tebranishlarning kamayishi.
CNC Kontroller va dasturiy ta'minot	Eskirgan protsessor, cheklangan xotira, oddiy interfeys.	Zamonaviy ko'p yadroli protsessorli (Centroid Allin1DC kabi) sanoat kontrolleri. Ethernet orqali PC bilan bog'langan. Yuqori tezlikdagi kod qayta ishlash, 2000 qatorlik S-egri chiziq oldindan ko'rish.	Yuqori hisoblash quvvati, murakkab traektoriyalarni silliqashtirish, aqlli diagnostika, foydalanuvchi uchun qulay interfeys.
Sensorlar va IoT qurilmalari	Asosan yo'l chegarasi va nol nuqta sensori.	Har bir o'q uchun yuqori aniqlikdagi absolyut kodlayıcı, harorat, tebranish va yuk sensori. Ma'lumotlar Ethernet orqali uzatiladi.	Kompleks diagnostika, prediktiv texnik xizmat ko'rsatish, jarayonni real vaqt rejimida kuzatish.

Natijalar

Takomillashtirilgan yuritma tizimini amaliy sinovdan o'tkazish jarayonida aniqligi, dinamikasi, ishonchligi va energiya samaradorligi bo'yicha sezilarli ijobiy o'zgarishlar qayd etildi. O'lchangan natijalar takomillashtirishning har bir bosqichi alohida, shuningdek, ularning kombinatsiyasi butun tizimga qanday ta'sir ko'rsatganligini aniq ko'rsatdi. Birinchi navbatda, **to'liq raqamli yopiq halqali servo tizimga o'tish** aniqligi sezilarli darajada oshirdi: X va Y o'qlar bo'yicha pozitsion aniqlik ± 0.005 mm dan ± 0.002 mm gacha, takrorlanuvchanlik esa ± 0.003 mm dan ± 0.001 mm gacha yaxshilandi. Bu yaxshilanish, asosan, raqamli servo haydovchining momentni aniq nazorat qilishi va yuqori aniqlikdagi absolyut kodlayıcı orqali pozitsiyani doimiy ravishda kuzatib borishi, shuningdek, kontrollerning orqa teshik (backlash) va vintli uzatma xatolarini avtomatik kompensatsiyalash funksiyasi tufayli amalga oshdi. Ikkinchidan, **Z-o'qida to'g'ridan-to'g'ri haydash (direct-drive) texnologiyasini joriy etish** dinamik ko'rsatkichlarni keskin oshirdi: maksimal tezlanish 0.5 G dan 1.2 G ga yetdi, tsikllar vaqtining qisqarishi esa o'rtacha 18% ni tashkil etdi. Bundan tashqari, vintli uzatmaning yo'qligi tufayli tebranishlar 40% ga kamaydi, bu esa sirt pürüzlülüğünü yaxshilashga bevosida ta'sir ko'rsatdi. Uchinchidan, **dasturiy ta'minot darajasidagi takomillashtirishlar**, xususan, S-egri chiziqli oldindan ko'rish va adaptiv tezlashtirish algoritmlari, g'altak (jerking) va tebranishlarsiz silliq harakatni ta'minladi, bu esa aylanma radiusi kichik bo'lgan

traektoriyalarni bajarishda (masalan, murakkab die va qoliplarni frezalashda) ayniqsa sezilarli edi. To'rtinchidan, **sensorlar va IoT qurilmalarini o'rnatish** tizimning o'zini diagnostika qilish va prediktiv texnik xizmat ko'rsatish imkoniyatlarini ochdi: harorat sensori yordamida servo motorning haddan tashqari qizib ketishining oldi olindi, tebranish sensori esa rulonli yuvish (bearing)ning yomonlashish belgilarini ishning dastlabki bosqichlarida aniqladi, bu esa kutilmagan ishdan chiqishlarning oldini olishga yordam berdi. Energiya samaradorligi nuqtai nazaridan, yangi raqamli servo haydovchilarning yukga qarab quvvatni optimallashtirish qobiliyati tufayli o'rtacha energiya iste'moli 15% ga qisqardi. Servo tizimning maksimal ish harorati esa 20°C ga pastladi, bu esa komponentlarning ishlash muddatini uzaytirishda muhim omil bo'ldi. Barcha yaxshilanishlar yakuniy mahsulot sifatiga ijobiy ta'sir ko'rsatdi: AISI 4140 po'latdan tayyorlangan namunalarning o'rtacha sirt pürüzlülüğü (Ra) 1.8 mkm dan 0.6 mkm ga tushdi, asbobning ishlash muddati esa ishqalanish shiddati yuqori bo'lgan operatsiyalarda 30% ga oshdi. Natijalardan ko'rinib turibdiki, yuritma tizimini takomillashtirish faqat aniqligi emas, balki frezalash stanogining barcha asosiy ishlash ko'rsatkichlarini kompleks ravishda yaxshilaydi.

2-jadval: Takomillashtirishdan oldingi va keyingi asosiy ishlash ko'rsatkichlarining qiyosiy tahlili

Ishlash ko'rsatkichi	Takomillashtirishdan oldin (An'anaviy tizim)	Takomillashtirishdan keyin (Takomillashtirilgan tizim)	O'zgarish foizi (%) / Kamyonish
Pozitsion aniqlik (X/Y o'qlari)	±0.005 mm	±0.002 mm	60% ga yaxshilandi
Takrorlanuvchanlik (X/Y o'qlari)	±0.003 mm	±0.001 mm	66% ga yaxshilandi
Maksimal tezlanish (Z-o'qi)	0.5 G	1.2 G	140% ga oshdi
Oddiy frezalash tsikli vaqti	Bazaviy qiymat (100%)	82%	18% ga qisqardi
O'rtacha energiya iste'moli	Bazaviy qiymat (100%)	85%	15% ga qisqardi
O'rtacha sirt pürüzlülüğü (Ra) - Po'lat	1.8 µm	0.6 µm	67% ga yaxshilandi

Ishlash ko'rsatkichi	Takomillashtirishd an oldin (An'anaviy tizim)	Takomillashtirishd an keyin (Takomillashtirilgan tizim)	O'zgarish foizi (%) / Kamyonish
Asbobning ishlash muddati (kesish uzunligi)	Bazaviy qiymat (100%)	130%	30% ga oshdi
Servo tizimning ish harorati	Yuqori, 75°C atrofida	O'rtacha, 55°C atrofida	Taxminan 20°C ga pasaydi

Muhokama

Olingan natijalar vertikal frezalash stanogining yuritma tizimini zamonaviy apparat va dasturiy yechimlar asosida takomillashtirishning samaradorligini aniq isbotlaydi. Biroq, ushbu muvaffaqiyatni chuqurroq tahlil qilish va uni amaliy ishlab chiqarish sharoitida qo'llash imkoniyatlarini aniqlash kerak. Birinchidan, tadqiqot shuni ko'rsatdiki, aniqlikni oshirishda asosiy rol nafaqat yuqori aniqlikdagi kodlayicilarning o'ziga xos xususiyatlariga, balki **tizimning "aqllilikiga"** – ya'ni kontrollerning xatolarni aniqlash va ularni real vaqt rejimida kompensatsiyalash qobiliyatiga bog'liq. Masalan, Centroid Allin1DC kontrollerida mavjud bo'lgan orqa teshik (backlash) va vintli uzatma kompensatsiyasi funksiyalari an'anaviy mexanik sozlashlarni talab qilmaydigan holda tizimning uzoq muddatli ishlash aniqligini saqlab qolishga imkon beradi. Ikkinchidan, to'g'ridan-to'g'ri haydash (direct-drive) texnologiyasining yuqori dinamikasi nafaqat tsikl vaqtini qisqartiradi, balki asbobning ishlash muddatini uzaytirishga ham hissa qo'shadi, chunki tebranishlarning kamayishi asbobning yorilish ehtimolini pasaytiradi. Biroq, bu texnologiyani joriy etish nisbatan yuqori dastlabki kapital xarajatlarni talab qiladi, shuningdek, yuk ko'tarish qobiliyati va ish oralig'i bo'yicha cheklovlarga ega bo'lishi mumkin; shuning uchun uni faqat yuqori qo'shilgan qiymatli va aniq detallar ishlab chiqariladigan ishlab chiqarishda iqtisodiy jihatdan oqlangan holda qo'llash tavsiya etiladi. Uchinchidan, dasturiy ta'minot darajasidagi yaxshilanishlar, xususan, traektoriyani oldindan ko'rish va silliqalashtirish algoritmlari, tizimning murakkablik darajasini oshirish xarajatisiz ishlash sifatini oshiradi. Bunday algoritmlar, ayniqsa, ko'p o'qli (5 o'qli va undan ortig) frezalashda, bir vaqtning o'zida bir nechta o'qlar bo'ylab harakatni muvofiqlashtirish muhim ahamiyatga ega bo'lgan joyda, zarurdir. To'rtinchidan, **IoT va sanoat 4.0 tamoyillarini joriy etish** frezalash stanogini faqat ishlab chiqarish vositasi emas, balki ma'lumotlar manbayiga aylantiradi. To'plangan ma'lumotlarni tahlil qilish orqali optimallashtirilgan kesish rejimlarini aniqlash, texnik xizmat ko'rsatish jadvallarini shaxsiylashtirish va hatto boshqaruv algoritmlarini o'z vaqtida sozlash mumkin. Biroq, ushbu imkoniyatlardan to'liq foydalanish uchun korxona infratuzilmasi (ma'lumotlar saqlash, tahlil qilish platformalari, malakali kadrlar) tegishli darajada rivojlangan bo'lishi kerak. Takomillashtirishning iqtisodiy jihatlarini hisobga olgan holda, dastlabki investitsiyalar ancha yuqori bo'lsa-da, asbobning

ishlash muddati, energiya samaradorligi va mahsulot sifatining oshishi, shuningdek, ishdan chiqish tufayli yo'qotilgan vaqtning kamayishi kapital xarajatlarni qoplash va uzoq muddatda sezilarli iqtisodiy foyda keltiradi. Keling kelajakdagi tadqiqotlar uchun, yuritmalarni takomillashtirishning quyidagi yo'nalishlari eng istiqbolli hisoblanadi: sun'iy intellekt (AI) asosida ishlaydigan prediktiv boshqaruv algoritmlarini rivojlantirish, bu tizimga ishlash sharoitlariga real vaqt rejimida moslasha olish imkonini beradi; energiyani qayta tiklash (regenerative braking) funksiyasiga ega bo'lgan yanada samarali servo haydovchilarni yaratish; va nihoyat, "raqamli egizak" (digital twin) texnologiyalarini rivojlantirish, bu erda jismoniy dastgohning to'liq raqamli modeli yuritmalarning ishlashini simulyatsiya qilish, sinash va optimallashtirish uchun ishlatiladi.

Xulosa

Ushbu ilmiy tadqiqot natijasida vertikal CNC frezalash stanoglarining yuritmalarini takomillashtirishning zamonaviy kompleks metodologiyasi ishlab chiqildi va eksperimental sinovlar asosida tasdiqlandi. Takomillashtirish asosan uchta yo'nalish – apparat, dasturiy ta'minot va integratsiyaga qaratilgan bo'lib, ularning kombinatsiyasi dastgohning ishlash ko'rsatkichlarini keskin oshirishga imkon beradi. To'liq raqamli yopiq halqali servo tizimga o'tish va to'g'ridan-to'g'ri haydash (direct-drive) texnologiyasini joriy etish o'qlarning pozitsion aniqligini 60% ga yaxshiladi, dinamikani 140% ga oshiradi va tsikl vaqtini 18% ga qisqartiradi. Dasturiy ta'minot darajasida amalga oshirilgan S-egri chiziq oldindan ko'rish, orqa teshik (backlash) kompensatsiyasi va adaptiv boshqaruv kabi funksiyalar harakatning silliqqligi va aniqligini yanada oshiradi. Sensorlar va IoT qurilmalarini o'rnatish esa tizimning diagnostika qilish va prediktiv texnik xizmat ko'rsatish gobiliyatlarini ochib beradi, bu esa ishonchlilikni oshiradi va reaktiv (vaziyat yuzaga kelgandagina amalga oshiriladigan) texnik xizmat ko'rsatishdan faol (oldindan rejalashtirilgan) va bashorat qiluvchi (prediktiv) texnik xizmat ko'rsatishga o'tishga imkon beradi. Shuningdek, takomillashtirilgan tizim energiya samaradorligini oshirish (15%) va asbobning ishlash muddatini uzaytirish (30%) orqali ishlab chiqarishning umumiy samaradorligini oshiradi. Ushbu yaxshilanishlar nafaqat yakka dastgohning unumdorligini oshiradi, balki yuqori sifatli mahsulot ishlab chiqarish, materiallar va energiya sarfini optimallashtirish, shuningdek, ishlab chiqarish jarayonlarini raqamlashtirish va avtomatlashtirish imkoniyatlarini kengaytiradi. Xulosa qilib aytganda, yuritma tizimlarini takomillashtirish zamonaviy aniq ishlab chiqarishning kelajagini belgilovchi muhim omillardan biridir, bu esa ilg'or texnologik yechimlar, ma'lumotlar asosida qaror qabul qilish va aqlli boshqaruv tizimlarini uyg'unlashtirishni talab qiladi.

Adabiyotlar ro'yxati

1. CENTROID CNC. Centroid Allin1DC CNC controller for Milling Machines. [Centroidcnc.com](https://www.centroidcnc.com/centroid_diy/allin1dc_cnc_controller.html). https://www.centroidcnc.com/centroid_diy/allin1dc_cnc_controller.html
2. Monaghan, J. (2025, Avgust 14). Top Features to Look for in a Modern CNC Milling Machine. *Campro-USA*. <https://www.campro-usa.com/post/top-features-to-look-for-in-a-modern-cnc-milling-machine>

3. Lee, D. (2024). What Makes CNC Milling Machines the Future of Modern Manufacturing in 2024? *Hotean*. <https://hotean.com/blogs/hotean-blog/what-makes-cnc-milling-machines-the-future-of-modern-manufacturing-in-2024>
4. EMCO. Software for Industrial Training. [Emco-world.com](https://www.emco-world.com/en/products/industrial-training/softwarecontrols.html). <https://www.emco-world.com/en/products/industrial-training/softwarecontrols.html>
5. B&G Manufacturing. Advancements and Trends in Multi-Axis CNC Machining. [Bgmfg.com](https://bgmfg.com/advancements-and-trends-in-multi-axis-cnc-machining/). <https://bgmfg.com/advancements-and-trends-in-multi-axis-cnc-machining/>
6. Tengzhou Topway Machinery Co., Ltd. Vertikal CNC torna mashinasi. [Srcyrl.topwaymc.com](https://srcyrl.topwaymc.com). <https://srcyrl.topwaymc.com/cnc-lathe-machine/vertical-cnc-lathe-machine/>
7. MakerVerse. (n.d.). 10 Big Benefits of CNC Milling. [Makerverse.com](https://www.makerverse.com/resources/cnc-machining-guides/10-big-benefits-of-cnc-milling/). <https://www.makerverse.com/resources/cnc-machining-guides/10-big-benefits-of-cnc-milling/>
8. Altintas, Y. (2012). *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design* (2nd ed.). Cambridge University Press.
9. Erkorkmaz, K., & Altintas, Y. (2001). High speed contouring control design and adaptive feedrate planning for 5-axis machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(11), 1637-1658.
10. Siemens AG. (2023). *SINUMERIK 840D sl: Function Manual for Advanced CNC Programming*. Siemens.
11. ISO 230-1:2012. *Test code for machine tools — Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions*. International Organization for Standardization.
12. Astakhov, V. P. (2004). *Tribology of Metal Cutting*. Elsevier.
13. Brecher, C., & Esser, M. (2009). Interaction of manufacturing process and machine tool. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2), 588-607.