

Prediktív karbantartás alkalmazása CNC megmunkálóközpontoknál az Ipar 4.0 környezetben

Application of Predictive Maintenance in CNC Machining Centers within an Industry 4.0 Environment

Burai István György

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország
burai.istvan@uni-obuda.hu

Összefoglalás — Az ipari digitalizáció és az Ipar 4.0 technológiák megjelenése jelentősen átalakította a gyártóberendezések üzemeltetésének és karbantartásának módszereit. A hagyományos reaktív és időalapú karbantartási stratégiákat egyre inkább felváltják az adatvezérelt állapotfelügyeleti megoldások, amelyek lehetővé teszik a berendezések működési állapotának folyamatos monitorozását és a meghibásodások előrejelzését. A prediktív karbantartás szenzoradatok, ipari kommunikációs rendszerek és fejlett adatfeldolgozási módszerek alkalmazásával támogatja a karbantartási döntéshozatalt, ezáltal csökkentve a nem tervezett gépleállások kockázatát. A tanulmány bemutatja a prediktív karbantartási rendszerek működési elvét, valamint azok alkalmazási lehetőségeit CNC megmunkálóközpontok esetében. A cikk ismerteti a legfontosabb állapotdiagnosztikai módszereket, például a rezgésdiagnosztikát, a hőmérséklet-monitorozást és az áramfelvétel elemzését, valamint áttekinti az ipari adatgyűjtési és kommunikációs technológiák szerepét az Ipar 4.0 gyártási környezetben. A vizsgálat rámutat arra, hogy a prediktív karbantartási megoldások hozzájárulhatnak a gyártási folyamatok megbízhatóságának növeléséhez, a berendezések rendelkezésre állásának javításához és a karbantartási költségek optimalizálásához.

Kulcsszavak: Ipar 4.0, prediktív karbantartás, CNC megmunkálóközpont, állapotfelügyelet, ipari adatgyűjtés

Abstract — The digital transformation of manufacturing systems and the emergence of Industry 4.0 technologies have significantly changed maintenance strategies in industrial production. Traditional reactive and time-based maintenance approaches are increasingly replaced by data-driven condition monitoring systems that enable continuous monitoring of equipment status and the prediction of potential failures. Predictive maintenance uses sensor data, industrial communication technologies and advanced data analysis methods to support maintenance decision-making and reduce the risk of unexpected machine downtime. This paper presents the operating principles of predictive maintenance systems and their potential application in CNC machining centers. The study discusses the main condition monitoring methods, including vibration analysis, temperature monitoring and electrical current analysis, and reviews the role of industrial data acquisition and communication technologies in Industry 4.0 manufacturing environments. The results highlight that predictive maintenance solutions can significantly improve production

reliability, increase machine availability and optimize maintenance costs.

Keywords: Industry 4.0, predictive maintenance, CNC machining centers, condition monitoring, industrial data acquisition

1 BEVEZETÉS

Az ipari termelési rendszerek az elmúlt évtizedben jelentős technológiai átalakuláson mentek keresztül, amelyet a szakirodalom az Ipar 4.0 fogalmával ír le. Az új ipari paradigma a gyártórendszerek digitalizációjára, hálózatba kapcsolására és az információs technológiák integrációjára épül. Ennek eredményeként a modern gyártási rendszerek egyre inkább adatvezérelt működést valósítanak meg, amely lehetővé teszi a termelési folyamatok hatékonyabb irányítását és optimalizálását [1][2].

A gyártóberendezések megbízható működése alapvető feltétele a stabil és hatékony termelési folyamatoknak. A nem tervezett gépleállások jelentős termelési veszteséget okozhatnak, valamint növelhetik az üzemeltetési költségeket. A hagyományos karbantartási stratégiák, mint a reaktív vagy az időalapú preventív karbantartás gyakran nem képesek hatékonyan kezelni a komplex gyártórendszerek működési kockázatait. A modern ipari környezetben ezért egyre nagyobb figyelmet kapnak az állapotfüggő és prediktív karbantartási megoldások, amelyek célja a berendezések működési állapotának folyamatos monitorozása és a potenciális meghibásodások előrejelzése.

A prediktív karbantartási rendszerek működése elsősorban szenzoradatok gyűjtésén és azok elemzésén alapul. A különböző diagnosztikai módszerek például rezgésanalízis, hőmérséklet monitorozás vagy elektromos áramfelvétel vizsgálata lehetővé teszik a berendezések állapotának folyamatos nyomon követését és az eltérések korai felismerését [3][4]. Az ipari adatgyűjtési rendszerek és a fejlett adatfeldolgozási módszerek fejlődése tovább növelte a prediktív karbantartás alkalmazhatóságát a modern gyártási környezetben.

A prediktív karbantartás különösen fontos szerepet játszik a CNC megmunkálóközpontok üzemeltetésében, mivel ezek a berendezések komplex mechanikai és vezérlési rendszereket tartalmaznak, amelyek meghibásodása jelentős termelési kiesést okozhat. A CNC gépek kritikus komponenseinek – főorsó, szervohajtások

vagy szerszámrendszer – állapotfelügyelete ezért kiemelt jelentőségű a gyártási folyamat megbízhatóságának biztosítása szempontjából.

A tanulmány célja a prediktív karbantartási rendszerek működési elvének bemutatása, valamint annak vizsgálata, hogy ezek a megoldások milyen módon alkalmazhatók CNC megmunkálóközpontok esetében az Ipar 4.0 környezetben. A cikk áttekinti a karbantartási stratégiák fejlődését, bemutatja a prediktív karbantartási rendszerek technológiai alapjait, valamint ismerteti azok ipari alkalmazási lehetőségeit.

2 KARBANTARTÁSI STRATÉGIÁK FEJLŐDÉSE

Az ipari karbantartási stratégiák fejlődése szorosan kapcsolódik a gyártórendszerek technológiai fejlődéséhez. A karbantartási módszerek az ipari termelés korai szakaszában elsősorban a meghibásodások utáni javításra épültek, azonban a gyártórendszerek komplexitásának növekedésével egyre nagyobb igény jelent meg a berendezések működési megbízhatóságának növelésére és a nem tervezett leállások csökkentésére [4][5].

A karbantartási stratégiák fejlődése általában három fő megközelítés mentén írható le: reaktív, preventív és prediktív karbantartás (1. ábra).



1. ábra: Karbantartási stratégiák fejlődése

2.1 Reaktív karbantartás

A reaktív karbantartás gyakran *run-to-failure* (meghibásodásig tartó) stratégiaként is ismert, és a legegyszerűbb karbantartási megközelítés, amely során a karbantartási beavatkozás kizárólag a meghibásodás bekövetkezése után történik. Ez a módszer a berendezések kezdeti üzemeltetési szakaszában széles körben elterjedt volt, mivel nem igényelt külön karbantartási tervezést vagy állapotfelügyeleti rendszereket [6].

A reaktív karbantartás előnye az alacsony kezdeti költség, azonban jelentős hátránya, hogy a váratlan meghibásodások termelési kiesést és magas javítási költségeket eredményezhetnek. A modern ipari gyártórendszerekben ezért ez a megközelítés elsősorban csak nem kritikus berendezések esetében alkalmazható.

2.2 Preventív karbantartás

A preventív vagy időalapú karbantartás célja a meghibásodások megelőzése előre meghatározott karbantartási intervallumok alkalmazásával. Ebben az esetben a berendezések karbantartása vagy az alkatrészek cseréje meghatározott üzemidő vagy ciklusszám után történik [5].

Ez a megközelítés jelentős mértékben csökkentheti a váratlan meghibásodások valószínűségét, azonban gyakran olyan karbantartási beavatkozásokat is eredményez, amelyek műszakilag még nem indokoltak. Ennek következtében a preventív karbantartás bizonyos esetekben felesleges alkatrészcserehez és magasabb karbantartási költségekhez vezethet.

2.3 Prediktív karbantartás

A prediktív karbantartás a modern ipari karbantartási stratégiák egyik legfejlettebb formáját képviseli. A módszer alapja a berendezések működési állapotának folyamatos monitorozása és a meghibásodások előrejelzése különböző diagnosztikai és adatfeldolgozási módszerek alkalmazásával [7][8].

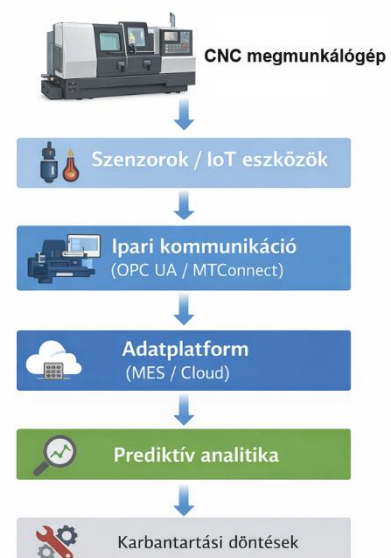
A prediktív karbantartási rendszerek szenzorok segítségével folyamatosan gyűjtik a berendezések működésével kapcsolatos adatokat, például rezgési jeleket, hőmérsékleti adatokat vagy elektromos terhelési paramétereket. Az összegyűjtött adatok elemzése lehetővé teszi az eltérések korai felismerését, így a karbantartási beavatkozások a tényleges műszaki állapot alapján tervezhetők meg [3].

Az ipari digitalizáció és az Ipar 4.0 technológiák fejlődése tovább növelte a prediktív karbantartás jelentőségét, mivel a modern gyártórendszerek egyre nagyobb mennyiségű működési adatot képesek gyűjteni és feldolgozni. Ennek eredményeként a prediktív karbantartás napjainkban a gyártási rendszerek megbízhatóságának növelésében és az üzemeltetési költségek csökkentésében kulcsfontosságú szerepet játszik [1][6].

3 PREDIKTÍV KARBANTARTÁSI RENDSZEREK MŰKÖDÉSI ELVE

A prediktív karbantartási rendszerek alapvető célja a gyártóberendezések működési állapotának folyamatos monitorozása, valamint a potenciális meghibásodások előrejelzése az üzemeltetési adatok elemzésével. A modern ipari rendszerekben ez a megközelítés a különböző szenzorokkal gyűjtött adatok, az ipari kommunikációs rendszerek és az adatfeldolgozási módszerek integrációjára épül [7][8].

A prediktív karbantartási rendszerek általában több egymással összekapcsolt technológiai elemből állnak (2. ábra). Ezek az elemek biztosítják a berendezések állapotának mérését, az adatok továbbítását, az adatok elemzését és a karbantartási döntések támogatását.



2. ábra: Prediktív karbantartási rendszer architektúrája

3.1 Szenzorok és állapotmonitorozás

A prediktív karbantartási rendszerek alapját a különböző mérési rendszerek és szenzorok jelentik, amelyek a berendezések működési paramétereit folyamatosan rögzítik. A leggyakrabban alkalmazott mérési módszerek közé tartozik a rezgésdiagnosztika, a hőmérsékletmonitorozás, az elektromos áramfelvétel vizsgálata, valamint az akusztikus jelanalízis [3].

A rezgésanalízis különösen fontos szerepet játszik a forgó gépegységek, úgymint csapágyak vagy elektromos motorok állapotának vizsgálatában. A rezgési jelek elemzésével korai stádiumban felismerhetők a mechanikai hibák, például a csapágykopás vagy a kiegyensúlyozatlanság [4].

3.2 Adatgyűjtés és kommunikáció

A szenzorok által gyűjtött adatok ipari adatgyűjtő rendszereken keresztül kerülnek feldolgozásra. A modern gyártórendszerekben az adatgyűjtést gyakran PLC alapú rendszerek, ipari IoT (*Internet of Things*, dolgok internete) eszközök vagy speciális adatgyűjtő egységek végzik.

Az adatátvitel különböző ipari kommunikációs protokollok segítségével történik, amelyek biztosítják a gyártóberendezések és az informatikai rendszerek közötti adatkapcsolatot. Az ipari digitalizáció fejlődésével egyre elterjedtebbé váltak az olyan szabványos kommunikációs megoldások, mint az OPC UA vagy az MTConnect, amelyek lehetővé teszik a gyártóberendezések állapotadatainak egységes kezelését [9].

3.3 Adatfeldolgozás és állapotdiagnosztika

Az adatgyűjtési rendszerek által rögzített adatok feldolgozása kulcsfontosságú szerepet játszik a prediktív karbantartás működésében. Az adatfeldolgozás során különböző statisztikai és matematikai módszereket alkalmaznak a berendezések működésében bekövetkező eltérések azonosítására [7][11].

A modern rendszerekben egyre gyakrabban alkalmaznak gépi tanulási algoritmusokat, amelyek képesek felismerni a normál működési állapottól való eltéréseket. Az ilyen módszerek lehetővé teszik az anomáliák automatikus detektálását, valamint a berendezések várható meghibásodásának előrejelzését [8].

3.4 Karbantartási döntéstámogatás

A prediktív karbantartási rendszerek végső célja a karbantartási döntések támogatása. Az adatfeldolgozás eredményeként a rendszer képes riasztásokat generálni, ha a berendezések működésében olyan eltérés figyelhető meg, amely potenciális meghibásodásra utal.

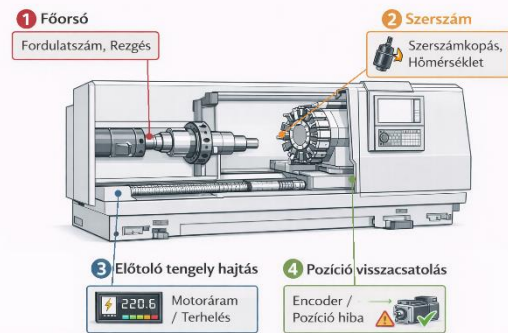
Az ilyen rendszerek segítségével a karbantartási beavatkozások tervezhetővé válnak, ami lehetővé teszi a karbantartási erőforrások hatékonyabb felhasználását és a nem tervezett gépleállások csökkentését. A prediktív karbantartás ezért a modern gyártórendszerekben a megbízható és hatékony üzemeltetés egyik kulcsfontosságú eszközévé vált [5][7].

4 PREDIKTÍV KARBANTARTÁS CNC GÉPEK ESETÉBEN

A CNC megmunkálóközpontok a modern gyártórendszerek kulcsfontosságú berendezései, amelyek nagy pontosságú és automatizált megmunkálási műveletek végrehajtására alkalmasak. A berendezések komplex mechanikai és vezérlési rendszereket tartalmaznak, ezért működésük megbízhatósága jelentős hatással van a gyártási folyamat hatékonyságára. A CNC gépek meghibásodása

gyakran jelentős termelési kiesést okozhat, ezért ezeknél a berendezéseknél különösen fontos az állapot monitorozáson alapuló karbantartási stratégiák alkalmazása [3], [4].

A prediktív karbantartási rendszerek lehetővé teszik a CNC gépek kritikus komponenseinek folyamatos felügyeletét (3. ábra). Az állapotmonitorozás során különböző diagnosztikai módszereket alkalmaznak a mechanikai és elektromos rendszerek működésének vizsgálatára.



3. ábra: CNC megmunkálóközpont állapotmonitorozási pontjai

4.1 Szerszámkopás monitorozása

A szerszámkopás a CNC megmunkálási folyamat egyik legfontosabb befolyásoló tényezője, amely közvetlen hatással van a megmunkált felület minőségére és a gyártási pontosságra. A túlzott szerszámkopás nemcsak a megmunkálási minőséget rontja, hanem növelheti a szerszám-törés kockázatát is.

A szerszám állapotának vizsgálata több különböző módszerrel történhet. A gyakorlatban gyakran alkalmazzák a vágóerő elemzését, a rezgésdiagnosztikát vagy az akusztikus emissziós jelek vizsgálatát. Az ilyen módszerek segítségével a szerszám állapotában bekövetkező változások kezdeti állapotukban felismerhetők, ami lehetővé teszi a szerszámcsere optimális időpontjának meghatározását [3].

4.2 Főorsó-diagnosztika

A főorsó a CNC gépek egyik legkritikusabb mechanikai egysége, amely a megmunkálási folyamat során nagy fordulatszámra és jelentős mechanikai terhelés mellett működik. A főorsó csapágyzásának meghibásodása komoly gépleállást és költséges javítási műveleteket eredményezhet.

A főorsó állapotának vizsgálatára gyakran alkalmaznak rezgésdiagnosztikai módszereket, amelyek lehetővé teszik a csapágykopás vagy a kiegyensúlyozatlanság korai felismerését. A rezgési spektrum elemzése segítségével a különböző mechanikai hibák azonosíthatók még a tényleges meghibásodás bekövetkezése előtt [4].

4.3 Tengelyhajtások és szervorendszerek felügyelete

A CNC gépek tengelymozgásait szervomotorok és hajtásrendszerek biztosítják, amelyek pontos pozicionálást tesznek lehetővé a megmunkálási folyamat során. A tengelyhajtások állapotának romlása befolyásolhatja a gép pozicionálási pontosságát és a megmunkálási minőséget.

A szervomotorok állapotának vizsgálatára gyakran alkalmazzák az elektromos áramfelvétel elemzését, amely lehetővé teszi a motor terhelésének és működési állapotának nyomon követését. Az ilyen jellegű diagnosztikai módszerek segítségével a mechanikai problémák – mint a golyósorsók kopása vagy a lineáris vezetékek hibái – szintén felismerhetők [3].

5 PREDIKTÍV KARBANTARTÁS AZ IPAR 4.0 RENDSZEREKBE

Az Ipar 4.0 koncepció a gyártórendszerek digitalizációjára, a fizikai és információs rendszerek integrációjára, valamint az adatvezérelt döntéshozatalra épül. A modern gyártási környezetben a berendezések működési adatai folyamatosan gyűjthetők és elemezhetők, ami lehetővé teszi a gyártási folyamatok optimalizálását és a berendezések állapotának hatékonyabb felügyeletét [1][9].

A prediktív karbantartás szorosan kapcsolódik az Ipar 4.0 technológiai infrastruktúrájához, mivel működésének alapja a szenzoradatok gyűjtése, az ipari kommunikációs rendszerek alkalmazása és az adatok feldolgozása (4. ábra). Az ilyen rendszerek lehetővé teszik a gyártóberendezések állapotának valós idejű monitorozását és a karbantartási beavatkozások optimalizálását.



4. ábra: Prediktív karbantartási rendszer architektúrája Ipar 4.0 környezetben

5.1 Ipari IoT rendszerek

Az ipari IoT rendszerek a gyártóberendezések és az informatikai rendszerek közötti adatkapcsolatot biztosítják. Az IoT eszközök segítségével a gépek működési paraméterei például rezgési adatok, hőmérséklet vagy energiafelhasználás folyamatosan rögzíthetők és továbbíthatók az adatfeldolgozó rendszerek felé.

Az IoT technológiák alkalmazása lehetővé teszi a gyártórendszerek decentralizált adatgyűjtését, amely a prediktív karbantartási rendszerek egyik alapvető feltétele [9].

5.2 Kiberfizikai rendszerek

Az Ipar 4.0 egyik meghatározó eleme a *cyber-physical systems* (CPS, kiberfizikai rendszerek) koncepciója, amely a fizikai gyártóberendezések és a digitális információs rendszerek integrációját jelenti. A CPS rendszerek lehetővé teszik a gyártóberendezések működésének digitális reprezentációját és valós idejű figyelését.

A prediktív karbantartási rendszerek a CPS infrastruktúrára támaszkodva képesek a berendezések működési állapotának folyamatos elemzésére és a lehetséges meghibásodások előrejelzésére [1].

5.3 Felhőalapú adatfeldolgozás

A modern gyártórendszerekben egyre gyakrabban alkalmaznak felhőalapú adatfeldolgozási platformokat a gyártási adatok tárolására és elemzésére. A felhőalapú rendszerek lehetővé teszik a nagymennyiségű adat feldolgozását és az összetett analitikai módszerek alkalmazását.

A felhőalapú adatfeldolgozás előnye, hogy a különböző gyártóberendezésekből származó adatok egy központi platformon elemezhetők, ami támogatja a prediktív karbantartási modellek fejlesztését és alkalmazását.

5.4 Digitális iker technológia

A digitális iker (*digital twin*) technológia a fizikai berendezések virtuális modelljének létrehozását jelenti, amely lehetővé teszi a berendezések működésének szimulációját és monitorozását. A digitális iker rendszerek segítségével a gyártóberendezések működési állapota valós időben nyomon követhető, és különböző szimulációs módszerekkel előre jelezhetők a potenciális működési problémák.

A prediktív karbantartás és a digitális iker technológia kombinációja új lehetőségeket teremt a gyártórendszerek optimalizálásában és a karbantartási folyamatok fejlesztésében [9].

5.5 Mesterséges intelligenciaalapú döntéstámogató rendszerek

Az Ipar 4.0 környezetben működő prediktív karbantartási rendszerek hatékonyságát jelentősen növeli a mesterséges intelligencia (MI) alapú analitikai módszerek alkalmazása [9][12]. Az MI algoritmusok képesek a szenzorhálózatokból származó nagymennyiségű működési adat feldolgozására, valamint a berendezések állapotában bekövetkező változások és rendellenességek azonosítására. Az ilyen modellek támogatják a karbantartási döntéshozatalt, mivel képesek előre jelezni a potenciális meghibásodások bekövetkezésének valószínűségét és időpontját [9].

A prediktív karbantartásban alkalmazott gépi tanulási módszerek közé tartoznak a különböző osztályozási és regressziós algoritmusok, például a döntési fák, a *Support Vector Machine* (SVM) modellek vagy a neurális hálóok. Ezek az algoritmusok a korábbi működési és meghibásodási adatok alapján képesek mintázatokat felismerni és a berendezések jövőbeli állapotát becsülni. A fejlettebb rendszerekben mélytanulási módszereket is alkalmaznak, amelyek különösen hatékonyak nagy

mennyiségű idősor jellegű szenzoradat feldolgozásában [10].

Az MI alapú analitikai modellek eredményei gyakran döntéstámogató rendszerek formájában jelennek meg, amelyek segítik a karbantartási szakembereket a beavatkozások optimális időpontjának meghatározásában, valamint a karbantartási prioritások kijelölésében. Az ilyen rendszerek hozzájárulnak a gyártóberendezések megbízhatóságának növeléséhez, a váratlan leállások csökkentéséhez és a karbantartási költségek optimalizálásához [9][12].

6 A PREDIKTÍV KARBANTARTÁS ELŐNYEI ÉS KIHÍVÁSAI

A prediktív karbantartási rendszerek alkalmazása jelentős előnyökkel járhat a modern gyártórendszerek üzemeltetésében. Az állapotmonitorozáson alapuló karbantartási stratégiák lehetővé teszik a berendezések működésének folyamatos felügyeletét, valamint a meghibásodások korai felismerését. Ennek eredményeként a karbantartási tevékenységek tervezhetőbbé válnak, ami hozzájárul a gyártási folyamatok stabilitásának növeléséhez és a nem tervezett gépleállások csökkentéséhez [5][7].

A prediktív karbantartás egyik legfontosabb előnye a gyártóberendezések rendelkezésre állásának növelése. A berendezések állapotának folyamatos monitorozása lehetővé teszi a hibák korai azonosítását, így a karbantartási beavatkozások még a meghibásodás bekövetkezése előtt elvégezhetők. Ez jelentősen csökkentheti a termelési kiesések mértékét és javíthatja a gyártórendszerek megbízhatóságát [8].

A prediktív karbantartás alkalmazása gazdasági szempontból is kedvező lehet, mivel lehetővé teszi a karbantartási erőforrások hatékonyabb felhasználását. A karbantartási műveletek a berendezések tényleges műszaki állapotához igazíthatók, így elkerülhetők a szükségtelen alkatrészcsere és karbantartási beavatkozások [3].

Ugyanakkor a prediktív karbantartási rendszerek bevezetése számos technikai és szervezeti kihívással is járhat. Az egyik legjelentősebb kihívás a szükséges infrastruktúra kialakítása, amely magában foglalja a szenzorok telepítését, az adatgyűjtési rendszerek kiépítését és az adatfeldolgozó platformok integrációját. Ezek a beruházások jelentős kezdeti költségeket igényelhetnek, különösen a kisebb vállalatok esetében.

További kihívást jelent az adatok kezelése és elemzése. A prediktív karbantartási rendszerek működése nagymennyiségű üzemeltetési adat feldolgozását igényli, amely megfelelő informatikai infrastruktúrát és szakértői kompetenciát feltételez [9].

A technológiai és szervezeti kihívások ellenére a prediktív karbantartási rendszerek alkalmazása egyre nagyobb szerepet kap a modern ipari környezetben, mivel hozzájárulhat a gyártási folyamatok hatékonyságának növeléséhez és a berendezések üzemeltetési költségeinek csökkentéséhez.

7 KÖVETKEZTETÉSEK

A modern ipari gyártórendszerek működésében egyre nagyobb jelentőséget kapnak az adatvezérelt technológiák és az intelligens gyártási megoldások. Az Ipar 4.0 koncepció megjelenésével a gyártóberendezések működéséről gyűjtött adatok hatékonyan felhasználhatók a

termelési folyamatok optimalizálására és a berendezések üzemeltetésének fejlesztésére.

A tanulmány bemutatta a prediktív karbantartási rendszerek működési elvét, valamint azok alkalmazási lehetőségeit CNC megmunkálóközpontok esetében. Az állapotmonitorozási technológiák, mint például a rezgésdiagnosztika, a hőmérsékletmonitorozás vagy az elektromos paraméterek vizsgálata, melyek lehetővé teszik a berendezések működési állapotának folyamatos nyomon követését és a potenciális meghibásodások korai felismerését.

A vizsgálat rámutat arra, hogy a prediktív karbantartási rendszerek alkalmazása jelentősen hozzájárulhat a gyártási folyamatok megbízhatóságának növeléséhez, a nem tervezett gépleállások csökkentéséhez és a karbantartási tevékenységek hatékonyabb tervezéséhez. A szenzorokkal támogatott adatgyűjtési rendszerek és az adatfeldolgozási módszerek fejlődése lehetővé teszi a berendezések állapotának pontosabb meghatározását, ami fontos szerepet játszik a modern gyártórendszerek üzemeltetésében.

A jövőben várhatóan egyre nagyobb szerepet kapnak a fejlett adatfeldolgozási módszerek és a mesterséges intelligencián alapuló diagnosztikai rendszerek, amelyek tovább növelhetik a prediktív karbantartási megoldások hatékonyságát. Az ilyen technológiák alkalmazása különösen fontos lehet a komplex gyártórendszerek, mint a CNC megmunkálóközpontok megbízható és gazdaságos üzemeltetésében.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] L. Monostori, "Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges", *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 9–13, 2014.
- [2] H. Kagermann, W. Wahlster, and J. Helbig, *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*, Frankfurt: acatech, 2013.
- [3] A. Heng, S. Zhang, A. Tan, and J. Mathew, "Rotating machinery prognostics: State of the art", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, pp. 724–739, 2009.
- [4] R. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, pp. 1483–1510, 2006.
- [5] Y. Peng, M. Dong, and M. Zuo, "Current status of machine prognostics in condition-based maintenance", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 50, pp. 297–313, 2010.
- [6] M. Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*, Butterworth-Heinemann, 2002.
- [7] J. Lee, B. Bagheri, and H. Kao, "A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems", *Manufacturing Letters*, vol. 3, pp. 18–23, 2015.
- [8] T. Wuest, D. Weimer, C. Irgens, and K. Thoben, "Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications", *Production & Manufacturing Research*, vol. 4, 2016.
- [9] A. Carvalho et al., "A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 137, 2019.
- [10] S. Zhang, Y. Yang and Y. Wang, "Machine learning and deep learning methods for predictive maintenance: A review", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 181213–181230, 2019.
- [11] J. Vachtsevanos, *Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems*, Wiley, 2006.
- [12] J. Lee, H. Davari, J. Singh, and V. Pandhare, "Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems", *Manufacturing Letters*, vol. 18, pp. 20–23, 2018.