



ÜTEMEZÉSI MÓDSZER A TECHNOLÓGIAI FOLYAMATTERVEZÉS ÉS A GYÁRTÁSIRÁNYÍTÁS INTEGRÁCIÓJÁNAK TÁMOGATÁSÁRA

KULCSÁR GYULA

Miskolci Egyetem,
Informatikai Intézet

gyula.kulcsar@uni-miskolc.hu

KULCSÁRNÉ FORRAI MÓNICA

Miskolci Egyetem,
Informatikai Intézet

monika.kulcsarne@uni-miskolc.hu

Absztrakt. A termelésinformatika folyamatosan nagy kihívásokkal néz szembe az intelligens gyártást támogató fejlesztések terén. Idetartoznak a gyártásirányítási és a technológiai folyamat tervezési feladatok integrációs problémái is. A cikk bemutatja a termelési finomprogramozás kiterjesztett koncepcióját, amely előnyösen alkalmazható a rugalmas gyártásirányítás és a robusztus technológiai folyamat tervezés integrálásának támogatására. Egy illusztratív példán keresztül kerül bemutatásra az integrációt támogató ütemezési módszer.

Kulcsszavak: technológiai folyamat tervezés, gyártásirányítás, ütemezés, szimuláció, többcélú optimalizálás, kereső algoritmus.

1. Bevezetés

A termelési folyamatok irányításában a kiberfizikai rendszer (Cyber-Physical Systems, CPS) paradigma egyre fontosabb szerepet játszik. A CPS-paradigma szerint a korszerű termelési rendszereket és folyamatokat a fizikai anyagfeldolgozás és az információfeldolgozás mély, közvetlen és valós idejű integrálása jellemzi. Ennek fő oka az egyre átfogóbb automatizálás, valamint az összes mérnöki és irányítási funkciót átfogó informatikai integráció.

A diszkrét gyártás területén a hatékony és jövedelmező termelés mellett nagy jelentőséggel bír a vevői igények kiszolgálási színvonala [1]. Az agilis gyártási stratégia alkalmazása azokra a gyártókra jellemző, akik gyorsan akarnak reagálni az ügyfelek igényeire és a piaci változásokra. Az agilis gyártóknak figyelembe kell venniük, hogy

a vállalati teljesítmény mérésének legfontosabb eleme a magas szintű szállítókészség, ami a vevői megrendelések megbízható és pontos teljesítését jelenti [2].

Az összetett és bonyolult folyamatok hatékony irányításához a gyakorlatban főként hierarchikus architektúrákat és visszacsatolós szabályzókat alkalmaznak. A visszacsatolás meghatározott mennyiségek fizikai folyamatokon alapuló mérését teszi szükségessé a termelés végrehajtásának szintjén. Ezen túlmenően a különböző irányítási szinteken általánosan származtatott (pl.: aggregált, átlagolt, kumulált stb.) mutatókra van szükség a termelési folyamatok absztrakt „teljesítményének” számszerűsítéséhez [3]. Az ipari tapasztalatok azt mutatják, hogy ezek a kulcsteljesítménymutatók (Key Performance Indicator, KPI) egyre jelentősebb szerepet játszanak a stabil és sikeres termelés biztosításában, valamint a termelés hatékonyságának javításában mind helyi (műhelyi), mind globális (vállalati) szinten [1], [4].

Az ütemezési modellek szintén nagymértékben befolyásolják a termelési folyamatok rugalmasságát, hatékonyságát és költségét. A technológiai folyamattervek készítése és a termelési ütemtervek generálása erősen összefonódnak. A folyamattervek alapvetően korlátokat és alternatívákat szolgáltatnak az ütemező számára, míg a termelésirányítás időről időre változó igényeket fogalmaz meg a technológiai folyamattervezés felé. A termelési ütemtervek elkészítésének módja és annak minősége alapvetően meghatározza a termelés teljesítménymutatóinak alakulását.

2. A technológiai folyamattervezés és a gyártásirányítás integrációs lehetőségei

A technológiai folyamattervezési (Computer Aided Process Planning, CAPP) és gyártásirányítási (Manufacturing Execution System, MES) funkciók erősen befolyásolják a gyártás hatékonyságát, gazdaságosságát, az erőforrások kihasználását és a termékek kiszállítási idejét. Sok kutató foglalkozik a folyamattervezési és ütemezési (Integrated Process Planning and Scheduling, IPPS) funkciók integrálásának szükségességével a rugalmasság elősegítése és a gyártási folyamatok javítása érdekében. Különböző integrációs megközelítési javaslatokat fogalmaztak meg a folyamattervezési és ütemezési komponensek közötti információcsere fokozására és a termelés globális optimalizálásának elérésére [5], [6].

A következő alfejezetekben néhány alapvető integrációs megközelítést mutatunk be azok előnyeivel és hátrányaival együtt. A szakirodalomban publikált főbb kategóriák a következők: (1) nemlineáris megközelítés, (2) zárt ciklusú megközelítés, (3) elosztott megközelítés és (4) egyéb megközelítések, ahol az utolsó kategória a különböző speciális és kombinált megközelítések heterogén gyűjtőcsoportja.

2.1. Nemlineáris megközelítés

A nemlineáris megközelítésben (Non-Linear Approach, NLA) a lehetséges folyamattervek többféle, rugalmas vagy alternatív formában készülnek minden egyes alkatrészhez és minden termékhez a gyártás/összeszerelés előtt. A CAPP figyelembe

veszi a gyártórendszer működését, az elvégzendő műveletek sorrendi kötöttségeit és a végrehajtás rugalmasságát. A nemlineáris folyamattervek (NLPP-k) generálása azon alapul, hogy egy adott műveletet általában különböző gépeken lehet végrehajtani, a szükséges gyártási műveletek sorrendje felcserélhető, valamint ugyanazon objektum sokszor különböző műveletekkel is előállítható. Általában az NLA-megközelítés irányított egyirányú információáramlást használ a folyamattervezéstől a termelés ütemezéséig. Ezáltal az ütemezés eredeti problématerét kibővíti az NLPP-k. A probléma megoldására számos kutató dolgozott ki és javasolt különböző döntéshozatali megközelítéseket. Néhány példa ezek közül a következő:

- mesterséges neurális hálózatra és szimulációra alapozott módszer [7],
- szimuláción alapuló genetikusan algoritmus [8],
- fejlett prediktív ütemezési módszerre alapozott módszer [9],
- ágensalapú hangyatelep-optimalizáló algoritmusra alapozott módszer [10],
- aktív tanulás genetikusan algoritmusra alapozott módszer [11],
- korlátozásprogramozási eljárásra alapozott módszer [123].

2.2. Zárt ciklusú megközelítés

A zárt ciklusú megközelítésben (Closed-Loop Approach, CLA) a folyamattervezés megkísérli figyelembe venni a dinamikus erőforrás-elérhetőséget és a műhelyállapot-információkat. A CLA-t valós idejű vagy dinamikus folyamattervezésnek is nevezik, mivel a folyamattervek a gyártásütemezési vagy gyártásirányítási modulok dinamikus visszacsatolása alapján készülnek.

Az egyik CLA-kategória a kétfázisú (vagy réteges) integrációs architektúra. Jellemzően statikus (offline) tervezési és dinamikus (online) tervezési fázisokat különböztetnek meg. Az első fázis alternatív makroszintű terveket és előrejelző ütemezéseket generál. A második fázisban a rendszer figyelembe veszi a termelési feltételek változásait (az erőforrások tényleges kihasználtságát és rendelkezésre állását), és módosítja vagy újragenerálja az alternatív folyamatterveket és üzemi ütemterveket [13] [14].

Különböző javasolt konkrét architektúrák is találhatók a szakirodalomban, amelyek visszacsatolt szabályzóköörök segítségével integrálják a folyamattervezési és ütemezési funkciókat. A zárt ciklusú megoldás termelési korlátokat és célfüggvényeket tartalmaz, amelyek az online ütemező modultól az offline folyamattervező modulhoz érkeznek visszajelzésként, hogy megkönnyítsék a meglévő megoldások tervezését vagy újratervezését.

Ügynök-alapú (Agent-Based) és tárgyalási protokollon alapuló holonikus megközelítéseket is kidolgoztak az IPPS-hez [15].

2.3. Elosztott megközelítés

Az elosztott megközelítés (Distributed Approach, DA) csökkenti a CLA összetettségét azáltal, hogy az integrált folyamattervezési és termelésütemezési döntéseket több döntési fázisra osztja fel.

A folyamattervezési és ütemezési feladatokat gyakran két szakaszra osztják: az előtervezésre és a végső tervezésre. Az előtervezési szakasz a gyártási munkák (job) terméktípusait elemzi. Felismeri a termékjellemzőket és azok összefüggéseit, meghatározza a megfelelő gyártási folyamatokat és megbecsüli a szükséges gépi képességeket. Az utolsó tervezési szakasz a műveleteket hozzárendeli a rendelkezésre álló erőforrásokhoz, és meghatározza a munkavégzés konkrét jellemzőit. A folyamattervezés és az ütemezés közötti kölcsönhatások mindkét fázisban érvényesülnek.

A szakirodalomban vannak olyan megközelítések is, amelyekben az integrált folyamattervezési és ütemezési feladatokat három szintre vagy fázisra osztják. Például Huang et al. a [17] publikációban az integrációs problémát a következő három fázisra bontják:

- előtervezés,
- párosítási tervezés és
- végső tervezés.

Az előtervezés a termék műszaki gyártási elemzése a megmunkálási követelmények és korlátok azonosítására. Ezt a feladatot korai szakaszban hajtják végre, amint a terméktervezés elkészült. A párosítás tervezése a szükséges munkaműveleteket a rendelkezésre álló termelési erőforrások működési képességeivel egyeztet. Ez a módszer akkor kerül végrehajtásra, amikor a gyártási rendeltetést aktiválják. A végső tervezés elkészíti a termék részletes gyártási terveit a kiválasztott berendezéshez. Ez a tervezési fázis közvetlenül a gyártás megkezdése előtt hajtódik végre. További megközelítésekről ad jó áttekintést a [16] publikáció.

3. A CAPP-MES-integráció támogatása

A számítógépes integráció jelentős sikereket ért el a konstrukciós tervezés, a termék-élettartam-menedzsment, a technológiai folyamattervezés (CAD-PLM-CAPP), valamint a vállalatirányítás, ügyfélkapcsolat-menedzsment, beszállítói hálózat menedzsment, és a gyártási erőforrások tervezése (ERP-CRM-SCM-MRP) funkciók területén. A folyamatközeli (MES-) funkciók integrációjában azonban még mindig sok a megoldatlan probléma.

A számítógépes integráció nagyon hatékonynak bizonyul, mert növeli a technológiai folyamattervezés robusztusságát, és lehetővé teszi új megközelítések bevezetését a műveletek optimalizálására. Egy ilyen integráció megvalósítása a funkcionális komponensek algoritmusaira, szolgáltatásaira reagál, és új, magas követelményeket támaszt. Ilyen követelmények például a következők:

- összeszerelési komponensek alternatíváinak generálása;
- előgyártási tervalternatívák előállítása;
- alternatív új útvonalak létrehozása;
- rugalmas és robusztus műveletek tervezése és alkalmazása;
- többcélú megmunkálóközpontok és szerszámrendszerek használata;
- sorozatnagyságok dinamikus generálása a munkatervezésben;

- több célhoz egyidejűleg alkalmazkodni képes alternatív ütemtervek kidolgozása;
- adaptív átütemezési funkciók használata;
- folyamatfigyelésen és KPI-ken alapuló valós idejű döntéstámogatás.

Ez a cikk a CAPP-MES-integráció egyetlen aspektusával foglalkozik, nevezetesen egy kiterjesztett műhelyszintű ütemezési modell bemutatásával, amely támogatja a technológiai folyamatterv-alternatívák felhasználását.

4. Egy kiterjesztett ütemezési modell CAPP-MES-integráció támogatására

4.1. Technológiai alternatívák kezelését támogató ütemezési modell

A MES-szintű műhelyütemezéskor kiemelt fontosságú céllá válik a megfelelő készletszint és a folyamatban lévő munkák számának (WIP) minimalizálása, továbbá az erőforrások harmonikus kihasználása (stabil folyamat és kiegyensúlyozott terhelés) és a magas fokú szállítókészség (határidők betartásának) biztosítása. Kutatómunkánk során egy olyan ütemezési rendszert fejlesztettünk ki, amely megnövelt képességekkel támogatja a CAPP-MES-integrációt. Ezt az integrált, szimuláción alapuló finomprogramozási megközelítést a cikk ezen része foglalja össze.

A zökkenőmentes működés szempontjából alapvetően fontos, hogy egy adott gyártási rendelés minden adata (azonosító, prioritás, terméktípus, termékmennyiség, határidő stb.) elérhető és letölthető legyen az ERP-rendszer adatbázisából. Másrészt a termékekre, technológiára és erőforrásokra vonatkozó összes információ (anyagjegyzékek, alternatív technológiai folyamattervek, beállítási idők, megmunkálási és műveletvégzési intenzitások stb.) elérhetők legyenek a MES adatbázisában vagy a vállalat adatközpontjában.

Az általunk javasolt finomprogramozási megközelítés egyetlen rétegben egyesíti a modellépítést, a döntéshozatalt, a szimulációt és az értékelési folyamatokat. Egy visszacsatolási hurok kapcsolja zárt ciklusba a funkcionális komponenseket, amelynek célja az ütemezési eredmény javítása. Ugyanakkor az interaktív emberi beavatkozás lehetősége szintén biztosítva van. A szakértői tudás bevihető a rendszerbe a paraméterek és működési módok megadásával, valamint a kézi szerkesztési eszköztár szolgáltatásain keresztül az ütemtervek konzisztens változtatásával.

A lehetséges finomprogramok (részletes termelési ütemtervek) keresési terét determinisztikus adatmodellek és gyors végrehajtás-vezérelt szimuláció alapján vizsgáljuk, hogy közel optimálisan megvalósítható finomütemezéseket állítsunk elő. Ebben a megközelítésben nincs külön fázis elkülönítve az optimumközeli szűkebb tartomány kezelésére. Az erőforrások részletes korlátainak és képességeinek figyelembevételével, valamint az előre kidolgozott gyártástechnológiai alternatívák kihasználásával közel optimálisan megvalósítható ütemezések létrehozására helyezzük a hangsúlyt. A különböző bizonytalanságokra és előre nem látható eseményekre az újraütemezési funkció ad hatékony válaszokat.

Ezen túlmenően az integrált ütemező rendszerben az igények teljesítésének értékelési szempontjait is figyelembe vesszük a jelölt megoldások vizsgált halmazán. Ez azt jelenti, hogy a lehetséges technológiai alternatívák miatt a keresési tér jelentősen kibővül az alternatívák nélküli változathoz viszonyítva.

A javasolt integrált, szimulációalapú modell több termelési cél és követelmény egyidejű rugalmas alkalmazását támogatja. A kidolgozott megközelítés segít megoldani a MES-szintű műhelyütemezés összetett, döntéshozatali problémáját összességében, annak szétbontása nélkül. Ily módon az összes olyan kérdés, mint a folyamat- és művelettervek kiválasztása, sorozatképzés, hozzárendelés, sorrend és időzítés, egyszerre, sokkal rövidebb idő alatt megválaszolásra kerül. Sőt, a szimuláció könnyen vezethet több termelési teljesítményindex kiértékeléséhez, még a gyártás végrehajtása előtt. Ez szolgálhat időbeni korrekciókra vagy kompenzációkra MES-en vagy akár ERP-szinten, azonnali eredménnyel mind az általános, mind a specifikus termelési teljesítmény tekintetében.

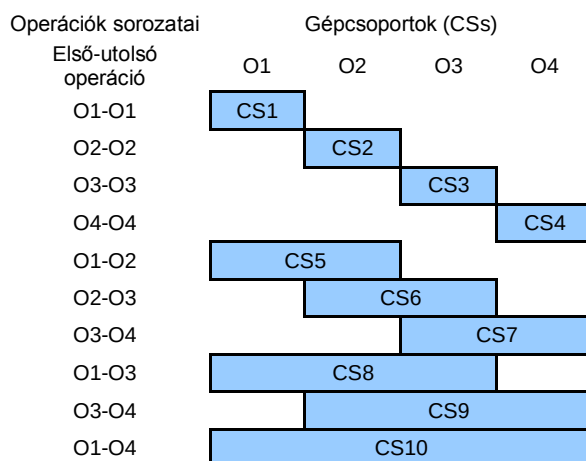
Az ütemező motor algoritmusa végrehajtás-vezérelt gyors szimuláción, általánosított összehasonlító (relációs) operátorokon és változó szomszédságú többféle módosító operátorral egyszerre működő keresési stratégián alapul. A megvalósított ütemező motor magja iteratív módon tárja fel a megvalósítható megoldási teret, és szomszédos lehetséges megoldásokat hoz létre a munkák (munkadarab-sorozatok) tényleges folyamat- és műveletterveinek, erőforrás-allokációinak, feladatsorrendjének és egyéb döntési változóinak módosításával. A jelölt ütemezésekre vonatkozó célfüggvényeket termelési szimulációval értékeljük, amely a valós környezetet reprezentálja kapacitás- és technológiai korlátokkal. A tételek, alkatrészek, egységek és feladatok passzív elemek a végrehajtás-vezérelt szimulációban, és aktív rendszererőforrások, például gépek, anyagmozgató eszközök, emberi munkások és műveletközi tárolók dolgozzák fel, mozgatják és tárolják őket. A termékegységek numerikus követése a gyártási lépések időadatait szolgáltatja. A szimulációs folyamat az előre meghatározott ütemezést finom ütemezéssé bővíti az időadatok kiszámításával és hozzárendelésével. A szimulációs algoritmus a kiválasztott végrehajtási tervek, a műveletek végrehajtására kijelölt gépek és a műveletek technológiai paraméterei alapján kiszámítja a várható megmunkálási és műveleti időket. Következésképpen a szimuláció az időzítési részprobléma megoldásával képes az eredeti keresési teret redukált térré alakítani. A megközelítés ezen része magában foglalja a valós ütemezési problémák függőségét. A megközelítés sikeres adaptálását a gyakorlatban nagymértékben befolyásolja a szimulációs algoritmus hatékonysága.

Az elkészített termelési finomprogram teljesítményelemzése elvégezhető az alkalmazott célfüggvények kiszámításával a modell alapegységeinek, munkáinak, gyártási rendelkezéseinek, gépeinek és egyéb objektumainak adatai alapján.

4.2. Egy illusztratív példa technológiai alternatívák kezelésére

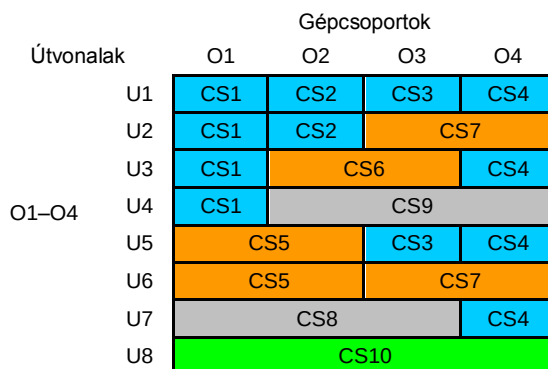
Ebben az alfejezetben bemutatunk egy esettanulmányt gyártástechnológiai alternatívákkal kibővített gyártásütemezési feladat demonstrálására. A vizsgált gyártórendszerben

4 műveletet kell elvégezni a végtermékek előállítására érdekében. A műveleteket gépcsoportokba szervezett gépek végzik el. A műveletek integrált megvalósítása is megengedett. Ez azt jelenti, hogy a közvetlenül egymás után következő technológiai műveleteket egyesítve is el lehet végezni alkalmas gépeken. Így összesen 10-féle géptípus különböztethető meg (1. ábra).



1. ábra. Integrált operációsorozatra alapozott géptípus-alternatívák

A géptípusok alapján gépcsoportok alakíthatók ki. A végtermékek előállításához a munkadarabokat a megfelelő gépcsoportokon kell végigáramoltatni. A bejárési útvonalak eltérőek lehetnek. A lehetséges technológiai útvonalak alternatíváit a 2. ábra szemlélteti. Például a négy szükséges művelet külön-külön is végre lehet hajtani négy gépcsoport érintésével (U1-útvonal) négy konkrét gépen. Ugyanakkor egyetlen gépcsoport felkeresésével is elvégezhető a feladat, ha az olyan gépekből áll, amely mind a négy műveletet integráltan el tudják végezni (U8-útvonal).



2. ábra. Gépcsoportokra alapozott technológiai útvonal-alternatívák

A modellünkben a megrendelésekhez egyedileg definiáljuk a számításba vehető gépcsoportokat és gépcsoportokon belül a használható konkrét gépeket. A gépcsoportokon belül a gépek paraméterei eltérőek lehetnek, így például a műveleti idők és az átállítási idők jelentősen eltérhetnek egymástól. Ezeket figyelembe véve, az ütemező döntési hatáskörébe helyeztük a konkrét útvonal kiválasztását. Ez azt jelenti, hogy minden gyártási sorozat esetében a klasszikus ütemezési döntéseken túlmenően a technológiai alternatívák közötti választással kapcsolatos döntéseket is meg kell hozni. Idetartozik az útvonaltípus kiválasztása és a kiválasztott útvonaltípus által érintett gépcsoportok gépei közötti választás is.

Az általunk fejlesztett ütemező rendszer a technológiai alternatívák közötti választást úgy kezeli, hogy az ütemezés megkezdése előtt elemzi a választási lehetőségeket és ezeket egy indexelt adatrendszerbe transzformálja. A keresőalgorithmus ezeket a megengedett lehetőségeket használja úgy, hogy a szomszédságképzésben a kiválasztást a módosító operátorok végzik el. Így az előállított megoldások mindig csak megvalósítható jelölteket jelentenek. Az előállított termelési finomprogram minden egyes döntési változónak pontosan definiálja az aktuális értékét. A szimuláció döntési kérdésekkel tehát nem foglalkozik, az csupán a végrehajtás numerikus szimulációját valósítja meg. A döntéseket egy önálló modul hozza meg és a szimuláció a teljes gyártási folyamat teljesítménymutatóinak számításához szükséges közbelső adatok számítását végzi.

A javasolt ütemezési módszer előnyei közé tartozik, hogy a technológiai alternatívák integrált alkalmazása jelentősen növeli a gyártásirányítás rugalmasságát. Az ütemezési célfüggvények prioritásainak hangolásával az ütemezés kiválóan szabályozható. A gyártási hatékonyság, a kihozatal és a költségek mértékét ki tudjuk egyensúlyozni olyan esetekben is, amelyekben az előírt teljesítési határidőkre csak költségesebb alternatívák alkalmazásával tudjuk legyártani a megrendelt termékeket a kívánt mennyiségben. A javasolt integrált ütemezési modell szoftveres megvalósítása rugalmasan használható a gyártásirányítás és a technológiai folyamattervezés integrációjának támogatására.

4.3. Egy prototípus ütemező motor implementálása és tesztelése

A bemutatott ütemezési modellt egy prototípus szoftverben valósítottuk meg. A javasolt finomprogramozási rendszert C++ programozási nyelven implementáltuk. Ez az ütemező motor megnövelt képességekkel támogatja a CAPP-MES-integrációt azáltal, hogy gyorsan és hatékonyan oldja meg a részletes ütemezési feladatokat.

A szükséges bemeneti input adatokat szöveges fájlokból olvassa be a rendszer, melyeket a kapcsolódó rendszerekből lehet exportálni. A megvalósított ütemező motor magában foglalja az integrált szimulációt és a célfüggvények számítását végző módszert is. Az ütemező motor grafikus felhasználói felülettel is rendelkezik, amelyet Windows XP/Vista/7/8/10/11 rendszereken teszteltük. Az ütemező szoftver átlagos PC-hardver-konfiguráción futtatható, nem igényel speciális erőforrást.

A bemutatott illusztratív példában szereplő 4 gyártási lépést és a kapcsolódó összes technológiai alternatívát használva tesztfeladat instanciákat generáltunk. Ezekben a

feladatokban 100-150 gépet, 300-500 megrendelést és 3000-5000 munkát szimuláltunk. A rendszerben figyelembe vettük a munkák konkrét indítási időkorlátját, az előírt határidőket, a gépek munkasorrendfüggő átállítási időadatait, a gépek konkrét műveletvégző képességeit, az erőforrások rendelkezésreállási időintervallumait, a gyártási sorozatnagyságok előírt minimális nagyságát. A klasszikus ütemezési feladatok jellemzőin túlmenően terméktípusokat vezettünk be, amelyekhez beállítottunk változó technológiai alternatívákat is.

A vázolt nagy méretű és összetett ütemezési feladatok megoldása során azt tapasztaltuk, hogy átlagos hardver/szoftver futtató környezetben (pl. Intel Core i3 CPU, 8 MB RAM, Windows 11 OS) az ütemező motor 1-2 perc alatt képes volt megoldani az integrált CAPP-MES-ütemezési problémákat. Ez a futási teljesítmény alkalmassá teszi a rendszert a gyakorlati műhelyszintű igények kielégítésére műszak, nap vagy nagyobb ütemezési időhorizontok esetén. A prototípus-implementáció igazolta a javasolt modell hatékonyságát.

5. Összefoglalás és következtetések

Ebben a cikkben összefoglaltuk a technológiai folyamattervezés és a gyártásirányítás integrációjának megközelítési lehetőségeit. Illusztratív példaként bemutattunk egy rugalmas diszkrét gyártórendszert, amelyben az alternatív technológiai útvonalak, gépcsoportok és konkrét gépek közötti választás kulcsszerepet játszik a műhelyszintű gyártásütemezésben.

A vázolt ütemezési modell végrehajtás-szimulációra alapozott problémater-transzformációval és többcélú keresési algoritmussal hatékonyan kezeli a technológiai alternatívákat. A javasolt koncepció és módszer hozzájárul a CPS-paradigma gyakorlati megvalósításához azáltal, hogy támogatja a CAPP-MES-funkciók NLA-alapú integrálását a diszkrét technológiai megmunkálásokon alapuló alkatrészgyártás széles területén.

Irodalomjegyzék

- [1] Askin, R. G., Standridge, C. R. (1993). *Modeling and Analysis of Manufacturing Systems*. J. Wiley Inc., New York.
- [2] Lee, H., Kim, S. (2001). Integration of process planning and scheduling using simulation based genetic algorithms. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18, pp. 586–590. <https://doi.org/10.1007/s001700170035>
- [3] Tóth, T., Kulcsár, Gy., Erdélyi, F., Kulcsárné, F. M., Bikfalvi, P. (2014). The role of CAPP-MES integration in the cyber-physical production systems paradigm. *Proceedings of the Tenth International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering*, pp. 1381–1392.
- [4] Kulcsárné, F. M. (2017). *Kiterjesztett modellek és módszerek erőforrás-korlátos termelésütemezési feladatok megoldására*. Doktori (PhD-) értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc. <https://doi.org/10.14750/ME.2018.006>
- [5] Tan, W., Khoshnevis, B. (2000). Integration of process planning and scheduling – a review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11, pp. 51–63.

-
- [6] Li, X., Gao, L., Zhang, C., Shao, X. (2010). A review on integrated process planning and scheduling. *International Journal of Manufacturing Research*, 5 (2), pp. 161–180. <https://doi.org/10.1504/IJMR.2010.031630>
- [7] Joo, J., Park, S., Cho, H. (2001). Adaptive and dynamic process planning using neural networks. *International Journal of Production Research*, 39 (13), pp. 2923–2946. <https://doi.org/10.1080/00207540110049034>
- [8] Lee, H., Kim, S. (2001). Integration of process planning and scheduling using simulation based genetic algorithms. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18, pp. 586–590. <https://doi.org/10.1007/s001700170035>
- [9] Rajkumar, M., Asokan, P., Page, T., Arunachalam, S. (2010). A GRASP algorithm for the integration of process planning and scheduling in a flexible job-shop. *International Journal of Manufacturing Research*, 5 (2), pp. 230–251. <https://doi.org/10.1504/IJMR.2010.031633>
- [10] Leung, C. W., Wong, T. N., Mak, K. L., Fung, R. Y. K. (2010). Integrated process planning and scheduling by an agent-based ant colony optimization. *Computers and Industrial Engineering*, 59 (1), pp. 166–180. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.09.003>
- [11] Li, X., Gao, L., Shao, X. (2012). An active learning genetic algorithm for integrated process planning and scheduling. *Expert Systems with Applications*, 39 (8), pp. 6683–6691. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.11.074>
- [12] Zhang, L., Wong, T. N. (2012). Solving integrated process planning and scheduling problem with constraint programming. *Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference 2012*, pp. 1525–1532.
- [13] Mamalis, A. G., Malagardis, I., Kanbouris, K. (1996). Online integration of process planning module with production scheduling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 12 (5), pp. 330–338. <https://doi.org/10.1007/BF01179808>
- [14] Usher, J., Fernandes, K. (1996). Dynamic process planning – the static phase. *Journal of Materials Processing Technology*, 61, pp. 53–58. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02465-X](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02465-X)
- [15] Zhao, F., Hong, Y., Yua, D., Yang, Y., Zhanga, Q. (2010). A hybrid particle swarm optimisation algorithm and fuzzy logic for process planning and production scheduling integration in holonic manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23 (1), pp. 20–39. <https://doi.org/10.1080/09511920903207472>
- [16] Shen, W., Wang, L., Hao, Q. (2006). Agent-based distributed manufacturing process planning and scheduling: a state-of-the-art survey. *IEEE Transactions on Systems, Management and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 36 (4), pp. 563–577. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2006.874022>
- [17] Wang, L., Shen, W. (2003). DPP: an agent-based approach for distributed process planning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14 (5), pp. 429–439. <https://doi.org/10.1023/A:1025797124367>