



*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gyártástudomány és -technológia Tanszék*



*Magyar Tudományos Akadémia
Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézet*

Új módszerek termeléstervezési és -irányítási döntések támogatására

Ph.D. értekezés tézisei

Készítette:

Pfeiffer András
okl. közlekedésmérnök

Témavezető:

Dr. Monostori László

Budapest, 2007

1. Problémafelvetés, előzmények

1.1 Problémafelvetés, motiváció

Napjaink gyártórendszerei gyorsan változó, bizonytalansággal terhelt környezetben működnek, mindemellett számolnunk kell a gyártórendszerekben, a gyártási folyamatokban és a vállalatstruktúrában egyaránt jelentkező *növekvő komplexitással*. A gyakran hektikus piaci hatásokra, a külső és belső változásokra és zavarokra a vállalatoknak az adott probléma természetének megfelelő gyorsasággal, valós időben kell reagálniuk. Termelési rendszerek valósidejű irányításának az a célja, hogy a változó viszonyokhoz *adaptív* módon igazodva hangolja össze a rendszer *viselkedését*; úgy, hogy az költség, idő és minőség szempontjából hatékony módon tudjon megfelelni a piaci igényeknek.

Az adaptív viselkedés az *intelligens gyártórendszerek* (Intelligent Manufacturing Systems, IMS) megvalósításának is egyik kulcskérdése. Hatvány József megfogalmazásában [22] az intelligens gyártórendszereknek bizonyos korlátok között alkalmazni kell lenniük hiányos és pontatlan információk alapján ismeretlen, előre nem látható problémák megoldására is. A téma aktualitását és jelentőségét érzékelteti, hogy bár a manapság elterjedt termelésinformatikai szoftverrendszerek az információk tárolását és feldolgozását magas szinten képesek elvégezni, nem nyújtanak hatékony támogatást sem az optimális megoldások iránti igények kielégítésére, sem a gyorsan változó, bizonytalan környezeti viszonyok között is érvényes döntések meghozatalára.

A *Digitális Vállalat* (Digital Enterprise, DE) koncepció – mely megközelítés elősegíti a gyártórendszerekben fellépő változások és zavarok hatékony kezelését és menedzselését – megvalósításának igen hatékony eszközéül szolgál a komplex rendszerek tervezéséhez és analíziséhez mind szélesebb körben alkalmazott *szimuláció*. Napjainkra mind az iparban, mind a kutatásban igen nagy jelentőségűvé vált a fejlett szimulációs programcsomagok alkalmazása, így a komplex termelőrendszerekkel -hálózatokkal kapcsolatos kutatásokban is egyre nagyobb szerepet kap a szimulációval támogatott tervezés, elemzés és döntéstámogatás. A szimuláció, mint eszköz újszerű alkalmazása illeszkedik a *Digitális Vállalat Technológia* (Digital Enterprise Technology, DET) irányzathoz, melynek lényegét Maropoulos [20] a következőképpen fogalmazta meg: „*The collection of systems and methods for the digital modelling of the global product development and realisation process, in the context of lifecycle management.*”

A disszertációban olyan megoldásokkal foglalkozom, melyeknek lényege, hogy elősegítse a dinamikus, változásokkal terhelt termelői rendszerek kiértékelését szimulációs modellezés segítségével. A kidolgozott új típusú modellezési és alkalmazási technikák felhasználásával egyben lehetőség nyílik arra, hogy a kísérleti eredményeket a rendszer igen gyorsan, szinte valós időben rendelkezésre bocsássa, így módon elősegítve a „*valós idejű*” döntéstámogatást.

1.2 Nemzetközi előzmények

Bonyolult, nagyszámú sztochasztikus állapotváltozóval rendelkező, dinamikus struktúrák – mint például az előbb említett termelőrendszerek – viselkedésének reprezentálása analitikus modellekkel igen korlátozott, gyakran nem is lehetséges [19]. Szimulációs modell

használatával ezen állapotváltozók lehetséges állapotait és ezen állapotok bekövetkezésének feltételeit definiáljuk, ezáltal a számítógépes szimuláció hatékony megoldást nyújt sztochasztikus rendszerek költséghatékony, biztonságos vizsgálatára. Az elmúlt évtizedek folyamán több társaság jött létre a számítógépes szimuláció népszerűsítésére, alkalmazásának széleskörűvé tételére, új megoldások feltárására, valamint az oktatás elősegítésére (pl. McLeod Institute of Simulation Sciences, www.simulationscience.org).

Szimulációs megoldásokat is felhasználó munkák publikálásánál szinte kivétel nélkül idézik Law & Kelton „*Simulation modeling and Analysis*” c. kézikönyvét [14], mely kötet méltán tekinthető a téma egyik alapművének. Szerzői a termelőrendszerek területén alkalmazott szimuláció egyik fő irányaként a *működési módok kiértékelését* határozzák meg. Ilyen például az előre kialakított döntési szabályok, sorrendtervezési politikák, vagy tételnagyság-képzési eljárások elemzése, validálása szimuláció segítségével. Számos szerző alkalmazott szimulációval segített eljárásokat termelés-tervezési, még gyakrabban ütemezési stratégiák/politikák kiértékeléséhez ([5][6][7][9][10][11][12][13]). Ezen megoldások közös jellemzője, hogy kifejezetten a kísérletek érdekében létrehozott, ún. *egyedülálló* (stand-alone) szimulációs modellekkel dolgoznak, melyek nem alkalmasak a szűken vett kísérletek lebonyolításán kívül egyéb funkciókra.

A fentiekén túlmenően igen előremutató megoldást olvashatunk például az [1] és a [21] munkákban, ahol a szerzők a szimulációt az ütemező rendszerrel összekapcsolva alkalmazzák ütemtervek végrehajtásához és kiértékeléséhez, habár maga a modellépítés folyamata itt is korlátozza a szimuláció további felhasználást. Hasonló feladatok megoldására az utóbbi években vált kutatások tárgyává az ún. *komponens* alapú szimulációs modellépítés [18]. Az eljárás alapját a folyamattervezésben is már ismert módszer adja, mely szerint előre definiált *neutrális komponensek* felhasználásával egy adott logika szerint a szimulációs modell – részben – automatikusan épül fel.

A termelésütemezéssel kapcsolatos kutatások legnagyobb része hagyományosan az *off-line* ütemezéssel foglalkozik. Eszerint a rendelkezésre álló – statikus – adatok alapján valamely adott célfüggvényben meghatározott szempont vagy szempontok figyelembevételével és a szükséges korlátok betartásával készül az ütemterv. Ezzel szemben a valós, üzemszintű feladat-hozzárendelési (ütemezési) problémák többsége az állandóan változó környezet miatt az ún. *dinamikus* ütemezési problémák közé sorolható, melyek komplex, *on-line* megoldási technikák alkalmazását teszik szükségessé. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a rendszerbe folyamatosan érkeznek újabb ütemezendő feladatok, valamint az elkészült ütemterv végrehajtását számtalan zavaró tényező befolyásolja, például nem tervezett gépleállás, sürgős megrendelés, határidő módosítás, emberi erőforrás hiánya. Ezeknek a zavaró tényezőknek vagy *zavaroknak* a bekövetkezése véletlenszerű, nem tervezhető, így szinte biztos, hogy a tervezett és a végrehajtott ütemterv között eltérés alakul ki. Azt, hogy milyen mértékű eltérés esetén avatkozunk be és a beavatkozás során hogyan módosítjuk/változtatjuk az eredeti ütemtervet az alkalmazott technika és a környezet határozza meg. A beavatkozás folyamatát a szakirodalom *újraütemezésnek* nevezi.

Ipari esetekben a termelés-tervezési- és ütemezési probléma nagy komplexitású, rendkívül számításigényes feladat [3], ugyanakkor a döntési alternatívák felállítása, és a döntéstámogatás gyors válaszidőket, interaktivitást kíván [17]. Termelési ütemtervek

bizonytalanságokkal terhelt környezetben történő végrehajtásáról, az e területen eddig elért eredményekről igen értékes összefoglaló munkát készített Aytug et al. [4], míg Kempf et al. [15] cikkében az ütemtervek kiértékelésének kategorizálását és módszereit olvashatjuk.

Az újraütemezés stratégiájaként a prediktív-reaktív módszert és a dinamikus ütemterv-generálást különböztethetjük meg [2]. Az utóbbi módszernél nincs kész ütemterv, a feladatokat „dinamikusan” azok feltűnésekor terheljük a rendszerre. Ezzel szemben az előbbi módszer előre kiszámított ütemtervet feltételez, így az újraütemezés főbb lépései: a zavar mértékének meghatározása, ha a zavar mértéke beavatkozást igényel, akkor a legmegfelelőbb újraütemezési eljárás kiválasztása, végül a meglévő ütemterv frissítése (esetleg újraszámítása). Azt, hogy a – valós termelői környezetekben igen gyakran alkalmazott – prediktív-reaktív módszer esetén mikor ütemezzünk, az *újraütemezési politika* határozza meg, mely lehet: periodikus, eseményvezérelt vagy a kettő kombinációja (hibrid). Az újraütemezés módszere szerint kétféle csoportot határozhatunk meg: ütemterv generálás (globális beavatkozás), vagy ütemterv-javítás, azaz *átütemezés* (lokális beavatkozás).

Az újraütemezés során az egyébként ismert és alkalmazott hatékonysági mérőszámokon túl, mint például átfutási idő, maximális késés, számos kutató foglalkozott *stabilitási mérőszámok* bevezetésével. Eszerint, a termelési ütemterv (valamint az ütemtervre épülő ún. másodlagos ütemtervek) módosítása során nem elhanyagolható tényező, hogy a „rég” és „új” ütemtervek – közös feladatokat tartalmazó részei – gyakran teljesen különböznek egymástól, ami a végrehajtás során bizonyos esetekben jelentős költségnövekedést okozhat (anyagmozgatási és átállási költségek). A témával kapcsolatban a '90-es évek elején, a proaktív ütemezés keretén belül jelentek meg az első publikációk. Leon et al. [11] valamint Wu & Storer [7] bizonyították, hogy a – sztochasztikus – termelői rendszerről gyűjtött meghatározott adatok felhasználásával, a fellépő bizonytalanságokkal szemben *robustus* ütemterveket lehet létrehozni. Ezek, a hatékonysági mérőszámokat tekintve nem feltétlen rosszabbak a „hagyományos”, nem *robustus* ütemtervekhez képest, ellenben a fellépő zavarokat minimális beavatkozás mellett is jobban „kezelik”. Olyan esetekben, amikor a lehetséges zavarokkal kapcsolatban csak igen kevés és bizonytalan információ áll rendelkezésre, célszerű lehet a zavarra adott válasznál (*reaktív* módon) felhasználni az addig megszerzett információt, és az ütemtervet úgy igazítani a kialakult *újraütemezési szituációhoz*, hogy a beavatkozás azt a lehető legkisebb mértékben módosítsa. Ezáltal az ütemterv végrehajtása *stabil* marad. Az *ütemterv stabilitására* vonatkozó első munkák között [5] [7] és [8] cikkeket érdemes megemlíteni.

1.3 Hazai előzmények

Hazánk jelentős kutatási potenciállal rendelkezik az intelligens gyártórendszerek és a gyártórendszerek modellezése területén. A számos, ilyen irányú kutatással foglalkozó intézmény közül azt a hármat emelném ki, melyek munkájának megismerésére – közös kutatási munkák, oktatás révén – lehetőségem nyílt: a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), a Miskolci Egyetem (ME), valamint az MTA SZTAKI.

A BME korábbi *Gépgyártástechnológia Tanszéke* hosszú időre visszatekintő hagyományokkal rendelkezik termelési folyamatok modellezésében és adaptív

szabályozásában (Somló János, Horváth Mátyás). Lipovszki György a korábbi *Gépészeti Informatika Tanszéken (GPK)* logisztikai rendszerek modellezésére sikerrel alkalmazott hibrid (folytonos és diszkrét komponenseket felhasználó) szimulációs eljárásokat.

A ME *Szerszámgépek Tanszékén* (később az *Informatikai Intézetben*) jelentős kutatási és fejlesztési munkák folytak, felügyeleti és diagnosztikai rendszerek kifejlesztésére, gyártócellák felügyeleti koncepciójának kialakítására, valamint fuzzy technikák alkalmazására (Erdélyi Ferenc, Tóth Tibor). Jelenleg is aktív kutatás folyik például a valósidejű gyártásirányítási feladatok, változások és zavarok kezelése témakörben. Lengyel Attila (ME) flexibilis gyártórendszerek modellezésénél alkalmazta sikeresen a szimulációt.

A '90-es évektől kezdve, a SZTAKI-n belül, a *CIM laborban* gyártórendszerek tervezése és szimulációja témában Kovács György, Mezgár István és Kopácsi Sándor nevéhez fűződnek kiemelkedő eredmények. A mai *Mérnöki és Menedzsment Intelligencia Kutatólaborban* (EMI) termelői rendszerek szimulációs kiértékelési lehetőségeinek számos aspektusát vizsgálták. Kádár Botond diszkrét szimulációt alkalmazott ágensalapú termelésirányítási rendszerek kiértékelési környezeteként, melyben elosztott intelligenciájú módszerekkel vizsgálta a változások és zavarok kezelésének lehetőségeit. Zudor Angyalka hasonló területen, szintén ágensalapú rendszerekre, de a beszállítói láncok modellezésére és irányítására javasolt szimulációs struktúrát. A termelés tervezés és ütemezés területén Márkus András, Váncza József, Kis Tamás, Kovács András, Csáji Balázs eredményei – nemzetközi szinten is – igen jelentősek.

A számítógépes szimuláció oktatása az utóbbi években számos hazai felsőoktatási intézmény tananyagába került be, elősegítve ezzel a terület ismertebbé tételét. A BME több tanszékén folyik ilyen irányú képzés, példaként említhető a *Gépészeti Informatika Tanszéken* a LabView folytonos szimulációs eszköz, vagy a TaylorED diszkrét szimulációs rendszer. Az *Információ- és Tudásmenedzsment Tanszéken (GTK)* a Cassandra Petri-hálón alapuló szimulációs rendszert alkalmazzák az oktatásban, döntés-előkészítés és gazdasági rendszerek modellezésénél. A *Közlekedésmérnöki karon (KSK)* az *Építőgépek, Anyagmozgatógépek és Üzemi Logisztika Tanszéken* az MTA SZTAKI-val együttműködésben az eM-Plant, a *Közlekedés Üzemi Tanszéken* a TaylorED és a kevésbé korszerű Witness rendszerek képzése biztosított. Érdemes megemlíteni, hogy Magyarországon a ME volt az egyik első intézmény, ahol rendelkeztek az akkori Simple++ (ma eM-Plant) szimulációs eszközzel.

2. A kutatás célkitűzései és módszertana

2.1 A kutatás célkitűzései

Kutatómunkám fő célkitűzése a diszkrét eseményorientált szimuláció alkalmazhatóságának kiterjesztése volt olyan területeken, mint a termelés tervezési- és ütemezési döntések támogatása, vagy a termelési (műhelyszintű) ütemtervek kiértékelése.

Célul tűztem ki egy olyan *modell* megalkotását, melyben a szimuláció az ütemezővel közösen, annak részeként segíti az elkészült ütemtervek többszemponú kiértékelését (pl.: *megvalósíthatóság, robusztusság, érzékenység*) dinamikus, változásokkal terhelt környezetben, még az ütemterv valós végrehajtása előtt. Ehhez, komplex

gyártórendszerekben új megoldásként, a termelői rendszereket leíró adatbázis-adatok és az előre definiált modellkomponensek segítségével előállított – ún. *komponens alapú* – *szimulációs modellépítési* módszerek kidolgozását és alkalmazását javasoltam.

Munkám során a szimulációt termelésirányító rendszerek tesztelési és validálási környezeteként is szándékoztam használni. A moduláris, elosztott struktúra felépítése során felmerül az igény, hogy a szimuláció csak bizonyos szintig – a vezérlő algoritmusok nélkül – modellezze a valós vagy leendő környezetet (*emuláció*). Ekkor az előbb említett vezérlő és irányító egység (irányító modul) csak kapcsolódik a szimulációs modellhez, de annak nem része. Ezzel a módszerrel olyan *moduláris egységek* hozhatóak létre, amelyek – megfelelő technikai háttér mellett – könnyen összekapcsolhatók más, hasonló rendeltetésű modulokkal, lehetővé téve a gyorsabb fejlesztést és a szimuláció szélesebb körű alkalmazhatóságát.

Fontosnak tartottam a termelési rendszerekben bekövetkezett változások és zavarok kezelésével kapcsolatos problémakör elemzését, illetve olyan változás- és zavar kezelő modellek, módszerek és eszközök kifejlesztését, amelyek hatékony támogatást nyújtanak az *operatív gyártáskorrekcióhoz*, a zavarok megelőzéséhez és megszüntetéséhez. Célkitűzéseim között ezért az *aktív zavarkezelési eljárások* vizsgálatát és fejlesztését is szem előtt tartottam. Ez olyan – a tervezett zavarkezelési modellbe integrált – diszkrét eseményorientált szimulációs modellek kifejlesztésén és alkalmazásán alapul, amelyek gyors előrejelzéseket végeznek az aktuális gyártórendszeri állapotváltozók és feladatok figyelembevételével, támogatva az időbeli *situáció felismerést* és a reaktív / proaktív beavatkozást. Az új módszerek együtt lehetővé teszik a termelési terv-tény eltérések beavatkozási küszöbértékeinek vizsgálatát. Ilyen, a terv-tény eltérések vizsgálata (például a számított és a végrehajtott termelési ütemterv közötti különbségek) alapján meghatározható beavatkozás lehet a termelési *ütemterv módosítása*, az *újraütemezés*. Az egyébként ismert és alkalmazott ütemterv stabilitási mérőszámok (sorrendváltozás, műveletek kezdőidejének változása, újraütemezések száma) megismerése mellett célt volt megvizsgálni, új *stabilitási mérőszám(ok)* bevezetésének szükségességét, előnyeit.

A szimulációs kiértékelés új megoldásait vizsgálva munkámban arra a kérdésre kerestem a választ, hogy létezik-e olyan szimulációs struktúra, mely „közvetlenül” létrehozható valós termelőrendszereket leíró adatmodellek és adatok, valamint szimuláció-releváns információk együtteseként oly módon, hogy a létrejött *modell* (szimulációs mag) egyaránt alkalmas legyen akár „laboratóriumi méretű” kísérletekre, de több száz modellezett erőforrás kezelésére is. Az ily módon megvalósuló struktúra lehetővé tehetné, hogy a vizsgálni kívánt rendszer különböző *működési módjait*, akár különböző *élet-ciklus fázisokban* elemezhessük. Ezzel megvalósítható lehetne a rendszer *tervezésétől* kezdve, akár a rendszer *működtetésért* felelős informatikai alkalmazások hierarchikus szintjein megjelenő szimulációs kiértékelése is.

A fentiek alapján a diszkrét eseményorientált szimulációs rendszerek e területen történő alkalmazhatóságának új irányáiként három fő témát jelöltem meg:

- A Digitális Vállalat (DE) koncepcióhoz illeszkedő új *szimulációs struktúra/modell* kidolgozása komplex gyártórendszerek kiértékeléséhez/ analíziséhez.
- Termelésirányítási döntések szimulációs támogatása és valósídejű, *aktív zavarkezelési* (beavatkozási) eljárások kialakítása.
- *Változások* és *zavarok* felismerése, hatásuk előrejelzése szimuláció segítségével.

2.2 A kutatás módszertana

A kutatási tevékenység során az irodalomkutatás, problémafelvetés, kísérleti megoldások, illetve azok vizsgálata, program és rendszerfejlesztés, valamint az ellenőrző futtatások lépéseinek egymásra épülő folyamatát követtem. Az intelligens gyártás általam vizsgált részterülete önmagában is rendkívül átfogó, sok tudományágat érintő multidiszciplináris terület, mely jellegzetességet a kutatási módszertan megtervezésénél messzemenően figyelembe kellett vennem.

A kutatómunkát, a komplex gyártórendszerek modellezéséhez és analíziséhez szükséges terminológiák és eljárások feltárásával kezdtem. Így, az irodalomkutatás során többségében a termelésütemezés, újraütemezés, szimulációs modellezés, szimulációs reprezentációs technikák, ütemterv-kiértékelés, robusztus ütemezés, ütemtervek stabilitás és végrehajthatósági vizsgálata, stabilitási mérőszámok, változások- és zavarok kezelése és felismerése, genetikus algoritmusok témakörökben, nemzetközi folyóiratokban és konferencia-kiadványokban megjelent szakcikket, valamint könyveket és PhD munkákat dolgoztam fel. Fontos volt továbbá olyan témakörök megismerése, mint az információ/anyag áramlás folyamatának objektumorientált leírása, aggregált adatok és mérőszámok létrehozásának módszere, valósidejű döntéstámogatás lehetőségei a termelési folyamatban, statisztikai kiértékelés és folyamatszabályozás módszerei, gyártási szituációk definiálása és ezek felismerése, viselkedés alapú vezérlési módszerek.

A kísérleti megoldások keretén belül kidolgoztam egy új szimulációs rendszerkonceptiót, majd a rendszerfejlesztést követően ellenőrző futtatásokkal igazoltam a modell helyességét. A komponens alapú szimulációs modellépítés egyik alapvető igénye a relációs adatbázisok ismerete, mind elméleti, mind gyakorlati szempontból (Oracle, TOAD). A kutatás egyik legfontosabb szoftver eleme a logisztikai és gyártási folyamatok szimulációs modellezésére kifejlesztett, teljesen objektumorientált *eM-Plant* szoftvercsomag, mely területén elismerten az egyik legsokoldalúbb és leghatékonyabb eszköz. A kutató laborban a szoftver évek óta számos kísérletben és kutatási projektben bizonyította hatékonyságát. A kísérleti eredmények statisztikai kiértékelését az SPSS 9.0 szoftverrel végeztem.

A következő fejezetben bemutatásra kerülő tézisek struktúrája a következő: minden tézis rendelkezik egy címmel (vastagon szedve), mely a tézis által felölelt tématerületet definiálja és az ott elért új eredményekre utal. Maga a tézis kimondása dőlt betűvel szedve, megnövelt margókkal olvasható, melyet magyarázó szöveg (normál betűvel szedve) és esetleg ábra követ. A tézisek végén megtalálható, hogy az eredmények a disszertáció mely fejezetén, valamint mely saját publikációkon alapulnak.

3. Új tudományos eredmények

1. Tézis

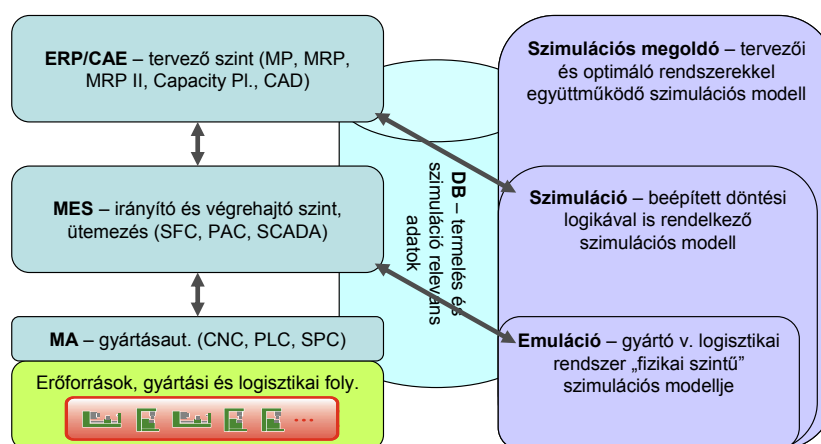
Komplex gyártórendszerek kiterjesztett szimuláción alapuló tervezése és analízise

Termeléstervezési -ütemezési és -irányítási döntések támogatásához a napjainkban használt *diszkrét eseményorientált szimulációs* (DES) megközelítések alkalmazhatósága igen korlátozott. Az általam javasolt *kiterjesztett szimuláció* – a szimulációt a termelőrendszerek különböző szintjein integráló megoldás – lényege, hogy a hierarchikus PPS rendszerek informatikai alkalmazásaihoz, szintenként megfeleltetünk egy-egy – közös modellen alapuló – DES modell-struktúrát (1. Ábra). A szokásos szimulációs megközelítéseket két irányba terjesztettem ki.

1.1. Kiterjesztett szimuláció. *Egyrészt, a hierarchikus szinteken vertikális kiterjesztést javasoltam, különálló szimulációs modellek helyett igény szerint, közös modell alapján, időleges jelleggel létrehozott modellek párhuzamos alkalmazásával (pl. kapacitás-tervezés, majd ütemterv kiértékelés).*

Másrészt, az alkalmazhatóság időbeni kiterjesztésére irányuló módszereket dolgoztam ki. A megoldás lényege, hogy a vizsgált komplex gyártórendszer időbeni változásait követve, a szimulációs struktúrák mindig alkalmazhatóak az egyes életciklus fázisokban (pl. gyártervezés, folyamattervezés, irányító rendszerek telepítése, működtetés).

Az ily módon megvalósuló struktúra lehetővé teszi a vizsgálni kívánt rendszer egymástól eltérő *működési módjainak* elemzését és kiértékelését a különböző *élet-ciklus fázisokban*. Ezáltal a rendszer tervezésétől kezdve, a működtetésért felelős informatikai alkalmazások hierarchikus szintjein megjelenő *kiterjesztett szimulációval*, a komplex gyártó/termelői rendszerek tervezése, üzemeltetése és kiértékelése hatékonyabbá válik.



1. Ábra: A termelőrendszerek szimulációjának struktúrája, lehetséges funkciói és kapcsolatai a termelésinformatikai alkalmazások meghatározott szintjein

A hagyományos szimulációs modellépítési eljárások helyett, a kiterjesztett szimulációs struktúrát szem előtt tartva, új modellépítési és végrehajtási eljárást javasoltam.

1.2. Komponens alapú szimulációs modellépítés új módszerének kidolgozása.

Kidolgoztam egy új, a termelői rendszereket leíró adatbázis-adatok és előre definiált modellelemek segítségével előállított – ún. komponens alapú – szimulációs modellépítési módszert, mely alkalmas a kiterjesztett szimulációs struktúra hatékony megvalósítására. Az egyes előre definiált szimulációs komponensek külön funkciókat ellátó/megvalósító, jól elkülöníthető egységek, melyek egy meghatározott struktúrát alkotva a szimulációs vizsgálatok céljainak megfelelően hozzák létre az időleges szimulációs modelleket.

1.3. Termelési ütemtervek szimulációs végrehajtásának új módszere. *Kidolgoztam és szimulációs környezetben elsőként alkalmaztam egy olyan új végrehajtási modellt, mely az előzési (precedencia) korlátok betartása mellett képes összeépítési műveleteket is végző erőforrások és termelési ütemterveik szimulációs vizsgálatára.*

A kidolgozott fontosabb szimulációs komponensek, funkciók szerint a következők: adatfeldolgozás -előkészítés, ERP interfész (Adat Komponens); modellépítés, pl. általános erőforrásmodellek és beépített végrehajtási logikák (Modellépítés Komponens); szimuláció vezérlés, szimulációs futtatás és kiértékelés (Vezérlés Komponens).

A javasolt struktúrát determinisztikus adatok alapján számított ütemtervek dinamikus, változásokkal terhelt környezetben történő, többszemponú kiértékeléséhez alkalmaztam. Az ütemterv valós végrehajtása előtt, a megvalósíthatóságot, robusztusságot és paraméter érzékenységet vizsgáló futtatásokkal a döntéshozó a környezettől függetlenül (*off-line*) vizsgálódhat, döntési alternatívákat állíthat fel a *feltárt bizonytalanságokkal* szemben.

Valós, ipari adatokon végzett kísérletekkel igazoltam, hogy a javasolt struktúra hatékonyan kezeli a jelentős számú erőforrást és műveletet tartalmazó feladatok kiértékelését is, azaz a kidolgozott módszerrel nagyszámú termelői erőforrás vizsgálatára hatékonyabban készíthető szimulációs kiértékelő környezet. A tézishez tartozó fejezetben részletesen ismertetem a módszert, valamint az ehhez szükséges adatmodellt, a termelői rendszer erőforrásainak *objektum-orientált* modelljét és a kapcsolódó működési logikát, melyet bonyolult struktúrájú, összeépítési műveletekkel rendelkező munkadarabok és multioperációs gépsorok szimulációs modellezésére alkalmaztam.

A tézis a disszertáció 4. fejezetén alapul, az eredmények a [P10], valamint a [P6],[P7],[P8],[P11],[P1],[P6],[P9] és [P15] közleményekben kerültek publikálásra.

2. Tézis

Dinamikus újraütemezési problémák megoldásának ütemterv-stabilitás központú támogatása

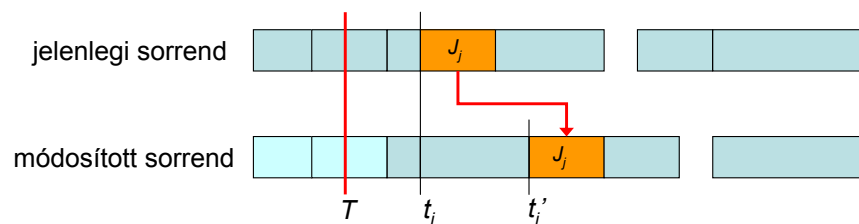
Dinamikus újraütemezési problémák vizsgálatánál a szakirodalomban is használt ütemterv-stabilitási mérőszámok közös jellemzője, hogy általában csak az eltérések mértékét (kezdési idő, sorrend) veszik figyelembe. Az általam kidolgozott kifejezés alapjául az a felismerés szolgált, miszerint az ütemterv-stabilitás mérésénél nem csak az eltérés mértékét, hanem a végrehajtáshoz mért aktualitását is célszerű lehet figyelembe venni.

2.1. Új ütemterv-stabilitási mérőszám. Újra-, illetve átütemezés céljából generált ütemtervek stabilitásának mérésére, egy összetett mérőszámot vezettem be, melynek előnye, hogy az ütemterv módosítása során nemcsak a változtatás mértékét, de annak végrehajtáshoz mért aktualitását is figyelembe veszi (1). Hatékonysági mérőszámokkal kombinálva, újraütemezési politikák többkritériumos vizsgálatánál kísérletekkel igazoltam az összefüggés felhasználhatóságát dinamikus ütemezési feladatokra periodikus újraütemezés stratégia alkalmazása mellett.

$$INS = \frac{1}{n_{pn}} \sum_{j \in B} \left[\frac{|t'_j - t_j|}{\min\{t_j, t'_j\} - T} \right] \quad (1)$$

ahol

B azon J feladatok halmaza, melyek nem kerültek megmunkálásra a kiindulási ütemtervben, $|t'_j - t_j| > 0$ és $\min\{t_j, t'_j\} - T > 0$,
 n_{pn} a B halmaz elemeinek száma,
 t_j adott J feladat tervezett kezdési időpontja a jelenleg érvényben lévő ütemtervben,
 t'_j adott J feladat tervezett kezdési időpontja a soron következő ütemtervben,
 T az aktuális idő, vagyis az az időpont melynél az újraütemezés történik (2. ábra).



2. Ábra: A sorrendmódosítás hatásának mérése a javasolt stabilitási mérőszám segítségével

A már korábban ismertetett szimulációs keretrendszer segítségével vizsgáltam a hatékonysági és a javasolt stabilitási mérőszámok (1), valamint az újraütemezési periódus egymásra hatását. Műhelyszintű ütemtervek előállítására kidolgoztam egy rugalmas job-shop környezetben, (újra)ütemezési feladatok megoldására alkalmas stabilitás-orientált, genetikus algoritmus-alapú ütemező. Fontos megjegyezni, hogy az (1) kifejezés alkalmas sorrendváltozások mérésére is.

Az (1) kifejezés igazolására kifejlesztettem egy, a tömeggyártás esetén jellemző termelési és belső logisztikai folyamatokat igen részletesen reprezentáló szimulációs modellt. Bevezettem négy különböző költségfajtát, melyekkel lehetővé vált a technológiai és erőforrás korlátok/korlátozások (pl. anyag, szállítás) zavarokra gyakorolt hatásának mérése, számszerűsítése. A szimulációs kísérletek során a költségek keletkezésének időbeni

jellegét, lefutását vizsgáltam az alkalmazott zavar típusokkal szemben (pl. gépleállítás, redukált szállítókapacitás).

2.2. A javasolt heurisztika költség-modell alapú kísérleti igazolása. *Igazoltam, hogy a termelési ütemtervek módosítása (újraütemezés, átütemezés) során, az ezen ütemtervek alapján számított másodlagos tervek (pl. szállítás, anyagrendelés) végrehajtásánál is többletköltségek keletkeznek, melyek időbeliségét egy lecsengő görbével lehet jellemezni. A kísérleti eredmények alapján megállapítottam, hogy a másodlagos tervekben a végrehajtáshoz közelebbi feladatok módosulásánál az átlagos költségnövekedés minden esetben jelentősen nagyobb volt, mint a változtatásnak nagyobb lehetőséget adó távolabbi feladatok esetében.*

Az eredmények elemzése alapján megállapítottam, hogy a vizsgált (1) kifejezés valóban felírható – adott feladatokra – a kezdési idők különbségének, és a végrehajtáshoz mért aktualitásuk hányadosaként.

Az itt megfogalmazott eredmények az értekezés 5. fejezetén alapulnak, valamint a [P3],[P12],[P13] [P14] és [P20] cikkekben kerültek publikálásra.

3. Tézis

Szituáció-függő beavatkozási eljárások újraütemezési döntések támogatására és kiértékelésére

Gyakorlati szempontból azok az újraütemezési politikák tekinthetőek elfogadhatónak és eredményesnek, melyek egyaránt teljesítik a *tervezhetőségre, kiszámíthatóságra* valamint a *reakcióra, adaptivitásra* vonatkozó követelményeket.

3.1. Hibrid újraütemezési politikák kiértékelése. *Új módszert javasoltam hibrid újraütemezési politikák kiértékelésére, mely képes az ütemterv módosításának pareto-optimalis időpontjának és mértékének meghatározására, dinamikus ütemezési környezetben. Bevezettem egy, a műveletek végrehajtásának monitorozásán alapuló beavatkozási küszöbértéket (2). Igazoltam, hogy a beavatkozás során a hatékonysági mérőszám nem, vagy alig csökken, ugyanakkor a beavatkozás várható negatív hatása is minimalizálható, növelve az ütemtervek stabilitását.*

3.2. Beavatkozási görbe. *Definiáltam egy beavatkozási görbét, mely az általam vizsgált prediktív-reaktív ütemezési környezet esetén két újraütemezési pont között, minden időpillanatban megadja, hogy egy esetleges zavar-típusra milyen beavatkozási küszöbértékkel, illetve ezáltal milyen újraütemezési politikával célszerű reagálni. Kísérletekkel igazoltam, hogy a fellépő szituációtól függően, megfelelően megválasztott beavatkozási küszöb-beállításokkal meghatározható a beavatkozás módja (újraütemezés, vagy átütemezés), optimalis mértéke és időpontja.*

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |c_{j,sim} - c_{j,pre}| > \beta, \quad (2)$$

ahol

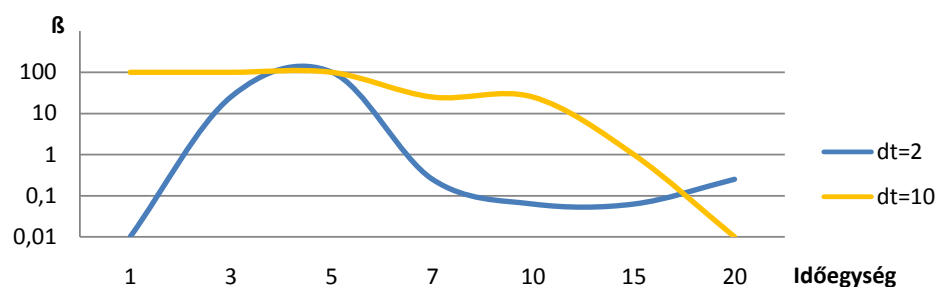
n a legutóbbi újraütemezési ponttól számított befejezett feladatok száma,

$c_{j,sim}$ a j -ik feladat szimulált bejezési időpontja,

$c_{j,pre}$ a j -ik feladat számított bejezési időpontja.

Az eredmények felhasználásával kidolgoztam egy új szimulációs eljárást, mely alkalmas a beavatkozási küszöbérték és az alkalmazott újraütemezési politika analitikus úton történő meghatározására (*beavatkozási görbe*, 3. Ábra). A vizsgált ütemezési környezetet szimulációs futtatásokkal előre be lehet „tanítani” a rendszerben fellépő adott hibafajtákra. Zavar esetén a beavatkozás (*control action*) szükségességének és mértékének meghatározása ezek alapján történik. Adott újraütemezési pontnál a rendszer megvizsgálja, hogy a görbe alkalmazható-e még. Ha szükséges újra tanul, paraméterezi a függvényt az aktuális adatok (ütemterv, erőforrás-naptár, műveleti terv) alapján. Szimulációs kísérletekkel bizonyítottam, hogy a módszer valóban eredményes, pl. ismétlődő feladatoknál a megvizsgált hibrid újraütemezési környezetekben fennállt, hogy a görbék alkalmazhatóak az egymást követő újraütemezési pontoknál.

Az itt megfogalmazott eredmények az értekezés 5. fejezetén alapulnak, valamint a [P2],[P3],[P5] és [P14] cikkekben kerültek publikálásra.



3. Ábra: A vizsgált időszakra (két normál újraütemezési pont között) számított beavatkozási küszöbértékek az idő függvényében (középértékek alapján számítva), ahol dt a gépleállítás valószínű időtartama

4. Tézis

Új megoldások a szimulációval támogatott operatív gyártáskorrekció területén

Az üzemszintű folyamatokban bekövetkező változások, eltérések és zavarok felismerésére, valamint hatásuk előrejelzésére a kiértékeléseket végző szimulációs modellek két külön működési módját definiáltam (4. ábra).

4.1. A Szimuláció proaktív és reaktív működési módjai. Meghatároztam az ún. *proaktív működési módot*, melynek célja a különböző termelési szituációk és a tervhez képest keletkező eltérések felismerése rövid időhorizont mellett elvégzett szimulációs kísérletek segítségével.

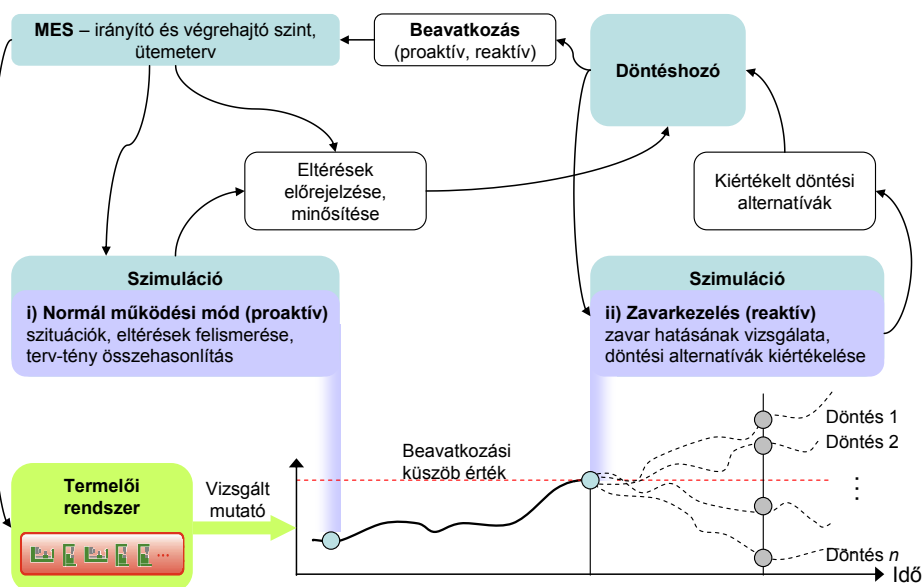
Kidolgoztam az ún. *reaktív működési módot*, melynek célja, ténylegesen fellépő zavar(ok) esetén, a beavatkozás lehetséges alternatíváinak

kiértékelése, a döntések hatásának vizsgálata, valamint a veszteségek minimalizálása.

4.2. Új aktív zavarkezelési struktúra. Igazoltam, hogy létezik olyan, az 1. Tézisben bevezetett szimulációs keretrendszeren és modellezési eljárásokon alapuló aktív zavarkezelési struktúra, melyek on-line alkalmazásával – a gyártásirányítás részeként – a rekatív/proaktív gyártáskorrekció hatékonyabban megvalósítható. Megállapítottam, hogy a rendszer képes felismerni különböző, a normál kondíciókhoz (pl. ütemtervhez) képest eltéréseket, zavarokat. Ezeket képes adott szituációként beazonosítani, illetve aktívan reagálni, azaz döntési alternatívákat felállítani és a döntéshozó elé tárni.

Valós, ipari adatokon vizsgáltam a proaktív és reaktív szimulációs módok különböző beállításainak hatásait (szűrő hatás – filtering effect) a hatékonysági és ütemterv-stabilitási mérőszámokra. Az erőforrás-korlátok szimulációs vizsgálata során rámutattam az időhorizontok pontos megválasztásának fontosságára. Eszerint – az általam vizsgált környezetben – a proaktív szimulációval a leghatékonyabbnak a heti ütemtervek folyamatos (on-line) kiértékelése bizonyult. Előre jelzett, valószínűsíthető zavar esetén (amennyiben az eltérés kimutatható veszteséget okoz) a reaktív, zavarelhárítást segítő szimulációs futtatásokat a zavar által érintett *egy műszakra* célszerű futtatni.

A tézis alapjául a disszertáció 6 fejezete szolgál. Az eredményeket a [P4], [P16], [P17] [P18] és [P19] publikációk tartalmazzák.



4. Ábra: Aktív zavarkezelést támogató rendszermodell; a szimuláció különböző működési módjai a vizsgált rendszer állapot-változásának függvényében

4. Az eredmények hasznosítása, alkalmazása

Az 1. Tézisben ismertetett *kiterjesztett szimuláció* hozzájárul a diszkrét szimuláció alkalmazhatóságának bővítéséhez, mivel csökkenti a modellezésre fordított időt (és munkát), ugyanakkor több területen is felhasználható az adat-integritásnak és a feladat-specifikusan kialakított szimulációs futtatásokból nyert eredményeknek köszönhetően. A tézishoz tartozó, 1. ábrán látható, hogy – letről felfelé – a szimulációs modell részletessége (mélysége) csökken, míg a leképezett funkciók száma és komplexitása nő. Habár a modellek *granuláltsági* szintje változó, a vázat alkotó adatstruktúra mindig azonos. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a szimuláció ugyanazt – a vállalatirányítási rendszerhez kapcsolódó – termelési adatbázist használhatja, mint az ütemező. Az előre elkészített modellkomponensekből az adatbázisban tárolt „legfrissebb” adatok alapján épül fel a szimulációs modell, és szükség szerint a kiértékelés során összegyűjtött eredményeket is ott tárolja.

A 1. Tézisben kifejtett koncepció gyakorlati megvalósítására a Digitális Vállalatok, Termelési Hálózatok (NKFP) projekten belül nyílt lehetőségem. A leképezett rendszer egyik sajátossága volt, hogy a szimulációban igen nagyszámú, közel hasonló tulajdonságú munkaállomást kellett kezelni. A gyár-részleg szimulációs modellje az ütemező adatmodelljét, valamint előre definiált modell-objektumokat alkalmazva dinamikusan épült fel minden szimulációs futtatás előtt, míg az adatbázis kapcsolat az ütemezővel ODBC-n keresztül valósult meg.

Újraütemezési döntések támogatására kollégáimmal kidolgoztunk egy dinamikus környezetben működő, hibrid újraütemezési politikát alkalmazó rendszert, mely eseményvezéreltként beavatkozik a zavarelhárítás segítésére (döntéstámogatás), míg adott ciklusidővel figyeli a terv-tény elemzés eredményeit és kezdeményezi az ütemterv módosítását. A rendszer előrejelzéseket végezhet esetlegesen bekövetkező zavarokra – mindkét újraütemezési politika esetében – a szimuláció alkalmazásával. A gyakorlati alkalmazás részeként a 2., 3. és 4. Tézisek eredményeit felhasználva, a Valós idejű, kooperatív vállalatok (NKFP) projekt II. klaszterében kifejlesztendő aktív zavarkezelést támogató rendszermodell implementálásra kerül egy konkrét tesztfeladatra. A prototípus döntéstámogató rendszer az I. klaszter ütemezőjéhez és az ipari partner termelésekövetési valamint folyamat-felügyeleti rendszereihez is kapcsolódhat. Elkészítettem a vizsgált gyáregység kiválasztott gyártósorainak komponens alapú, valamint „hagyományos” szimulációs modelljét is. Összehasonlító kísérleti futtatásokkal igazoltam a javasolt elképzelés életképességét és hatékonyságát, mely szerint az igen nagyméretű rugalmas flow-shop rendszerek szimulációs vizsgálatánál a komponens alapú megközelítés jóval hatékonyabbnak bizonyult.

A Modular Plant Architecture, EU FP5-os projekt keretében a területén piacvezető belga ipari partner gyárában, egy gyáregység munkaállomásainak és az ezt kiszolgáló szállító erőforrás és az ehhez szervesen kapcsolódó automata magasraktári rendszer modellezését végeztem. Az erőforrásokat ütemező rendszer leképezése, valamint az erőforrások hatékonyabb kihasználásának elérése szintén a célok között szerepelt. Munkám során elkészült az említett gyáregység részletes *emulációs* modellje (1. Tézis), az (elosztott intelligenciájú, ágensalapú) ütemező rendszer, valamint az ezek kapcsolatát biztosító interfész. A modellen végzett kísérleteim eredményei között szerepel a szállító erőforrás

kiszolgálási stratégiájának optimalizálása genetikus keresési (GA) modul alkalmazásával, valamint a megrendelés-összetételek hatásának vizsgálata az átfutási időkre.

Részt vettem a stuttgarti IPA (Fraunhofer Intézet) munkatársaival közösen, a kecskeméti Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft. összeszerelő üzemében egyes kiválasztott gyártósorok, valamint a kapcsolódó logisztikai rendszerek folyamatszintű optimalizálásában. A projekt-munka sikeres kivitelezésének érdekében ugyan szimuláció alkalmazására nem került sor, azonban a termelésstervezés és -irányítás területén szerzett ismereteimre nagymértékben támaszkodhattam.

Kollégáimmal a Robert Bosch Elektronika Kft. (RBHH) számára egy olyan informatikai alkalmazást készítettünk, melynek segítségével biztosítható (a vállalat hatvani gyárában) a gyártósori kivonatos anyagkiszolgálás és készárumozgatás logisztikai folyamatának számítógéppel támogatott tervezése és optimalizálása. A feladat célja volt olyan új módszerek és rendszer kifejlesztése, amelyek segítségével a belső logisztikai folyamatok változtatása esetén (pl. újabb fel- ill. leadópontok kialakítása, újabb közlekedő utak megnyitása, gyártósorok telepítése, meglévő gyártósorok áthelyezése, stb.) a kiszolgáló járatok – a módosított feltételeknek megfelelően – adott szempontok szerint optimalizálva újraszámíthatóak.

A disszertációban bemutatott kutatási eredmények egyes részeredményei mind K+F, mind ipari projekteken közvetlenül hasznosulhatnak (komponens alapú szimulációs modellezés, szimulációval segített döntéstámogatás és aktív zavarkezelés, termelési szituáció-felismerés). A kidolgozott megoldások a termelésinformatika több területén – így a termelésirányító és végrehajtó rendszerek (MES) különböző szintjein – integrálhatóak lehetnek ismert és népszerű informatikai rendszerek megfelelő komponenseihez.

A kutatáshoz kapcsolódó főbb K+F projektek:

2000-2003	Modular Plant Architecture (MPA), EU FP5
2000-2002	Virtual Institute for the Modelling of Ind. Manufacturing Systems (VIMIMS), SOCRATES
2001-2004	Digitális Vállalatok, Termelési Hálózatok (DF), NKFP
2001-2004	Termelőhálózatok tervezése és irányítása, OTKA
2004-2007	An internet-based education/training platform, in the field of SCM, for students, teachers and industrial employees (eSCM), Leonardo
2004-2007	Virtual Research Lab for Knowledge Community in Prod. (VRL-KCiP), EU FP6
2004-2007	Valós idejű, kooperatív vállalatok (VITAL), NKFP
2006-2009	Digital Factory for Human-Oriented Production System (DiFac), EU FP6

Nemzetközi és hazai elismerések

- TDK első helyezés, OTDK részvétel (BME, 2001)
- Magyar Logisztikai, Beszerzési és Készletezési Társaság 2002 évi diplomamunka pályázatán I. helyezés (2002)

- Szekcióelnök-helyettes, 12. IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM2003, Spanyolország (2003)
- MTA-SZTAKI Aspiránsok és Doktoranduszok Díj első helyezés az első éves kategóriában (2003)
- MTA-SZTAKI Intézeti Díj (2004)
- Szekció elnök, 19th European Modeling & Simulation Symposium, EMSS 2007, Olaszország (2007)

5. Saját publikációk jegyzéke

Külföldön megjelent / megjelenés alatt álló idegen nyelvű folyóiratcikkek

- [P1] Kádár, B; Pfeiffer, A.; Monostori, L.: Building agent-based systems in a discrete-event simulation environment, Lecture Notes in Computer Science; 3690: Lecture Notes in Artificial Intelligence, Multi-Agent Systems and Applications IV, Springer, 2005, pp.: 595-599 (impakt faktor 0,402).
- [P2] Pfeiffer, A.; Kádár, B; Monostori, L.: Stability-oriented evaluation of hybrid rescheduling methods in a job-shop with machine breakdowns, CIRP Journal of Manufacturing Systems, 2006, 35/6, pp.: 563-570.
- [P3] Pfeiffer, A.; Kádár, B.; Monostori, L.: Stability-oriented evaluation of rescheduling strategies by using simulation, Computers in Industry, 2007, 58/7, pp.: 630-643, (impakt faktor 0,935).
- [P4] Monostori, L.; Kádár, B.; Pfeiffer, A.; Karnok, D.: Solution approaches to real-time control of customized mass production, Annals of the CIRP, 2007, 56/1, pp.: 431-434, (impakt faktor 0,891)
- [P5] Pfeiffer, A.; Kádár, B.; Monostori, L.; Karnok, D.: Simulation as one of the core technologies for digital enterprises: Assessment of hybrid rescheduling methods, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Special Issue (felkért cikk, beküldve 2007, nyomtatásban, impakt faktor 0,383)

Nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent idegen nyelvű cikkek

- [P6] Pfeiffer, A.; Kádár, B.; Monostori, L.: Evaluating and improving production control systems by using emulation, Proc. of the 12th IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2003, 3-5 September, 2003, Marbella, Spain, pp.: 261-267.
- [P7] Kovács, A.; Váncza, J.; Kádár, B.; Monostori, L.; Pfeiffer, A.: Real-life scheduling using constraint programming and simulation, 7th IFAC workshop on Intelligent Manufacturing Systems, ISM 2003, 6-8 April 2003, Budapest, Elsevier, pp.: 213-218.
- [P8] Kádár, B.; Pfeiffer, A.; Monostori, L.: Testing and Validating Deterministic Schedules in a Simulated Stochastic Environment, 11th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, April 5-7, 2004, Salvador, Brasil, (A konferencia kiadvány CD-n érhető el).

- [P9] Kádár, B.; Csáji, B.; Monostori, L.; Pfeiffer, A.: Simulation supported agent-based adaptive production scheduling, International IMS Forum 2004; Global Challenges in Manuf., May 17-19, 2004, Cernobbio, Italy, pp.: 658-665.
- [P10] Kádár, B.; Pfeiffer, A.; Monostori, L.: Discrete event simulation for supporting production planning and scheduling decisions in digital factories, 37th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems; Digital enterprises, production networks, May 19-21, 2004, Budapest, Hungary, pp.:441-448.
- [P11] Pfeiffer, A.: Evaluation of production schedules by using simulation, Proc. of 4th Conference on Mechanical Engineering, GÉPÉSZET 2004, May 27-28, 2004, Budapest, Hungary, pp.:648-652.
- [P12] Pfeiffer, A.; Kádár, B.; Monostori, L.: Simulation support for rescheduling, Proc. of the 16th European Simulation Symposium and Exhibition, ESS2004, October 17-20, 2004, Budapest, Hungary, pp.: 41-46.
- [P13] Pfeiffer, A.; Kádár, B.; Csáji, B.Cs.; Monostori, L.: Simulation supported analysis of a dynamic rescheduling system, in: Manufacturing, Modelling, Management and Control 2005, edited by Chryssolouris, G. and Mourtzis, D., 2005, Elsevier, pp.: 25-30, (also in Proc. of the IFAC Conference on Manufacturing, Modelling, Management and Control, October 21-22, 2004, Athens, Greece, pp.: 24-29.).
- [P14] Pfeiffer, A.; Kádár, B.; Monostori, L.: Stability-oriented evaluation of hybrid rescheduling methods in a job-shop with machine breakdowns, 39th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems; The Morphology of Innovative Manuf. Systems, June 7-9, 2006, Ljubljana, Slovenia, pp.: 173-178.
- [P15] Pfeiffer, A.; Kádár, B.; Monostori, L.; Karnok D.: Simulation-based control strategy optimization by using genetic algorithm, Proc. Of the 8th International Conference on the Modern Information Technology in the Innovation Processes of Industrial Enterprises, MITIP 2006, September 11-12, 2006, Budapest, Hungary, pp.: 469-474.
- [P16] Viharos, Zs.J.; Botond, K.; Monostori, L.; Kemény, Zs.; Csáji, B.Cs.; Pfeiffer, A.; Karnok, D.: Integration of production-, quality- and process monitoring for agile manufacturing, XVIII IMEKO World Congress, Metrology for a Sustainable Development, Sept. 17-22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil (A konferencia kiadvány CD-n érhető el)
- [P17] Pfeiffer, A.; Kádár, B.; Monostori, L.; Karnok, D.: Simulation as one of the core technologies for digital enterprises: Assessment of hybrid rescheduling methods, 3rd International CIRP Seminar on Digital Enterprise Technology, September 18-20, 2006, Setubal, Portugal, (A konferencia kiadvány CD-n érhető el)
- [P18] Pfeiffer, A.; Kádár, B.; Monostori, L.: Simulation-based validation of production control decisions, subject to resource availability, EMSS2007, 19th European Modeling and Simulation Symposium, October 4-6, Bergaggi (SV), Italy, (A konferencia kiadvány CD-n érhető el)
- [P19] Kádár, B.; Pfeiffer, A.; Monostori, L.: Simulation-based monitoring and validation of production control decisions, IFAC Workshop on Manufacturing Modelling, Management and Control, November 14-16, Budapest, Hungary, pp.: 107-114.

Magyar nyelvű konferencia-kiadványban megjelent cikk

- [P20] Pfeiffer A.: Újraütemezési döntések támogatása diszkrét esemény-szimuláció alkalmazásával, Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, 2005. március 18-19., Kolozsvár, Románia, pp.: 335-338.

Egyéb, az értekezéshez közvetlenül nem kapcsolódó publikációk

- [P21] Pfeiffer, A.; Lipovszki, Gy.: Was bedeutet die Simulation in der Logistik?, Wissenschaftliche Mitteilungen der 14. Frühlingsakademie (ISBN 963 86234 5 4), 2002, München, pp.: 81-86.
- [P22] Czinege, I.; Ilie-Zudor, E.; Pfeiffer, A.: LOG4SMEs: Improving logistics performance of SMEs in the automotive sector, ERCIM News, J. of the European Consortium for Informatics and Math., No. 66, July 2006, pp.: 60-61.

Összes publikáció és független hivatkozás Összefoglaló táblázat	
Összes publikációk száma	22
Referált nemzetközi folyóiratban	5*
Nemzetközi konferencián	17
SCI (db)**	4
Ismert független hivatkozások száma	9

*ebből 1 nyomtatásban; ** kumulált impakt faktor: 2,611

6. A tézisfüzetben felhasznált irodalom jegyzéke

- [1] Sabuncuoglu, I., Kizilisik, O.M., 2003, Reactive Scheduling in a Dynamic and Stochastic FMS Environment, Int. J. of Prod. Res., 41/17: 4211-4231.
- [2] Vieira, G.E., Herrmann, J.W., Lin, E., 2003, Rescheduling Manufacturing Systems: A Framework of Strategies, Policies and Methods, Journal of Scheduling, 6/1: 39-62.
- [3] Pinedo, M., 2002, Scheduling: Theory, Algorithms and Systems, Prentice Hall, NJ, USA.
- [4] Aytug, H., Lawley, M.A., McKay, K., Mohan, S., Uzsoy, R., 2005, Executing Production Schedules in the Face of Uncertainties: A Review and Some Future Directions, European Journal of Op. Res., 161: 86-117.
- [5] Church, L.K., Uzsoy, R., 1992, Analysis of Periodic and Event-Driven Rescheduling Policies in Dynamic Shops, Int. J. of Computer Integrated Manufacturing, 5: 153-163.
- [6] Abumaizar, R.J., Svestka, J.A., 1997, Rescheduling Job Shops Under Random Disruptions, International Journal of Production Research, 35: 2065-2082.

- [7] Wu, S.D., Storer, R.H., Chang, P.C., 1993, One-Machine Rescheduling Heuristics with Eff. and Stability as Criteria, *Comp. and Op. Res.*, 20: 1-14.
- [8] Mehta, S.V., Uzsoy, R.M., 1998, Predictable Scheduling of a Job Shop Subject to Breakdowns, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 14: 365-378.
- [9] Cowling, P., Johansson, M., 2002, Using Real Time Information for Effective Dynamic Scheduling, *European J. of Operational Research*, 139: 230-244.
- [10] Rangsaritratsamee, R., Ferrell, Jr., W.G., Kurz, M.B., 2004, Dynamic Rescheduling that Simultaneously Considers Efficiency and Stability, *Computers & Industrial Engineering*, 46: 1-15.
- [11] Leon, V.J., Wu, S.D., Storer, R.H., 1994, Robustness Measures and Robust Scheduling for Job Shops, *IIE Transactions*, 26/5: 32–43.
- [12] Vieira, G.E., Herrmann, J.W., Lin, E., 2000, Predicting the Performance of Rescheduling Strategies for Parallel Machines Systems, *Journal of Manufacturing Systems*, 19: 256-266.
- [13] Bidot, J., Laborie, P., Beck, J.C., Vidal, T., 2003, Using Simulation for Execution Monitoring and On-Line Rescheduling with Uncertain Durations, In: *Proc. of the ICAPS'03 Workshop on Plan Execution*, Trento, Italy.
- [14] Law, A., Kelton, D., 2000, *Simulation Modelling and Analysis*, McGraw-Hill.
- [15] Kempf, K., Uzsoy, R.; Smith, S.; Gary, K., 2000, Evaluation and comparison of production schedules, *Computers in Industry*, 42:203-220.
- [16] Wiendahl, H.H., Westkämper, E., 2003, Situation-based selection of PPC methods – fundamentals and approaches, In: *Manuf. systems*, 32/4: 333-340.
- [17] Monostori, L.; Váncza, J.; Márkus, A.; Kis, T.; Kovács, A.; Erdős, G.; Kádár, B.; Viharos, Zs.J., 2005, Real-time, cooperative enterprises: management of changes and disturbances in different levels of production, *38th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, May 16-18, Florianopolis, Brasil, pp.:1-6.
- [18] Son, Y.J., Wysk, R.A., 2001, Automatic simulation model generation for simulation-based, real-time shop floor control, *Comp. in Industry*, 45:291-308.
- [19] Wiendahl, H.P., Worbs, J., 2003, Simulation based analysis of complex production systems with methods of non-linear dynamics, *J. of Materials Processing Technology*, 139: 28-34.
- [20] Maropoulos, P.G., 2002, Digital Enterprise Technology – Defining Perspectives and Research Priorities, *Proc. of the 1st CIRP (UK) Seminar on Digital Enterprise Technology*, DET02, September 16-17, Durham, UK, Part V: 3-12.
- [21] Honkomp, S.J., Mockus, L., Reklaitis, G.V., 1999, A framework for schedule evaluation with processing uncertainty, *Comp. and Chemical Eng.* 23: 595–609.
- [22] Hatvany, J., 1985, Intelligence and cooperation in heterarchic manufacturing systems, *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, 2/2: 101-104.