



ÚJ MÓDSZER DOLGOZÓK MUNKÁJÁNAK KÖZVETLEN IRÁNYÍTÁSÁRA RUGALMAS GYÁRTÓRENDSZERBEN

TÓTH NORBERT

Bay Zoltán Nonprofit Kft.
norbert.toth@bayzoltan.hu

KULCSÁR GYULA

Miskolci Egyetem, Informatikai Intézet
iitkg@uni-miskolc.hu

Absztrakt. Az emberi munkavégzésre alapozott rugalmas gyártórendszerek hatékonyságát nagymértékben befolyásolja a dolgozók irányításának módszere. A cikk bemutatja egy rugalmas gyártórendszerben elvégzendő munkák és rendelkezésre álló dolgozók dinamikus összerendelési feladatát és annak egy új megoldási módszerét. A javasolt megoldási módszer egyidejűleg több szempontot és befolyásoló tényezőt vesz figyelembe. A javasolt módszer hatékonyságát szimulációs modell futási eredményei igazolják.

Kulcsszavak: gyártásirányítás, rugalmas gyártórendszer, szimuláció, optimalizálás, heurisztika

1. Bevezetés

A gyártórendszerek hatékonyságának növelése fontos feladat. A vevői igények gyors kiszolgálására koncentráló agilis gyártási filozófia széles körben elterjedt. A piaci körülmények gyors változása és a vevők igényeinek kiszolgálása egyre nagyobb kihívásokat generál. A gyártási erőforrások maximális kihasználása érdekében korszerű gyártásirányítási stratégiák szükségesek. Az ilyen irányú fejlesztésekhez a digitális gyártás, az intelligens gyártórendszer, a kiberfizikai rendszerek, az Ipar 4.0 és a hasonló kulcsszavakhoz kapcsolódó automatizálási, digitalizációs, informatikai és kommunikációs technológiák jó alapot biztosítanak a rendszerből kinyerhető hasznos információk összegyűjtéséhez, tárolásához és feldolgozásához [1]. Azonban a gyártórendszerekből így kinyert és rendelkezésre álló információk hatékony felhasználásához új irányító modellekre, módszerekre és konkrét algoritmusokra van szükség.

A szimulációs modellek alkalmazása széles körben elterjedt. A szimulációs vizsgálatok eredménye alapján a gyártórendszerek struktúrájának, irányítási stratégiáinak és döntési módszereinek átalakítása is sokszor indokoltá válik. Előtérbe kerülnek az új munkaállomás-elrendezések és ismét jelentős szerephez jutnak az emberi munkavégző képességre alapozott rugalmas gyártó-szerelő rendszerek [2]. Ezek a

rendszerek nagymértékű rugalmasságot biztosítanak a vevői igények magas fokú kiszolgálására [3].

Az emberi munkavégzésre orientált rugalmas gyártórendszerekben a gyártási és szerelési műveletek egy jelentős részét különböző képességű dolgozók végzik el. A folyamatokban a munkadarabtípusokon a tulajdonságváltoztató főfolyamatok műveleteinek elvégzésén túl a mellékfolyamatokat (pl. logisztikai műveleteket) is a dolgozók végzik el. Ezeknek a rendszereknek az irányítási döntéseit a dolgozók egyedi műveletvégző képességeit is figyelembe vevő modellekkel hatékonyan lehet támogatni, ezáltal a teljes gyártórendszer hatékonysága növelhető [4]. Ilyenkor kiemelkedően fontossá válik, hogy az operatív gyártásirányítási és ütemezési modellek integráltan kezeljék a gyártórendszerek erőforrásainak pontos jellemzőit.

A jól ismert alapvető termelésütemezési problémákat és módszereket összefoglalja például az [5] könyv. Az ütemezési feladatok nagy része NP-nehéz, ami azt jelenti, hogy az optimális megoldás előállítása polinomiális futási idejű algoritmus-sal nem garantálható [6]. A sokműveletes ütemezési problémák is ebbe az NP-nehéz feladatkategóriába tartoznak. A rugalmas gyártórendszerek ütemezési problémái is rendszerint ilyenek. Ezeknél főként az egyutas és a többutas alapmodellekből indulhatunk ki és a konkrét rendszer jellemzőivel bővíthetjük az alapmodellt. Példaként szolgálnak a Flow Shop esetekre a [7], [8], és [9] munkák. A Job Shop problémákra mutatnak példát a [10], [11], [12], és [13] cikkek.

A valós ipari ütemezési feladatok esetében sokszor az erőforrások halmaza magában foglalja a termelőberendezéseket, a munkaállomásokat, a logisztikai eszközöket, a műveletközi tárolókat és a dolgozókat is. Ezekben az összetett gyakorlati feladatokban a gyártásirányítási és ütemezési igények hatékony kiszolgálása megköveteli azt, hogy a klasszikus ütemezési problémák alapvető jellemzőin túl további gyártórendszer-specifikus működési jellemzőket, korlátfeltételeket és célokat is figyelembe vegyünk. Az ilyen kiterjesztések miatt az alkalmas modellek komplexitása tovább növekszik, ezáltal a problémák megoldása újra és újra visszatérő fejlesztési igényeket generál.

A számítógépes szimulációs lehetőségek és a mesterséges intelligenciára alapozott optimalizálási módszerek hatékonyan támogatják a valós gyártási rendszerek és folyamatok modellezését, ütemezését és irányítását [14]. A korszerű szimuláció azt is lehetővé teszi, hogy egy virtuális térben végezzünk elemzéseket, kísérleteket és fejlesztéseket. A fejlesztési javaslatok ezáltal kipróbálhatók, validálhatók és értékelhetők a konkrét valós gyártórendszerbeli alkalmazás előtt. Az új ütemezési és irányítási algoritmusok fejlesztésekor is jól alkalmazhatók a valós gyártórendszerek digitális modelljei. Ezen túlmenően a mindennapi operatív működésben is hatékonyan együttműködhet a digitális ikerpár a valós rendszerrel. Ebben a cikkben egy ilyen digitálisikerpár-koncepcióra alapozott új irányítási módszer kerül bemutatásra.

2. A feladat bemutatása

2.1. A vizsgált rugalmas gyártórendszer működési jellemzői

A kutatómunkánk célja egy valós rugalmas gyártórendszer összetett ütemezési és irányítási feladatának modellezése és megoldása volt. Egy korábbi cikkünkben bemutatunk egy olyan gyártórendszert, amelyben a dolgozók gyártási képessége kulcsszerepet játszott a gyártási teljesítmény maximalizálásában [15]. Az akkor elvégzett vizsgálataink végén megállapítottuk, hogy az emberi tényező jelentősége kiemelkedő fontossággal bír a műszakonkénti termelési tervek végrehajtása során. Kutatásunk egy korábbi fázisában elkészítettünk és bemutatunk egy diszkrét eseményvezérelt szimulációs modellt. A szimuláció továbbfejlesztésével további új jellemzőket vettünk figyelembe és kibővítettük a szimuláció szolgáltatásainak körét. Ebben a cikkben a rugalmas gyártórendszer dolgozóinak irányítási kérdéseire helyezük a hangsúlyt. A további vizsgálataink során a rendszer termelési tervét adottnak tekintjük, és arra törekszünk, hogy a gyártási hatékonyságot alkalmasan megtervezett irányítási stratégiával tudjuk tovább fokozni.

A modellben leképzésre kerültek a következő elemek:

- a terméktípusok;
- a terméktípusokon végrehajtandó operációk és azok sorrendje;
- az operációk műveleti normaideje;
- a munkahelyek és a szerelőállomások, ahol az operációk elvégezhetők;
- a dolgozók;
- a dolgozók műszakbeosztása;
- a dolgozók gyártási képességei, amelyek az operációk műveleti normaidejét befolyásolják;
- az útvonalak, amelyek a dolgozók egydarabos anyagmozgatását biztosítják az egyes munkaállomások között, figyelembe véve az összes gyártható terméktípus lehetséges operációinak sorrendjét reprezentáló anyagáramlási relációkat;
- a vizsgált időszak műszakjai;
- a szünetek;
- a műszakonkénti termelési tervek, melyek előírják, hogy melyik terméktípusból mennyit kell gyártani az adott időszakban.

A gyártórendszer digitális modelljét a Plant Simulation szimulációs környezetben készítettük el. Objektumorientált modellezési módszertant követve a fejlesztőeszköz objektumait használtuk fel a rendszer vázának megalkotására. A valós folyamatok minél pontosabb leképzésére törekedtünk, így az alkalmazás SimTalk programozási nyelvét használtuk az objektumok viselkedésének leírására.

A kidolgozott szimulációs modell a következő gyártási folyamat digitális ikerpárjaként működik:

- A rendszer egy adott műszakjában a behívott dolgozók aktívan dolgoznak.
- A dolgozók aktuális halmaza minden egyes műszakban egyedileg adott.
- Az aktuális termelési terv adott, amely előírja minden egyes műszak számára a legyártandó termékek típusát és darabszámát.
- A dolgozó a kijelölt indulási helyről kiválaszt egy olyan munkadarabot, amelynek műveleteit el tudja végezni.
- A kiválasztott terméktípus technológiai tervének megfelelően végrehajtja a kijelölt műveleteket.
- A dolgozó a gyártórendszer munkaállomásai között végighalad a terméktípus technológiai útvonala mentén. A mindenkor következő művelet elvégzéséhez kiválaszt egy alkalmas munkaállomást a megfelelő munkaállomások közül és ott elvégzi az előírt műveletet.
- A művelet sor végén elhelyezi a készterméket a kijelölt tárolóba. Ezután előlőről kezdi a következő munkadarab kiválasztásával a gyártási ciklust.

2.2. A vizsgált irányítási feladat jellemzői

Ebben a cikkben összefoglaljuk a dolgozók irányításának feladatát és bemutatjuk a kidolgozott megoldási módszert.

A vizsgált rugalmas gyártórendszerben a dolgozók irányításának feladata lényegét tekintve azt jelenti, hogy meg kell határozni egy olyan módszert, amelynek segítségével valós időben, reaktív módon eldönthető az, hogy az aktuális dolgozó:

- aki a kiindulási helyen el szeretné kezdeni a következő gyártási ciklust, milyen terméktípust válasszon;
- aki a gyártási ciklusban olyan művelethez érkezik, melyhez többféle munkaállomás is megfelel, melyik alternatív munkaállomást válassza.

Ez a dolgozói irányítási probléma egy optimalizálási feladatot jelent, melynek a döntési változói egyrészt a munkadarabok és dolgozók összerendelését, másrészt a műveletek és a munkaállomások összerendelését határozzák meg. Az optimalizálási feladat korlátfeltételeit a fentebb bemutatott rugalmas gyártórendszer működési jellemzői adják meg. Az optimalizálásnak két célja van. Ezek a következők:

- Az elsődleges cél a legyártott termékek darabszámának maximalizálása.
- A másodlagos cél a dolgozók időkapacitásának maximális kihasználása.

A dolgozók irányításával kapcsolatban ilyenformán megfogalmazott optimalizálási kérdésekre adott válaszok nagymértékben befolyásolják a gyártórendszer hatékonyságát. Ebben a cikkben bemutatjuk a vizsgált feladat egy új megoldási módszerét. A javasolt megoldási módszer egyidejűleg több szempontot és befolyásoló tényezőt vesz figyelembe.

3. Digitális ikerpár szimulációs szolgáltatására alapozott reaktív irányítási módszer

A dolgozók irányítási feladatának megoldására kidolgoztunk egy digitális ikerpár szimulációs modelljébe integrált sokprioritásos reaktív döntési algoritmust. A saját fejlesztésű gyártásirányítási módszerünkre a továbbiakban az SBRCA rövidítéssel hivatkozunk (SBRCA = Simulation-based Reactive Control Algorithm).

Ebben a cikkben a digitális ikerpár részletes bemutatására nem térünk ki, csupán jelezzük, hogy a dolgozók irányításával kapcsolatos döntések meghozatalához a digitális ikerpár eseményvezérelt működési módját használjuk fel, valamint a szükséges összes aktuális rendszerinformációt a döntési szituációt kiváltó esemény bekövetkezésével egyidejűleg szolgáltatja a szimulációs modell. Cikkünk további részében a döntési helyzetekben alkalmazott döntési logikára helyezzük a hangsúlyt.

Az SBRCA-módszer a vizsgált gyártásirányítási feladatot úgy oldja meg, hogy a műszakonkénti előírt gyártandó termékmennyiségek dolgozókhoz rendelését, valamint a műveletek és munkaállomások összerendelését nem prediktív módszerrel előidőben tervezi meg, hanem eseményvezérelt módon a gyártási folyamat szituációival egyidőben megjelenő döntési kérdésekre reaktív módon adja meg a választ. A döntések meghozatalakor az irányító logika figyelembe veszi a valós rendszer állapotát, ideértve a dolgozók tényleges gyártási képességeit is.

3.1. A következő terméktípus kiválasztási módszere

Amikor egy dolgozó megérkezik a bemeneti (input) tárolóhoz, ki kell választani a következő gyártandó terméktípust. Ennek a döntési feladatnak a megoldására egy súlyozott többszemponútú értékelési g függvényen alapuló reaktív módszert alkalmazunk. Amikor a dolgozó megérkezik a bemeneti tárolóhoz, a digitális ikerpárban futó vezérlő algoritmus kiszámítja a g függvény értékét minden egyes kiválasztható terméktípusra, és a legnagyobb g függvényértékű jelöltet választja ki következő gyártandó terméktípusként. A g függvény definíciója a következő:

$$g(J_i) := \beta_1 b_1(J_i) + \beta_2 b_2(J_i) + \beta_3 b_3(J_i) + \beta_4 b_4(J_i) + \beta_5 b_5(J_i) \quad (1)$$

A definícióban alkalmazott szimbólumok jelentése a következő:

- J_i : Az i -edik jelölt gyártási tétel (munka), amely egy adott terméktípus adott konkrét példányának legyártási feladatát jelenti.
- $b_1(J_i)$ gyártási képesség: az aktuális dolgozó J_i munkára vonatkozó gyártási képessége [%]. Ez az érték kifejezi, hogy a dolgozó a munkához tartozó operációk műveleti idejét hány százalékban képes betartani.
- $b_2(J_i)$ gyártási rugalmasság: ez a számérték kifejezi, hogy a J_i munkát az adott műszakban a dolgozók hány százaléka tudja elvégezni [%].
- $b_3(J_i)$ a terméktípus várakozási aránya: ez a számérték kifejezi, hogy a J_i munka terméktípusa hány százalékban van jelen a még várakozó munkák között [%].

- $b_4(J_i)$ terméktípus inhomogenitása: ez a szempont azt fejezi ki, hogy arra törekszünk, hogy azt a terméktípust válasszuk, amelyeknek a gyártási rendszerben a legkevesebb jelenleg futó munkája van. A különböző terméktípusok egyidejű gyártása a terméktípusok heterogenitási fokának növelésével biztosítható. A $b_4(J_i)$ definícióját a felsorolás végén adjuk meg.
- $b_5(J_i)$ átlagos átfutási idő: a J_i munkához tartozó terméktípus átlagos átfutási idejének és az aktuális műszak összes terméktípusának átlagos átfutási idejének aránya [%]. Az összes felsorolt b tényező értéke százalékban van kifejezve.
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ a szempontok egyedi súlyai: a mi modellünkben ezek egész értékek a $[-5, 5]$ zárt intervallumból véve. Egy adott döntési szempont súlyának beállítása meghatározza az adott szempont figyelembevételének mértékét.

A $b_4(J_i)$ inhomogenitás precíz definiálásának előkészítése érdekében bevezetjük az alábbi jelöléseket:

- P_p jelöli a p -edik terméktípust.
- N_p jelöli a terméktípusok számát.
- $L(P_p)$ jelöli a P_p terméktípus jelenleg futó munkáinak számát (mennyi munkarabot gyártanak az adott időpontban a dolgozók ebből a típusból),
- $R(P_p)$ a P_p terméktípus éppen induló munkáinak száma:

$$R(P_p) := \begin{cases} 1, & \text{ha a } P_p \text{ terméktípus került kiválasztásra} \\ 0, & \text{egyébként} \end{cases} \quad (2)$$

Mivel minden döntési helyzetben csak egy munka választható ki indításra, így a következő összefüggést kapjuk:

$$\sum_{\mu=1}^{N_p} R(P_\mu) = 1 \quad (3)$$

Felhasználva ezeket a képleteket a következőképpen definiáljuk a P_p terméktípus valószínűségét:

$$\xi(P_p) = \frac{L(P_p) + R(P_p)}{\sum_{\mu=1}^{N_p} L(P_\mu) + 1} \quad (4)$$

Az információelméletben használt entrópia (Shannon, 1948) fogalmának adaptálásával bevezetjük a P_p terméktípus entrópiájának definícióját a következőképpen:

$$\eta(P_p) = -\xi(P_p) \log_2 \xi(P_p) \quad (5)$$

Ha a $P_{p(i)}$ terméktípusú J_i munka kerül kiválasztásra, akkor a rendszer entrópiája a következő képlettel számítható ki:

$$E(P_{P(i)}) = \sum_{p=1}^{N_p} \eta(P_p) = - \sum_{p=1}^{N_p} \xi(P_p) \log_2 \xi(P_p) \quad (6)$$

A rendszer entrópiája akkor lenne maximális, ha az összes terméktípus egyidejűleg azonos számú munkája lenne végrehajtás alatt a rendszerben. Ilyen ideális esetben az egyes P_p terméktípusok ξ valószínűsége a következő:

$$\xi(P_p) = \frac{1}{N_p} \quad (7)$$

Következésképpen a rendszer maximális entrópiája a következő:

$$E_{max} = - \sum_{p=1}^{N_p} \xi(P_p) \log_2 \xi(P_p) = \log_2 N_p \quad (8)$$

A $b_4(J_i)$ inhomogenitás faktor értékét százalékban a következőképpen definiáljuk:

$$b_4(J_i) := \frac{E(P_{P(i)})}{E_{max}} \quad (9)$$

Az inhomogenitás szempontjából azt a J_i munkát szeretnénk kiválasztani indításra, amelyik esetén a $b_4(J_i)$ érték maximális.

A bemutatott szempontokat figyelembe véve, amikor egy dolgozó megérkezik a bemeneti (input) tárolóhoz, akkor az irányító rendszer ki tudja jelölni a dolgozó számára a következő gyártandó terméktípust. Ezt a döntési feladatot a súlyozott többszemponútú értékelési g függvény segítségével reaktív elven meg tudjuk oldani. A digitális ikerpárból kinyert aktuális információk behelyettesítésével az irányító algoritmus kiszámítja a g függvény értékét minden egyes jelöltre és kiválasztja a maximális értékű jelöltet. Az irányító algoritmus a kiválasztási szempontok súlyának megadásával igény szerint finoman hangolható.

3.2. A következő munkaállomás kiválasztási módszere

Amikor egy dolgozó végrehajtott egy adott műveletet, ki kell választani azt a munkaállomást, amelyen a következő művelet végrehajtásra kerül. Ennek a döntési feladatnak a megoldására is szintén egy súlyozott többszemponútú értékelési függvényen alapuló reaktív módszert alkalmazunk. Amikor a dolgozónak egy olyan műveletet kell végrehajtania, amelyikhez több alkalmas munkaállomás is rendelkezésre áll, akkor a digitális ikerpárban futó irányító algoritmus kiszámítja egy z függvény aktuális értékét minden egyes kiválasztható munkaállomásra és a legnagyobb z függvényértékű jelöltet választja ki. A z függvény definíciója a következő:

$$z(M_m) := \alpha_1 c_1(M_m) + \alpha_2 c_2(M_m) \quad (10)$$

A definícióban alkalmazott szimbólumok jelentése a következő:

- M_m : Az m -edik jelölt alkalmas munkaállomás.
- $c_1(M_m)$: az M_m munkaállomás előtt aktuálisan várakozó dolgozók száma [db].
- $c_2(M_m)$: az M_m munkaállomáson az aktuális műszakban végrehajtott műveletek száma [db].
- α_1, α_2 : egész súlyok a $[0, 100]$ zárt intervallumból. Egy adott szempont súlyának beállítása határozza meg az adott szempont figyelembevételének a mértékét.

A bemutatott irányítási algoritmusokkal kiegészített digitális ikerpárra alapozott szimuláció egyértelműen meghatározza a dolgozói feladatok végrehajtását. A szimuláció során az összes döntési változó a reaktív ütemezés szerint kapja meg az értékét a bekövetkező események kezelésekor:

4. Néhány futási eredmény

A bemutatott döntési módszerek teszteléséhez kidolgoztunk és implementáltunk egy Plant Simulation környezetben működő szimulációs modellt. Ebben a cikkben illusztratív példaként bemutatunk egy szimulált gyártási tesztkörnyezetet, amelynek legfontosabb jellemzői a következők:

- Műszakok száma: 5
- Műszakonkénti dolgozók száma: 5
- Műszakok és dolgozók összerendelése: műszakonként változó, de előre megtervezett és rögzített.
- Terméktípusok száma: 8
- Terméktípusonként gyártandó mennyiségek (munkák száma): műszakonkénti bontásban egyedileg meghatározott gyártandó darabszám van előírva terméktípusonként.
- Munkahelycsoportok száma: 3
- Munkahelycsoportonkénti munkahelyek száma: 2
- Operációk műveleti ideje: a dolgozók átlagos képességeitől függ.
- Termelési tervek: előzetes tervek alapján műszakonként adott.

A felsorolt beállításokkal különböző szimulációs vizsgálatok készültek a javasolt reaktív többszemponitú irányítási módszerek hatékonyságának mérése érdekében. A vizsgálat során ugyanazoknak a döntési helyzeteknek a kezelésére több működtetési stratégiát is kipróbáltunk.

A következő munka kiválasztására három módszert használtunk:

- FJS: az első alkalmas (a dolgozó által gyártható) munka kiválasztása.
- RJS: véletlenszerűen kijelölt alkalmas munka kiválasztása.
- GJ: az általunk javasolt többszemponitú módszer.

4.1. A munkaállomás-választás paramétereinek vizsgálata

Az alternatív munkaállomások közötti választásra általunk javasolt módszert a továbbiakban a GW rövidítéssel jelöljük. A GW-módszerünk célja a munkahelyek előtt dinamikusan kialakuló várakozási sorok hosszának minimalizálása, a dolgozók munkahelyre való várakozási idejének minimalizálása és a munkahelyek terheltségének kiegyenlítése. A GW-módszer paramétereinek beállítására önálló szimulációs vizsgálatokat végeztünk. A tesztkörnyezetben végzett vizsgálatok során a munkaválasztási stratégia FJS típusú volt azért, hogy az α paraméterek értékei függetlenek legyenek a β paraméterek értékeitől.

A munkahely-kiválasztási stratégiát különböző esetekre (A és B) vizsgáltuk. Az egyes esetekben különböző termelési tervet és műszakbeosztást alkalmaztunk.

Az α_1 és α_2 paraméterek különböző értékeivel való vizsgálatok eredményére mutat példát az 1. táblázat. A cél olyan értékpáros meghatározása volt, amelynél a gyártott mennyiség magas, valamint a dolgozók munkahelyre való várakozási ideje alacsony. A dolgozók átlagos várakozási idejét a dolgozók hasznos időalapjához viszonyítottuk.

1. táblázat. Futási eredmények különböző α paraméterekkel

		Gyártott darabszám [db]				Dolgozók átlagos várakozási ideje a munkahelyek előtt [%]			
		8 dolgozó		15 dolgozó		8 dolgozó		15 dolgozó	
Súlyok		Termelési terv		Termelési terv		Termelési terv		Termelési terv	
α_1	α_2	A	B	A	B	A	B	A	B
100	40	734	839	1061	1175	3,01	4,87	25,50	24,20
90	50	734	840	1061	1177	3,01	4,75	24,71	24,17
70	90	734	843	1061	1181	2,99	4,53	24,71	23,96
60	30	734	840	1061	1177	3,01	4,75	24,75	24,17
50	20	734	839	1061	1175	3,01	4,87	24,71	24,20
40	100	734	841	1058	1178	3,01	4,58	24,71	24,15
90	60	734	841	1061	1177	3,01	4,75	24,58	24,17
30	100	734	841	1058	1180	3,14	4,58	24,71	24,04
80	30	734	839	1061	1175	3,01	4,87	24,71	24,20
1	100	726	827	1046	1160	4,06	5,91	24,71	25,04

Az α_1 és α_2 paraméterek legkedvezőbb értékeinek kiválasztásakor az elsődleges szempont a gyártott mennyiség volt, és másodlagos szempontként a várakozási időrátát vettük alapul. Az 1. táblázat alapján a legjobb eredményt az $\alpha_1 = 70$ és $\alpha_2 = 90$ kombináció érte el. A további vizsgálatok során ezt az értékpárost használtuk.

4.2. A munkaválasztás paramétereinek vizsgálata

A javasolt GJ-módszer bemenő β paraméterértékeinek változtatásával befolyásolható a dolgozó és a munka dinamikus összerendelése, amely a gyártórendszer produktivitását erőteljesen befolyásolja.

Az egyes döntési szempontokhoz tartozó súlyok mértékét a β értékei adják meg. Ezek finomhangolására szintén szimulációs vizsgálatokat végeztünk. A szimulációs vizsgálatok bemeneti adatait és kiindulási helyzetét rögzítettük, és a GJ-módszer döntési szempontjait különböző súlyal vettük figyelembe. A β paraméterek a $[0, 5]$ tartományból származó egész értékek összes kombinációját megadták. A paraméterek hatására a rendszer termelékenysége megváltozott. A cél az volt, hogy megtaláljuk a β paraméterek legjobb értékeit, amelyekkel az előállított termékek mennyisége maximalizálható és a rendszer műszakjainak végén fennmaradó idő összege (tartalékidő) maximalizálható. Néhány tipikus eredményt tartalmaz a 2. táblázat.

2. táblázat. Futási eredmények különböző β paraméterekkel

Sorszám	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	Tervezett mennyiség [db]	Gyártott mennyiség [db]	Maradék idő [db]
1	4	2	2	5	2	1044	993	9,10
2	1	4	2	5	5	1044	987	1,98
3	3	4	1	3	4	1044	990	0,20
4	4	4	5	3	3	1044	992	2,48
5	2	3	4	3	5	1044	993	5,06
6	5	4	5	3	2	1044	993	10,32
7	1	3	4	2	4	1044	987	3,74
8	4	3	2	4	5	1044	992	6,14
9	5	4	2	2	1	1044	989	10,47
10	5	1	2	1	4	1044	988	6,58
11	2	4	2	3	5	1044	991	1,69
12	3	1	2	3	1	1044	992	10,75
13	4	1	1	4	4	1044	987	9,68
14	4	5	2	2	2	1044	991	11,03
15	2	5	1	4	2	1044	985	5,75
16	5	1	1	1	5	1044	982	9,83
17	2	4	3	5	2	1044	988	2,61

A legjobb szimulációs eredményt a következő paraméter-kombináció eredményezte:
 $\beta_1 = 5, \beta_2 = 4, \beta_3 = 5, \beta_4 = 3, \beta_5 = 2$.

A vázolt szimulációs vizsgálatok segítségével sikerült megtalálni az α és β paraméterek azon értékeit, amelyek biztosítják a reaktív irányítási algoritmusok leghatékonyabb működését.

4.3. A javasolt munkaválasztási módszer összehasonlítása más stratégiákkal

Megvizsgáltuk azt is, hogy az FJS, RJS és a GJ munkaválasztási stratégiák milyen hatással vannak a gyártórendszer termelékenységére. A vizsgálat során többféle különböző termelési tervet vettünk alapul a célfüggvény-értékek összehasonlításakor. Példaként bemutatunk néhány jellemző futási eredményt a 3. táblázatban. Három különböző (A, B és C) termelési terv teljesítésére irányuló gyártási folyamat szimulációját valósítottuk meg az FJS, RJS és GJ munkaválasztási stratégiák alkalmazásával. A vizsgálatokat a gyártandó mennyiségek növelésével (A_n , B_n , C_n) és csökkentésével (A_{cs} , B_{cs} , C_{cs}) is elvégeztük.

3. táblázat: Munkaválasztási stratégiák összehasonlítása

	Tervezett mennyiség [db]	Munkaválasztási stratégiák					
		FJS		RJS		GJS	
		Gyártott mennyiség [db]	Szabad időkapacitás [perc]	Gyártott mennyiség [db]	Szabad időkapacitás [perc]	Gyártott mennyiség [db]	Szabad időkapacitás [perc]
A	958	927	20,02	905	0	957	115,40
A_n	1230	928	0	895	0	1000	0
A_{cs}	738	738	700,22	738	567,16	738	886,89
B	950	876	24,74	852	15,00	926	117,22
B_n	1190	869	0	855	0	967	0
B_{cs}	715	715	600,92	715	527,76	715	908,9
C	945	898	8,03	867	0	927	134,21
C_n	1183	927	134,2	862	0	971	0
C_{cs}	712	712	706,17	712	641,16	712	916,81

Az elvégzett szimulációs vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a javasolt GJ többszempon্তু munkaválasztási stratégia hatékonyabban működik, mint az FJS és az RJS irányítási stratégiák. A GJ legfőbb előnye az FJS és RJS stratégiákkal szemben az, hogy a munka és a dolgozó (operátor) dinamikus összerendelése során a gyártórendszer környezetének mindenkor aktuális állapotait is figyelembe veszi. A döntési szempontokat a reaktív algoritmusok az aktuális paraméterértékek alapján veszik figyelembe, ezáltal valós időben és szabályozott módon dinamikusán rendelik össze a dolgozót és a munkát.

5. Összefoglalás és következtetések

A cikkben bemutattuk egy rugalmas gyártórendszert dolgozóinak irányítási feladatát. A gyártási folyamat hatékonyságának vizsgálatára létrehoztunk egy digitális-ikerpár-konceptióra alapozott szimulációs modellt. A dolgozói munkavégzésre alapozott gyártási folyamatok hatékonyságának növelésére kidolgoztunk egy többszemponútú reaktív irányítási módszert, amely eseményvezérelt reaktív algoritmusok segítségével kiválasztja a dolgozó által gyártandó következő terméktípust és a műveletek végrehajtására kijelöli az adott szituációban legalkalmasabbnak tűnő munkaállomást.

A javasolt saját módszerünk eredményét összehasonlítottuk két olyan módszerrel, melyek a dolgozókra bízott döntéshozatalt képviselték. Az elvégzett vizsgálatok igazolták, hogy a javasolt többszemponútú döntési algoritmusok hatékonyabban oldják meg az irányítási feladatokat. A szimulációs vizsgálataink eredményei alátámasztják azt is, hogy a dinamikus ütemezési modellekben meg kell jelennie integráltan az egyéni dolgozói képességeknek azért, hogy a rendszer hatékonyságát tovább lehessen növelni.

Általánosítva az elért eredményeket megfogalmazható, hogy a bemutatott modell és algoritmusok hatékonyan meg tudják oldani a rugalmas gyártási rendszerek integrált ütemezési és irányítási problémáját azokban az esetekben is, ahol az emberi erőforrások különböző egyéni képességekkel jellemezhetők. A javasolt algoritmusok rugalmasan és hatékonyan tudják kezelni a változó követelményeket, a változó erőforráskorlátokat, a bizonytalanságokat és a váratlan eseményeket.

A javasolt megközelítés lényege, hogy az adott mindenkori termelési tervek végrehajtását a digitális ikerpár szimulációs szolgáltatásába beágyazott reaktív algoritmusok irányítják azért, hogy a szükséges döntéseket a gyártási folyamatok végrehajtásával egy időben hozzák meg. A bemutatott gyártásirányítási fázis és az azt megelőző termelésstervezési szakasz együtt egy kétszintű döntési hierarchiát hoz létre a termelési tevékenységek optimalizálására. A javasolt modell, a megoldási megközelítés és az algoritmusok a gyakorlatban is használhatók.

Irodalom

- [1] Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., Wahlster, W.: *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*. Forschungsunion, Frankfurt/Main, 2013.
- [2] Elmaraghy, H., Elmaraghy, W.: Smart Adaptable Assembly Systems. *Procedia CIRP*, 44, 2016, pp. 4–13., <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.107>.
- [3] Faccio, M.: The impact of production mix variations and models varieties on the parts-feeding policy selection in a JIT assembly system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72 (1–4), pp. 543–560. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5675-0>

- [4] Ferjani, A., Ammar, A., Pierreval, H., Elkosantini, S.: A simulation-optimization based heuristic for the online assignment of multi-skilled workers subjected to fatigue in manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, pp. 663–674. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.02.008>
- [5] Brucker, P.: *Scheduling Algorithms*. Springer, 2007.
- [6] Garey, M., R., Johnson, D., S., Sethi, R.: The Complexity of Flowshop and Jobshop Scheduling. *Mathematics of Operations Research*, Vol. 1, No. 2, 1976, pp. 117–129. <https://doi.org/10.1287/moor.1.2.117>
- [7] Kulcsár, Gy., Erdélyi, F.: A New Approach to Solve Multi-Objective Scheduling and Rescheduling Tasks. *International Journal of Computational Intelligence Research*, 3 (4), 2007, pp. 343–351., <https://doi.org/10.5019/j.ijcir.2007.115>.
- [8] Kulcsár Gy.: *Ütemezési modell és heurisztikus módszerek az igény szerinti tömeggyártás finomprogramozásának támogatására*. Doktori (PhD-) értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc-Egyetemváros, 2007.
- [9] Kulcsárné F. M.: *Kiterjesztett modellek és módszerek erőforrás-korlátos termelésütemezési feladatok megoldására*. Doktori (PhD-) értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc-Egyetemváros, 2017.
- [10] Kulcsár Gy., Kulcsárné F. M.: Kiterjesztett termelésprogramozási modell erőforráskorlátos ütemezési feladatok megoldására. *Multidiszciplináris Tudományok*, 4, 1. sz., 2014, pp. 19–30.
- [11] Botta-Genoulaz, V.: Hybrid flow shop scheduling with precedence constraints and time lags to minimize maximum lateness. *International Journal of Production Economics*, Vol. 64, 2000, pp. 101–111, [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(99\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(99)00048-1).
- [12] Low, C.: Simulated annealing heuristic for flow shop scheduling problems with unrelated parallel machines. *Computers and Operations Research*, Vol. 32, 2005, pp. 2013–2025, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.01.003>.
- [13] Demir, Y., İşleyen, S. K.: Evaluation of mathematical models for flexible job-shop scheduling problems. *Applied Mathematical Modelling*, Volume 37, Issue 3, 2013, pp. 977–988, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.03.020>.
- [14] VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen*. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1993.
- [15] McCall, J.: Genetic algorithms for modelling and optimisation. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 184 (1), 2005, pp. 205–222. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2004.07.034>
- [16] Tóth N., Kulcsár Gy.: Rugalmas gyártórendszer hatékonyságának növelése dolgozói képességek szimulációjára alapozott termelésstervezési módszerrel. *Multidiszciplináris Tudományok*, 10. kötet. 3 sz., 2020, pp. 130–142. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.3.17>