

**Vedecká rada Fakulty elektrotechniky a informatiky
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave**

Ing. Juraj Švančara

**SIMULAČNÁ ANALÝZA MNOHOVÝROBKOVÉHO
VÝROBNÉHO SYSTÉMU**

Autoreferát dizertačnej práce

na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor
v odbore doktorandského štúdia: 9.2.7 Kybernetika

Bratislava, august 2012

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Juraj Švančara**

Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. Zdenka Králová, PhD.**

Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: prof. Ing. Ivan Brezina, CSc.
Fakulta hospodárskej informatiky, EU v Bratislave
Dolnozemská cesta 1/b, 852 35 Bratislava

doc. Ing. Vladimír Jerz, PhD.
Strojnícka fakulta, STU v Bratislave
Námestie slobody 17, 812 31 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa

Obhajoba dizertačnej práce sa koná
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia, vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie dňa číslo odboru: 9.2.7, odbor doktorandského štúdia: Kybernetika na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Predseda spoločnej odborovej komisie:

.....
Ústav riadenia a priemyselnej informatiky STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Obsah

1. Úvod	1
2. Mnohovýrobné výrobné systémy typu High-Mix Low-Volume	2
3. Simulačná analýza mnohovýrobných výrobných systémov	2
3.1. Oblasti analýzy	2
3.1.1. Riadenie výroby	3
3.1.2. Rozvrhovanie výroby	3
3.1.3. Typy rozvrhovacích úloh	4
3.2. Simulácia výrobných systémov typu HMLV	5
4. Ciele dizertačnej práce	6
5. Návrh a realizácia nových prístupov k simulačnému modelovaniu a rozvrhovaniu výroby v mnohovýrobných výrobných systémoch	7
5.1. Reprezentácia výrobkov v simulačných modeloch	7
5.1.1. Prepojenie simulačného a databázového systému	7
5.2. Rozvrhovanie výroby a určovanie veľkosti výrobných dávok	10
5.2.1. Offline optimalizácia rozvrhovania výroby	10
5.2.1.1. Rozvrhovanie s využitím permutačného algoritmu	10
5.2.1.2. Rozvrhovanie s využitím genetického algoritmu	12
5.2.2. Online optimalizácia rozvrhovania výroby	18
5.3. Experimentálne overenie navrhnutých prístupov rozvrhovania výroby	22
5.3.1. Prístupy offline optimalizácie	23
5.3.2. Prístupy online optimalizácie	29
6. Záver	33
Použitá literatúra	34

1. Úvod

Orientácia výroby na široké spektrum zákazníkov a ich špecifické požiadavky predpokladá nasadenie modernej technológie s možnosťou rýchleho prestavenia výrobných zariadení na iný variant výrobu, t.j. pružný výrobný systém. Súčasne prináša nové výzvy v oblasti plánovania a riadenia výroby, kde sa mnohé dovtedy využívané stratégie ukázali ako veľmi náročne realizovateľné či dokonca nepoužiteľné. Dôsledkom prechodu k takémuto typu organizácie výroby je výrazné zvýšenie prevádzkových nákladov výrobných spoločností. Optimalizácia výrobných systémov s veľkým sortimentom výrobkov sa preto stala aktuálnym predmetom výskumu v oblasti plánovania a riadenia výroby.

Vo výrobných systémoch s veľkým sortimentom výrobkov, typických najmä pre elektronický či automobilový priemysel, je však veľmi náročné pomocou konvenčných metód analyzovať jednotlivé procesy a zachytiť všetky okolnosti, ktoré na ne vplývajú. Užitočným, avšak v našej podnikovej praxi stále málo využívaným nástrojom je simulácia s využitím vhodného softvéru, ktorá umožňuje overiť fungovanie výrobného systému pri rôznych variantoch organizácie a riadenia výroby na simulačnom modeli reprezentujúcom reálny výrobný systém.

Simuláciu je pritom možné použiť priamo ako hlavný nástroj analýzy, prípadne nepriamo ako podporný nástroj integrovaný do nadradeného systému. Obidvom týmto prístupom využitia simulácie nebolo doposiaľ venované dostatočné množstvo odborného záujmu v oblastiach analýzy a optimalizácie mnohovýrobových výrobných systémov.

Predkladaná práca má preukázať možné prínosy využitia simulácie pri analýze a optimalizácii mnohovýrobových výrobných systémov, a to najmä v oblastiach rozvrhovania výroby a určovania výrobných dávok.

Práca je členená nasledovne.

Druhá kapitola prináša definíciu mnohovýrobových výrobných systémov typu High-Mix Low-Volume.

Tretia kapitola je venovaná teórii rozvrhovania výroby a simulačnej analýze mnohovýrobových výrobných systémov so zameraním na optimalizáciu rozvrhovania výroby a určovanie veľkosti výrobných dávok.

Štvrtá kapitola prináša formuláciu cieľov dizertačnej práce.

V piatej kapitole je uvedený návrh a realizácia nových prístupov v oblasti rozvrhovania výroby a určovania veľkosti výrobných dávok v mnohovýrobových výrobných systémoch s využitím simulácie.

V závere sú zhrnuté hlavné výsledky a prínosy práce.

2. Mnohovýrobnkové výrobné systémy typu High-Mix Low-Volume

Mnohovýrobnkové výrobné systémy typu HMLV (High-Mix Low-Volume Production Systems) sú definované ako výrobné systémy schopné vyrábať bežne viac ako 600 typov výrobkov pri výrobných objednávkach od 1 do 1000 kusov jedného typu, rozdelených do charakteristických podskupín – výrobných rodín [Mahoney, 1997].

Napríklad v podmienkach modernej výroby napájacích zdrojov, ktorá bola predmetom modelovania v tejto práci, si zákazníci sami konfigurujú požadovaný výrobok kombináciou dostupných parametrov a iných vlastností. Vyrábané napájacie zdroje sa líšia vstupno-výstupnými parametrami, typom konektorových pripojení, či vonkajším dizajnom, pričom možných kombinácií uvedených vlastností je takmer nekonečný počet. Veľkosť objednávok jedného typu výrobku sa pohybuje cca od 10 do 500 kusov. Jednotlivé typy výrobkov sú vo výrobnom systéme rozdelené do tzv. výrobných rodín. V jednej rodine sú zastúpené produkty, ktorých nosným a základným prvkom je z hľadiska dizajnu rovnaká doska plošného spoja (DPS). Početnosť druhov konečných výrobkov v jednej rodine predstavuje niekoľko stoviek, ba dokonca tisícok rôznych typov výrobkov.

Plánovanie a rozvrhovanie výroby v týchto podmienkach si vyžaduje vývoj a implementáciu špeciálnych prístupov, metód a prostriedkov, aby bola zabezpečená efektívnosť výroby.

Analýza HMLV systémov v oblasti plánovania, rozvrhovania a operatívneho riadenia výroby sa preto zameriava práve na špecifiká, ktoré tento typ výroby prináša v teórii úzkych miest, rozvrhovaní výroby, teórii zásob, výrobných dávok, prepravných dávok či výrobných kapacít s cieľom minimalizácie relatívnych nákladov závislých od variability produktov.

3. Simulačná analýza mnohovýrobnkových výrobných systémov

3.1 Oblasti analýzy

Plánovanie a riadenie výroby vo výrobnom podniku je zabezpečované na niekoľkých úrovniach. Jednotlivé úrovne predstavujú samostatné oblasti, ktoré je nutné pri optimalizácii výroby analyzovať. Úlohou plánovania a riadenia výroby je zabezpečiť plynulý tok materiálu výrobným procesom.

Základné činnosti plánovania a riadenia výrobného systému podniku je možné rozdeliť do piatich úrovní - Strategické plánovanie, Plánovanie výroby, Plánovanie finálnej výroby, Plánovanie potreby materiálu, Operatívne riadenie výroby. [Arnold, 2004]

3.1.1 Operatívne riadenie výroby

Operatívne riadenie výroby zodpovedá za realizáciu plánu finálnej výroby vo výrobnom procese, kontrolu jeho plnenia a riadiace zásahy pri odchýlkach od plánu. Rozhoduje o konkrétnom toku materiálu cez výrobný systém a riadi priradovanie výrobných zákaziek na pracoviská – vytvára a naplňa výrobný rozvrh. Predstavuje najdetailnejší pohľad na výrobu a denne sa koriguje.

V mnohovýrobových výrobných systémoch, kde dochádza k častým zmenám využitia výrobných liniek, objemu rozpracovanej výroby, počtu typov výrobkov na pracoviskách atď., je rozvrhovanie a riadenie výroby ešte náročnejšie. V HMLV systémoch sú považované za kľúčové a predstavujú hlavnú oblasť analýzy.

3.1.2 Rozvrhovanie výroby

Rozvrhovanie výroby je dôležitou súčasťou plánovania výrobných procesov. Úlohou výrobného rozvrhovania je minimalizácia výrobných nákladov, minimalizácia priebežných výrobných časov a maximalizácia výrobných kapacít určením, **kedy** sa má spracovať, **ktorá zákazka**, na **ktorom pracovisku**. [Pinedo, 2002] Rozvrhovanie výroby je teda priradovanie úloh (výrobných zákaziek) k pracoviskám (výrobným zdrojom) a určovanie poradia, v akom budú priradené úlohy spracované. [Schen, 2006]

Rozvrhovanie výroby je zamerané na dve hlavné úlohy:

1. Priradenie úloh k výrobným zdrojom (vytvorenie zásobníka úloh pred pracoviskami). Toto je takzvaný problém priradenia (dopredné priradenie, spätné priradenie) alebo problém zadávania do výroby. Jeho cieľom je navrhnuť profil vyťaženia kapacitných jednotiek. Priradenie (*loading*) by malo zabezpečiť rovnomerné vyťaženie jednotlivých zdrojov, pracovísk. Pri priradovaní sa získava len hrubý rozvrh, využívajú sa priemerné časy čakania a transportu.
2. Určenie poradia spracovania priradených úloh, so snahou minimalizácie priebežného času výroby a maximalizácie využitia zariadení (*sequencing*).

V tomto kroku sa už realizuje presný krátkodobý rozvrh s uvažovaním všetkých interakcií jednotlivých výrobkov a s presným výpočtom výrobných a nastavovacích časov. [Bubeník, 1999]

3.1.3 Typy rozvrhovacích úloh

1. Paralelné procesy (stroje, výrobné zariadenia)
 - rozvrhovanie na jednom procese (jednostupňová výroba)
 - rozvrhovanie na viacerých procesoch (viacstupňová výroba)
2. Dedikované procesy (výrobné stupne)
 - úlohy sa rozdeľujú do skupín (výrobných zákaziek)
 - každá úloha danej zákazky prebieha na inom procese
 - rozlišujeme tri základné typy týchto úloh (tab. 3.1)

Tab. 3.1 Základné typy úloh rozvrhovania výroby

Typ úlohy	Počet úloh v rámci výrobných zákaziek	Poradie úloh v rámci výrobných zákaziek
Open shop	Rovnaký pre všetky výrobné zákazky	Ľubovoľné
Flow shop	Rovnaký pre všetky výrobné zákazky	Pevne dané, rovnaké pre všetky výrobné zákazky
Job shop	Rôzny pre jednotlivé výrobné zákazky	Pevne dané, rôzne pre jednotlivé zákazky

Neoddeliteľnou súčasťou problematiky riadenia výroby je popri rozvrhovacích procesoch problematika stanovenia veľkostí výrobných, dopravných a spracovacích dávok. Ich veľkosť v koordinácii s rozvrhovaním a priestorovou organizáciou výroby významne ovplyvňuje skladovacie zásoby, zásoby rozpracovanej výroby či dĺžku priebežných časov. Výrobná, dopravná a spracovacia dávka sú definované nasledovne: [Košturiak, 1993]

- **výrobná dávka** – počet kusov, ktorý sa nepretržite spracúva na jednom pracovisku s jednorazovým vynaložením času na nastavenie tohto pracoviska
- **prepravná dávka** – počet kusov, ktoré sa dopravujú spoločne od jedného pracoviska k druhému
- **spracovacia dávka** – počet kusov, na ktorých sa na jedno upnutie vykoná daná operácia

3.2. Simulácia výrobných systémov typu HMLV

Simulácia je výskumná metóda, ktorej podstata tkvie v tom, že skúmaný dynamický systém je nahradený jeho simulačným modelom, s ktorým sa vykonávajú pokusy, s cieľom získania informácií o pôvodne skúmanom systéme (podľa definície O. J. Dahla z roku 1966). [Jerz, 2008]

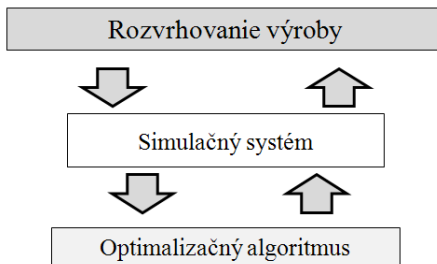
Simuláciu výrobných systémov možno definovať ako experimentovanie s počítačovým modelom reálneho výrobného systému s cieľom analýzy a optimalizácie priebehu výroby. [IPA Slovakia]

Využitie simulácie pri rozvrhovaní systémov typu HMLV

Najväčším obmedzením pri optimalizácii výrobných rozvrhov v mnohovýrobových výrobných systémoch pomocou klasických analytických prístupov je potreba dokonalej znalosti analyzovaného systému a vytvorenie matematického modelu. Pri vytváraní matematického modelu je pre veľkú zložitosť systémov HMLV potrebné pristúpiť k viacerým obmedzeniam a zjednodušeniam analyzovaných systémov, čím sa značne naruša dôveryhodnosť výsledkov resp. daný prístup nie je možné zaviesť do praxe. V niektorých prípadoch sa preto javí použitie analytických prístupov pri optimalizácii mnohovýrobových výrobných systémov ako veľmi nepresné či dokonca nepoužiteľné.

Naopak viaceré prístupy poukazujú na výhody použitia heuristických, fuzzy resp. genetických algoritmov pri optimalizácii systémov typu HMLV. Aj pri využívaní týchto prístupov je však potrebná analytická resp. matematická reprezentácia analyzovaných systémov.

Najmodernejšie prístupy v oblasti analýzy mnohovýrobových výrobných systémov poukazujú na výhody využívania dynamickej simulácie systémov s použitím vhodných softvérov. Výrobný systém je reprezentovaný simulačným modelom, ktorý zachytáva všetky jeho dôležité dynamické vlastnosti vrátane náhodných javov či poruchovosti výrobných zariadení, a to bez nutnosti významných obmedzení či zjednodušení. Simulácia systémov však nie je považovaná za optimalizačnú metódu v pravom slova zmysle. Preto bol navrhnutý prístup priameho prepojenia simulačných systémov s modernými optimalizačnými metódami (obr. 3.1). Pomocou takéhoto prístupu je možné hovoriť o optimalizácii mnohovýrobových výrobných systémov s využitím simulácie.



Obr. 3.1. Spolupráca rozvrhovacieho a simulačného systému s optimalizačným algoritmom pri rozvrhovaní výroby [Bubeník, 1997]

Problémom pri reprezentácii mnohovýrobných výrobných systémov pomocou simulačných modelov však býva spôsob prenesenia veľkého množstva parametrov reprezentujúcich výrobný systém HMLV do simulačného modelu. Vedecké práce sa tomuto problému venujú veľmi málo a analyzované výrobné systémy, ktoré prinášajú, sú vo svojich parametroch (zložení množiny výrobných zákaziek) nemenné, čo je v rozpore s reálnymi mnohovýrobnými výrobnými systémami, kde sa výrobné zákazky prechádzajúce výrobným systémom menia prakticky denne.

4. Ciele dizertačnej práce

Ciele dizertačnej práce sú definované nasledovne:

- Návrh a realizácia nových prístupov reprezentácie veľkého sortimentu výrobkov a výrobných rodín v simulačných modeloch mnohovýrobných výrobných systémov.
- Návrh nových prístupov v rozvrhovaní výroby a určovaní veľkosti výrobných dávok so zameraním na heuristické modely a algoritmy.
- Programová realizácia navrhnutých postupov v simulačnom softvéri Witness a ich overenie na simulačnom modeli reálneho výrobného procesu.

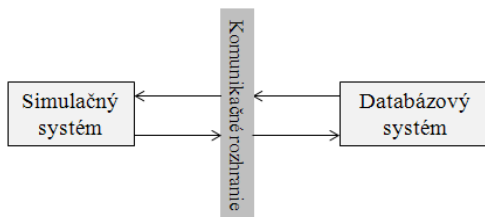
5. Návrh a realizácia nových prístupov k simulačnému modelovaniu a rozvrhovaniu výroby v mnohovýrobových výrobných systémoch

5.1 Reprezentácia výrobkov v simulačných modeloch HMLV systémov

Základným predpokladom využívania simulácie pri zdokonaľovaní výrobných systémov je schopnosť simulačného modelu dôveryhodne reprezentovať modelovaný systém. Stovky až tisíce typov výrobkov vyrábaných v mnohovýrobových výrobných systémoch sa navzájom líšia operačnými a nastavovacími časmi na jednotlivých zariadeniach, výrobnými dávkami, poruchovosťou, technologickým postupom, prioritou, či zaradením do príslušnej výrobkovej rodiny. Pri neustále sa meniacom počte, type a veľkosti objednávok zákazníkov je prakticky nemožné parametre výrobkov ručne zadávať do simulačného modelu pri jeho tvorbe. Preto je potrebné nájsť prakticky využiteľný spôsob, ako v simulačnom modeli reprezentovať jednotlivé typy výrobkov, výrobkové rodiny, zákazky, ako aj im prislúchajúce nastavenia výrobných zariadení a ich dynamické zmeny.

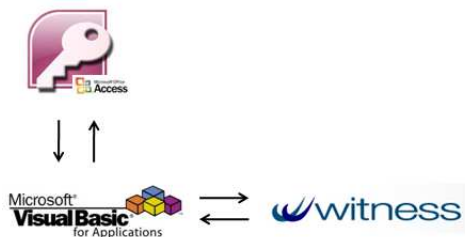
5.1.1 Prepojenie simulačného a databázového systému

Typy výrobkov a k nim prislúchajúce parametre sú zvyčajne uložené v databázach podnikových informačných systémov. Návrh prepojenia simulačného systému a databázového systému je založený na myšlienke automatického importovania dát potrebných na simulačné experimenty z databázového systému do simulačného modelu podľa aktuálneho zloženia výrobného plánu (rozvrhu). Principiálna schéma prepojenia simulačného systému a databázového systému je zobrazená na obr. 5.1.



Obr. 5.1 Schéma prepojenia simulačného a databázového systému

V programových aplikáciách, ktoré uvádzame v tejto práci, sú na realizáciu predstaveného prístupu využité simulačný systém Witness a databázový systém MS Access. Prepojenie systémov je zabezpečené príkazmi OLE (Object Linking and Embedding) v jazyku Visual Basic for Applications (VBA) (obr. 5.2).



Obr. 5.2 Schéma prepojenia softvérových produktov

Simulačný model reprezentuje reálny mnohovýrobový výrobný systém, pričom zachytáva všetky jeho relevantné parametre. V modeli je pevne zadaná štruktúra výrobnjej linky a výrobné postupy.

Parametre, akými sú napr. operačné a nastavovacie časy na jednotlivých výrobných stupňoch linky, materiálové toky, poruchovosť, priorita výrobkov a ďalšie, ktoré sú závislé od konkrétneho typu výrobku, nie sú v simulačnom modeli zadané napevno, ale menia sa v závislosti od typov výrobkov prechádzajúcich v aktuálnom časovom intervale výrobnou linkou.

Táto požiadavka je riešená v simulačnom modeli tak, že všetky výrobkové typy v rámci všetkých výrobových rodín sú reprezentované jediným typom virtuálneho výrobku (v simulačnom systéme Witness jedným elementom typu *part*) s unikátnymi hodnotami atribútov.

Na začiatku simulačných experimentov preto nie je potrebné generovať presný počet virtuálnych výrobkov (elementov typu *part*) a ku každému množstvo premenných veličín (elementov typu *variables*), ale stačí vytvoriť jediný virtuálny výrobok s potrebným počtom atribútov (elementov typu *attribute*), ktorých hodnoty sa budú automaticky meniť na základe aktuálneho zloženia výrobných zákaziek (typov výrobkov).

Atribúty virtuálneho výrobku v sebe nesú informácie o type konkrétneho výrobku, zaradení výrobku do konkrétnej výrobovej rodiny, operačné a nastavovacie časy na jednotlivých výrobných stupňoch, mieru poruchovosti, informáciu o priorite výrobku, čas vstupu výrobku do výrobného systému atď. Atribúty priradené k jedinému virtuálnemu

výrobku, teda vytvárajú množinu unikátnych výrobkov reprezentujúcich všetky výrobné zákazky vstupujúce do výrobného systému.

Uvedené riešenie umožňuje pred začiatkom navrhnutých simulačných experimentov automaticky priradiť všetky parametre prislúchajúce výrobkom z výrobného rozvrhu k atribútom virtuálneho výrobku simulačného systému.

Takýto spôsob importovania dát do simulačného modelu výrazne eliminuje časovú náročnosť reprezentácie veľkého počtu výrobkov v modeloch mnohovýrobných výrobných systémov, sprehľadňuje aktuálne zloženie výrobných zákaziek reprezentovaných v simulačnom modeli, a súčasne umožňuje archivovať v databázovom systéme všetky výrobkové typy, tzn. aj také, ktoré aktuálne nevstupujú do výrobného systému.

Navrhovaný prístup priameho prepojenia simulačného systému s databázovým systémom bol programovo realizovaný a overený v práci [Švančara, 2010a], kde bol databázový systém prepojený so simulačným modelom časti výrobnej linky z automobilovej výroby. Model výrobného systému bol vytvorený v simulačnom systéme Witness, databázový systém bol vytvorený v systéme MS Access. Prepojenie systémov je zabezpečené príkazmi OLE v jazyku Visual Basic for Application ako napr.:

DAO.Database - adresuje aktuálne používanú databázu

DAO.Recordset - adresuje všetky záznamy uložené v databáze

db.OpenRecordset - adresuje konkrétne dáta uložené v konkrétnej tabuľke databázy, atď.

V práci [Švančara, 2010c] bola programová realizácia z publikácie [Švančara, 2010a] rozšírená o výstupný modul simulačného systému, vďaka ktorému sú výsledky simulačných experimentov automaticky exportované zo simulačného modelu do databázového systému, kde ich je následne možné ďalej spracovávať, analyzovať a porovnávať s výsledkami z predchádzajúcich experimentov, ktoré v databáze ostávajú archivované.

V práci [Švančara, 2011d] bol databázový systém prepojený priamo so simulačným modelom reprezentujúcim typický mnohovýrobný výrobný systém z oblasti elektronického priemyslu.

Toto riešenie umožňuje modelovať priebeh výroby, kedy výrobným systémom súčasne prechádzajú stovky rôznych typov výrobkov rozdelených do výrobných rodín. Typy výrobkov sa v systéme rozlišujú aj napriek rovnakému zaradeniu v rámci výrobných rodín. Operačné a nastavovacie časy na jednotlivých výrobných zariadeniach sa však v rámci

výrobných rodín príliš nelíšia, a preto ich možno považovať pre potreby vytvárania výrobných rozvrhov za totožné.

Štruktúra databázy je navrhnutá tak, aby bolo možné zadať výrobnú rodinu s jej parametrami (operačné časy, nastavovacie časy, výrobné operácie) a výrobnú objednávku s jej parametrami (príslušnosť k výrobkovej rodine, veľkosť objednávky, veľkosť výrobnéj a prepravnej dávky, mieru poruchovosti, atď.). Tým sa veľmi zjednodušuje definovanie výrobnéj objednávky, ku ktorej sa automaticky nahrajú príslušné hodnoty parametrov.

5.2 Rozvrhovanie výroby a určovanie veľkosti výrobných dávok

Výrobný rozvrh sa v praxi vytvára s časovým predstihom 1-4 týždne pred zahájením konkrétnej periódy výrobného procesu. Operatívne riadenie výroby a s ním spojené operatívne upravovanie výrobného rozvrhu prebieha priamo počas výrobného procesu. Problematiku optimalizácie výrobného rozvrhu je preto možné rozdeliť do dvoch hlavných kategórií:

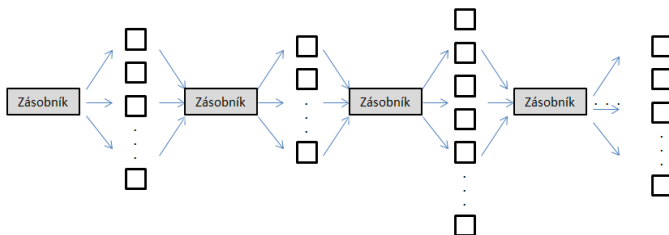
- **offline** optimalizácia - zaoberajúca sa prvotným vytvorením výrobného rozvrhu s časovým predstihom 1-4 týždne
- **online** optimalizácia - zaoberajúca sa úpravou výrobného rozvrhu v procese operatívneho riadenia

5.2.1 Offline optimalizácia rozvrhovania výroby

Návrh a programová realizácia nových prístupov v oblasti offline optimalizácie rozvrhovania výroby v mnohovýrobných výrobných systémoch vychádza z koncepcie prepojenia rozvrhovacích algoritmov a simulačných systémov uvedenej v kapitole 3.2 (obr. 3.1).

5.2.1.1 Rozvrhovanie s využitím permutačného algoritmu

V článku [Švančara, 2011c] bol po prvýkrát programovo realizovaný prístup prepojenia rozvrhovacieho algoritmu so simulačným modelom mnohovýrobného flow-shop výrobného systému. Simulačný model reprezentuje mnohovýrobný flow-shop výrobný systém s k výrobnými stupňami a m_s identickými paralelnými pracoviskami na s -tom výrobnom stupni. Medzi jednotlivými výrobnými stupňami je vždy umiestnený zásobník vyrovnávajúci úzke miesta výrobného systému. Takéto usporiadanie výrobného systému je v praxi veľmi časté a typické najmä pre elektrotechnický priemysel s čiastočne manuálnou montážou výrobkov. Ilustračná schéma modelovaného výrobného systému je na obr. 5.3.



Obr. 5.3 Ilustračná schéma flow-shop výrobného systému

Výrobný rozvrh je reprezentovaný permutačným reťazcom určujúcim poradie výrobkových rodín, v akom sú spracovávané jednotlivé zákazky do nich patriace. Celkový počet permutačných reťazcov je daný vzťahom $P = n!$, kde P je celkový počet permutačných reťazcov (výrobných rozvrhov) a n je počet výrobkových rodín, ktorých zákazky vstupujú do výrobného systému.

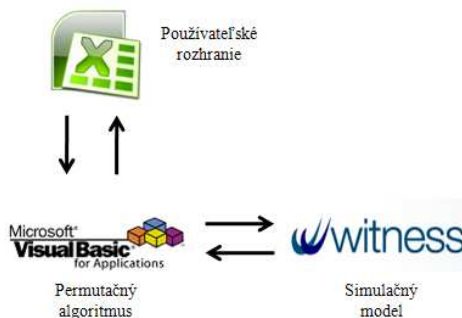
Generovanie a vyhodnocovanie výrobných rozvrhov prebieha v cykle typickom pre optimalizačné úlohy. Po inicializácii základných premenných (počet výrobných stupňov, počet výrobných pracovísk, počet výrobkových rodín, nastavovacie a operačné časy) je permutačným algoritmom generovaný reťazec reprezentujúci výrobný rozvrh. Permutačný algoritmus je programovo realizovaný *for cyklus* vytvárajúci permutačné reťazce z n premenných (v našom prípade n výrobkových rodín).

Priebeh výroby s použitím navrhnutého výrobného rozvrhu je overený simulačným experimentom. Po zápise výsledkov (výrobný rozvrh, celkový výrobný čas, priemerná hodnota priebežných časov, atď.) posledného simulačného experimentu z celkového počtu $P = n!$, je vyhodnotený najlepší variant a optimalizačný cyklus ukončený.

Programová realizácia

Predstavený prístup rozvrhovania výroby mnohovýrobových flow-shop výrobných systémov s využitím permutačného algoritmu a simulácie bol programovo realizovaný tak, že zabezpečuje automatickú výmenu dát medzi tromi nezávislými programovými produktmi.

Simulačný model mnohovýrobového flow-shop výrobného systému bol skonštruovaný v simulačnom systéme Witness. Výrobné rozvrhy sú generované pomocou permutačného algoritmu programovo realizovaného v jazyku VBA. Používateľské rozhranie bolo vytvorené v programe MS Excel. Schéma prepojenia jednotlivých častí aplikácie je zobrazená na obr. 5.4.



Obr. 5.4 Schéma prepojenia základných častí optimalizačného systému

Vďaka simulačnému overeniu všetkých prípustných riešení (všetkých permutácií) je s použitím predstavenej aplikácie zaručené nájdenie optimálneho riešenia.

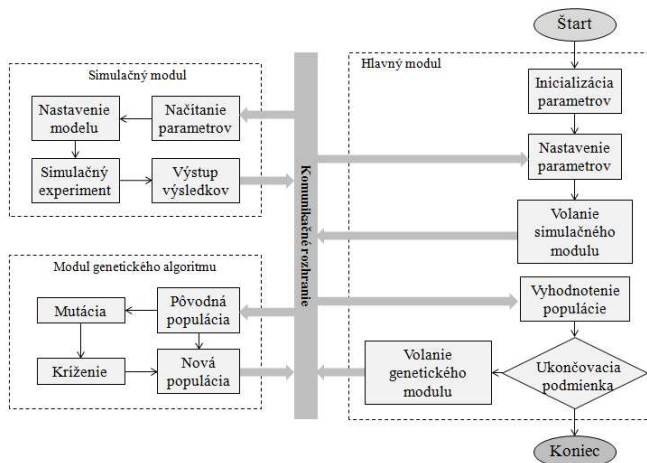
Vzhľadom na výpočtovú náročnosť je nevýhodou tohto optimalizačného prístupu výrazné obmedzenie maximálneho počtu rozvrhovaných výrobných rodín (v predstavenej programovej aplikácii je maximálny počet výrobných rodín obmedzený na 5). Pre potreby zvýšenia počtu rozvrhovaných výrobných rodín a ďalších parametrov, ktoré môžu byť predmetom optimalizácie, bolo potrebné nahradiť permutačný algoritmus efektívnejšou optimalizačnou metódou.

5.2.1.2 Rozvrhovanie s využitím genetického algoritmu

V publikácii [Švančara, 2012c] bol pôvodný systém, určený výhradne na optimalizáciu výrobných rozvrhov, rozšírený o možnosť optimalizácie veľkosti výrobných dávok a optimalizácie obmedzenia maximálneho počtu výrobných zariadení, ktoré súčasne spracovávajú rovnaký typ výrobku (zákazky patriace do rovnakej výrobkovej rodiny). Táto požiadavka vyplynula z analýzy podmienok v reálnej výrobe.

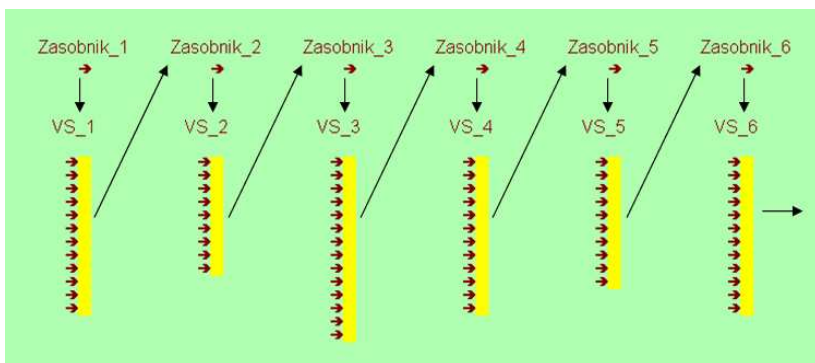
Vzhľadom na zvýšenú náročnosť optimalizačnej úlohy bol v predstavovanom systéme permutačný algoritmus nahradený efektívnejšou optimalizačnou metódou - genetickým algoritmom, ktorý síce nezaručuje nájdenie absolútne optimálneho rozvrhu spomedzi všetkých prípustných rozvrhov, ale je použiteľný pri hľadaní efektívneho rozvrhu aj pri veľkom počte výrobných rodín, výrobných stupňov a paralelných pracovísk. Táto koncepcia vychádza z návrhu uvedeného v práci [Zailin, 2010] a je založená na spolupráci simulačného modulu, modulu genetického algoritmu

a hlavného optimalizačného modulu. Bloková schéma prepojenia základných častí systému je zobrazená na obr. 5.5.



Obr. 5.5 Prepojenie základných častí systému pri optimalizácii výrobného rozvrhu s využitím genetického algoritmu [Zailin, 2010]

Simulačný modul predstavuje simulačný model mnohovýrobného flow-shop výrobného systému zobrazeného na obr. 5.3. Grafická reprezentácia simulačného modelu v simulačnom systéme Witness je zobrazená na obr. 5.6.



Obr. 5.6 Grafická reprezentácia simulačného modelu flow-shop výrobného systému

Modul genetického algoritmu reprezentuje systém rozvrhovania a optimalizácie mnohovýrobných výrobných systémov s využitím heuristickej optimalizačnej metódy - genetického algoritmu [GA].

V predstavovanom systéme sú uvažované tri základné navzájom nezávislé populácie genetického algoritmu. Každý z troch predmetov optimalizácie (výrobný rozvrh, výrobné dávky, obmedzenie spracovania rovnakého typu výrobkov) je reprezentovaný jednou základnou populáciou, z ktorých každá obsahuje osem chromozómov. Základné populácie sú spojené do jednej výslednej populácie v závislosti od zvolených predmetov optimalizácie. Systém totiž umožňuje optimalizovať jednotlivé predmety optimalizácie vo všetkých kombináciách.

Tvorba novej populácie prebieha podľa nasledovných pravidiel:

- najlepší chromozóm prechádza priamo do nasledujúcej populácie
- tri najlepšie chromozómy prechádzajú do nasledujúcej populácie po krížení a mutácii
- tri chromozómy vybrané pomocou ruletového výberu (miera pravdepodobnosti výberu chromozómu je priamo úmerná hodnote účelovej funkcie chromozómu, tzn. najväčšiu šancu výberu majú chromozómy s najlepšou hodnotou účelovej funkcie) prechádzajú do nasledujúcej populácie po krížení a mutácii
- najhorší chromozóm je nahradený náhodne generovaným chromozómom

Spôsob reprezentácie optimalizovaných parametrov v genetickom algoritme

Výsledná populácia obsahuje vždy osem chromozómov, ktorých dĺžka (počet génov) závisí od vybraných objektov optimalizácie, počtu výrobných rodín a počtu výrobných stupňov.

Chromozómy výslednej populácie môžu vyzerat' nasledovne:

Chromozóm pre šesť výrobných rodín a päť výrobných stupňov pri optimalizácii výrobného rozvrhu, veľkosti výrobných dávok a obmedzenia spracovania rovnakého typu výrobkov

[5,6,1,4,2,3,5,5,5,10,1,5,4,6,2,2,4] - chromozóm výslednej populácie, kde:

5,6,1,4,2,3 - výrobný rozvrh

5,5,5,10,1,5 - výrobné dávky

4,6,2,2,4 - obmedzenie spracovania rovnakého typu výrobkov

Simulačný modul a modul genetického algoritmu sú v systéme prepojené s hlavným optimalizačným modulom. Hlavný modul predstavuje optimalizačný cyklus s nasledovnou postupnosťou udalostí:

1. inicializácia základných parametrov
2. generovania základných populácií - gény chromozómov sú generované náhodne
3. volanie simulačného modulu - osem simulačných experimentov (pre každý chromozóm)
4. vyhodnotenie výsledkov simulačných experimentov, zápis najlepšieho chromozómu a hodnoty účelovej funkcie
5. vyhodnotenie ukončovacej podmienky (predpísaný počet generácií, stagnácia účelovej funkcie)
6. volanie modulu genetického algoritmu - tvorba novej populácie
7. pokračovanie od bodu 3
8. ukončenie optimalizačného cyklu

Pre vyhodnocovanie výsledkov simulačných experimentov je možné použiť jednu z troch účelových funkcií:

- celkový výrobný čas (makespan)
- priemerná hodnota priebežných časov výroby (average lead time)
- zložená účelová funkcia, navrhnutá v práci [Švančara, 2012c]:

$$\left(\alpha \sum_{i=1}^n \frac{t_{li}}{n} + \beta t_t + \gamma W + \delta \sum_{i=1}^n \frac{t_{cdi}}{n} \right) \rightarrow \min \quad (1)$$

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ - váhové koeficienty

t_l - priebežný výrobný čas zákazky

t_t - celkový výrobný čas

W - priemerná hodnota zásob rozpracovanej výroby

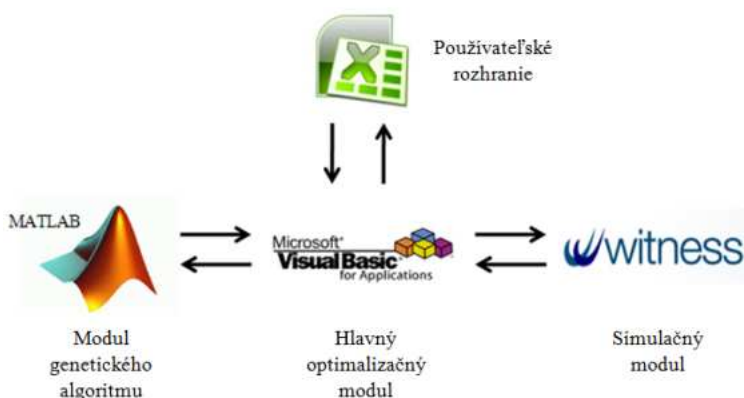
t_{cd} - čas oneskorenia dokončenia zákazky

Takto navrhnutá účelová funkcia rieši možnosť viackriteriálnej optimalizácie výrobného rozvrhu, pričom významnosť uvedených ukazovateľov možno určiť vhodným nastavením váhových koeficientov.

Programová realizácia

Predstavená koncepcia prepojenia simulačného modelu, rozvrhovacieho systému a optimalizačného systému bola programovo realizovaná nasledovne:

Simulačný modul bol vytvorený v simulačnom systéme Witness, modul genetického algoritmu v systéme MATLAB a hlavný optimalizačný modul bol naprogramovaný v jazyku VBA. Všetky tri základné moduly systému sú prepojené s používateľským rozhraním vytvoreným v systéme MS Excel (obr. 5.7)



Obr. 5.7 Schéma prepojenia hlavných systémov aplikácie

Simulačný modul reprezentuje simulačný model vytvorený v simulačnom systéme Witness Power with Ease 3.0 a je zhodný s modelom predstaveným v predchádzajúcej časti (obr. 5.6).

Modul genetického algoritmu bol vytvorený v systéme MATLAB R2010b. Jadro modulu tvoria tri funkcie (*genrpopperm*, *genrpopnatural*, *genrpoprestrict*) generujúce inicializačné populácie a tri funkcie (*geneticschedule*, *geneticbatch*, *geneticrestrict*) tvoriace nové (modifikované) populácie výrobných rozvrhov, veľkosti výrobných dávok a obmedzení spracovávaní rovnakého typu výrobkov. Všetkých šesť funkcií je v systéme MATLAB vytvorených vo forme tzv. *m-file* súborov.

Vytvorené funkcie sú za účelom použitia v jazyku VBA prevedené z pôvodného formátu (súbory m-file) do formátu triedy funkcií (súbor .dll) pomocou nástroja *deployment tool*, ktorý je súčasťou systému MATLAB. Takto pripravenú knižnicu funkcií systému MATLAB je možné využiť v jazyku VBA v podobe programových doplnkov - add in.

Hlavný optimalizačný modul je vytvorený v jazyku VBA a zabezpečuje prepojenie všetkých častí aplikácie. Komunikácia medzi jazykom VBA a simulačným systémom Witness je zabezpečená pomocou príkazov OLE. Pred ich použitím je potrebné v jazyku VBA definovať objekt systému Witness, ktorý prepojí jazyk VBA s aktívnym simulačným modelom.

Príkaz prepojenia jazyka VBA a simulačného systému Witness:

Set WitObj = GetObject ("Witness.WCL")

Príklady OLE príkazov na ovládanie simulačného modulu:

<i>WitObj.Begin</i>	– nastavenie simulačného času na začiatok
<i>WitObj.Run</i>	– spustenie simulácie s animáciou výroby
<i>WitObj.Batch</i>	– spustenie simulácie bez animácie výroby
<i>WitObj.Stop</i>	– zastavenie simulácie
<i>WitObj.Variable</i>	– zápis alebo čítanie premennej

Prepojenie jazyka VBA a systému MATLAB je zabezpečené pomocou kompilátora MCR (MATLAB Compiler Runtime). Vďaka MCR je plná verzia systému MATLAB potrebná iba pri vytváraní a modifikovaní funkcií genetického algoritmu, nie pre samotné používanie aplikácie. Pri volaní funkcie genetického algoritmu hlavným optimalizačným cyklom je v prvom kroku vytvorený objekt triedy funkcií (súboru .dll vytvoreného pomocou nástroja *Deployment Tool*) a následne adresovaná samotná funkcia s príslušnými parametrami.

Volanie funkcie *geneticschedule* v jazyku VBA:

Public Sub geneticschedule (a As Range)

Dim r As Range

Set r = Worksheets("genetic").Range("B1:B80")

Call InitModule

Set Class1 = CreateObject("GAHMLVS_optimizer.Class1.1_0")

Call Class1.geneticschedule(1, r, a)

End Sub

Podobným spôsobom sú v hlavnom module volané aj funkcie *genrpopperm*, *genrpopnatural*, *genrpoprestrict*, *geneticbatch* a *geneticrestrict*.

Používateľské rozhranie je vytvorené v programe MS Excel a slúži na ovládanie celej aplikácie. Príklad grafickej podoby používateľského rozhrania (okno – hlavné menu) je zobrazený na obr. 5.8.

The screenshot displays the WITNESS PwE 3.0 user interface. At the top, there are tabs for 'Main', 'Settings', and 'Results', with 'Main' currently selected. A status bar at the top right indicates 'RUNNING' and a value of '1600'. Below the tabs, there are two text boxes: 'Witness path: "C:\Program Files (x86)\WITNESS PwE 3.0\witness.exe"' and 'Model path: D:\GAHMLVS_optimizer\GAHMLVS_optimizer\distrib\MPSS_optimizer.mod'. The main area contains several configuration options: 'Product number' set to 6, 'Process step number' set to 10, 'Simulation' selected with a radio button, 'Optimization' selected with a radio button, 'Objective criterion' set to 'Obj. function', 'Optimization goal' set to 'All', and 'Number of generations' set to 200. A 'Production orders' button is also present. On the right side, there is a 'Schedule settings' window with a table for Product A through J. The table has two columns: 'Product' and 'Schedule'. The values for the schedule are: A: 5, B: 4, C: 1, D: 2, E: 3, F: 6, G: , H: , I: , J: . To the right of the 'Schedule settings' window are two buttons: 'OPTIMIZE' and 'Abort'.

Obr. 5.8 Používateľské rozhranie – Hlavné okno

5.2.2 Online optimalizácia rozvrhovania výroby

Pri online optimalizácii výrobných rozvrhov je uvažovaný mnohovýrobový flow-shop výrobný systém s k výrobnými stupňami a m_s identickými paralelnými zariadeniami (pracoviskami) na výrobnom stupni s , ktorý bol definovaný v predchádzajúcej časti práce (obr. 5.3).

Zákazky vstupujúce do výrobného systému sú rozdelené do výrobových rodín na základe základných charakteristických vlastností. Hlavnou myšlienkou navrhovaných algoritmov je vyvažovanie výrobnéj linky s cieľom maximalizácie plynulosti materiálového toku, minimalizácie potreby nastavovania výrobných zariadení, priebežných výrobných časov a celkového výrobného času množiny zákaziek.

Vyvažovanie výrobnéj linky v tomto prípade znamená optimálne priradenie (rozvrhnutie) výrobných zariadení na jednotlivých výrobných stupňoch k výrobným zákazkám z konkrétnych výrobových rodín vzhľadom na aktuálnu štruktúru výrobných zákaziek vo výrobnom systéme. Celkový počet výrobných zariadení na jednotlivých výrobných stupňoch sa pri vyvažovaní výrobnéj linky nemení.

Rozvrhovací algoritmus priraduje pracoviská na všetkých výrobných stupňoch k zákazkám patriacim do konkrétnych výrobových rodín. Výrobovým rodinám je na každom výrobnom stupni priradený určitý

(optimálny) počet výrobných zariadení na základe veľkostí operačných časov a/alebo veľkosti výrobných dávok a/alebo veľkostí celkových objednávok. Vo výrobnej linke tak vznikajú tzv. „výrobné prúdy“ výrobných rodín.

Návrh algoritmov

Rozvrhovanie výroby s uvažovaním rozdelenia výrobných zákaziek do výrobných rodín môže byť definovaný nasledovne [Švančara, 2012b]:

- K – počet výrobných stupňov, $s = 1 \dots K$
- F – počet výrobných rodín, $f = 1 \dots F$
- M_s – počet výrobných zariadení na výrobnom stupni s
- O_f – veľkosť výrobných zákaziek patriacej do výrobných rodiny f
- O_{fs} – počet výrobkov z výrobných zákaziek, ktoré musia byť spracované na výrobnom stupni s
- B_f – veľkosť výrobných dávok zákaziek patriacej do výrobných rodiny f
- T_{fs} – operačný čas zákaziek patriacej do rodiny f na výrobnom stupni s
- A_{fs} – počet výrobných zariadení na výrobnom stupni s priradených k zákazkám patriacim do výrobných rodiny f

Za predpokladu rovnocennosti všetkých výrobných rodín vo výrobnom systéme musí platiť, že každej výrobných rodine, ktorej zákazky musia byť spracované na určitom výrobnom stupni, musí byť priradené minimálne jedno výrobné zariadenie na tomto výrobnom stupni – t.j. $M_s \geq F, \forall s$.

Pri návrhu rozvrhovacích heuristických algoritmov (algoritmov priradzujúcich výrobné zariadenia k výrobným rodinám) boli uvažované operačné časy zákaziek na jednotlivých výrobných stupňoch, veľkosti výrobných dávok a veľkosti zákaziek.

1. Algoritmus operačných časov

Algoritmus operačných časov vyvažuje priradenia výrobných zariadení k výrobným rodinám na základe veľkostí operačných časov.

$$A_{fs} = \text{round} \left(\frac{T_{fs}}{\sum_{f=1}^F T_{fs}} M_s \right) \quad \forall f, f \in F, O_{fs} > 0 \quad (2)$$

Vzhľadom na neceločíselné hodnoty operačných časov, algoritmus uvažuje zaokrúhľenie výpočtu. Toto zaokrúhľenie môže spôsobiť nerovnosť medzi počtom priradených výrobných zariadení a ich celkovým počtom na výrobnom stupni s . Na zabezpečenie rovnosti spomínaných hodnôt sú použité následné pomocné algoritmy.

$$\text{Ak } \sum_{f=1}^F A_{fs} < M_s \text{ potom } "A_{fs} = A_{fs} + 1" \quad f, \frac{T_{fs}}{A_{fs}} = \max \quad (3)$$

$$\text{Ak } \sum_{f=1}^F A_{fs} > M_s \text{ potom } "A_{fs} = A_{fs} - 1" \quad f, A_{fs} = \max \quad (4)$$

Počet priradených výrobných zariadení sa zvýši pre výrobný prúd kde $T_{fs} / A_{fs} = \max$. Počet priradených výrobných zariadení sa zníži pre výrobný prúd kde $A_{fs} = \max$.

2. Algoritmus výrobných dávok

Algoritmus výrobných dávok vyvažuje priradenia výrobných zariadení k výrobným rodinám na základe veľkostí operačných časov a veľkosti výrobných dávok.

$$A_{fs} = \text{round} \left(\frac{B_f T_{fs}}{\sum_{f=1}^F B_f T_{fs}} M_s \right) \quad \forall f, f \in F, O_{fs} > 0 \quad (5)$$

$$\text{Ak } \sum_{f=1}^R A_{fs} < M_s \text{ potom } "A_{fs} = A_{fs} + 1" \quad f, \frac{B_f T_{fs}}{A_{fs}} = \max \quad (6)$$

$$\text{Ak } \sum_{f=1}^F A_{fs} > M_s \text{ potom } "A_{fs} = A_{fs} + 1" \quad f, A_{fs} = \max \quad (7)$$

3. Algoritmus veľkostí výrobných zákaziek

Algoritmus veľkostí výrobných zákaziek vyvažuje priradenia výrobných zariadení k výrobným rodinám na základe veľkostí operačných časov, veľkosti výrobných dávok a veľkostí výrobných zákaziek.

$$A_{fs} = \text{round} \left(\frac{B_f T_{fs} O_{fs}}{\sum_{f=1}^F B_f T_{fs} O_{fs}} M_s \right) \quad \forall f, f \in F, O_{fs} > 0 \quad (8)$$

$$\text{Ak } \sum_{f=1}^R A_{fs} < M_s \text{ potom } "A_{fs} = A_{fs} + 1" \quad f, \frac{B_f T_{fs} O_{fs}}{A_{fs}} = \max \quad (9)$$

$$\text{Ak } \sum_{f=1}^F A_{fs} > M_s \text{ potom } "A_{fs} = A_{fs} + 1" \quad f, A_{fs} = \max \quad (10)$$

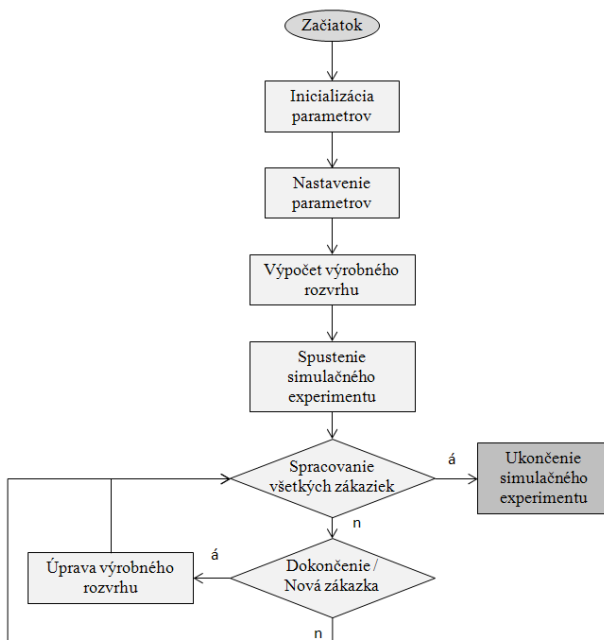
Všetky tri predstavené heuristické algoritmy sú navrhnuté na podobnom princípe vyvažovania výrobnej linky uvažujúc pomerné zloženie výrobných zákaziek a majú zabezpečiť dosiahnutie stanovených cieľov – zvýšenie plynulosti prechodu zákaziek výrobnou linkou, zníženie celkového výrobného času, zníženie počtu nastavovaní výrobných zariadení a zníženie priebežných časov výroby.

Programová realizácia - implementácia algoritmov

Navrhnuté algoritmy boli programovo realizované v simulačnom programe Witness Power with Ease 3.0. Simulačný model reprezentuje

mnohovýrobnkový flow-shop výrobný systém s nastaviteľným počtom výrobných stupňov a výrobných zariadení na jednotlivých výrobných stupňoch a je zhodný s predstaveným simulačným modelom z obr. 5.6.

Rozvrhové algoritmy boli implementované pomocou samostatných funkcií (Witness - element typu function), ktoré sú volané na jednotlivých výrobných stupňoch. Bloková schéma priebehu simulačného experimentu je zobrazená na obr. 5.9.



Obr. 5.9 Bloková schéma priebehu simulačného experimentu

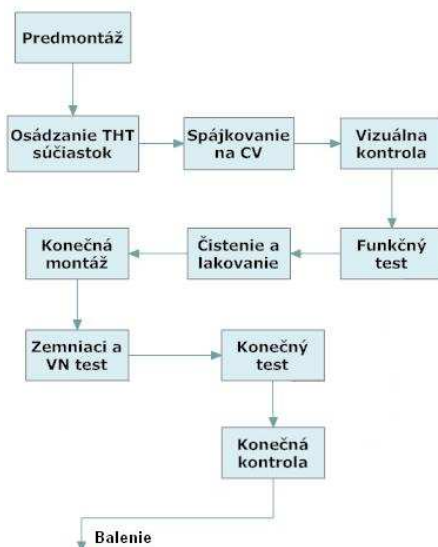
Úprava (optimalizácia) výrobného rozvrhu prebieha priamo počas behu simulačného experimentu, a teda priamo počas priebehu výrobného procesu v reálnych výrobných systémoch. Simulácia má preto v tomto prípade iba verifikačnú funkciu – overenie vlastností navrhnutých algoritmov. V reálnych systémoch by mohli byť algoritmy implementované priamo v podnikových informačných systémoch a informácie, ktoré sa dostávajú k virtuálnym výrobným zariadeniam v simulačnom modeli v podobe virtuálnych premenných, by boli prenášané priamo k reálnym výrobným pracoviskám, pomocou vizualizačných zariadení podnikových informačných systémov.

5.3 Experimentálne overenie navrhnutých prístupov rozvrhovania výroby

Navrhnuté prístupy v oblasti rozvrhovania výroby a určovania veľkosti výrobných dávok boli overené pomocou simulačného modelu reálneho mnohovýrobového flow-shop výrobného systému z oblasti elektronického priemyslu.

Jednotlivé typy výrobkov – napájacie zdroje rôznych kategórií - sú vo výrobnom systéme rozdelené do výrobných rodín. V jednej rodine sú zastúpené produkty, ktorých nosným a základným prvkom je z hľadiska dizajnu rovnaká doska plošného spoja (DPS). Jedna rodina predstavuje niekoľko stoviek, ba dokonca tisícok rôznych typov výrobkov.

Veľkosť objednávok jedného typu výrobku sa pohybuje cca od 10 do 500 kusov. Všetky výrobky prechádzajú rovnakou postupnosťou operácií (schéma na obr. 5.10), pričom výrobky jedného typu sa líšia veľkosťou dávok, nárokom na operačné a nastavovacie časy na jednotlivých výrobných stupňoch a pod.



Obr. 5.10 Schéma výrobnjej linky THT

V simulačných experimentoch sú uvažované reálne operačné časy, nastavovacie časy a veľkosti výrobných dávok zákaziek podľa rozdelenia do výrobných rodín.

5.3.1 Prístupy offline optimalizácie

Pertmutačný algoritmus

Simulačné experimenty boli zamerané na overenie navrhnutých prístupov offline optimalizácie výrobných rozvrhov a veľkosti výrobných dávok. Pri všetkých simulačných experimentoch boli použité parametre reálneho výrobného systému predstaveného v predchádzajúcej časti. Pri vyhodnocovaní simulačných experimentov boli najlepšie dosiahnuté výsledky porovnávané s náhodne vybranými výsledkami a najhoršími dosiahnutými výsledkami. Výsledky experimentov dokázali významné zlepšenia parametrov výrobného systému dosiahnuté optimalizáciou výrobných rozvrhov.

Navrhnutý permutačný algoritmus bol testovaný sériou simulačných experimentov na modeli reálnej výrobnéj linky. Operačné časy, nastavovacie časy, výrobné dávky a počet výrobných zariadení boli pri simulačných experimentoch nemenné. Počet výrobkových rodín bol nastavený na maximálnu hodnotu, ktorú navrhnutý permutačný algoritmus umožňuje - 5. Pri sérii simulačných experimentov sa menila štruktúra výrobných zákaziek (počet výrobkov patriacich do konkrétnych výrobkových rodín, ktoré treba vyrobiť - Tab 5.1). Cieľom experimentov je dokázať schopnosť navrhnutého prístupu nájsť optimálny výrobný rozvrh v množine všetkých prípustných výrobných rozvrhov.

Tab. 5.1 Štruktúra výrobných zákaziek

Rodina	A	B	C	D	E
Simulačný experiment					
1	2000	2500	1500	1800	1900
2	2500	1500	3500	1500	2500
3	3200	2800	200	3200	1900
4	1000	1200	2400	1600	1400
5	3800	2800	3600	2200	200

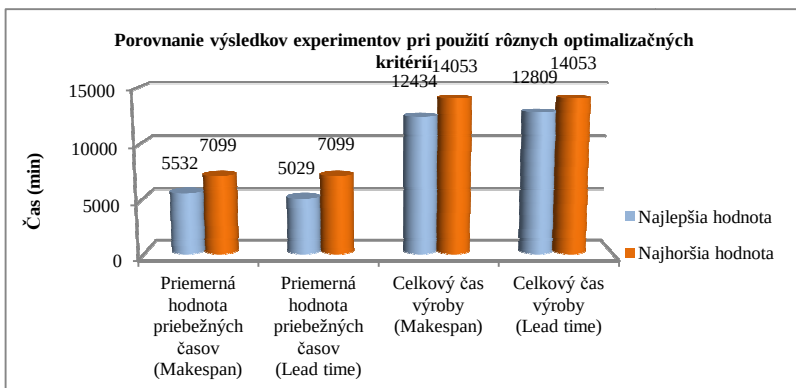
Výhodou použitia permutačného algoritmu je overenie všetkých prípustných riešení, čím je zabezpečené nájdenie optimálneho riešenia - optimálneho výrobného rozvrhu. Pri vyhodnocovaní simulačných experimentov boli optimálne hodnoty porovnávané s najhoršími hodnotami a náhodne vybranými hodnotami. Simulačné experimenty boli rozdelené do dvoch hlavných skupín v závislosti od voľby účelovej funkcie - celkový výrobný čas (Makespan), priemerná hodnota priebežných výrobných časov

(Lead time). Výsledky experimentov sú zobrazené v Tab. 5.2 s farebným vyznačením optimálnych hodnôt.

Tab. 5.2 Výsledky simulačných experimentov

Hodnota účelovej funkcie		Priemerná hodnota priebežných časov (min)			Celkový výrobný čas (min)		
Č. exp.	Účelová funkcia	Najlepší	Náhodný	Najhorší	Najlepší	Náhodný	Najhorší
1	Makespan	5532	6845	7099	12434	13698	14053
	Lead	5029	6312	7099	12809	12989	14053
2	Makespan	6213	7015	7438	14054	15960	16077
	Lead	5416	6964	7438	14837	15645	16077
3	Makespan	6234	7305	7606	13537	14723	15716
	Lead	5320	6985	7606	13990	15064	15716
4	Makespan	5534	6114	6441	10876	11608	12277
	Lead	4728	6426	6441	11685	12166	12277
5	Makespan	7105	7268	8526	17095	18032	19454
	Lead	6188	6720	8526	17751	19227	19454

Grafická reprezentácia výsledkov simulačného experimentu č. 1 pre optimalizáciu celkového výrobného času (makespan) je zobrazená na obr. 5.11.



Obr. 5.11 Výsledky simulačných experimentov - Permutačný algoritmus

Pri porovnaní najlepších dosiahnutých hodnôt účelovej funkcie je zrejmé, že určenie optimálneho výrobného rozvrhu je závislé od voľby kritéria. Výrobný rozvrh pre dosiahnutie optimálnej hodnoty celkového času výroby danej množiny zákaziek teda nemusí zaručiť aj dosiahnutie optimálnych priebežných výrobných časov a naopak.

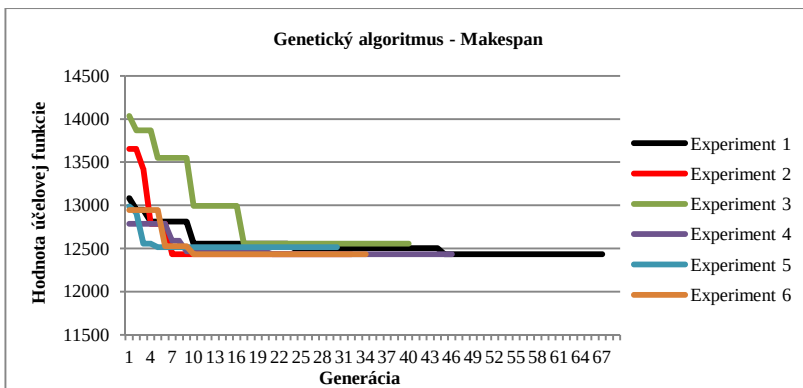
Genetický algoritmus

Programová aplikácia pre optimalizáciu výrobných rozvrhov mnohovýrobových výrobných systémov s využitím genetického algoritmu bola podobne ako permutačný algoritmus testovaná sériou simulačných experimentov na modeli reálnej výrobnéj linky.

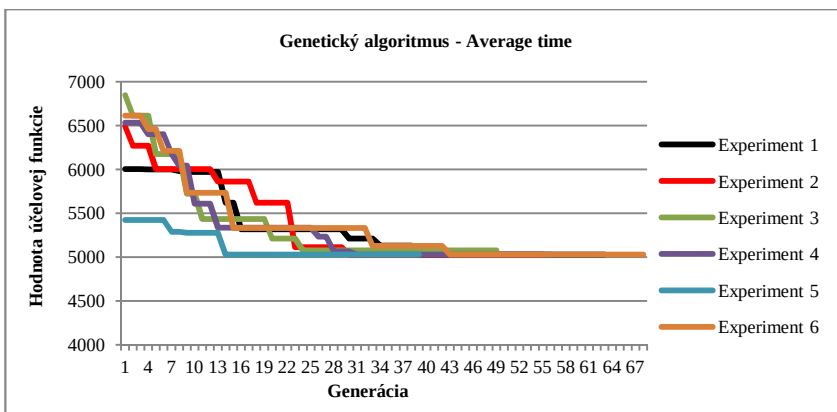
Prvá séria simulačných experimentov bola zameraná na overenie funkčnosti samotného genetického algoritmu, porovnaním s výsledkami získanými zo simulačných experimentov s využitím permutačného algoritmu. Parametre výrobnéj linky boli nastavené na rovnaké hodnoty ako pri simulačnom experimente č. 1 s permutačným algoritmom.

Genetický algoritmus dosiahol optimálnu hodnotu pri cca. 85% simulačných experimentoch zameraných na optimalizáciu celkového výrobného času (Total time - makespan) a cca. 70% simulačných experimentoch zameraných na optimalizáciu priemernej hodnoty priebežných výrobných časov (Average lead time).

Grafická reprezentácia priebehu účelovej funkcie pri optimalizácii celkového výrobného času je zobrazená na obr. 5.12, resp. priemernej hodnoty priebežných časov na obr. 5.13. Grafy znázorňuje postupné približovanie hodnoty účelovej funkcie v priebehu výpočtu pri jednotlivých experimentoch k optimálnej hodnote.



Obr. 5.12 Priebeh účelovej funkcie pre celkový čas spracovania množiny zákaziek



Obr. 5.13 Priebeh účelovej funkcie pre priemerný priebežný čas zákaziek

Výsledky simulačných experimentov porovnávajúcich genetický algoritmus s permutačným algoritmom dokázali schopnosť genetického algoritmu konvergovať vo väčšine prípadov ku globálnemu extrému alebo k uspokojivejšiemu riešeniu, akým je náhodne vybrané riešenie optimalizačnej úlohy.

Viackriteriálna optimalizácia s využitím genetického algoritmu

V porovnaní s permutačným algoritmom je však vďaka rýchlejšej konvergencii hodnoty účelovej funkcie možné genetický algoritmus použiť na optimalizáciu viacerých parametrov výrobného systému súčasne. V ďalších sériách simulačných experimentov bol genetický algoritmus využitý na optimalizáciu nasledujúcich kombinácií parametrov výrobných linky:

- výrobný rozvrh a výrobné dávky
- výrobný rozvrh a obmedzenie priradenia zariadení k rovnakej výrobkovej rodine
- výrobné dávky a obmedzenie priradenia zariadení k rovnakej výrobkovej rodine
- výrobný rozvrh, výrobné dávky a obmedzenie priradenia zariadení k rovnakej výrobkovej rodine

Ostatné parametre simulačných experimentov (počet výrobných rodín, počet výrobných stupňov, počet výrobných zariadení, operačné časy, nastavovacie časy, atď.) ostávali zachované ako pri predchádzajúcich experimentoch.

V nasledujúcich experimentoch bol GA využitý na optimalizáciu výrobného rozvrhu, veľkosti výrobných dávok a obmedzenia priradenia zariadení k rovnakej výrobkovej rodine pri maximálnom počte kombinácií optimalizačnej úlohy. Pri experimentoch boli použité ako účelové funkcie postupne celkový výrobný čas, priemerná hodnota priebežných výrobných časov a zložená účelová funkcia (1).

Optimalizované parametre boli nastavené nasledovne:

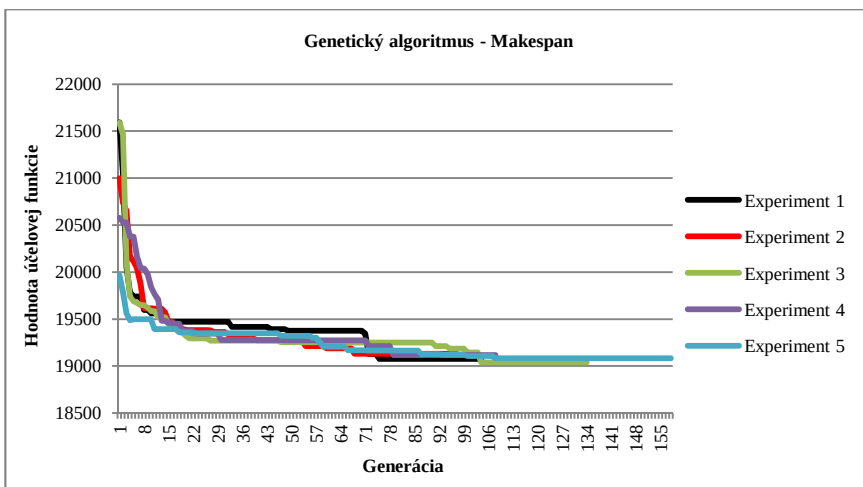
- počet výrobných rodín = 10
- veľkosti výrobných dávok menené pre všetky výrobkové rodiny od 1 do 50 so skokom 5 (napr. 1-5-10-15-...-50)
- obmedzenie priradenia výrobných zariadení menené pre všetky výrobné stupne od 1 do maximálneho počtu zariadení na danom výrobnom stupni so skokom 1

Počet možných prípustných riešení :

- výrobný rozvrh: $10! = 3628800$ variantov (permutácií)
- výrobné dávky: $11^{10} = 25937424601$ variantov
- obmedzenie priradenia: $15.15.2.15.7.4.6.4.7.4 = 127008000$ variantov
- celkový počet variantov = cca $11,95 \cdot 10^{24}$

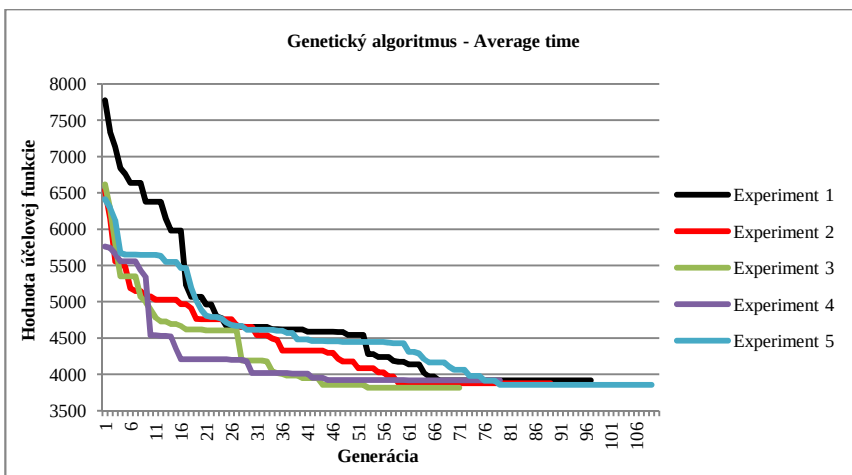
Vzhľadom na celkový počet variantov v danej optimalizačnej úlohe je prakticky nemožné v relatívne krátkom výpočtovom čase zabezpečiť nájdenie globálneho extrému. Hlavnou úlohou navrhnutého genetického algoritmu je rýchle zavrhnutie všetkých nevyhovujúcich riešení a konvergencia k uspokojivému riešeniu.

Výsledky piatich experimentov pri optimalizácii celkového výrobného času sú zobrazené na obr. 5.14.



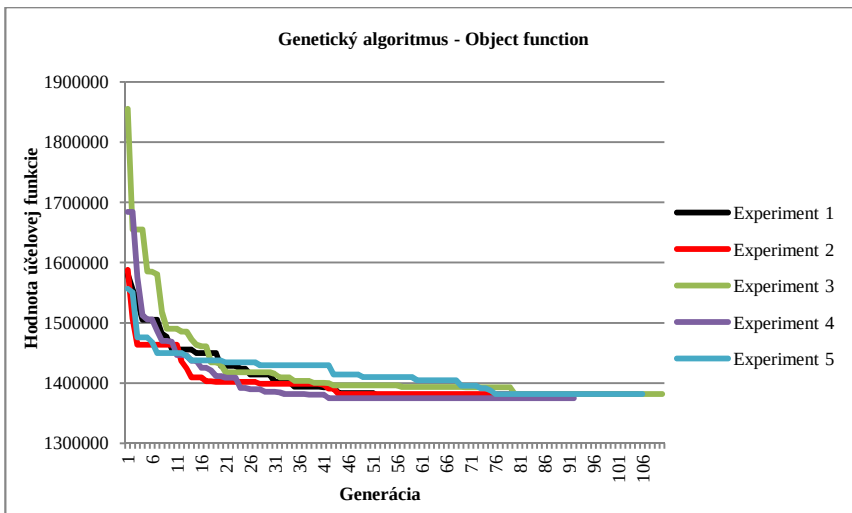
Obr.5.14 Priebeh účelovej funkcie pre celkový čas spracovania množiny zákaziek

Výsledky piatich experimentov pri optimalizácii priemernej hodnoty priebežných výrobných časov sú zobrazené na obr. 5.15.



Obr. 5.15 Priebeh účelovej funkcie pre priemerný priebežný čas zákaziek

Výsledky piatich experimentov pri použití zloženej účelovej funkcie (1) sú zobrazené na obr. 5.16.



Obr. 5.16 Priebeh zloženej účelovej funkcie

Všetky uvedené experimenty boli zamerané na overenie funkčnosti predstavených aplikácií využívajúcich permutačný, resp. genetický algoritmus. Experimenty dokázali, že predstavené aplikácie sú plne funkčné z pohľadu jednoduchého používania konečným používateľom a predovšetkým schopné naplňať hlavný cieľ – konvergenciu k uspokojivému riešeniu v množine veľkého počtu kombinácií parametrov optimalizačnej úlohy v relatívne krátkom výpočtovom čase. Pri najzložitejších experimentoch sa výpočtový čas pohyboval okolo 1 hod. 30 min. Priemerný výpočtový čas pri všetkých predstavených experimentoch bol cca 50 min. Výpočtový čas je závislý aj od použitého hardvéru. Pri experimentoch predstavených v tejto práci bol využívaný hardvér s parametrami (CPU i3 2.13 GHz, 4 GB RAM).

5.3.2 Prístupy online optimalizácie

Algoritmy pre online optimalizáciu výrobného rozvrhu opísané v kapitole 5.2.2 boli testované na reálnom výrobnom systéme opísanom v predchádzajúcej časti práce. Po zohľadnení podmienky $M_s \geq F, \forall s$ (počet výrobných zariadení na všetkých výrobných stupňoch musí byť väčší alebo rovný počtu výrobných rodín) bol však počet výrobných zariadení na jednotlivých výrobných stupňoch upravený.

Predstavené algoritmy sú zamerané na vyvažovanie výrobnjej linky v závislosti od aktuálnej štruktúry výrobných zákaziek vo výrobnom systéme, rozdelených do výrobkových rodín.

Štruktúra výrobných zákaziek (výrobová rodina, čas vstupu zákazky do výroby, veľkosť zákazky) pre množinu simulačných experimentov č.1 sú zobrazené v Tab. 5.3.

Tab. 5.3 Štruktúra výrobných zákaziek

Výrobová rodina	Čas vstupu zákazky do výroby	Veľkosť zákazky	Výrobová rodina	Čas vstupu zákazky do výroby	Veľkosť zákazky
A	0	250	B	500	280
B	0	300	H	500	190
C	0	280	G	500	390
D	0	190	J	500	400
E	0	350	F	500	260
F	0	450	D	600	240
A	200	200	E	600	180
J	200	260	G	600	230
I	200	150	H	600	150
C	500	120	I	600	170
A	500	310	B	600	230

Vyvažovacie algoritmy boli testované pomocou simulačného modelu predstaveného v kapitole 5.2.1.2 za nasledujúcich podmienok:

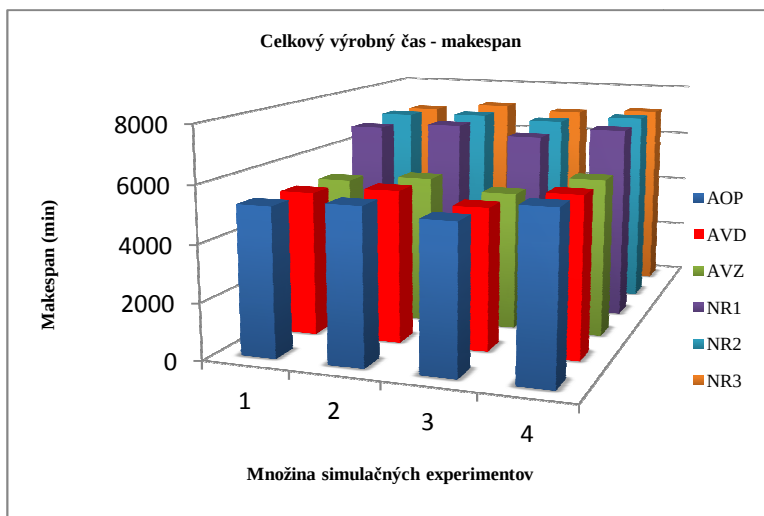
- počet výrobných stupňov = 10
- počet výrobkových rodín = 10
- reálne operačné časy
- reálne nastavovacie časy
- reálne veľkosti výrobných dávok
- optimalizačné kritérium = celkový čas výroby (makespan)

Pri simulačných experimentoch boli na online optimalizáciu výrobného rozvrhu použité postupne nasledovné prístupy:

- Algoritmus operačných časov (AOP)
- Algoritmus výrobných dávok (AVD)
- Algoritmus veľkostí výrobných zákaziek (AVZ)
- Náhodný rozvrh č. 1 (NR1)
- Náhodný rozvrh č. 2 (NR2)
- Náhodný rozvrh č. 3 (NR3)

Pri použití náhodných rozvrhov č. 1-3 boli výrobné zariadenia priradované k výrobným zákazkám pomocou náhodne generovaných pravidiel (výrobné zariadenia boli priradované k výrobným zákazkám použitím funkcie *random*) v simulačnom systéme Witness.

Výsledky štyroch nezávislých množín simulačných experimentov (celkové výrobné časy - makespan) sú zobrazené na obr. 5.17.

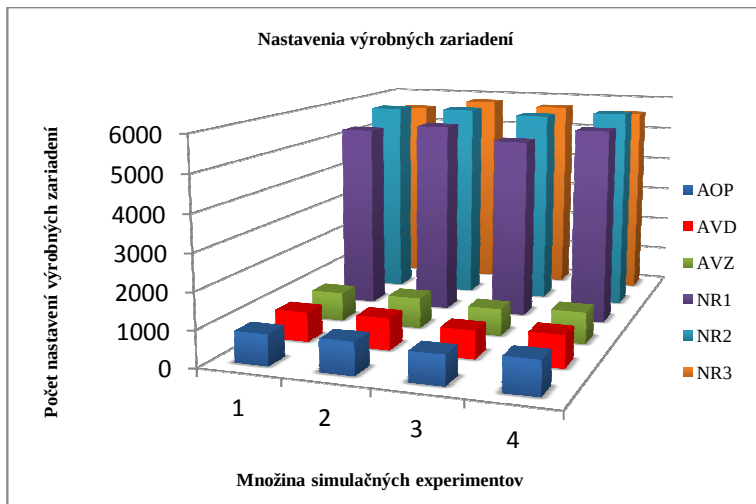


Obr. 5.17 Celkový výrobný čas – makespan

Výsledky simulačných experimentov (obr. 5.17) porovnávajú hodnoty celkových výrobných časov (makespan) dosiahnutých pri použití troch predstavených algoritmov pre online optimalizáciu výrobného rozvrhu a troch náhodne generovaných výrobných rozvrhov. Výsledky dosiahnuté pri použití predstavených algoritmov boli v priemere o 25 % lepšie ako výsledky dosiahnuté použitím náhodných výrobných rozvrhov. Z predstavených algoritmov boli vo všetkých množinách simulačných experimentov najlepšie výsledky dosiahnuté pre *Algoritmus veľkostí výrobných zákaziek*, avšak len v rozmedzí o cca 5 – 7 % v porovnaní s algoritmami AOP resp. AVD.

Keďže operačné časy, ako aj veľkosti výrobných dávok boli pri všetkých simulačných experimentoch rovnaké, časová úspora celkového výrobného času bola pri použití navrhovaných algoritmov dosiahnutá vďaka redukcii počtu nastavení výrobných zariadení. Porovnanie počtu nastavení

výrobných zariadení pre jednotlivé simulačné experimenty je zobrazené na obr. 5.18.



Obr. 5.18 Porovnanie počtu nastavení výrobných zariadení

Predstavené algoritmy na online optimalizáciu výrobného rozvrhu boli testované na simulačnom modeli reálneho výrobného systému, s upraveným počtom výrobných zariadení na jednotlivých výrobných stupňoch.

Algoritmy slúžia na vyvažovanie výrobných liniek na základe aktuálnej štruktúry výrobných zákaziek rozdelených do výrobkových rodín. Vzhľadom na podmienku, že počet výrobných zariadení na všetkých výrobných stupňoch musí byť väčší, nanajvýš rovný počtu výrobkových rodín, algoritmy sú určené predovšetkým pre stredne veľké, resp. veľké výrobné systémy.

Výsledky simulačných experimentov dokázali, že predstavené algoritmy sú schopné pružne reagovať na zmeny v zložení výrobných zákaziek, a pomerne rýchlo prispôbiť výrobný rozvrh týmto zmenám. Vďaka optimálnemu vytváraniu tzv. výrobných prúdov pre zákazky z jednotlivých výrobkových rodín dochádza k významnej redukcii potreby nastavovania výrobných zariadení na všetkých výrobných stupňoch. Predpokladáme, že vďaka nie veľkej zložitosti predstavených algoritmov, sú algoritmy vhodné na implementáciu do bežných podnikových informačných systémov.

6. Záver

Predložená práca sa venuje simulačnej analýze mnohovýrobných výrobných systémov so zameraním na návrh a programovú realizáciu nových prístupov v oblastiach reprezentácie mnohovýrobných výrobných systémov v simulačných modeloch, optimalizácie výrobných rozvrhov a optimalizácie určovania veľkosti výrobných dávok, s dôrazom na možnosť ich využitia v prostredí reálnych výrobných systémov. Tejto problematike je venovaná teoretická časť práce, tj. kapitoly 2 a 3.

Základné ciele práce uvedené v kapitole 4 boli riešené v jednotlivých kapitolách práce nasledovne.

Kapitola 5.1. prináša návrh a programovú realizáciu reprezentácie mnohovýrobných výrobných systémov v simulačných modeloch s využitím priameho prepojenia simulačného systému s databázovým systémom. Parametre výrobného systému ako aj parametre jednotlivých výrobkov, ktoré je možné vo výrobnom systéme spracovávať, sú uložené v databázovom systéme.

Štruktúra databázy je navrhnutá tak, aby bolo možné zadefinovať výrobnú rodinu s jej parametrami (operačné časy, nastavovacie časy, výrobné operácie) a výrobnú objednávku s jej parametrami (príslušnosť k výrobkovej rodine, veľkosť objednávky, veľkosť výrobnéj a prepravnej dávky, mieru poruchovosti, atď.). Tým sa veľmi zjednodušuje definovanie výrobnéj objednávky, ku ktorej sa automaticky nahrávajú príslušné hodnoty parametrov.

Táto štruktúra popri priamom prepojení databázového systému so simulačným systémom zjednodušuje a urýchľuje definovanie parametrov simulačného modelu mnohovýrobného výrobného systému a ich priradenie k jedinému virtuálnemu výrobku vytvorenému v simulačnom modeli.

Návrhu nových prístupov v oblasti rozvrhovania výroby a určovania veľkosti výrobných dávok v mnohovýrobných výrobných systémoch je venovaná kapitola 5.2. Navrhnuté prístupy boli rozdelené do dvoch hlavných skupín.

Problematike „offline“ optimalizácie rozvrhovania výroby a určovania veľkosti výrobných dávok sa venuje kapitola 5.2.1. Navrhnuté prístupy využívajú priame prepojenie simulačného modelu reprezentujúceho mnohovýrobný výrobný systém s optimalizačnými algoritmami rozvrhovania výroby. V prvej z predstavených aplikácií bol simulačný model prepojený s permutačným algoritmom rozvrhovania výroby.

Rozšírený prístup rozvrhovania výroby s využitím genetického algoritmu bol navrhnutý a programovo realizovaný s využitím simulačného systému Witness, programovacieho jazyka VBA a programu MATLAB. Navrhnuté prístupy sú určené na optimalizáciu výrobných rozvrhov a veľkosti výrobných dávok pred spustením samotného výrobného procesu.

V kapitole 5.2.2 sú navrhnuté a programovo implementované tri algoritmy vyvažovania výrobných liniek – Algoritmus operačných časov, Algoritmus výrobných dávok, Algoritmus veľkostí výrobných zákaziek. Navrhnuté algoritmy reprezentujú prístup „online“ optimalizácie rozvrhovania výroby v mnohovýrobných výrobných systémoch a sú určené na optimalizáciu výrobných rozvrhov priamo počas priebehu výrobného procesu.

Experimentálne overenie navrhnutých prístupov v oblastiach „offline“ a „online“ optimalizácie rozvrhovania výroby a určovania veľkosti výrobných dávok s využitím simulačného modelu reálneho mnohovýrobného výrobného systému bolo realizované v kapitole 5.3.

Zoznam použitej literatúry

Publikované práce autora

Králová, Z., Švančara, J.: Model linky na výrobu napájacích zdrojov. *WITNESS 2007 : Sborník příspěvků. 10. ročník konference*, s. 63-69, Brno, Česká republika, 978-80-214-3432-5, 2007.

Švančara, J., Králová, Z.: Optimalizácia výroby napájacích zdrojov s využitím simulácie. *Posterus*, 1338-0087, Vol. 2, Iss. 7, (<http://www.posterus.sk/?p=1093>), 2009.

Švančara, J., Králová, Z.: Simulation Based Performance Analysis of the Multi-Product Manufacturing System. *Process Control 2009 : Proceedings of the 17th International Conference on Process Control*, s. 249-253, Štrbské Pleso, 978-80-227-3081-5, 2009.

Švančara, J., Leporis, M.: Simulačná analýza mnohovýrobných výrobných systémov s využitím databázového rozhrania. *Posterus*, 1338-0087, Vol. 3, Iss. 11, (<http://www.posterus.sk/?p=8973>), 2010.

* Švančara, J., Králová, Z.: Case Study on Simulation Analysis of a Multiple Product Manufacturing System. *MCPL 2010. 5th IFAC International Conference on Management and Control of Production and Logistic*, CD-Rom, Lisboa, Portugal, 2010.

Švančara, J., Leporis, M.: Databázové rozhranie pre potreby simulačnej analýzy mnohovýrobných výrobných systémov. *WITNESS 2010 :*

Sborník příspěvků. 13. ročník mezinárodní konference, s. 67-73, Kouty nad Desnou, Česká republika, ISBN 978-80-214-4107-1, 2010.

Králová, Z., Švančara, J.: Rozšířený integrovaný algoritmus rozvrhovania výrobných systémov typu HMLV. *WITNESS 2011 : Sborník příspěvků. 14. ročník mezinárodní konference*, CD-Rom, Česká republika, 2011.

Švančara, J., Králová, Z., Šimkovič, A.: HMLV Manufacturing System Scheduling using Extended Integrated Algorithm. *PEIT '11: New Paradigms in Electronics & Information Technologies : 1st International Conference*, CD-Rom, Alexandria, Egypt, 2011.

Švančara, J., Králová, Z.: HMLV Systems Production Scheduling using Permutation Algorithm and Simulation. *PEIT '11: New Paradigms in Electronics & Information Technologies : 1st International Conference*, CD-Rom, Alexandria, Egypt, 2011.

Švančara, J.: HMLV Manufacturing Systems Simulation Analysis using the Database Interface. *Recent Advances in Manufacturing Engineering : 4th International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems*, s. 15-19, Barcelona, Spain, ISBN 978-1-61804-031-2, 2011.

Švančara, J., Králová, Z.: Permutačný algoritmus rozvrhovania HMLV výrobného systému s využitím simulácie. *WITNESS 2011 : Sborník příspěvků. 14. ročník mezinárodní konference*, CD-Rom, Česká republika, 2011.

Švančara, J., Králová, Z.: Simulation Analysis of the Power Supply Production Line. In: *Selected Topics in Modelling and Control*, s. 113-117, Vol. 7, Bratislava, 978-80-227-3597-1, 2011.

Švančara, J., Králová, Z.: Genetické algoritmy a simulácia v rozvrhovaní mnohovýrobných výrobných systémov. *WITNESS 2012 : Sborník příspěvků. Conference Witness 2012*, Hrubá Voda, Česká republika, 2012.

** Švančara, J., Králová, Z.: High-Mix Low-Volume Flow Shop Manufacturing System Scheduling. *INCOM 2012 : 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, Bucharest, Romania, ISBN 978-3-902661-98-2, 2012.

Švančara, J., Králová, Z., Blaho, M.: Optimization of HMLV Manufacturing Systems Using Genetic Algorithm and Simulation. *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, Italy, s. 482-487, ISBN 1974-9821, Vol. 5, No. 1, 2012.

* článok citovaný v práci:

Vassiliou, V., Menicou, M., Chartosia, N., Christofi, S., Charalambides, M.: Preliminary analysis for adopting high pressure treatment: a simulation-based approach. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Mathematical Models for Engineering Science, and Proceedings of the 2nd International Conference on Development, Energy, Environment, Economics, and Proceedings of the 2nd International Conference on Communication and Management in Technological Innovation and Academic Globalization*, Wisconsin, USA, 2011.

** článok ocenený cenou „Winner of the Industrial Paper Prize“

na sympóziu *14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, Bucharest, Romania, 2012.

Najdôležitejšia použitá literatúra (okrem prác autora)

Arnold, J.R.T., Chapman, S.N.: *Introduction to materials management*. Pearson Prentice Hall, ISBN 0131128744, 2004.

Brezina, I., Čičková, Z., Reiff, M.: *Kvantitatívne metódy na podporu logistických procesov*. EKONÓM, ISBN 978-80-225-2648-7, 2009.

Bubeník, P., Hromada, J.: Simulácia ako podporný nástroj rozvrhovania výrobných úloh. *ASIS 1997. Advanced Simulation of Systems: 19th International Workshop*, str.277-282, Krnov, 1997.

Bubeník, P.: Rozvrhovanie výroby v systéme plánovania a riadenia výroby. s. 29-31. *Logistika* 7-8, 1999.

Davis, L.: *Handbook of Genetic Algorithms*. Van Nostrand Reinhold, NY, ISBN 0442001738, 1991.

Goldratt, E.M.: What is the theory of constraints? *APICS - The Performance Advantage*, vol. 3, no. 6, pp. 18–20, 1993.

Jerz, V.: Simulácia a optimalizácia výrobných systémov. FX s.r.o., ISBN 978-80-89313-16-7, 2008.

Košturiak, J., Frolík, Z.: *Štíhlý a inovatívni podnik*. Alfa Publishing, Praha, 1. vyd. ISBN 80-86-851-38-9, 2006.

Law, A.M., Kelton, W.D.: *Simulation modeling and analysis*. McGraw-Hill Higher Education, 2000.

Mahoney, R.M.: *High-Mix Low-Volume manufacturing*. Hewlett-Packard Company, 1997.

Pinedo. M.: *Scheduling: theory, algorithms, and systems*. Prentice Hall, ISBN 0-13-028138-7, 2002.

Sekaj, I.: *Evolučné výpočty a ich využitie v praxi*. IRIS, 2005.

Shen, W., Wang, L., Hao, Q.: Agent-based distributed manufacturing process planning and scheduling. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 36(4), 2006.

Unčovský, L., Koval', L., Fiala, P., Vejmla, S.: *Modely sieťovej analýzy*. Alfa, Bratislava, ISBN 80-05-00812-0, 1991.

Zailin, Z., Chuangjian, W., Jinguo, H., Lizhi, W., Xinyu, S. Optimization of manufacturing systems using genetic search and multi-resolution simulation. *8th International Conference on Control and Automation*, 1473-1480, ISBN 978-1-4244-5195-1, Xiamen, China, 2010.

IPA Slovakia, združenie. 2010 [online] <http://www.ipaslovakia.sk>