

Vytvorenie metodiky procesu multikriteriálnej optimalizácie výrobných liniek

Ján Čabala

Katedra Kybernetiky a Umelej Inteligencie
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovensko
jan.cabala@tuke.sk

Ján Jadlovský

Katedra Kybernetiky a Umelej Inteligencie
Technická univerzita v Košiciach
Košice, Slovensko
jan.jadlovsky@tuke.sk

Abstrakt — Článok sa zaoberá vtvorením metodiky procesu multikriteriálnej optimalizácie výrobných liniek a jej overením v laboratórnych podmienkach. Definovaná metodika pozostáva z krokov spadajúcich do oblastí modelovania výrobných procesov, multikriteriálneho rozhodovania a multikriteriálnej optimalizácie. V oblasti modelovania výrobných procesov boli vytvorené simulačné modely rôznych konfigurácií výrobných liniek využitím programového prostredia Matlab/Simulink. Vzniknuté modely boli realizované s využitím experimentálnych dát získaných z reálneho modelu výrobných liniek, ako aj na základe modelov daných výrobných procesov vytvorených prostredníctvom Petriho sietí. Na úrovni multikriteriálneho rozhodovania sú výstupy zo simulačných modelov transformované do formy vstupov vhodných pre riešenie úlohy multikriteriálnej optimalizácie zameranej na identifikáciu optimálnej konfigurácie výrobných liniek s využitím metód ELECTRE, AGREPREF, TOPSIS a AHP. Z pohľadu multikriteriálnej optimalizácie sú výstupy simulačných modelov využité pre definovanie matematického modelu úlohy multikriteriálnej optimalizácie špecializovanej na problém optimálneho produkčného procesu s dôrazom na optimalizáciu zisku a času výroby. Navrhnutý bol taktiež spôsob syntézy výsledkov riešenia úloh multikriteriálneho rozhodovania resp. optimalizácie pomocou rôznych metód za účelom vyššej objektívnosti získaných riešení. Na aplikačnej úrovni je implementovaná aplikácia pre riešenie úloh multikriteriálneho rozhodovania a multikriteriálnej optimalizácie v oblasti optimalizácie činnosti výrobných liniek v programovom prostredí MATLAB.

Príčné slová— *Výrobné procesy, modelovanie systémov s diskretnými udalosťami, multikriteriálne rozhodovanie, multikriteriálna optimalizácia, evolučné algoritmy, Matlab/Simulink, Stateflow*

I. ÚVOD

Rozhodovanie a optimalizácia sú predmetom najrôznejších výskumov a štúdií vedeckých tímov prakticky z celého sveta. Táto téma je veľmi aktuálna, nakoľko algoritmicizácia metód rozhodovania a optimalizácie umožňuje obmedziť vplyv človeka na výsledok rozhodovania a prenechať rozhodnutie metódam postaveným na matematickom základe. Využitie týchto metód zároveň zabezpečuje objektívnosť prijatých rozhodnutí a stratégií.

V procese rozhodovania resp. optimalizácie nie je možné vždy prijať výsledné rozhodnutie len na základe jedného

kritéria, v praxi sú najčastejšie riešené problémy, pri ktorých na rozhodnutie vplyva viacero kritérií, ktoré sú často protichodné a je potrebné nájsť riešenie tak, aby čo najviac vyhovovalo každému z rozhodovacích kritérií. Pre riešenie takýchto úloh existujú metódy multikriteriálneho rozhodovania (MKR) resp. multikriteriálnej optimalizácie (MO), ktorými sa budeme v článku zaoberať.

Článok popisuje návrh komplexnej metodiky procesu multikriteriálnej optimalizácie výrobných liniek a aplikácie metód multikriteriálneho rozhodovania a optimalizácie pri tomto procese na modeloch výrobných liniek, ktorými disponuje Centrum Moderných Metód Riadenia a Priemyselnej Informatiky na Katedre Kybernetiky a Umelej Inteligencie Technickej Univerzity v Košiciach.

Vytvorená metodika procesu riešenia úloh multikriteriálneho rozhodovania a multikriteriálnej optimalizácie popisuje tri základné oblasti, pomocou ktorých je možné riešiť problém multikriteriálnej optimalizácie činnosti výrobných liniek, konkrétne modelovanie výrobných liniek, multikriteriálne rozhodovanie a multikriteriálnu optimalizáciu.

V oblasti modelovania výrobných liniek je potrebná realizácia simulačných modelov rôznych konfigurácií výrobných liniek. Vytvorené simulačné modely boli realizované na základe dát z reálnych modelov výrobných liniek, ako aj z modelov výrobných liniek vytvorených pomocou Petriho sietí. Vytvorené modely poskytujú pre procesy multikriteriálnej optimalizácie a multikriteriálneho rozhodovania vstupné dáta, ktoré sú ďalej transformované do podoby vhodnej pre vstup do procesu multikriteriálneho rozhodovania, resp. pre definovanie matematického modelu úlohy multikriteriálnej optimalizácie. Pre implementáciu simulačných modelov bolo zvolené modelovanie pomocou Stateflow diagramov, ktoré sú súčasťou programového prostredia Matlab/Simulink.

Pre definovanie optimálnej konfigurácie výrobných liniek sú využité dáta zo simulačných modelov, ktoré ďalej slúžia ako vstupy do procesu MKR, v ktorom sa pomocou metód objektívizácie hodnotiacich kritérií a metód multikriteriálneho rozhodovania vyberie optimálna konfigurácia výrobných liniek vzhľadom na rôzne obmedzenia rozhodovacieho procesu. V tejto časti riešenia problému sú využité priame metódy

a metódy prahov citlivosti pre riešenie úloh multikriteriálneho rozhodovania.

Ich aplikačný potenciál v rámci procesu optimalizácie výrobných liniek je v procesoch nastavenia váhy optimalizovaných faktorov, ako aj pri procese výberu niektorého z variantov riešenia, napr. pri rozložení niektorých častí výrobnej linky a pod.

Hľadanie optimálnej konfigurácie montážnej linky je len jednou z mnohých možností aplikácie metód multikriteriálneho rozhodovania. Tieto metódy nachádzajú svoje uplatnenie aj v iných aplikačných oblastiach, napr. prípadová štúdia [1] sa zaoberá výberom optimálneho plánu maľovania áut v automobilovom priemysle v Portugalsku, pričom sú využité metódy AHP a MMASI. V štúdií je pri riešení rôznymi metódami vidieť rozdielne usporiadanie alternatív na druhom a ďalších miestach, avšak zvolenú stratégiu potvrdili obe vybrané metódy. Riešenie environmentálnych problémov s použitím metód SMART, PROMETHEE a ELECTRE III je diskutované v [2]. Z výsledkov štúdie vyzdvihujú autori skutočnosť, že možnosť využitia prahov veta pri metóde ELECTRE III môže spôsobiť úplne rozdielne výsledné poradie alternatív, než pri metódach SMART a PROMETHEE.

Podľa [3] je problematika multikriteriálneho rozhodovania využiteľná a aplikovateľná v oblasti výroby pri riešení týchto problémov:

- výber materiálu pre zvolenú inžiniersku aplikáciu,
- ohodnotenie rôznych návrhov dizajnu produktu,
- ohodnotenie spracovateľnosti výrobných materiálov,
- ohodnotenie a výber moderných metód výroby,
- ohodnotenie a výber flexibilných montážnych systémov,
- výber robota pre danú priemyselnú aplikáciu,
- výber softvéru pre návrh a zostavenie výrobného procesu,
- posúdenie vplyvu výrobného procesu na životné prostredie,
- výber lokality pre výstavbu výrobnej haly,
- výber obchodníka v dodávateľskom reťazci atď.

V oblasti výrobných procesov sa prístupy a metódy multikriteriálneho rozhodovania využívajú aj na ohodnotenie a výber dodávateľov. Prehľad metód a prístupov v tejto oblasti je predmetom štúdie [4]. Jednou z najpopulárnejších metód pre riešenie úloh v tejto oblasti je podľa výsledkov štúdia metóda AHP. Štúdia [5] poskytuje okrem iného aj prehľad metód MKR s frekvenciou ich využitia pri riešení problému výberu dodávateľa, kde sa na pomerne vysokých priečkach umiestnili metódy AHP a TOPSIS, ktoré sú využité taktiež v tejto dizertačnej práci.

Motivácia pre výber prístupu MKR k riešeniu problému optimálnej konfigurácie výrobných liniek vyplynula z aplikovateľnosti týchto metód pre riešenie uvedeného problému. Z výsledkov štúdií [1] a [2] uvedených vyššie vyplýva, že riešenie pomocou rôznych metód MKR môže poskytovať rozdielne výsledné usporiadanie alternatív. Tento fakt bol motiváciou pre realizáciu spôsobu syntézy výsledkov

procesu MKR získaných pomocou rôznych metód ako súčasti výpočtového procesu riešenia úlohy MKR.

V rámci výberu metód ocenenia hodnotiacich kritérií, ako aj metód pre samotné riešenie úloh MKR boli z portfólia metód zvolené metódy s možnosťou jednoduchšej algoritmickej s dôrazom na čo najväčšiu objektivizáciu riešeného problému. V rámci metód MKR bol pri výbere kladený dôraz aj na rozmanitosť zvolených prístupov tak, aby zvolené metódy zahrnuli rozdielne prístupy k riešeniu úlohy MKR s cieľom napomôcť väčšej objektivite pri syntéze čiastkových výsledkov. Ďalším faktorom bola taktiež absencia matematického aparátu využiteľného pri syntéze výsledkov získaných pomocou rôznych metód MKR. V realizácii spomínanej syntézy výsledkov a definovaní matematického aparátu pre jej splnenie tvorí jeden z prínosov tejto práce.

Vstupy zo simulačných modelov sú taktiež využiteľné v procese riešenia multikriteriálnej optimalizácie výrobného plánu s cieľom maximalizovať zisk a časovú úsporu výrobného procesu. Pre riešenie tejto úlohy je využitá kombinácia matematických metód a metód umelej inteligencie.

Pokiaľ sa zameriame na metódy umelej inteligencie, tak sa v problematike multikriteriálnej optimalizácie využívajú najmä evolučné algoritmy. Sú jedným z prístupov umožňujúcich hľadanie najlepších riešení pri skúmaní relatívne malého počtu možných riešení, pretože rozsah možných riešení je v mnohých prípadoch veľmi rozsiahly.

Niektoré algoritmy týchto skupín dokážu zvládnuť rôzne formy účelových funkcií a vyriešiť úlohy s komplikovanými množinami nedominovaných riešení (MOEA / D alebo NSGA-II) [6]. Práve komplexnosť bola jedným z dôvodov pre výber algoritmu NSGA-II na zostavenie množiny nedominovaných riešení pre riešenie cieľov DZP.

Evolučné algoritmy pracujú s populáciou jednotlivcov. Táto populácia zvyčajne obsahuje viac jednotlivcov, často stovky alebo dokonca tisíce. Prvá populácia je spravidla generovaná náhodne, takže pravdepodobnosť generovania každého potenciálneho riešenia je rovnaká. Táto populácia je potom ohodnotená na základe hodnotiacej funkcie (zodpovedá účelovej funkcii pri úlohách MO) a pričom najlepšie hodnotené jedince ostávajú v evolučnom procese, zatiaľ čo horšie sú vylúčené.

Na riešenie úloh multikriteriálnej optimalizácie sa spravidla používajú algoritmy skupiny VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithms). Podrobnejší popis tejto skupiny algoritmov možno nájsť v [7].

Motivácia pre výber kombinácie matematických metód a metód umelej inteligencie na vyriešenie úlohy definície optimálneho výrobného procesu na modeli montážnej linky PVS umiestnenej v rámci CMMRaPI KKUI FEI TUKE bola iniciovaná širokým aplikačným potenciálom týchto metód. Napr. pri riešení problému spolehlivosti systému bol problém s alokáciou redundancie vyriešený algoritmom NSGA - [8]. Z výsledkov vyplýva, že rozhodovateľ dostáva na výstupe množinu nedominovaných riešení, ktorá zodpovedá jeho preferenciám pomocou rôznych metód MO. Výsledkom vak nie je výber konkrétnej alternatívy riešenia problému. [9] popisuje využitie algoritmu MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm)

pri vyvážení činnosti výrobných liniek, zaoberajúci sa hlavne výkonom navrhnutého algoritmu pri zmenách parametrov optimalizačného procesu, ktoré ovplyvňujú kvalitu a diverzitu optimalizačného procesu. Využitie optimalizácie pomocou kolónie mravcov popisujú články [10], v ktorom sú taktiež zostavené množiny nedominantných riešení na základe rôznych modifikácií navrhnutého algoritmu kolónie mravcov, a [11], v ktorom je porovnaná výkonnosť algoritmu kolónie mravcov s algoritmi ULINO a simulovaným žiňaním, pričom algoritmus kolónie mravcov dosahuje v tomto prípade výrazne lepšie výsledky ako ostatné skúšané algoritmy. Genetické algoritmy sa môžu použiť aj na riešenie plánovania sekvencie výrobných zariadení v rámci výrobných liniek, čo je uvedené v [12]. Ďalšie možnosti aplikácie súvisiace s problémami dynamickej multikriteriálnej optimalizácie (množina nedominovaných riešení sa v čase mení) sú uvedené v [13]. Aplikácia MO v oblasti výrobných liniek je ilustrovaná v [14], kde sa cieľové programovanie používa na vyvázenie obojstrannej montážnej linky, pričom optimalizovanými faktormi je minimalizácia počtu prepojených pracovných staníc, minimalizácia počtu pracovných staníc a minimalizácia času výrobného cyklu.

Ďalším z dôvodov pre zvolenie kombinácie matematického prístupu a prístupu umelej inteligencie pre riešenie tohto problému vyplynula z potreby výberu konkrétnej stratégie pre riešenie problému optimálneho výrobného procesu na výrobných linkách PVS, pričom využité matematické metódy popísané v nasledujúcich kapitolách poskytujú ľahko implementovateľný a vhodný nástroj pre výber výsledného riešenia z množiny nedominovaných riešení. Taktiež bol v práci navrhnutý spôsob syntézy výsledkov pomocou rôznych matematických metód pre zabezpečenie väčšej objektívnosti výsledkov riešenia úlohy multikriteriálnej optimalizácie.

Výsledkom navrhutej metodiky je definícia optimálnej konfigurácie výrobných liniek a určenie optimálneho výrobného procesu prebiehajúceho na linkách vzhľadom k definovaným cieľom výrobného procesu.

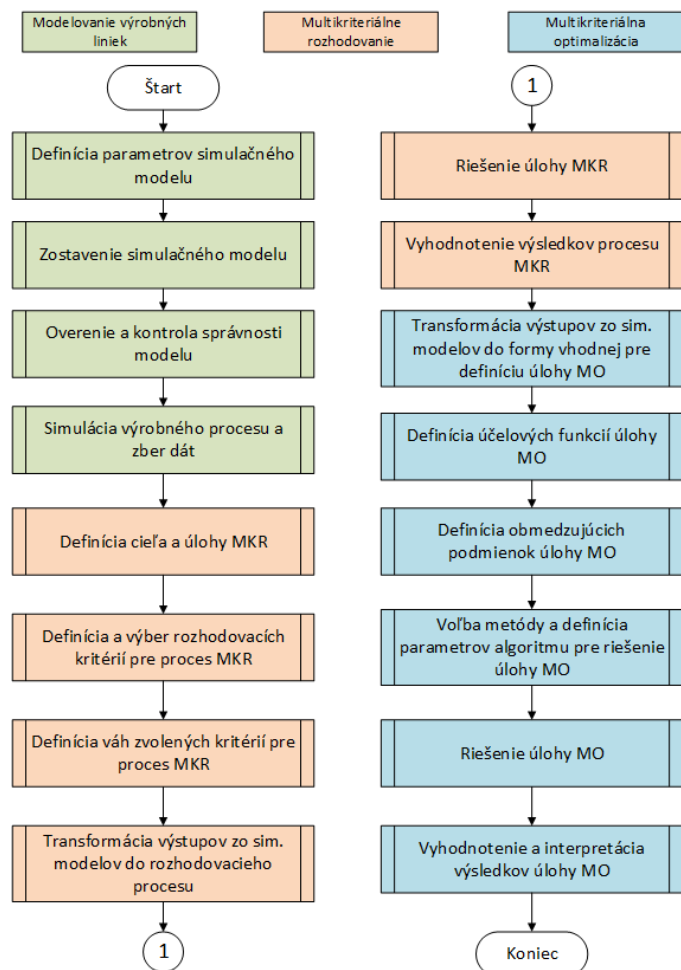
II. METODIKA PROCESU MULTIKRITERIÁLNEJ OPTIMALIZÁCIE VÝROBNÝCH LINIEK

Táto časť článku popisuje postupy realizácie jednotlivých úkonov potrebných pre riešenie problému optimálnej konfigurácie a výpočtu optimálneho produkčného plánu výrobných liniek. Táto metodika bude následne v ďalších kapitolách overená pri riešení problémov optimálnej konfigurácie a optimálneho produkčného procesu modelov automatizovaných výrobných liniek FMP a PVS umiestnených v rámci CMMRaPI KKUI FEI TUKE.

Návrh metodiky procesu multikriteriálnej optimalizácie výrobných liniek je možné rozdeliť do 3 častí, ktoré sa podieľajú na riešení čiastkových úloh celého procesu návrhu a vedú ku komplexnému riešeniu zadaného problému:

1. modelovanie výrobných liniek,
2. definícia optimálnej konfigurácie výrobných liniek pomocou metód multikriteriálneho rozhodovania,
3. definícia optimálneho produkčného plánu výrobných liniek pomocou metód multikriteriálnej optimalizácie.

Celý proces definovania metodiky je rozdelený do týchto 3 častí, v rámci ktorých sú popísané jednotlivé kroky vedúce k splneniu ako čiastkových cieľov daného kroku, tak aj komplexného cieľa – zabezpečenia optimálnej činnosti automatizovanej výrobných liniek. Metodický postup pri riešení úlohy MKR je znázornený na Obr. 1.



Obr. 1 Postupnosť krokov metodiky procesu multikriteriálnej optimalizácie výrobných liniek

A. Modelovanie výrobných liniek

Hlavnou úlohou modelovania a implementácie simulačných modelov výrobných liniek do zvoleného programového prostredia je vytvorenie modelu, ktorý sa následne využíva na simuláciu výrobného procesu danej výrobných liniek. Výhodou simulačných modelov je ich menšia finančná náročnosť v porovnaní s budovaním reálnych prototypov. S využitím Stateflow diagramov v programovom prostredí Matlab/Simulink, vieme vytvoriť pomerne presný simulačný model výrobného procesu, ktorý poskytuje výstupy a parametre výrobného procesu, ktoré môžu byť následne ďalej spracované a využité v procese optimalizácie činnosti výrobných liniek.

Taktiež, je možné v simulačnom prostredí realizovať a testovať rôzne možnosti konfigurácie výrobných liniek, ktoré nie je možné v daných podmienkach testovať reálne, či už z dôvodu finančných, časových alebo priestorových obmedzení.

Metodika v oblasti modelovania výrobných liniek pozostáva z nasledujúcich krokov:

1. **Definícia parametrov modelu** - pre zostavenie modelu je nevyhnutný dostatočný počet parametrov, ktoré definujú výrobný proces a ktoré sú potrebné pre zostavenie simulačného modelu danej výrobnej linky
2. **Zostavenie simulačného modelu** - v tomto kroku sa na základe definovaných parametrov realizuje samotná tvorba simulačného modelu výrobnej linky vo zvolenom programovom prostredí. Výber programového prostredia sa odvíja od účelu simulačného modelu (cieľom môže byť napr. vizualizácia konkrétnych činností na linke, alebo je žiaduce proces výroby znázorniť schematicky a zozbierať výstupné parametre simulácie výrobného procesu). Navrhnutá metodika využíva simulačný model výrobnej linky najmä na zisk výstupných parametrov výrobného procesu, ktoré sú v ďalších krokoch využité ako vstupy do procesov multikriteriálneho rozhodovania resp. optimalizácie
3. **Overenie a kontrola správnosti modelu** - proces overenia a kontroly (validácie) vytvoreného modelu opäť prebieha v závislosti na celi, za ktorým bol model realizovaný. V prípade, že bol model tvorený vo fáze návrhu výrobnej linky, je overenie možné realizovať pomocou detailného sledovania funkcionality modelu, ktorá musí zodpovedať predstave realizátora modelu. Taktiež je potrebné sledovať výstupné parametre modelu, ktoré by mali korešpondovať s predpokladanými výstupmi. Výstupné parametre sú dôležité aj pri realizácii modelu na základe už existujúcej výrobnej linky, tu je však kontrola správnosti modelu jednoduchšia, nakoľko je výsledky simulácie možné porovnať z výstupmi z reálneho modelu.
4. **Simulácia výrobného procesu a zber údajov z modelu** - Posledným krokom realizovaným v rámci procesu modelovania je samotná simulácia výrobného procesu na jednotlivých simulačných modeloch a zber výstupných parametrov z týchto modelov. Výstupné parametre jednotlivých simulácií sú následne spracované a využité v procese multikriteriálnej optimalizácie a multikriteriálneho rozhodovania. Pre realizáciu simulácie výrobného procesu je nevyhnutné taktiež zadefinovať vstupy do procesu simulácie, ktoré sa počas realizácie jednotlivých simulácií nemenia: definícia typu produktu, počet vyrábaných produktov atď.

Modelovanie výrobných liniek prostredníctvom Stateflow diagramov v laboratórnom prostredí CMMRaPI KKUI FEI TUKE je predmetom článku [15].

B. Multikriteriálne rozhodovanie

Úlohou metód multikriteriálneho rozhodovania pri definovaní metodiky procesu multikriteriálnej optimalizácie činnosti výrobných liniek je na základe vstupných parametrov získaných rôznymi spôsobmi zvoliť najlepšiu alternatívu z určitého konečného množstva ponúkaných alternatív riešenia.

Pri navrhovanej metodike sú metódy multikriteriálneho rozhodovania využité pre výber najlepšej možnej konfigurácie resp. rozloženia výrobných pracovísk v rámci výrobnej linky. Navrhnutá metodika pozostáva v oblasti MKR z nasledujúcich krokov:

1. **Definícia úlohy a cieľa** - prvým krokom pri riešení úlohy multikriteriálneho rozhodovania je definícia cieľa tejto úlohy. V týchto úlohách by mal byť cieľ spravídla jeden, na rozdiel od úloh multikriteriálnej optimalizácie. Definícia cieľa vzniká väčšinou ako konsenzus názorov viacerých členov predstavenstva organizácie. Cieľ v tomto prípade nemusí byť definovaný konkrétne, skôr predstavuje popis problému, ktorý by mal byť prostredníctvom MKR vyriešený. Cieľ musí byť dosiahnuteľný viacerými spôsobmi, ktoré predstavujú rôzne alternatívy riešenia úlohy MKR. V úlohe z laboratórneho prostredia CMMRaPI KKUI FEI TUKE je cieľov voľba optimálnej konfigurácie výrobnej linky FMP.
2. **Definícia a výber rozhodovacích kritérií** - môžu nastať 2 situácie: individuálne rozhodovanie - v tomto prípade definuje kritériá pre rozhodovanie sám rozhodovateľ, alebo skupinové rozhodovanie - v tomto prípade definuje kritériá pre rozhodovanie skupina ľudí (expertov)
3. **Definícia váh zvolených rozhodovacích kritérií** - významnú mieru pri riešení úlohy MKR zohráva váha resp. dôležitosť jednotlivých kritérií, ktoré ovplyvňujú výsledok rozhodovania. Pri individuálnom rozhodovaní je proces jednoduchší, pri skupinovom sa využívajú metódy na to určené (napr. Bodovacia metóda, metóda expertov)
4. **Transformácia výstupov zo simulačných modelov na vstupy do rozhodovacieho procesu** - výstupy zo simulačných modelov musia byť pre potreby multikriteriálneho rozhodovania transformované do vhodnej podoby. Spôsob zmeny týchto parametrov hodnotenia jednotlivých alternatív vstupujúcich do procesu rozhodovania môže byť realizovaný pomocou relatívneho alebo absolútneho hodnotenia.
5. **Riešenie úlohy MKR** - v tomto kroku riešenia úlohy MKR sa realizuje proces výberu najlepšej alternatívy z ponúknutého spektra navrhovaných riešení. Výber je možné realizovať rôznymi metódami multikriteriálneho rozhodovania (ELECTRE I – IV, AFGREPREF, TOPSIS, AHP. Pre väčšiu objektivnosť rozhodovacieho procesu je možné riešiť úlohu MKR pomocou rôznych metód postavených na rôznych matematických základoch
6. **Vyhodnotenie výsledkov procesu MKR** - v prípade, že rozhodovateľ využije pre určenie výsledkov procesu MKR jednu metódu spracovania vstupných údajov, tak výsledkom je spravídla poradie alternatív podľa ich užitočnosti. V prípade, že sú rozdiely medzi ohodnotením alternatív malé, alternatívy vykazujú rovnakú hodnotu hodnotiaceho ukazovateľa. V takejto situácii môže rozhodovateľ kvôli väčšej objektivnosti

rozhodovacieho procesu využiť pre riešenie úlohy MKR viaceré metódy s rôznym rozhodovacím procesom. V tomto prípade je však potrebné definovať, ako sa riešiteľ resp. skupina riešiteľov vysporiada s prípadom, keď nebudú výsledky procesu MKR podľa jednotlivých metód konzistentné.

C. Multikritériálna optimalizácia

Multikritériálna optimalizácia je optimalizácia sledujúca viac než jeden cieľ pri hľadaní optimálnej alternatívy. Rozdiel medzi využitím MKR a MO je v tom, že pri multikritériálnom rozhodovaní sa rozhodovateľ rozhoduje medzi konečným počtom definovaných alternatív, pri multikritériálnej optimalizácii je úloha definovaná ako optimalizácia viac ako jednej účelovej funkcie pri dodržaní všetkých obmedzení danej úlohy MO. V aplikačnej oblasti optimalizácie činnosti výrobných liniek je možné riešiť pomocou MO napr. úlohy optimálneho výrobného plánu. Metodika v tejto oblasti pozostáva z krokov:

1. **Transformácia výstupov zo sim. modelov do formy vhodnej pre definíciu úlohy MO** - pre správny popis matematického modelu výrobného procesu prebiehajúceho na výrobnej linke je potrebné čo najlepšie poznať výrobný proces. Pri tomto procese je možné opäť využiť simulačné modely výrobných liniek, ktoré na základe výstupov simulácií dokážu dodať detailné informácie ohľadom výrobného procesu, z ktorých je následne možné zadefinovať matematický model úlohy multikritériálnej optimalizácie.
2. **Definícia účelových funkcií** - Veľmi dôležitým krokom v procese multikritériálnej optimalizácie výrobných liniek je definícia matematického modelu úlohy MO. V tomto kroku je potrebné definovať ciele optimalizácie, ako aj smer optimalizácie každého z definovaných cieľov – či sa jedná o minimalizáciu alebo maximalizáciu daného ukazovateľa.[16]
3. **Definícia obmedzujúcich podmienok** - ďalším krokom pri procese riešenia úlohy MO je definovanie obmedzujúcich podmienok. Tie sú definované vo forme rovníc alebo nerovníc, ktoré musia platiť, aby sa dané riešenie úlohy MO dalo považovať za prípustné. Ak riešenie nespĺňa niektorú z obmedzujúcich podmienok, je považované za neprípustné a ďalej sa s ním v procese riešenia neuvažuje. Obmedzenia úlohy sú reprezentované rovnicami a nerovnicami, ktoré musia platiť (v praxi predstavujú napr. obmedzenia zásob, obmedzené možnosti investícií atď.).[16]
4. **Voľba metódy a definícia parametrov algoritmu** - Po zadefinovaní úplného matematického modelu úlohy MO je úloha multikritériálnej optimalizácie pripravená na riešenie. Spôsobov a metód pre riešenie úloh MO je mnoho, medzi základné patria matematické metódy a metódy umelej inteligencie. V rámci navrhutej metodiky je využité riešenie pomocou fúzie týchto prístupov k riešeniu úloh MO. Riešenie úlohy MO pozostáva v navrhutej metodike

z 2 častí: definícia Pareto frontu, resp. množiny nedominovaných riešení pomocou metód umelej inteligencie a následný výber riešenia úlohy MO prostredníctvom matematických metód.

5. **Riešenie úlohy MO** - v prvej fáze riešenia úlohy multikritériálnej optimalizácie využijeme metódy umelej inteligencie, konkrétne modifikovaný evolučný algoritmus NSGA-II pre špecifikáciu tzv. Pareto frontu, resp. množiny nedominovaných riešení danej úlohy multikritériálnej optimalizácie. Pre nájdenie jedincov patriacich do Pareto frontu je možné využiť aj matematické metódy, avšak najmä vzhľadom k pomerne náročnému procesu jeho identifikácie, zvlášť pri zložitejších tvaroch účelových funkcií, sme zvolili pre riešenie tejto časti úlohy MO evolučný algoritmus. V druhej fáze sa spomedzi riešení, ktoré sú obsiahnuté v množine nedominovaných riešení, zvolí optimálne riešenie úlohy MO. Keďže existuje viacero spôsobov resp. metód výberu optimálneho riešenia, je ideálne porovnať viaceré metódy a na základe ich výsledkov zvoliť optimálne riešenie.
6. **Vyhodnotenie a interpretácia výsledkov procesu MO** - výstupom z procesu riešenia úlohy multikritériálnej optimalizácie je poradie potenciálnych riešení zoradené podľa ich umiestnenia v danom Pareto fronte. V rámci jednotlivých frontov sú riešenia usporiadané podľa zvolenej matematickej metódy usporiadania týchto riešení. V prípade, že zvolené riešenie nekorešponduje s predstavami rozhodovateľa, je možné optimalizačný proces zopakovať so zmenenými parametrami a porovnať výsledky získané pomocou rôznych metód a následne zvoliť riešenie, ktoré najviac korešponduje s potrebami rozhodovateľa.

Riešenie úloh multikritériálnej optimalizácie z ekonomického prostredia prostredníctvom nástrojov programového prostredia Matlab/Simulink je uvedené v [17].

V ďalších kapitolách článku budú zobrazené výstupy získané v procese overenia správnosti vytvorenej metodiky v laboratórnom prostredí Centra moderných metód riadenia a priemyselnej informatiky pracujúceho v rámci Katedry Kybernetiky a Umelej Inteligencie Fakulty elektrotechniky a Informatiky technickej Univerzity v Košiciach (CMMRaPI KKUI FEI TUKE).

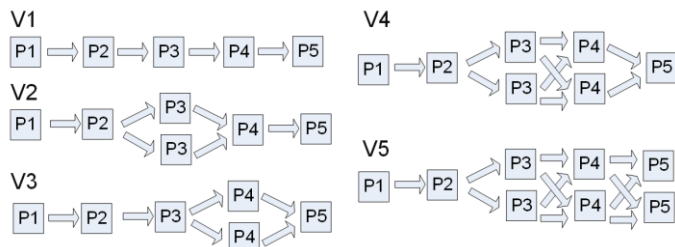
III. MODELOVANIE A SIMULÁCIA VÝROBNÉHO PROCESU VÝROBNÝCH LINIEK

V rámci overenia správnosti navrhutej metodiky boli v oblasti modelovania a simulácie výrobných procesov zostavené simulačné modely rôznych konfigurácií výrobných liniek FMP. Proces tvorby týchto simulačných modelov sleduje navrhnutú metodiku procesu multikritériálnej optimalizácie výrobných liniek, uvedenú v predchádzajúcej kapitole. Konkrétne sa jedná o tieto konfigurácie:

- V1: súčasný stav (1 pracovisko na každom poste),
- V2: prídanie jedného pracoviska na post 3,

- V3: pridanie jedného pracoviska na post 4,
- V4: pridanie jedného pracoviska na posty 3 a 4,
- V5: pridanie jedného pracoviska na posty 3, 4 a 5.

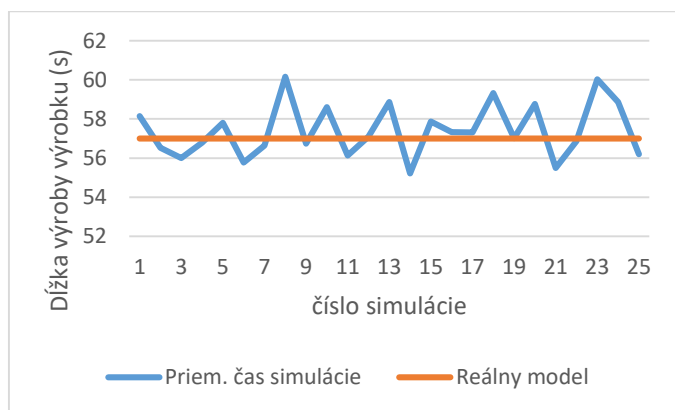
Simulačné modely (schémy sú zobrazené na Obr. 2) boli vytvorené v pomocou Stateflow diagramov v programovom prostredí Matlab/Simulink. Predpokladom pre ich vznik bol model výrobnéj linky FMP popísaný pomocou Petriho sietí, ktorý bol vytvorený ako výstup 1. fázy riešenia projektu Technicom. Zdrojom dát pre vytvorenie simulačných modelov boli taktiež hodnoty jednotlivých úkonov namerané v reálnom výrobnom procese na laboratórnom modeli FMP.



Obr. 2 Uvažované konfigurácie výrobnéj linky FMP

Proces overenia a kontroly správnosti modelu opäť prebehol na základe porovnania časov realizácie výrobkov na reálnom modeli výrobnéj linky a realizáciou simulácií na modeli alternatívy V1 (zodpovedajúca súčasnému stavu reálneho modelu výrobnéj linky FMP). V rámci výrobného procesu realizovaného na reálnom modeli FMP bolo vyrobených 10 výrobkov a časy vykonávania jednotlivých úkonov boli zaznamenané do tabuľky vytvorenej v programe Microsoft Excel.

Pre realizáciu porovnania funkcionality činnosti simulačného a reálneho modelu bolo realizovaných 25 simulácií výroby 100 výrobkov na simulačnom modeli alternatívy V1, pričom bol následne vypočítaný priemerný čas výroby jedného výrobku. Táto hodnota sa v jednotlivých simuláciách pohybuje medzi 55 a 60 sekúnd, čo znamená odchýlku 2 až 3 sekundy od času výroby na reálnom modeli - Obr. 3.



Obr. 3 Porovnanie času výroby výrobku v reálnom a simulačnom modeli výrobnéj linky FMP

Po vytvorení a porovnaní funkcionality simulačného a reálneho modelu výrobnéj linky prebehla realizácia simulácií a zberu údajov zo simulačných modelov. Výstupy z modelov sú následne ďalej využité ako vstupy pre riešenie úloh

multikriteriálneho rozhodovania a multikriteriálnej optimalizácie – TABUĽKA 1.

TABUĽKA 1 Výstupy zo simulačných modelov rôznych konfigurácií výrobnéj linky FMP

Variant riešenia	Priem. dĺžka vyr. cyklu (s)	Priem. čas čakania výrobku na poste 3 (s)	Priem. čas čakania výrobku na poste 4 (s)	Priem. čas čakania výrobku na poste 5 (s)	Priem. čas čakania výrobku v rade (s)
V1	523,6	136,19	27,57	3,89	167,65
V2	494,89	1,5	76,65	6,58	84,73
V3	477,11	67,89	0,09	13,92	81,90
V4	448,22	5,97	0,03	9,16	15,16
V5	335,72	1,79	6,08	3,37	11,24

IV. APLIKÁCIA NAVRHNUTEJ METODIKY V PROCESSE VÝBERU OPTIMÁLNEJ KONFIGURÁCIE VÝROBNÉJ LINKY

V tejto kapitole je predstavené využitie navrhnutéj metodiky v procese výberu optimálnej konfigurácie výrobnéj linky Flexibilný montážny podnik (FMP), ktorej reálnym model CMMRaPI KKUI FEI TUKE disponuje. V rámci kapitoly sú taktiež popísané jednotlivé kroky aplikovania metodiky pri riešení tohto problému, samotné riešenie problému rôznymi metódami multikriteriálneho rozhodovania (MKR), ako aj vyhodnotenie a interpretácia riešenia.

Cieľom tejto úlohy multikriteriálneho rozhodovania je voľba optimálnej konfigurácie výrobnéj linky FMP. V tejto úlohe boli pri riešení uvažované 4 rozhodovacie kritériá (na kritériách sa zhodli 5 členovia CMMRaPI KKUI FEI TUKE, ďalej označovaní ako „experti“):

- C1: zvýšenie efektivity výrobného procesu,
- C2: minimalizácia prestojov vo výrobnom procese,
- C3: dopad na životné prostredie,
- C4: veľkosť investície.

Proces definovania váh teda začína ohodnotením váh jednotlivých rozhodovacích kritérií expertmi. Každý z expertov hodnotil váhami dôležitosť jednotlivých kritérií tak, aby bol súčet váh rovný 1. Jednotlivé ohodnotenia sú zapísané v TABUĽKA 2:

TABUĽKA 2 Ohodnotenie dôležitosti kritérií expertmi

Expert/Kritérium	C1	C2	C3	C4
E1	0.7	0.1	0	0.2
E2	0.8	0.1	0.05	0.05
E3	0.5	0.1	0.3	0.1
E4	0.6	0.05	0.1	0.25
E5	0.5	0.2	0.2	0.1

Aplikovaním metódy expertov na ohodnotenie jednotlivých váh expertmi boli získané nasledujúce váhy kritérií – TABUĽKA 3:

TABUĽKA 3 Výsledné váhy kritérií získané metódou expertov

Kritérium	C1	C2	C3	C4
Váha	0.6922	0.082	0.0547	0.1711

Pre proces MKR je vstupy (namerané dáta zo sim. modelov, ako aj vstupy pre definovanie miery splnenia každého kritéria každou z možných alternatív riešenia) potrebné upraviť na jednotný formát, pretože momentálne sú ich hodnoty udávané v rôznych jednotkách. Pre úpravu vhodnú pre proces MKR využijeme škálu od 0 po 100, ktorá bude predstavovať percentuálne splnenie každého kritéria každou z alternatív – TABUĽKA 4.

TABUĽKA 4 Vstupy do procesu MKR

	C1	C2	C3	C4
V1	0	0	100	100
V2	15	53	75	89
V3	25	55	50	42
V4	40	97	25	32
V5	100	100	0	0

Výsledky riešenia úlohy MKR pomocou jednotlivých metód môžeme zhrnúť do prehľadnej tabuľky, v ktorej uvedieme poradie jednotlivých alternatív podľa hodnotiaceho ukazovateľa jednotlivých metód MKR – TABUĽKA 5:

TABUĽKA 5 Výsledky riešenia úlohy MKR rôznymi metódami

Poradie/ Metóda	ELECTRE III	AGREPREF	TOPSIS	AHP
1.	V5 1	V5 4	V5 0,7951	V5 0,4772
2.	V2 1,5	V4 2	V4 0,4039	V4 0,1483
3.	V4 2	V3 0	V3 0,2684	V1 0,1362
4.	V1 2,5	V2 -2	V2 0,2472	V2 0,1335
5.	V3 3	V1 -4	V1 0,2049	V3 0,1047

Jedným zo spôsobov je obodovanie poradia alternatív podľa ich umiestnenia v rozhodovacom procese podľa každej z využitých metód (najlepšia alternatíva podľa každej z metód získava 1 bod, najhoršia pv bodov) a následná syntéza tohto bodovania pomocou vzťahu:

$$pb_i = \sum_{j=1}^{pm} b_{ij}, \text{ pre } i = 1, 2, \dots, pv, \quad (1)$$

kde pb_i je výsledný počet bodov i -tej alternatívy, b_{ij} je bodové ohodnotenie i -tej alternatívy v j -tej metóde, pm je počet metód a pv je počet výsledkov.

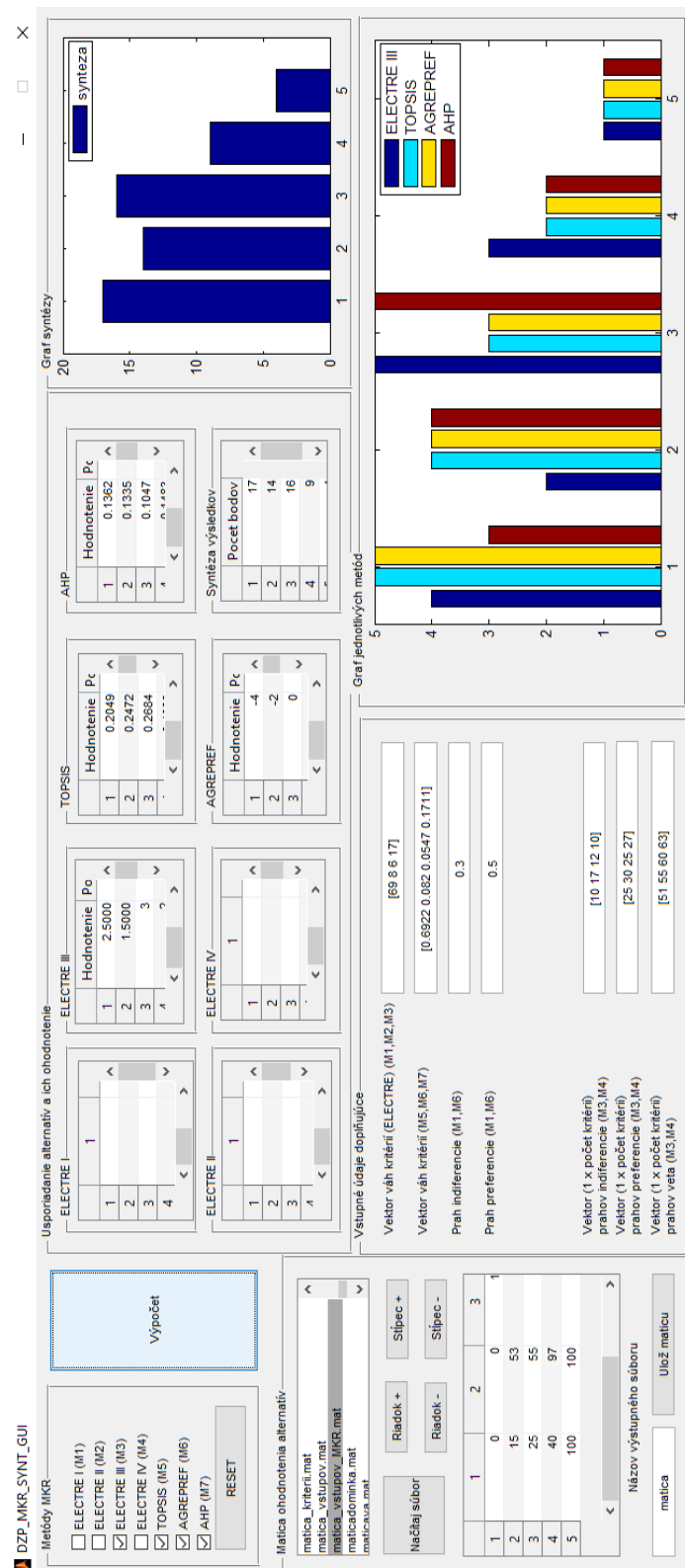
V tomto prípade sú hodnoty matice obodovania nasledovné (TABUĽKA 6):

TABUĽKA 6 Výsledok syntézy riešenia úlohy MKR využitím rôznych metód

	ELECTRE III	AGREPREF	TOPSIS	AHP	pb_i	Poradie
V1	4	5	5	3	17	5.
V2	2	4	4	4	14	3.
V3	5	3	3	5	16	4.
V4	3	2	2	2	9	2.
V5	1	1	1	1	4	1.

Z uvedenej tabuľky je zrejmé, že podľa všetkých v práci využitých metód je víťaznou alternatívou alternatíva V5: pridanie pracovísk na posty 3,4 a 5. Za týmto jednoznačným výsledkom je možné hľadať pomerne nerovnomerné rozdelenie váh jednotlivých kritérií (jednoznačná preferencia kritéria C1: zvýšenie efektivity výrobného procesu, pred ostatnými

kritériami) v kombinácii s vysokým ohodnotením práve tohto kritéria pri víťaznej alternatíve, keďže táto dokázala vyprodukovať 24 výrobkov vo výrazne najkratšom čase.



Obr. 4 Riešenie úlohy MKR pomocou aplikácie vytvorenej počas doktorandského štúdia

Ohliadnuc od jednoznačného výberu alternatívy V5 ako víťaznej, poradie ostatných alternatív sa v závislosti od metódy mení. Vystáva preto otázka, ako sa vysporiadať s rôznymi výsledkami podľa rôznych metód.

Môžeme usudzovať, že po jednoznačne najlepšej alternatíve V5, sa na 2. mieste podľa syntézy dielčích hodnotení umiestnila alternatíva V4, nasledovaná postupne alternatívami V2, V3 a V1. Podľa grafu na Obr. 4 môžeme ďalej zhodnotiť, že metódy AGREPREF a TOPSIS uprednostnili alternatívu s vyššou investíciou a skrátením času výroby (V3) pred alternatívami s lepším hodnotením v oblastiach dopadu na životné prostredie a veľkosti počiatkovej investície (V1 resp. V2). Naopak, metódy ELECTRE III a AHP uprednostnili alternatívy V1 a V2 pred alternatívou V3.

Riešenie úlohy MKR pomocou uvedených metód je publikované v [18].

V. APLIKÁCIA NAVRHNUTEJ METODIKY PRI OPTIMALIZÁCII VÝROBNÉHO PROCESU VÝROBNEJ LINKY

V nasledujúcej časti je popísaný spôsob aplikácie definovanej metodiky procesu multikriteriálnej optimalizácie výrobného procesu pri optimalizácii výrobného procesu Pružného Výrobného Systému (model automatizovanej výrobného linky v rámci CMMRaPI KKUI FEI TUKE).

V rámci výrobného linky PVS je definovaná požiadavka na výrobu 4 rôznych typov výrobkov (mozaik), ktoré sú vytvárané zo 4 rôznych typov farebných kociek: modrých, bielych, zelených a čiernych. Počet jednotlivých typov kociek potrebných pre výrobu daného výrobku je uvedený v TABUĽKA 7, rovnako ako aj kapacitné obmedzenie jednotlivých typov kociek pre jeden výrobný cyklus tejto výrobného linky.

TABUĽKA 7 Počet jednotlivých typov kociek potrebných na výrobu výrobkov

Kocka/výrobok	A	B	C	D	Kapacita
Modrá	5	7	7	3	100
Biela	3	4	2	4	80
Zelená	4	6	3	2	90
Čierna	5	5	6	6	120

Zisk z každej modrej kocky obsahujúcej v mozaike je 3 €, pri bielej kocke je to 5 €, pri zelenej 4 € a pri čiernej 2 €. Od počtu kociek, z ktorých sa mozaika skladá, sa taktiež odvíja čas výroby danej mozaiky. V rámci jedného výrobného cyklu je možné vyrobiť maximálne 24 výrobkov, nakoľko takýto počet výrobkov je možné naraz uskladniť. Konkrétne hodnoty dĺžky výroby každého z výrobkov získame zo simulačného modelu výrobného linky, ktorý bol realizovaný v rámci diplomovej práce Ing. Slavomíra Vartovníka [19], na ktorej som sa podieľal ako konzultant. Cieľom tejto úlohy MO je definovať výrobný proces tak, aby spĺňal všetky obmedzenia, a aby bol maximalizovaný ako zisk z predaja jednotlivých výrobkov, tak aj časová úspora výrobného procesu.

V rámci spomenutej DP bol vytvorený simulačný model a realizované simulácie rôznych variantov výrobného procesu na linke. Pre riešenie úlohy MO je potrebné definovať dĺžku procesu vkladania kocky do mozaiky, ktorá je podľa

vykonaných simulácií stanovená na 1,6 sekundy. Táto hodnota je dôležitá pre definíciu účelovej funkcie časovej úspory. Transformácia údajov v tomto prípade nie je tak rozsiahla ako v prípade riešenia úlohy MKR, nakoľko využiteľnosť simulačného modelu pri tomto type úlohy je obmedzená. Na druhej strane, pri zmene optimalizovaných parametrov by realizácia a transformácia výstupov zo simulačného modelu nabrala na význame.

Po výpočte zisku a časovej úspory z výroby jednotlivých výrobkov boli účelové funkcie definované nasledovne:

$$J_1(x) = 56x_1 + 75x_2 + 55x_3 + 49x_4 \rightarrow \max. \quad (2)$$

$$J_2(x) = 12,8x_1 + 4,8x_2 + 11,2x_3 + 16x_4 \rightarrow \max. \quad (3)$$

Obmedzenie výrobného procesu vyplynuli z kapacitných obmedzení, ako aj z ďalších obmedzení výrobného procesu a boli definované nasledovne:

$$5x_1 + 7x_2 + 7x_3 + 3x_4 \leq 100, \quad (4)$$

$$3x_1 + 4x_2 + 2x_3 + 4x_4 \leq 80, \quad (5)$$

$$4x_1 + 6x_2 + 3x_3 + 2x_4 \leq 90, \quad (6)$$

$$5x_1 + 5x_2 + 6x_3 + 6x_4 \leq 120, \quad (7)$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \leq 24, \quad (8)$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0. \quad (9)$$

Riešenie tejto úlohy multikriteriálnej optimalizácie má 2 fázy: najprv je využitý evolučný algoritmus NSGA-II pre zostavenie Pareto frontu (množiny nedominovaných riešení úlohy MO). Po ukončení výpočtového procesu zoradíme riešenia patriace do Pareto frontu podľa ich vhodnosti pre riešenie úlohy MO – TABUĽKA 8.

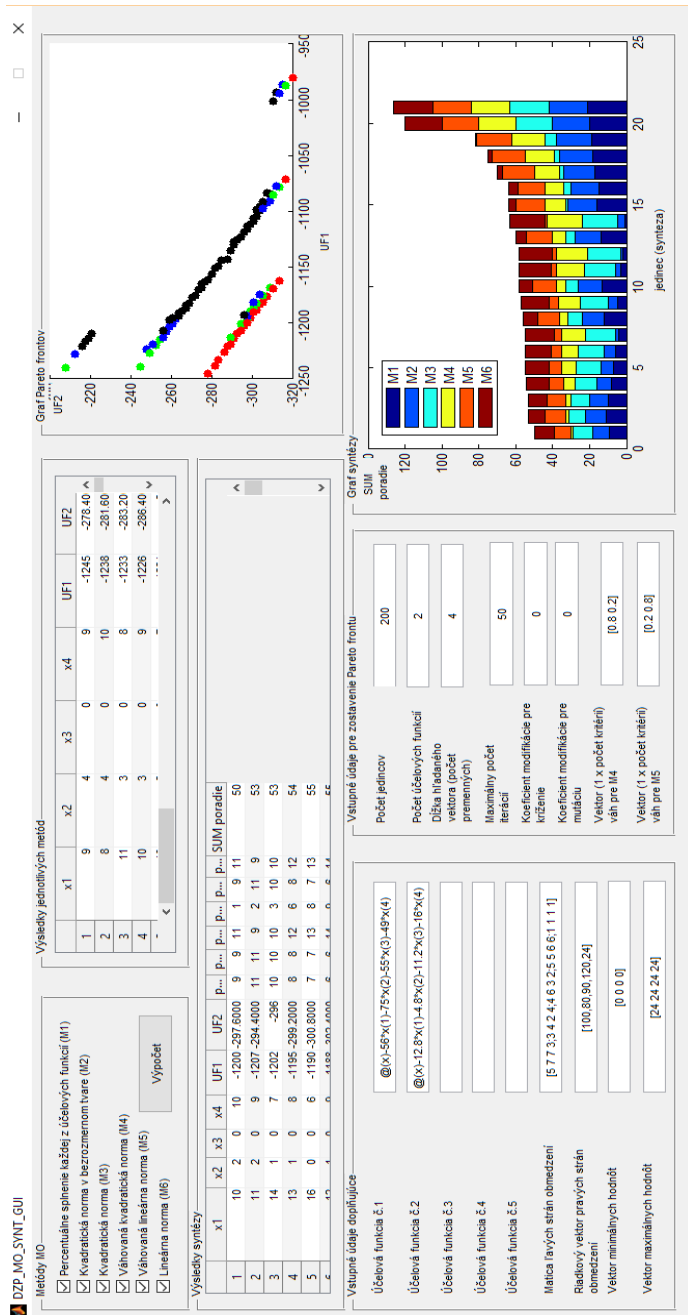
TABUĽKA 8 Jedince Pareto frontu zoradené podľa percentuálneho splnenia každej z účelových funkcií

x_1	x_2	x_3	x_4	$J_1(x)$	$J_2(x)$	$\delta J_1(x)$	$\delta J_2(x)$	$\sum \delta J_i(x)$
12	0	0	10	-1162	-313,6	0,066	0,02	0,086
13	0	0	9	-1169	-310,4	0,061	0,03	0,091
14	0	0	8	-1176	-307,2	0,055	0,04	0,095
11	1	0	10	-1181	-305,6	0,051	0,045	0,096
15	0	0	7	-1183	-304	0,049	0,05	0,099
12	1	0	9	-1188	-302,4	0,045	0,055	0,100
16	0	0	6	-1190	-300,8	0,044	0,06	0,104
13	1	0	8	-1195	-299,2	0,040	0,065	0,105
10	2	0	10	-1200	-297,6	0,036	0,07	0,106
14	1	0	7	-1202	-296	0,034	0,075	0,109
11	2	0	9	-1207	-294,4	0,030	0,08	0,110
15	1	0	6	-1209	-292,8	0,028	0,085	0,113
12	2	0	8	-1214	-291,2	0,024	0,09	0,114
9	3	0	10	-1219	-289,6	0,020	0,095	0,115
13	2	0	7	-1221	-288	0,019	0,1	0,119
10	3	0	9	-1226	-286,4	0,015	0,105	0,120
11	3	0	8	-1233	-283,2	0,009	0,115	0,124
8	4	0	10	-1238	-281,6	0,005	0,12	0,125
9	4	0	9	-1245	-278,4	0	0,13	0,13
6	0	0	15	-1071	-316,8	0,139	0,01	0,149
0	0	0	20	-980	-320	0,212	0	0,212

Riešením tejto úlohy multikriteriálnej optimalizácie je vektor $x=[12,0,0,10]$. To znamená, že podľa metódy percentuálneho splnenia každej z účelových funkcií by mala výrobná linka pri splnení všetkých obmedzení vyrobiť 12 výrobkov typu A a 10 výrobkov typu D. Zisk z jedného výrobného cyklu by v tomto prípade predstavoval 1162 €

a časová úspora oproti výrobe výrobkov s 25 kockami by bola 313,6 sekundy. Odchýlka od maximálnych vypočítaných hodnôt predstavuje 6,67% od maximálnej zistenej hodnoty zisku a 2% od maximálnej zistenej hodnoty časovej úspory. Spolu teda odchýlka od maximálnych zistených hodnôt účelových funkcií predstavuje 8,67%, čo je o 0,43% menej, ako v prípade druhej najlepšej alternatívy.

Keďže výsledky s využitím rôznych metód sú pomerne konfliktné, jedným zo spôsobov realizácie syntézy výsledkov rôznych metód MO je obodovanie poradia alternatív podľa ich umiestnenia v optimalizačnom procese podľa každej z využitých metód podľa vzťahu (1).



Obr. 5 Riešenie úlohy MO pomocou aplikácie vytvorenej počas doktorandského štúdia

Proces riešenia úlohy pomocou syntézy 6 matematických metód je zobrazený vo výstupe z aplikácie, ktorá bola pre riešenie úloh MKR a MO vytvorená v programovom prostredí MATLAB.

Ako je možné vidieť z Obr. 5, po syntéze výsledkov sa najvhodnejšou alternatívou riešenia javí alternatíva $\mathbf{x}=[10,2,0,10]$ tesne nasledovaná alternatívami $\mathbf{x}=[11,2,0,9]$ a $\mathbf{x}=[14,1,0,7]$. Zaujímavé je taktiež zistenie, že najlepšie riešenie získané pomocou metód percentuálneho splnenia každej z účelových funkcií, sa pri riešení pomocou syntézy viacerých matematických metód umiestnilo až na 14. mieste.

Z grafu je taktiež možné vidieť pomerne veľkú vyrovnanosť výsledkov syntézy, nakoľko až 17 z 21 jedincov z Pareto frontu delilo od seba pri syntéze 6 metód len 20 bodov. Pri bližšom pohľade na Obr. 5 je možné vidieť že 2 najnižšie a 2 najvyššie položené jedince Pareto frontu sú od ostatných pomerne vzdialené, vďaka čomu môžeme odôvodniť ich zlé umiestnenie v rámci syntézy riešenia pomocou rôznych metód. Vzhľadom k pomerne veľkej vyrovnanosti výsledkov syntézy môžeme taktiež usudzovať, že pri aplikácii rozličných konfigurácií výrobného procesu z popredných priechok syntézy by boli rozdiely v dosiahnutých výsledkoch výrobného procesu minimálne, čomu napovedajú aj malé rozdiely v hodnotách účelových funkcií týchto jedincov.

Vo výstupoch z aplikácie je uvedené poradie jednotlivých jedincov podľa rôznych matematických metód MO, ako aj výsledná hodnota syntézy týchto metód. Taktiež sú uvedené hodnoty účelových funkcií a hodnoty hodnotiacich charakteristík pri jednotlivých matematických metódach. V grafoch sú zobrazené jedince prislúchajúce do prvých piatich frontov, a taktiež je zobrazený výsledok syntézy riešenia úlohy MO.

VI. ZHRNUTIE

Výsledkom práce je komplexná metodika procesu multikriteriálnej optimalizácie výrobných liniek, overená na príkladoch riešených v laboratórnych podmienkach v rámci CMMRaPI KKUI FEI TUKE. Výstupy z modelovaných scenárov riešených v laboratórnych podmienkach demonštrujú využiteľnosť zostavenej metodiky pri riešení problémov v reálnych výrobných procesoch, pričom dôraz pri riešení je kladený predovšetkým na zabezpečenie čo najväčšej miery objektivity zvoleného rozhodnutia. Tento cieľ je zabezpečený využitím metód z rôznym matematickým základom, pričom vyhodnotenie riešenia je v oboch modelových scenároch realizované syntézou výsledkov získaných viacerými metódami. Zvolená metóda syntézy nereflektuje mieru preferencie jednotlivých výsledkov medzi sebou, vytvára len poradie alternatív. Pre exaktnějšíe riešenie týchto problémov by bolo možné uvažovať o definícii spôsobu syntézy metód zohľadňujúcej aj mieru preferencie (rozdielu užitočnosti resp. hodnotiacej charakteristiky danej metódy) medzi jednotlivými alternatívami riešenia.

Predpokladom pre riešenie aplikačných úloh z oblasti multikriteriálneho rozhodovania a multikriteriálnej optimalizácie bola realizácia simulačných modelov rôznych konfigurácií výrobných liniek, ktorej cieľom bol zisk dát

potrebných pre vstupy do procesu rozhodovania resp. optimalizácie.

V rámci práce je pomocou metód multikriteriálneho rozhodovania zvolená optimálna konfigurácia modelu výrobnéj linky s ohľadom na dĺžku výrobného procesu, efektívnosť využitia jednotlivých pracovísk, environmentálny aspekt a veľkosť investície rešpektujúcej kapacitné a priestorové obmedzenia pre potenciálnu implementáciu zvoleného riešenia.

Druhou aplikačnou oblasťou je voľba optimálneho produkčného procesu riešená kombináciou metód umelej inteligencie (modifikovaný algoritmus NSGA-II) a tradičných matematických metód vzhľadom na optimalizáciu zisku a času výroby, rešpektujúcej obmedzenia výrobného procesu riešeného modelu výrobnéj linky.

V oboch aplikačných oblastiach riešenie realizované ako pomocou jednotlivých metód, tak aj pomocou syntézy riešení získaných jednotlivými metódami multikriteriálneho rozhodovania resp. optimalizácie. Vytvorená aplikácia umožňuje syntézu 7 metód riešenia úloh multikriteriálneho rozhodovania a 6 matematických metód multikriteriálnej optimalizácie. Taktiež je možné zvoliť akúkoľvek kombináciu týchto metód, čo vytvára široké portfólio možností riešenia úloh z vymedzenej oblasti, pričom voľba metód závisí len od preferencií rozhodovateľa. Aplikácia taktiež umožňuje automatizáciu procesov transformácie vstupných dát do formy potrebnej pre proces multikriteriálnej optimalizácie, ako aj objektivizáciu váh hodnotiacich kritérií bodovacou metódou alebo metódou expertov. Komplexnosťou realizácie programov výstup prekračuje hranice zvolenej aplikačnej oblasti a je využiteľný pre riešenie úloh z rôznych iných oblastí, v ktorých je možné využiť metódy, ktoré boli v rámci práce programovo spracované.

POĎAKOVANIE

Článok, rovnako ako aj dizertačná práca je výsledkom riešenia projektov:

- projekt Univerzitný vedecký park Technicom pre inovačné aplikácie s podporou znalostných technológií, kód ITMS:26220220182, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja, Centrum pre nedeštruktívnu diagnostiku technologických procesov so štandardným softvérovým vybavením pre riadenie a komunikáciu (aktivita 3.1), (2013 - 2015);
- projekt Univerzitný vedecký park Technicom pre inovačné aplikácie s podporou znalostných technológií - II.fáza, kód ITMS:313011D232, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja, (2015 - 2017), Centrum pre nedeštruktívnu diagnostiku technologických procesov so štandardným softvérovým vybavením pre riadenie a komunikáciu (aktivita 3.1, PP7), (2015 - 2017);
- projekt KEGA c.001TUKE-4/2015, CyberLabTrainSystem – demonštrátor a trenažér informačno-riadiaceho systému - inovácia (2015 - 2017) ;grant FEI TUKE 2015-33 s názvom Výskumné laboratórium nelineárnych podaktuovaných systémov

(Research laboratory for nonlinear underactuated systems), (1/2017 - 12/2017);

- projekt ALICE KE FEI TUKE (0222/2016 - 2/2016-DOT) s názvom Experiment ALICE na LHC v CERN: Štúdium silno interagujúcej hmoty v extrémnych podmienkach, (2016-2020).

LITERATÚRA

- [1] OLIVEIRA, Márcia; FONTES, Dalila BMM; PEREIRA, Teresa. Multicriteria decision making: a case study in the automobile industry. *Annals of Management Science*, 2014, 3.1: 109.
- [2] SALMINEN, Pekka; HOKKANEN, Joonas; LAHDELMA, Risto. Comparing multi-criteria methods in the context of environmental problems. *European Journal of Operational Research*, 1998, 104.3: 485-496.
- [3] RAO, Ravipudi Venkata. Decision making in the manufacturing environment: using graph theory and fuzzy multiple attribute decision making methods. Springer Science & Business Media, 2007.
- [4] HO, William; XU, Xiaowei; DEY, Prasanta K. Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 2010, 202.1: 16-24.
- [5] CHAI, Junyi; LIU, James NK; NGAI, Eric WT. Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40.10: 3872-3885.
- [6] LI, Hui; ZHANG, Qingfu. Multiobjective optimization problems with complicated Pareto sets, MOEA/D and NSGA-II. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 2009, 13.2: 284-302.
- [7] FONSECA, Carlos M., et al. Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation Discussion and Generalization. In: *ICGA*. 1993. p. 416-423.
- [8] TABOADA, Heidi A., et al. Practical solutions for multi-objective optimization: An application to system reliability design problems. *Reliability Engineering & System Safety*, 2007, 92.3: 314-322.
- [9] MANSOURI, S. Afshin. A multi-objective genetic algorithm for mixed-model sequencing on JIT assembly lines. *European Journal of Operational Research*, 2005, 167.3: 696-716.
- [10] BAUTISTA, Joaquín; PEREIRA, Jordi. Ant algorithms for a time and space constrained assembly line balancing problem. *European journal of operational research*, 2007, 177.3: 2016-2032.
- [11] SABUNCUOGLU, Ihsan; EREL, Erdal; ALP, Arda. Ant colony optimization for the single model U-type assembly line balancing problem. *International Journal of Production Economics*, 2009, 120.2: 287-300.
- [12] CHOI, Young-Keun; LEE, Dong Myung; CHO, Yeong Bin. An approach to multi-criteria assembly sequence planning using genetic algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 42.1-2: 180-188.
- [13] FARINA, Marco; DEB, Kalyanmoy; AMATO, Paolo. Dynamic multiobjective optimization problems: test cases, approximations, and applications. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 2004, 8.5: 425-442.
- [14] ÖZCAN, Uğur; TOKLU, Bilal. Multiple-criteria decision-making in two-sided assembly line balancing: A goal programming and a fuzzy goal programming models. *Computers & Operations Research*, 2009, 36.6: 1955-1965.
- [15] ČABALA, J., JADLOVSKÝ J.: Application of Stateflow Diagrams in Production Line Modeling. 2016. In: *SAMI 2016*. - Danvers : IEEE, 2016 S. 125-130. - ISBN 978-1-4673-8739-2
- [16] ROSINOVÁ, Danica; DÚBRAVSKÁ Mária : *Optimalizácia*. 1.vyd. Bratislava : STU, 2008. 190 s. - ISBN: 8022727952.
- [17] ČABALA, J., JADLOVSKÝ J.: Optimization Toolbox Usage in Solving Vector Optimization Tasks - 2015. In: *Technical Computing Bratislava 2014 Proceedings*. - Saarbrücken : Lap Lambert Academic Publishing, 2015 P. 45-64. - ISBN 978-3-659-40792-5

- [18] ČABALA, J., JADLOVSKÝ J.: Solving optimal assembly line configuration task by multi-objective decision making methods. 2017. In: Acta Electrotechnica et Informatica. Roč. 17, č. 2 (2017), s. 53-60. - ISSN 1335-8243
- [19] VARTOVNÍK, Slavomír: Modelovanie a vizualizácia priemyselných procesov, Diplomová práca, KKUI FEI TUKE, Košice, 2016.