

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie, FS
Technická univerzita v Liberci
Studentská 2
461 17 Liberec 1

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
ČVUT v Praze – Fakulta strojní
Proděkan pro VaV činnost
Technická 4
166 07 Praha 6

Oponentní posudek disertační práce

Název disertační práce: **Optimalizace návrhu výrobních linek v automobilovém průmyslu**
Autor práce: **Ing. Petr Hynek**
ČVUT v Praze – Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie**
Školitel: **doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.**

Hodnocená disertační práce je zpracována v celkovém rozsahu 110 stran, včetně seznamu použité literatury, publikací, vyzvaných přednášek autora a seznamu použitých tabulek a obrázků. Práce neobsahuje přílohy. Vlastní textová část je členěná do 8 kapitol a má 100 stran. Disertační práce se opírá o 41 citovaných literárních pramenů, z nichž 18 je zahraničních. Značná část literárních pramenů nemá parametry příspěvku ve sborníku, časopisu, skript nebo knihy. Jedná se především o diplomové a disertační práce a on-line dostupnou firemní literaturu. V souvislosti se zpracováním disertační práce publikoval autor práce s dalšími spoluautory 4 publikace.

Práce je zaměřena do oblasti projektování výrobních linek v automobilovém průmyslu. Konkrétně se týká návrhu svařovacích linek a simulace dostupnosti bodových kleští určených pro svařování elektrickým odporem. Výběr svařovacích kleští je realizován optimalizačně dle vybraných kritérií, pomocí globálního evolučního algoritmu. Vlastní postup a optimalizační proces je ukázán na souboru 20 typů bodovacích kleští a vybraném souboru 15 bodových svarů umístěných na přední podlaze modelu Škoda Rapid. Evoluční algoritmus umožňuje nalezení optimálního řešení na základě jedno i více kritériálního rozhodování. Jako kritéria pro výběr vhodného typu svařovacích kleští vybral autor práce cenu bodových svařovacích kleští pro jednokritériální optimalizaci a kombinaci ceny a hmotnosti bodových svařovacích kleští pro vícekritériální optimalizaci. Na základě uvedeného souboru autor demonstruje optimalizační postup, včetně zařazení parametru α definujícího váhu jednotlivých kritérií.

Cíle a hypotézy stanovené v disertační práci odpovídají jejímu názvu. V práci je definován jeden hlavní a dva dílčí cíle práce. Hlavní cíl práce je zvolen logicky vzhledem k zaměření práce. Je však otázkou, jak budu uvádět dále, zda byla optimalizační kritéria vedoucí k dosažení dílčích cílů zvolena vhodně vzhledem k předpokládané funkci automatizovaných svařovacích linek.

Práce není striktně rozdělena na teoretickou a experimentální část, ale plynule přechází z jedné do druhé. Stejným způsobem bude provedeno i hodnocení práce.

Hodnocení disertační práce

V úvodu práce se autor správně věnuje popisu současného stavu problematiky a snaží se popsat motivaci, účel a cíle pro vypracování předkládané disertační práce. Konkrétně se jedná o kapitoly věnované výrobním systémům (2.1), jejich projektování (2.2) a simulacím (2.3). Kapitola 2.4 pak popisuje řešící



algoritmy vhodné k optimalizaci. Vše je shrnuto v kapitole 2.5. Z uvedeného je zřejmé, že se jedná o aktuální a často diskutovanou tematiku, u které je možno předpokládat především praktické využití v technické praxi.

Autor práce by si však měl položit otázku, zda je vhodné v práci odevzdané v roce 2019 a konkrétně v kapitolách zaměřených na současný stav poznání citovat zdroje, které byly on-line k dispozici v letech 2011 až 2013. V současné době již bohužel k dispozici nejsou. S tím souvisí i volba literárních zdrojů popisujících současný stav řešené problematiky zejména v kapitolách 2.1 a 2.2. Zde bych očekával jiný typ literárních zdrojů. Tedy více zahraničních zdrojů a obecně více zdrojů. To že je to možné ukazuje autor disertační práce v kapitole 2.3, věnované simulaci výrobních procesů, kde uvádí 8 literárních zdrojů, z nichž 6 je zahraničních. Kapitola 2.4 věnovaná řešícím algoritmům vhodným k optimalizaci je pak zpracována přehledně a srozumitelně, zejména část 2.4.2 věnovaná globálním evolučním algoritmům. Uvítal bych obdobný způsob zpracování i u kapitoly 2.4.3. věnované pravděpodobnostním metodám Monte–Carlo. Bylo by vhodné představit tuto metodu také s Pottsovým rozšířením tak, jak je v současnosti využívána pro simulace pravděpodobnostních dějů.

Z popisu současného stavu problematiky vyplývá, že projektování výrobního systému svařovny je vystaveno značným nárokům na kvalitně provedený projekt z důvodu nutnosti zohlednit mnoho faktorů a variant řešení. Proto jsou používány systémy digitální továrny, které však v současnosti neumožňují aplikovat výběr vhodných svařovacích kleští na základě simulace dostupnosti nástroje. Z toho vyplynul hlavní cíl práce, **navrhnout optimalizační metodu pro výběr vhodných svařovacích odporových kleští v rámci návrhu robotické linky**. Dílčím cílem byla jednotlivá optimalizační kritéria. Jako správné optimalizační kritérium byla zvolena cena svařovacích kleští, ale jako další bych spíše čekal kritéria více reflektující technologické požadavky, tedy kvalitu provedeného svaru a vliv na výrobní takt linky. Hmotnost kleští samozřejmě také ovlivňuje konstrukční návrh linky (únosnost ramena robota, setrvačné síly a momenty při pohybu), ale možná by bylo vhodnější rozdělit uvažované svařovací odporové kleště podle způsobu ovládání (pneumatické, servopneumatické, servoelektrické). V práci je uvažován soubor 20 druhů svařovacích odporových kleští, ale nikde není uvedeno, zda mají všechny typy kleští stejný typ ovládání, nebo zda se jedná o různé typy. To má vliv na rychlost otevírání a uzavírání kleští, možnost individuálního nastavení síly sevření pro každý svar a samozřejmě i na cenu svařovacích kleští.

Dále se autor zaměřuje na projektování svařovacího výrobního zařízení. Nejprve se věnuje struktuře procesu výroby karosérie a následně používaným spojovacím technologiím (kapitola 4.2). Právě k nim bych měl několik poznámek. V kapitole 4.2.1. autor uvádí, že metodou odporového bodového svařování je „možno svařovat materiály jiným způsobem nesvařitelné“ a dokládá to citací své diplomové práce. Vzhledem ke značnému množství metod svařování založených na rozdílných fyzikálních principech se mi toto tvrzení jeví jako neopodstatněné. V kapitole 4.2.2. autor uvádí, že pro metodu MIG jsou jako ochranný plyn využívány Ar a He, případně jejich směsi a u metody MAG pak CO₂. Je třeba si uvědomit, že v současné době se pro svařování metodou MAG používají především směsné plyny v kombinaci Ar/CO₂, případně plyny vícekomponentní. V kapitole 4.2.4 Laserové svařování autor uvádí že „rychlost ochlazování je díky malému vnesenému teplu vysoká a proto u ocelí nesmí překročit obsah uhlíku hodnotu 0,2% uhlíku“. Bylo by vhodné rozvést, zda platí toto tvrzení opravdu pro všechny svařované tloušťky a zda platí pouze u laseru, nebo se týká i ostatních tavných metod svařování. V tomto případě by měl být uveden i vliv dalších prvků, nejlépe vyjádřený uhlíkovým ekvivalentem.

Autor se věnuje také vlastnímu procesu plánování linek a definici ukazatelů, které je třeba zohlednit při projektování výrobního systému svařovny. Jednotlivé ukazatele správně přepočítává na jednotkový spojovací ekvivalent $S_p E_q$. Definuje hloubku výroby, stupeň automatizace a podrobněji se zaměřuje na výpočet doby návratnosti nákladů. Zde musím autorovi vytknout pouze sporadické zařazení jednotlivých zkratk a symbolů do Seznamu použitých symbolů a zkratk a to přesto, že je v textu v tabulkách 7 a 8 uvádí. V následující kapitole se autor zaměřuje na projektování pomocí nástrojů digitální továrny. Kapitola je formulována jasně a srozumitelně, až na část kapitoly 4.5.4., kde jsou uvedeny nástroje ve formě Ganttova a



Pertova diagramu (obr. 35). U Pertova diagramu autor uvádí, že „diagram přehledně zobrazuje, jaké spoje se na dané operaci vyrábí a jaké jsou k tomu použité výrobní prostředky“. Z definice je Pert analytickou metodou, která zkoumá úlohy v projektu a používá se pro určení času, který je potřeba pro dokončení každé úlohy a zjišťuje se minimální čas nezbytný k dokončení celého úkolu. Pro čtenáře neznajícího dokonale konkrétní operaci je však z obrázku zřejmé pouze to, že operace se stejným názvem R_1130R01_ jde za sebou, přičemž má v každém kroku jiný čas operace. Tedy ani o jaký spoj se jedná, ani jaký výrobní prostředek je použit. Bylo by vhodnější obrázek lépe a podrobněji popsat.

Popis simulace robotické výrobní linky je věnován kinematizaci svařovacích odporových kleští a jejich dostupnosti ať již samostatně, nebo s využitím robota. Výsledkem je matice dostupnosti pro vybraný soubor bodových svarů a svařovacích odporových kleští. Jak již bylo uvedeno výše, z práce není bohužel zřejmé, jaký typ kleští byl pro výběr použit. V dalších kapitolách je v tabulkách 15 a 19 uveden alespoň procentuální rozdíl v ceně a hmotnosti jednotlivých svařovacích kleští.

Kapitola 5 je celá věnována vlastní optimalizaci výběru svařovacích kleští pomocí globálního evolučního algoritmu. Konkrétně se jedná o soubor 20 svařovacích kleští a 15 bodových svarů z „přední podlahy“ modelu Škoda Rapid. K optimalizaci použil autor software Solver, který je doplňkem tabulkového procesoru MS Excel. Vícekriteriální řešení autor rozšířil o váhový parametr α . Na řešeném příkladu pak demonstruje výhodu aplikace globálních optimalizačních algoritmů spočívající především ve výrazné časové úspoře při návrhu svařovacích linek. Jako velmi významný hodnotím fakt, že uvedený způsob optimalizace je možné využít pro minimalizaci investičních nákladů jak při projektování nového, tak při integraci nové karosérie do stávající výroby. Také je možné využít uvedenou metodu při projektování svařovny již vyráběného modelu do jiného výrobního závodu.

V průběhu obhajoby prosím autora předložené disertační práce o zodpovězení následujících otázek:

- 1) Na základě jakých kritérií byla jako optimalizační dvojice zvolena cena a hmotnost bodových svařovacích kleští?
- 2) Jakým způsobem se optimalizují svařovací linky z pohledu výrobního taktu? Je již při přípravě projektu známa průchodnost linky, na jejímž základě se plánuje pro danou sestavu počet svařovacích stanovišť (například svařovacích odporových kleští)?
- 3) Které materiály jsou dle názoru autora svařitelné pouze odporovým svařováním? Jaké jsou (mimo rychlosti otevírání a zavírání kleští) hlavní výhody a nevýhody kleští typu C a X?
- 4) Jak by se dle názoru autora prodloužila délka optimalizačního výpočtu v programu Solver pro daný počet svařovacích kleští a bodových svarů při použití kombinace tří optimalizovaných kritérií? Je v tomto případě možné a vhodné použít váhový parametr?

Vyjádření k disertační práci

Dosažení stanoveného cíle disertační práce

Hlavní cíl i dílčí cíle práce tak jak byly v práci definovány, byly splněny.

Úroveň rozboru současného stavu řešené problematiky

Rozsah rozboru současného stavu řešené problematiky odpovídá požadavků kladeným na vypracování disertační práce. Bylo by však vhodné, jak bylo uvedeno výše, v této oblasti lépe volit strukturu, typ a počet použitých literárních zdrojů.

Teoretický přínos práce

S ohledem na popsanou problematiku a dosažené výsledky vidím u práce spíše praktický než teoretický přínos. Autor řešil problematiku aplikací globálních evolučních algoritmů v programu Solver, protože stávající systémy podporující proces projektování výrobního zařízení nemají systémovou podporu výběru vhodného



výrobního nástroje. Výsledky práce ukazují, jak by proces implementace například do systémů digitální továrny mohl vypadat a propojení simulace a automatického výběru svařovacích kleští by vedlo k autonomizaci projektování výrobního zařízení.

Praktický přínos práce

Praktický přínos práce by pro automobilový průmysl mohl být značný, zejména ve fázi projektování výrobního zařízení. Pokud by se dala v systému PLM definovat vazba mezi svařovaným elementem, výrobní operací a výrobním nástrojem, vedlo by to k další autonomizaci a při zavedení do systému digitální továrny by tak bylo možné získat aktuální přehled o výrobním čase bez ručního zásahu projektanta. Uvedená metodika je však variabilní a s velkou pravděpodobností ji lze použít u podobných výrobních technologií.

Vhodnost použitých metod řešení a způsob jakým byly aplikovány

Doktorand použil vesměs moderní metody a postupy dostupné v průmyslové praxi pro oblast projektování výrobních linek. Ať už se jedná o simulace dostupnosti svařovacích kleští, projektování svařovacího zařízení v prostředí digitální továrny, nebo využití globálních evolučních algoritmů. Použitím všech systémů prokázal schopnost samostatné práce a technickou orientaci v dané problematice.

Prokázání odpovídajících znalostí v oboru

Autorem navržený optimalizační postup výběru svařovacích bodových kleští na základě simulací dostupnosti svědčí o dostatečných znalostech zejména v oblasti projektování výrobních linek. Svědčí o tom i počet 14 vyzvaných přednášek. Kde mohl být doktorand aktivnější, je oblast autorských publikací, ve které se vyskytují pouze 3 publikace ve sbornících českých konferencí a 1 publikace v časopise Acta Polytechnica. Dvě diplomové práce (pravděpodobně mělo být BP a DP) zaměřené na svařování, bych v dané problematice asi neuváděl.

Formální úroveň práce

Z pohledu formální úrovně práce je třeba konstatovat, že text je psán jasně a srozumitelně až na několik výše uvedených výjimek. Autor také střídavě používá činný a trpný rod. V seznamu zkratk pak chybí některé zkratky uvedené v textu. Např. zkratka R.I.P uvedená na obr. 2., zkratka TPS, nebo zkratky uvedené ve vzorcích. Poznámku mám i k formě citací. Dle mého názoru není úplně vhodné, když je citace uvedena přímo u názvu kapitoly (viz 2.1.2. či 2.4.1.). Potom není zcela zřejmé, zda se jedná o převzetí celé kapitoly, nebo pouze její části ani to zda autor citoval doslova. Naopak u některých převzatých obrázků (soudím dle jejich kvality) citace zcela chybí. I přes uvedené výhrady je práce na dobré úrovni, graficky odpovídající běžným standardům.

Celkové hodnocení

Přes uvedené výhrady považuji autorem stanovené cíle disertační práce za splněné a konstatuji, že v disertační práci Ing. Petra Hynka jsem nenašel závažné chyby bránící její obhajobě. Práci doporučuji k obhajobě před zkušební komisí a současně souhlasím s tím, aby po úspěšné obhajobě byla Ing. Petru Hynkovi udělena vědecko - akademická hodnost

„Philosophiae Doctor (Ph.D.)“.

V Liberci dne 21.10. 2019

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D

