



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
MATERIÁLOVOTECHNOLOGICKÁ FAKULTA SO SÍDLOM V TRNAVE

Ing. Róbert Bočák

Autoreferát dizertačnej práce

**Návrh metodiky projektovania robotizovaných pracovísk so zameraním sa na
zníženie energetickej náročnosti a pracovného času**

na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: Strojárske technológie a materiály

v študijnom odbore: Strojárstvo

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Trnava, 29.5. 2024



Dizertačná práca bola vypracovaná na Ústave výrobných technológií Materiálovotechnologickej fakulty so sídlom v Trnave Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ Ing. Róbert Bočák
Ústav výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Slovenská
technická univerzita v Bratislave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Školiteľ doc. Ing. Radovan Holubek, PhD.
Ústav výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Slovenská
technická univerzita v Bratislave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Autoreferát bol rozoslaný

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 28.8. 2024 o 9:15 hod., č.m. T-137 na Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava.

.....
prof Ing. Miloš Čambál, CSc.
dekan MTF STU

OBSAH

ÚVOD	4
1 SÚČASNÝ STAV PROJEKTOVANIA ROBOTIZOVANÝCH PRACOVÍSK	5
2 SPOTREBA ELEKTRICKEJ ENERGIE PRIEMYSELNÝCH ROBOTOV	7
2.1 Softvérové nastavenie.....	7
2.2 Hardvérové nastavenie	7
2.3 Dispozičné riešenie periférií robotizovaných pracovísk	8
3 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	9
4 VÝSLEDKY SKÚMANIA ENERGETICKEJ A ČASOVEJ NÁROČNOSTI	10
2.2. Relevantnosť zvolenej metódy merania	10
2.3. Výber skúmanej vzorky priemyselných robotov	12
2.4. Tvorba parametrickej trajektórie	12
4.4 Spracovanie nameraných hodnôt.....	13
4.4.1 Meranie elektrickej energie	13
4.4.2 Meranie času.....	15
4.5 Celkové vyhodnotenie meraní	17
5 VÝVOJ METODIKY TVORBY ROBOTIZOVANÝCH PRACOVÍSK	19
5.1 Prvotný dispozičný návrh rozmiestnenia komponentov stanice	20
5.2 Polohovanie na základe pracovnej vzdialenosti od základne robota.....	20
5.3 Overenie dosiahnuteľnosti pracovných bodov	21
5.4 Tvorba pohybov zariadení a definovanie polôh	22
5.5 Tvorba bezpečnostných zón	23
5.6 Tvorba trajektórie	23
5.7 Overenie stavu bezkolíznosti.....	24
5.8 Overenie dodržania taktu pracovného cyklu	25
5.9 Celkový vývojový diagram navrhovanej metodiky	27
5.10 Overenie metodiky experimentálnym modelom	31
5.11 Zhodnotenie vyvinutej metodiky	32
ZÁVER.....	34
ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV	37
ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI	38

ÚVOD

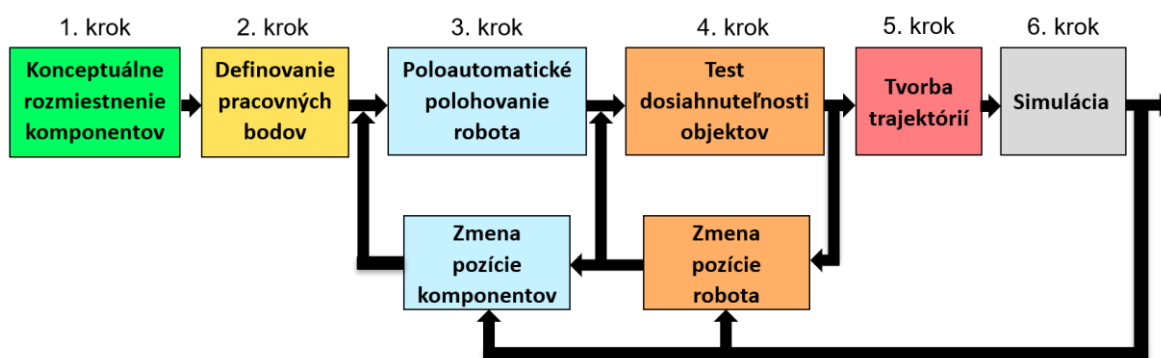
Napriek vysokému dopytu po robotických aplikáciách je ľudstvo na prahu energetickej a ekologickej krízy a je nutné sa zaoberať aj samotnou spotrebou elektrickej energie, pretože robotické zariadenia odoberajú výraznú časť energie, čo sa odzrkadľuje aj v cene konečného produktu. Akékoľvek riešenia, ktoré môžu prispieť k úspore energie, budú v budúcnosti významné. Dobre navrhnuté robotické pracovisko môže prispieť vo významnej miere k úspore energie aj pri zabezpečení požadovanej produktivity. Kvôli komplexnosti procesu projektovania robotizovaných pracovísk stále neexistuje možnosť tvorby pracovísk použitím automatizovanej funkcie v simulačných softvéroch. Vyvíjaná metodika by však mohla tento proces urýchliť a v budúcnosti prispieť na tvorbe pokročilých algoritmov pre automatizované rozloženie komponentov v robotizovanom pracovisku.

Firmy zaoberajúce sa projektovaním takýchto pracovísk používajú len už vyvinuté funkcie, ktoré dokážu poloautomaticky vygenerovať polohu robota voči perifériám alebo vygenerovať dráhu na základe tvaru digitálneho modelu. Ďalej je proces projektovania uskutočňovaný metodikou a simulačnými softvérmi zaužívanými v praxi, ktoré sú popísané v prvej kapitole. Pomocou simulačných softvérov môžu byť realizované zmeny, ktoré by mimo digitálneho sveta boli ťažko uskutočniteľné. Pri projektovaní je nutné dodržať dve hlavné zásady – dodržať dopredu stanovený pracovný takt a dosiahnuteľnosť pracovných bodov robotom. Tieto dve zásady je možné dodržať už v prvej fáze projektovania pri rozmiestňovaní zariadení v robotizovanom pracovisku. Vhodné dispozičné riešenie môže skrátiť pracovný čas a znížiť energetickú náročnosť pracoviska. Nielen rozmiestnenie komponentov ale aj vhodné softvérové a hardvérové nastavenie priemyselných robotov dokáže markantne znížiť energetickú náročnosť robotizovaných pracovísk, čo je opísané v druhej kapitole. Tretia kapitola sa zameriava na ciele dizertačnej práce. Štvrtá kapitola je zameraná na spôsob a vyhodnotenie merania spotreby elektrickej a časovej náročnosti použitím simulačných nástrojov pre vybrané priemyselné roboty. Na základe nameraných hodnôt spotreby elektrickej energie a času potrebného na vykonanie zvolených trajektórií je možné vyvinúť metodiku pre tvorbu robotizovaných pracovísk, ktorá pri samotnom návrhu zohľadňuje vzájomnú polohu priemyselného robota voči perifériám za účelom zníženia elektrickej spotreby. Návrh tejto metodiky je predmetom piatej kapitoly.

1 SÚČASNÝ STAV PROJEKTOVANIA ROBOTIZOVANÝCH PRACOVÍSK

Táto kapitola sa venuje aktuálnym trendom tvorby robotizovaných pracovísk využívaných v praxi, kde sú podrobne popísané jednotlivé kroky a podmienky, ktoré musí projektant takýchto pracovísk dodržať.

V dnešnej dobe, kedy neexistujú pokročilé algoritmy na projektovanie celých robotizovaných pracovísk pomocou jednej funkcie, sa pracoviská navrhujú v šiestich krokoch v určenej postupnosti (Obr. 1):



Obr. 1 Postupnosť projektovania robotizovaných pracovísk (Lueth 1992)

- 1 *Konceptuálne rozmiestnenie komponentov* – V počiatočnej fáze projektovania sú rozmiestnené komponenty v pracovisku podľa vytýčeného pracovného priestoru tak, aby približne zodpovedali požiadavke využitia čo najmenšieho možného pracovného priestoru.
- 2 *Definovanie pracovných bodov* – Ďalším krokom je určenie pracovných bodov, do ktorých sa má priemyselný robot v rámci pracovného cyklu dostať. Jedná sa hlavne o procesné body, pri ktorých sa vykonávajú procesné aplikácie ako zváranie, nitovanie, lepenie a pod. Patria sem aj body určené na manipuláciu s objektom alebo prejazdové body na vyhýbanie sa statickým prekážkam v pracovisku.
- 3 *Poloautomatické polohovanie robota* – Keďže v dnešnej dobe už softvéry disponujú funkciami pre poloautomatické umiestnenie robota na základe dosiahnuteľnosti pracovných bodov, nie je nutný zdĺhavý spôsob určenia polohy priemyselného robota v pracovisku. Takouto funkciou je napríklad *Smart Place* v softvéri *Process Simulate*, kde vstupnými parametrami sú vytýčený priestor pre umiestnenie, dĺžka ramena priemyselného robota a body, ktoré má robot dosiahnuť. Na základe týchto parametrov funkcia vyhodnotí, ktoré lokácie vo vytýčenom priestore sú vhodné pre polohu robota v robotizovanom pracovisku.
4. *Test dosiahnuteľnosti objektov* – Po počiatočnom rozložení priemyselného robota spolu s okolitými perifériami je nutné overiť, či robot dokáže dosiahnuť každý pracovný bod. Je nutné brať do úvahy, či robot vie do daného bodu prísť a neprekáža mu v pohybe samotná konštrukcia

prípravku a nástroja. Ak sa robot nemôže dostať do niektorého pracovného bodu, je nutné zmeniť polohu robota alebo periférií. V prípade, že sa robot ani po zmene rozloženia pracoviska nemôže dostať do pracovného bodu, je tento problém riešený zmenou samotnej konštrukcie prípravku alebo nástroja.

5. *Tvorba trajektórií* – po overení dosiahnuteľnosti pracovných bodov je manuálne vytvorená trajektória priemyselného robota na základe procesných a prejazdových bodov. Po vytvorení trajektórie sú jej pridané parametre ako rýchlosť, zrýchlenie a pod. Program RobotStudio disponuje funkciou *AutoPath*, ktorá automaticky generuje trajektóriu na základe tvaru súčiastky. Takto vygenerovaná dráha môže byť dodatočne upravovaná a musia jej byť manuálne priradené parametre.
6. *Simulácia* – Posledným krokom je samotná simulácia celého robotizovaného pracoviska, kde sa zohľadňujú okrem pohybov priemyselného robota aj pohyby okolitých periférií a nástrojov. Dôležitou súčasťou simulácie je aj overenie pracovného taktu, či bezkolízny stav pracoviska.

2 SPOTREBA ELEKTRICKEJ ENERGIE PRIEMYSELNÝCH ROBOTOV

V tejto kapitole je prehľad dostupnej literatúry a výskumov, pomocou ktorých je možné energetickú optimalizáciu zlepšiť vhodným softvérovým alebo hardvérovým nastavením, či optimalizovaním dispozičného riešenia pracoviska.

2.1 Softvérové nastavenie

Optimalizácia softvéru je založená na myšlienke, že spotreba energie v priemyselných výrobných zariadeniach vyplýva predovšetkým z riadenia a prevádzky elektrických pohonov v automatizovaných výrobných procesoch. Aby sa maximalizovala výroba, roboty a stroje sú často prevádzkované dynamicky. To spôsobuje vysoké straty energie pri vysokorýchlostných pohyboch, ako aj nadbytočnú energiu pri spomalení. Taktiež po mnohých pohyboch osí nasledujú doby nečinnosti so stratou produktivity (Chemnitz et al. 2011). Softvérové nastavenia, keď je robot v pohybe, je možné rozdeliť do dvoch kategórií, a to optimalizácia trajektórie a plánovanie operácií (Carabin et al. 2017).

- *Optimalizácia trajektórie* – optimalizáciu trajektórie je možné rozdeliť do dvoch skupín. Prvá skupina je zameraná na priestorové nastavenie trajektórie, teda spôsobu, ako bude robotické rameno vykonávať svoje pohyby. Druhá skupina je zameraná na nastavenie rýchlosti a zrýchlenia.
- *Plánovanie operácií* - Plánovací prístup sa zameriava na optimalizáciu operácií robotickej bunky ako celku a možno nájsť dve hlavné metódy: časové škálovanie a sekvenčné plánovanie (Carabin et al. 2017).

2.2 Hardvérové nastavenie

Optimalizácia hardvéru zahŕňa implementáciu nových typov pohonných systémov, ako aj stratégií rekuperácie a distribúcie energie. To umožňuje nový prístup k zníženiu spotreby energie a tým aj menšiemu dopadu na životné prostredie. Výberom správneho automatizačného systému pre danú aplikáciu je možné znížiť spotrebu energie pri zachovaní produktivity. Hardvérové nastavenie pre energetickú efektívnosť možno ďalej rozdeliť do nasledujúcich troch podkategórií (Carabin et al. 2017):

- *Typ robota* - Správnym výberom automatizačného systému pre danú aplikáciu je možné dosiahnuť zníženie spotreby energie a zároveň zachovať produktivitu (Carabin et al. 2017).
- *Výmena hardvérových komponentov*- Týmto spôsobom je možné znížiť krútiaci moment, čím sa zníži spotreba energie (Carabin et al. 2017). To je možné docieľiť použitím vhodných

materiálov ako uhlíkové vlákna (Hirzinger et al. 2002) alebo optimálnym návrhom sériového robotického manipulátora.

- *Prídavné hardvérové komponenty* - Jednou z najnovších techník prijatých na zníženie spotreby energie mechatronických a robotických systémov je pridanie zariadení na ukladanie a regeneráciu energie. Hlavnou myšlienkou týchto zariadení je zbierať energiu počas brzdného fázy a v prípade potreby ju poskytovať späť do systému (Lee 2012). Existujú dva rôzne typy: Zariadenia na uchovávanie energie a Zariadenia na zdieľanie energie

2.3 Dispozičné riešenie periférií robotizovaných pracovísk

Problém usporiadania robotizovanej pracovnej bunky spočíva v určení relatívnych polôh periférnych strojov v blízkosti robota, ktorý s nimi interaguje. Robot ako centrálny nástroj, ktorý je obklopený periférnymi zariadeniami, musí byť umiestnený tak, aby sa rameno robota pohybovalo od jedného pracovného bodu k druhému a plnilo rôzne úlohy. Pracovná trajektória môže zahŕňať viacero ciest medzi rôznymi stanicami a predpokladá sa, že prejdenná vzdialenosť je významná (z časového hľadiska) len v smeroch X a Y. Táto vzdialenosť sa meria súčtom všetkých priamočiarych vzdialeností medzi prístupovými bodmi staníc. Cieľom optimálneho dispozičného riešenia pracovnej bunky je dosiahnuť čo najkratšiu možnú dráhu pohybu ramena robota v celom výrobnom cykle, aby sa skrátil čas pracovného cyklu. To je možné dosiahnuť umiestnením jednotlivých periférnych strojov alebo staníc v rámci dispozície optimálnym spôsobom tak, aby predstavovali najkratšiu dráhu pohybu pre rameno robota (Sim et al. 2005). Kým polohovanie v osiach X a Y je významné pre skracovanie pracovného taktu, polohovanie v osi Z je významné v oblasti energetickej náročnosti pracoviska (Rassõlkin et al. 2011).

3 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Po štúdiu a spracovaní teoretických a výskumných poznatkov v oblasti znižovania energetickej a časovej náročnosti priemyselných robotov bolo požadované definovanie výskumného problému, ktorým sa bude táto dizertačná práca zaoberať. Na základe spracovania vedeckých výskumov a dostupnej literatúry je možné definovať výskumný problém nasledujúcim spôsobom. V posledných troch desaťročiach je požiadavka na rýchlosť a objemnosť výroby čoraz vyššia. Aj kvôli vysokému dopytu po robotických aplikáciách je ľudstvo na prahu energetickej a ekologickej krízy a je nutné sa zaoberať aj samotnou spotrebou elektrickej energie. Na základe týchto problémov je v dnešnej dobe kladený veľký dôraz na znižovanie elektrickej náročnosti pracovísk. Preto je možné definovať hlavný výskumný problém ako zníženie energetickej a časovej náročnosti týchto robotizovaných pracovísk. Analýzou teoretických poznatkov bolo preukázané, že vhodným dispozičným riešením pracoviska je možné znížiť energetickú náročnosť pracoviska už v ranej fáze projektovania týchto pracovísk. Keďže moderné softvéry nedisponujú funkciami, ktoré by zohľadňovali aj energetickú náročnosť pracoviska, nie je táto podmienka zahrnutá do metodiky tvorby robotizovaných pracovísk používanej v praxi.

Na základe opisu súčasnej problematiky robotizovaných pracovísk je možné stanoviť hlavný cieľ dizertačnej práce. Hlavným cieľom dizertačnej práce je ***vývoj inovatívnej metodiky projektovania robotizovaných pracovísk, ktorá bude zohľadňovať energetickú náročnosť už v prvotných fázach dispozičného návrhu pracoviska.***

Na to, aby mohol byť stanovený hlavný cieľ splnený, museli byť spracované tieto čiastkové ciele:

- Porovnanie a vyhodnotenie merania medzi spotrebou elektrickej energie skutočným robotom a simuláciou.
- Výber vzorky priemyselných robotov, ktoré budú vhodné na účely merania energetickej a časovej náročnosti.
- Tvorba univerzálnej parametrickej trajektórie, pomocou ktorej bude meraná časová a energetická náročnosť.
- Meranie a vyhodnotenie optimálnej pracovnej polohy vybraných priemyselných robotov na základe časovej a energetickej náročnosti.
- Experimentálne overenie metodiky pomocou simulačného softvéru.

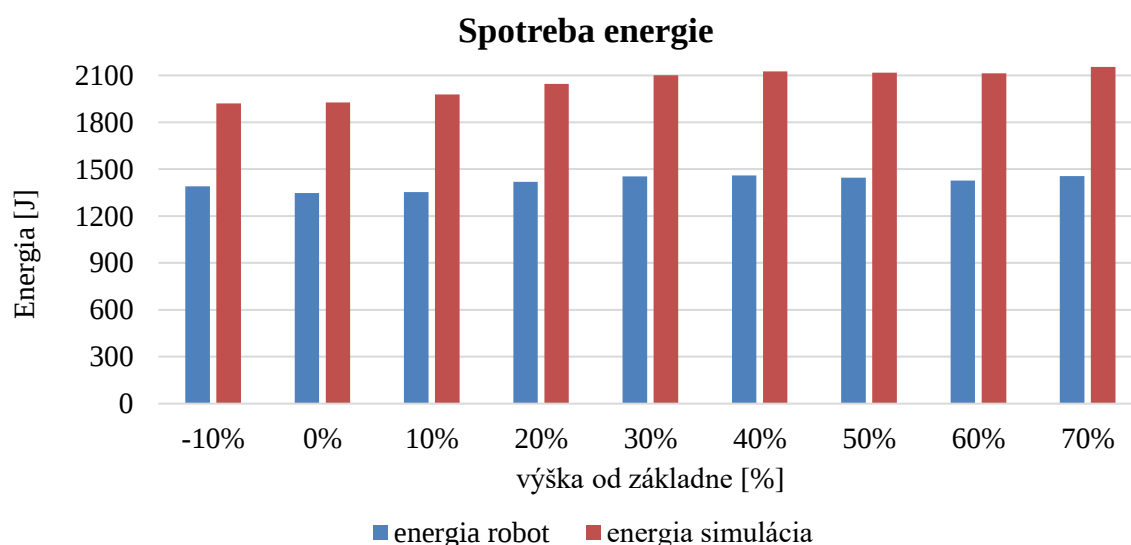
4 VÝSLEDKY SKÚMANIA ENERGETICKEJ A ČASOVEJ NÁROČNOSTI

Táto kapitola pozostáva z overenia dôveryhodnosti nameraných hodnôt v simulácii voči nameraným hodnotám na skutočnom priemyselnom robote. Ďalej pokračuje výberom vhodnej vzorky priemyselných robotov, na ktorých budú vykonané merania energetickej a časovej náročnosti. Merania budú vykonané pomocou navrhutej parametrickej trajektórie použiteľnej pre všetky vybrané roboty. V závere kapitoly budú popísané namerané hodnoty energetickej a časovej náročnosti jednotlivých priemyselných robotov a ich optimálna pracovná poloha voči základni robota.

4.1 Relevantnosť zvolenej metódy merania

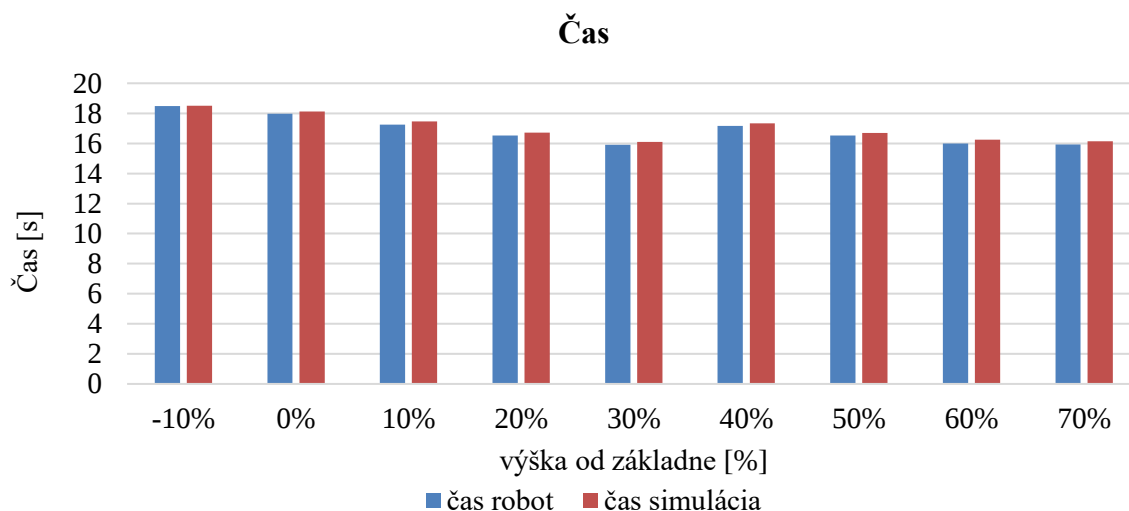
Aby bolo možné považovať dáta o spotrebe elektrickej energie a čase zo simulácie za relevantné, bolo nutné vykonať porovnanie dát zo simulácie a z reálneho robota. Do robota boli nahrané parametrické trajektórie vo vzdialenosti 50% dosahu v osi X a v rozsahu výšky od -10% po 70% najvyššie dosiahnuteľného bodu od základne robota. Pre zvýšenie náročnosti vykonania trajektórie boli zvolené parametre: maximálna rýchlosť (v_{max}), maximálne zrýchlenie (a_{max}), zóna 0 (z_0) a payload 0.

Na Obr. 2 je znázornený graf nameraných hodnôt spotreby elektrickej energie reálneho robota (modrá) v porovnaní s nameranými hodnotami zo simulácie (oranžová). Na grafe je možné vidieť markantný rozdiel medzi nameranými hodnotami avšak tvar grafu ostáva zachovaný. Taktiež je možné vidieť rozdielnú spotrebu elektrickej energie v závislosti od výšky, v ktorej sa trajektória vykonávala.



Obr. 2 Nameraná spotreba elektrickej energie ABB IRB 120

Na nasledujúcom Obr. 3 je graf, ktorý znázorňuje čas potrebný na vykonanie trajektórie skutočným robotom (modrá) a robotom v simulácii (oranžová). Z grafu možno vyčítať, že namerané hodnoty sú takmer identické a rozdiely sú len minimálne. Tak ako aj v predchádzajúcom prípade je možné zaznamenať rozdielny čas trvania trajektórie v závislosti od výšky, kde bola trajektória vykonaná.



Obr. 3 Nameraný čas ABB IRB 120

Namerané hodnoty zo skutočného robota a robota zo simulácie sú zapísané v Tab. 1, kde sú porovnané rozdiely medzi nameranými hodnotami a vypočítané ich rozdiely. Pri meraní hodnôt nameraného času je rozdiel medzi simuláciou a skutočným robotom na úrovni desatinných miest, čo predstavuje približne 1% rozdiel. V prípade merania spotreby elektrickej energie už je možné si všimnúť takmer tretinový rozdiel medzi nameranými hodnotami. Po prepočítaní rozdielu nameraných hodnôt možno usúdiť, že hodnoty namerané čisto v simulačnom prostredí sú navýšené o približne 31%, tak ako uvádza výrobca a teda je možné považovať namerané hodnoty spotreby elektrickej energie za relevantné.

Tab. 1 Porovnanie nameraných hodnôt skutočného a virtuálneho robota

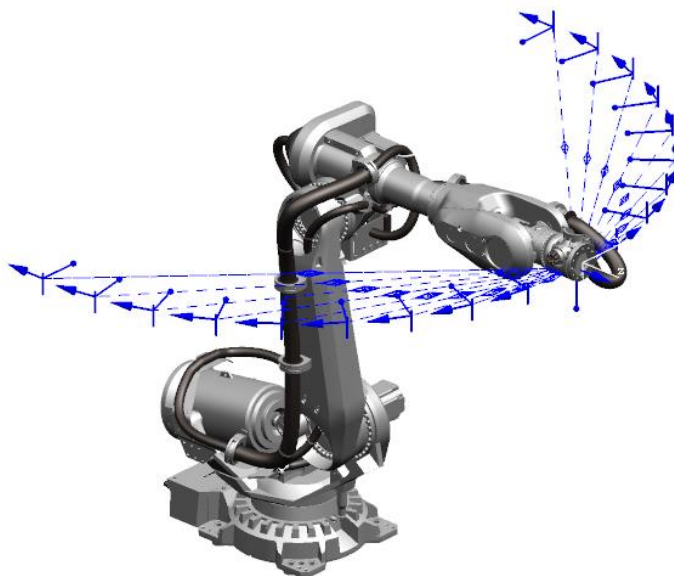
výška	čas robot [s]	čas simulácia [s]	rozdiel		výška	energia robot [J]	energia simulácia [J]	rozdiel	
-10%	18,483	18,516	0,033	0%	-10%	1390,02	1921,278	531,258	28%
0%	17,97	18,113	0,143	1%	0%	1346,399	1926,106	579,707	30%
10%	17,244	17,458	0,214	1%	10%	1352,988	1978,026	625,038	32%
20%	16,533	16,716	0,183	1%	20%	1419,459	2044,792	625,333	31%
30%	15,911	16,094	0,183	1%	30%	1454,371	2101,298	646,927	31%
40%	17,155	17,328	0,173	1%	40%	1459,061	2125,478	666,417	31%
50%	16,533	16,699	0,166	1%	50%	1445,096	2118,259	673,163	32%
60%	15,991	16,259	0,268	2%	60%	1427,914	2112,532	684,618	32%
70%	15,94	16,152	0,212	1%	70%	1456,751	2153,973	697,222	32%

4.2 Výber skúmanej vzorky priemyselných robotov

Aby mohla metodika určiť v akej pracovnej polohe majú vybrané priemyselné roboty pracovať, musia mať namerané hodnoty minimálnej aj maximálnej časovej náročnosti približne na rovnakej úrovni. Preto boli následne vybrané priemyselné roboty, ktoré sú konštrukčne podobné a disponujú dosahom 2,3 m až 3,1 a nosnosťou 90 kg až 270 kg. Ani jeden z vybraných priemyselných robotov nemá paralelogram. Konkrétne vybrané modely priemyselných robotov sú ABB IRB 5710, ABB IRB 5720, ABB IRB 6710, ABB IRB 6720, ABB IRB 6730 a ABB IRB 6740. Ďalším dôvodom výberu týchto priemyselných robotov je ich časté využitie v automobilovom priemysle a ich početnom nasadení v karosárni a na montáži. Na základe nameraných hodnôt bude možné určiť, aká vzdialenosť a výška od základne je pre vybrané priemyselné roboty najmenej a najviac energeticky a časovo náročná.

4.3 Tvorba parametrickej trajektórie

Pre overenie energetickej a časovej náročnosti bola v programe Process Simulate vytvorená parametrická trajektória (Obr. 4) použiteľná pre všetkých zvolených robotov. Trajektória pozostáva z 19 bodov, ktoré sú rozmiestnené v polkruhu tak, aby každý z bodov trajektórie bol v rovnakej vzdialenosti v osiach X a Z od základne robota. Medzi jednotlivými bodmi je rozstup a natočenie 10° a body v ľavej polovici sú zrkadlené z bodov v pravej polovici polkruhu. Postupnosť bodov trajektórie simuluje „Pick and Place“ (zober a umiestni) operáciu.



Obr. 4 Parametrická trajektória

Aby bolo možné overiť elektrickú spotrebu a času vykonania trajektórie vzhľadom na polohu pracovného objektu pre osi X a Z v percentách, boli pre robotov vytvorené trajektórie odstupňované po 10% maximálnej dosiahnuteľnej výšky a vzdialenosti od základne robota.

Ďalším kritériom pre vytvorenú trajektóriu je, aby robot pri dosahovaní bodov maximalizoval využitie svojich osí a tým zvýšil energetickú a časovú náročnosť trajektórie z dôvodu presnejších meraní. Vzhľadom na to, že všetky body na pravej alebo na ľavej polovici majú rovnaké natočenie v priestore, bolo nutné upraviť konfiguráciu robota v každom druhom bode. Tým bola docielená maximalizácia využitia osí 4, 5 a 6.

Keďže je práca tvorená tak, aby bolo možné využiť výsledky aj v praxi, z pôvodne vytvorených 274 trajektórii sa pre výskum ich počet zredukoval na 173. Je to kvôli tomu, že v praxi sa pri tvorení trajektórii ráta s obmedzením rozsahu jednotlivých kĺbov robota o 5 až 10%. Toto obmedzenie sa udáva kvôli nepresnému umiestneniu objektov, pretože nie je možné postaviť robotickú bunku v pomere 1:1 k simulácii. Vytvorené trajektórie boli exportované a upravené tak, aby zodpovedali vhodnému formátovaniu programovacieho jazyka priemyselných robotov ABB – RAPID.

4.4 Spracovanie nameraných hodnôt

Keďže bola overená vhodnosť použitia simulácie pre účely merania, všetky merania prebehli čisto vo virtuálnom prostredí. Merania prebiehali vybraním konkrétneho robota a nahraním príslušného robotického programu v programovacom jazyku RAPID. Na simuláciu spotreby elektrickej energie a času bol použitý softvér RobotStudio od firmy ABB.

Pre čo najpresnejšie výsledky bola každá trajektória meraná 10 krát a namerané hodnoty energie a času z každého merania boli spriemerované. Je to z toho dôvodu, že namerané hodnoty spotreby energie a času sa pri každom meraní líšili aj keď robot vykonával tú istú trajektóriu. Na druhú stranu, merania možno považovať za relatívne presné, keďže rozdiel medzi jednotlivými nameranými hodnotami spotreby bol v priemere 0,006% a pri meraní času sa v niektorých prípadoch dostal až na 0%.

Namerané hodnoty možno rozdeliť na dve skupiny. V prvej skupine sú hodnoty nameranej spotreby elektrickej energie a v druhej dĺžka trvania vykonania trajektórie. Obe skupiny pozostávajú z 274 nameraných trajektórii. Výsledné hodnoty sú spísané do tabuliek a každá nameraná hodnota má svoju polohu v priestore podľa osí X a Z.

4.4.1 Meranie elektrickej energie

V nasledujúcich tabuľkách 2 až 7 sú uvedené hodnoty nameranej spotreby elektrickej energie pri vykonávaní navrhutej parametrickej trajektórie v rozdielnych výškach a vzdialenostiach od základne. Krížikom sú vyznačené súradnice polohy, v ktorých robot nedokázal trajektóriu vykonať kvôli obmedzeniam konštrukcie priemyselného robota. Ako už bolo vyššie spomínané, z pôvodných 274 nameraných trajektórii sa pre použitie v praxi ich počet zredukoval na 173 kvôli

obmedzeniam natočenia jednotlivých kĺbov používaných v praxi. Trajektórie, ktoré prekračujú tento stanovený limit (5% maximálneho natočenia kĺbu) sú vyznačené čiernou farbou. Zo zvyšných nameraných hodnôt je vytvorená farebná škála, znázorňujúca najnižšiu spotrebu zelenou farbou a najvyššiu hodnotu červenou farbou. Hodnoty údajov sú merané v Jouloch, avšak pre definovanie spotreby elektrickej energie boli prepočítané na Wh.

Tab. 2 Nameraná spotreba elektrickej energie ABB IRB 5710

Z \ X	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
70%	19,0027	22,1691	24,7571	27,2606	32,7786	×	×
60%	×	23,8015	25,1712	26,401	28,2933	33,4409	×
50%	×	26,3169	26,5834	26,7292	27,4595	29,517	×
40%	×	32,1146	28,5357	27,0153	26,908	28,146	32,3509
30%	×	×	×	26,0425	25,8939	26,9296	30,0372
20%	×	×	×	23,2968	24,2278	25,642	28,769
10%	×	×	18,8284	20,7405	22,5603	24,4743	28,3386
0%	×	×	×	19,4809	21,4231	23,8463	29,9818
-10%	×	×	×	19,3117	21,0894	24,4154	×
-20%	×	×	×	19,2624	21,8481	×	×
-30%	×	×	×	20,4579	×	×	×

Tab. 3 Nameraná spotreba elektrickej energie ABB IRB 5720

Z \ X	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
80%	19,0224	22,63689	26,51584	35,1575	×	×	×
70%	20,24116	23,4646	26,20876	28,9606	33,67285	×	×
60%	22,15612	25,37753	26,99995	28,34986	30,21107	34,8165	×
50%	×	28,15617	28,62306	28,85964	29,60587	31,44624	39,75548
40%	×	×	31,62081	29,92957	29,56003	30,3874	33,716
30%	×	×	35,25438	30,33534	29,13357	29,49773	31,69965
20%	×	×	×	28,70536	27,83481	28,35633	30,4454
10%	×	×	×	25,27654	25,86544	27,02499	29,61905
0%	×	×	20,43845	22,42648	24,02628	25,87887	29,53202
-10%	×	×	19,57712	20,85289	22,81861	25,37622	31,60422
-20%	×	×	19,47392	20,18966	22,47494	26,31858	×
-30%	×	×	19,30123	20,34372	23,58647	×	×
-40%	×	18,41347	19,25892	22,39045	×	×	×

Tab. 4 Nameraná spotreba elektrickej energie ABB IRB 6710

Z \ X	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
80%	18,981	22,47547	26,2736	34,69008	×	×	×
70%	20,20245	23,12732	25,76019	28,399	32,97239	×	×
60%	×	24,34194	25,8262	27,19476	29,27784	33,92702	×
50%	×	26,12567	26,73185	27,36304	28,44953	30,68515	38,53468
40%	×	29,37641	27,65994	27,31269	27,86393	29,35866	33,27911
30%	×	×	×	26,2867	26,89759	28,23178	31,31737
20%	×	×	×	24,24625	25,51	27,08424	30,19723
10%	×	×	×	22,46787	24,18976	26,17107	29,89413
0%	×	×	×	22,13432	23,44445	25,81897	×

Tab. 5 Nameraná spotreba elektrickej energie ABB IRB 6720

Z \ X	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
80%	19,19723	22,44608	25,61869	31,64804	×	×	×
70%	20,40918	23,19822	25,4203	27,62937	31,22763	×	×
60%	21,48933	24,16876	26,17164	27,62472	29,23966	32,89668	×
50%	×	25,84605	26,97951	27,5335	28,40449	30,12032	36,36989
40%	×	28,61628	27,88825	27,56637	27,93375	28,99165	31,99613
30%	×	×	28,24853	27,17003	27,28435	28,07154	30,27862
20%	×	×	25,95909	25,74706	26,17788	27,09162	29,2057
10%	×	×	22,15027	23,63459	24,83994	26,12224	28,61571
0%	×	×	21,37564	22,12154	23,68369	25,45001	28,79782
-10%	×	×	21,40817	21,61182	23,08313	×	×

Tab. 6 Nameraná spotreba elektrickej energie ABB IRB 6730

Z \ X	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
80%	20,76746	24,53267	28,45528	36,4155	×	×	×
70%	22,12576	25,41091	28,13881	30,92846	35,55844	×	×
60%	×	26,80442	29,3218	31,01491	33,0523	37,85577	×
50%	×	29,35812	30,64164	31,17497	32,17862	34,41492	42,68695
40%	×	×	32,41888	31,51317	31,74512	33,12097	37,15379
30%	×	×	33,36525	31,04905	30,96542	32,05976	35,11496
20%	×	×	×	28,98351	29,55722	30,9093	33,92145
10%	×	×	23,96638	26,06751	27,88359	29,78419	33,37798
0%	×	×	23,55796	24,21039	26,46511	29,09322	×
-10%	×	×	×	23,70025	×	×	×

Tab. 7 Nameraná spotreba elektrickej energie ABB IRB 6740

Z \ X	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
70%	30,52987	34,47274	37,71564	41,04773	46,78627	×	×
60%	×	×	40,05881	41,98162	44,31534	50,24264	×
50%	×	38,9076	40,6252	41,22565	42,52595	45,49954	58,82469
40%	×	42,56749	41,37568	40,7904	41,39124	43,31996	49,00207
30%	×	×	×	39,11061	39,96484	41,67414	45,95313
20%	×	×	×	35,45478	37,5505	40,09348	44,29084
10%	×	×	×	32,80505	35,24684	38,48769	43,70566
0%	×	×	×	32,11146	34,05144	37,61026	×

4.4.2 Meranie času

Rovnaké pravidlá ako pri meraní elektrickej energie sú aplikované aj pri meraní času počas vykonávania trajektórie. To znamená, že je zachovaný počet meraní, čiernou farbou sú vyznačené nevhodné pozície a je vytvorená farebná škála od zelenej (najnižšia hodnota) do červenej (najvyššia hodnota). Namerané údaje sú uvedené v sekundách.

Tab. 8 Nameraný čas ABB IRB 5710

Z \ X	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
70%	29,0	27,5	28,0	28,5	27,9	×	×
60%	×	28,0	28,6	29,2	29,9	30,9	×
50%	×	29,0	28,7	29,2	30,0	31,2	×
40%	×	28,2	28,7	29,4	30,3	31,4	33,2
30%	×	×	×	30,1	31,0	32,1	33,7
20%	×	×	×	31,5	32,2	33,1	34,4
10%	×	×	34,0	33,3	33,5	34,2	35,4
0%	×	×	×	34,9	34,7	35,3	36,1
-10%	×	×	×	35,6	35,4	35,7	×
-20%	×	×	×	35,4	35,2	×	×
-30%	×	×	×	34,4	×	×	×

Tab. 9 Nameraný čas ABB IRB 5720

Z \ X	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
80%	29,6	29,1	29,0	29,9	×	×	×
70%	28,9	28,3	28,0	28,3	29,6	×	×
60%	28,7	28,7	29,2	29,5	30,6	32,2	×
50%	×	29,1	29,8	30,6	31,2	33,1	35,7
40%	×	×	29,6	30,2	31,2	33,0	36,1
30%	×	×	29,5	30,3	31,6	33,5	36,4
20%	×	×	×	31,1	32,4	34,4	37,2
10%	×	×	×	32,6	34,0	35,7	38,2
0%	×	×	34,3	34,6	35,7	37,2	39,2
-10%	×	×	36,3	36,5	37,3	38,4	39,8
-20%	×	×	37,2	37,5	38,0	38,9	×
-30%	×	×	37,0	37,4	37,9	×	×
-40%	×	35,5	36,0	36,2	×	×	×

Tab. 10 Nameraný čas ABB IRB 6710

Z \ X	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
80%	36,1	34,5	33,8	34,5	×	×	×
70%	35,1	33,6	32,9	33,0	33,6	×	×
60%	×	34,2	34,8	35,4	36,1	36,8	×
50%	×	34,7	34,9	35,4	36,3	37,7	40,2
40%	×	35,1	35,4	36,1	37,1	38,5	40,6
30%	×	×	×	37,4	38,5	39,8	41,5
20%	×	×	×	39,9	40,5	41,5	42,8
10%	×	×	×	43,1	42,7	43,2	44,1
0%	×	×	×	44,9	44,4	44,5	×

Tab. 11 Nameraný čas ABB IRB 6720

Z \ X	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
80%	42,7	40,5	39,6	40,1	×	×	×
70%	40,9	39,3	38,5	38,4	39,3	×	×
60%	41,5	39,5	38,5	39,1	40,1	41,0	×
50%	×	39,8	39,1	39,8	41,0	42,9	45,2
40%	×	40,0	39,7	40,6	41,8	43,7	46,2
30%	×	×	40,7	41,7	43,1	45,0	47,4
20%	×	×	42,6	43,6	45,1	46,8	48,9
10%	×	×	47,3	47,0	47,6	48,9	50,4
0%	×	×	50,9	50,2	50,1	50,7	51,7
-10%	×	×	52,5	52,0	51,6	×	×

Tab. 12 Nameraný čas ABB IRB 6730

Z \ X	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
80%	42,6	40,6	39,5	39,8	×	×	×
70%	41,2	39,4	38,5	38,2	38,6	×	×
60%	×	39,6	38,4	38,6	39,5	39,8	×
50%	×	39,8	38,8	39,4	40,3	41,7	43,7
40%	×	×	39,5	40,2	41,1	42,4	44,4
30%	×	×	40,6	41,4	42,5	43,8	45,5
20%	×	×	×	43,4	44,3	45,5	46,9
10%	×	×	47,4	46,7	46,6	47,3	48,2
0%	×	×	50,5	49,4	48,8	48,9	×
-10%	×	×	×	50,8	×	×	×

Tab. 13 Nameraný čas ABB IRB 6740

Z \ X	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
70%	45,4	42,7	41,5	41,0	41,2	×	×
60%	×	×	41,5	41,8	42,5	42,6	×
50%	×	43,2	41,6	42,4	43,4	44,8	46,1
40%	×	42,9	42,6	43,5	44,5	45,8	47,6
30%	×	×	×	45,6	46,2	47,4	48,9
20%	×	×	×	49,7	49,2	49,4	50,4
10%	×	×	×	53,4	52,2	51,6	51,8
0%	×	×	×	55,5	54,2	53,3	×

4.5 Celkové vyhodnotenie meraní

V závere je možné zhrnúť, že pre vybrané priemyselné roboty je najmenej energeticky náročná poloha v koordinátoch X 48% a Z -10. Poloha s najväčšou spriemerovanou hodnotou spotreby elektrickej energie sa nachádza v koordinátoch X 63% a Z 63%. Časová náročnosť je v opačnom postavení a teda najnižšia priemerná hodnota času potrebného na vykonanie trajektórie sa nachádza v koordinátoch X 50% a Z 70% a najvyššia priemerná hodnota energetickej náročnosti v koordinátoch X 63% a Z -3%.

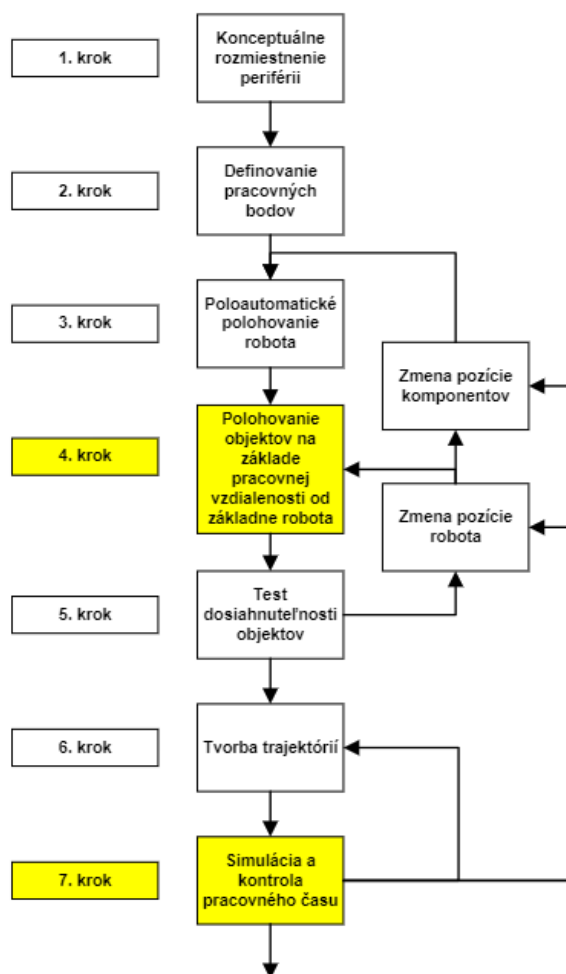
Podľa nameraných hodnôt je možné tvrdiť, že ideálna pracovná vzdialenosť pre vybrané priemyselné roboty v osi X sa pohybuje vo vzdialenosti 50% z maximálneho dosahu. To platí pre

energetickú ale aj pre časovú náročnosť. Avšak pri zachovaní hodnoty X 50% a zmenou výšky v osi Z je možné ovplyvniť energetickú náročnosť posúvaním pracovnej polohy smerom nadol pod úroveň základne robota. Tým sa docieli nižšia energetická spotreba ale časová náročnosť narastá. Naopak, ak je cieľom znížiť časovú náročnosť, poloha pracovného bodu musí byť čo najvyššie ale spotreba elektrickej energie sa zvýši. Úlohou simulačných inžinierov v praxi je teda nájsť kompromis, medzi úsporou energie a časom na základe požadovaných podmienok od zákazníka.

5 VÝVOJ METODIKY TVORBY ROBOTIZOVANÝCH PRACOVÍSK

Táto kapitola sa zaoberá vývojom metodiky pre tvorbu robotizovaných pracovísk s pridaním podmienky polohovania periférií v okolí priemyselného robota za účelom zníženia energetickej náročnosti alebo skrátenia pracovného taktu.

Vyvíjaná metodika zobrazená zjednodušenou formou v siedmych krokoch (Obr. 5) vychádza z pôvodných šiestich krokov tvorby robotizovaných pracovísk (Obr. 1), ktoré sa využívajú v súčasnosti a sú rozšírené o podrobnejšie polohovanie periférií voči priemyselnému robotu. Rozšírené alebo upravené kroky sú znázornené žltou farbou. Prvé tri kroky sa zameriavajú na prvotné dispozičné riešenia pracoviska. Doplnený štvrtý krok sa zameriava na úpravu prvotného rozloženia komponentov pracoviska za účelom zníženia energetickej náročnosti priemyselného robota. Nasleduje piaty krok, ktorý overuje dosiahnuteľnosť všetkých pracovných bodov. Šiesty krok zahŕňa tvorbu trajektórií a definovanie jej parametrov. Posledný, upravený, siedmy krok je zameraný na simuláciu kompletného pracoviska vrátane pohybov zariadení. Táto metodika je určená pre vybraných priemyselných robotov ABB IRB 5710, ABB IRB 5720, ABB IRB 6710, ABB IRB 6720, ABB IRB 6730 a ABB IRB 6740.

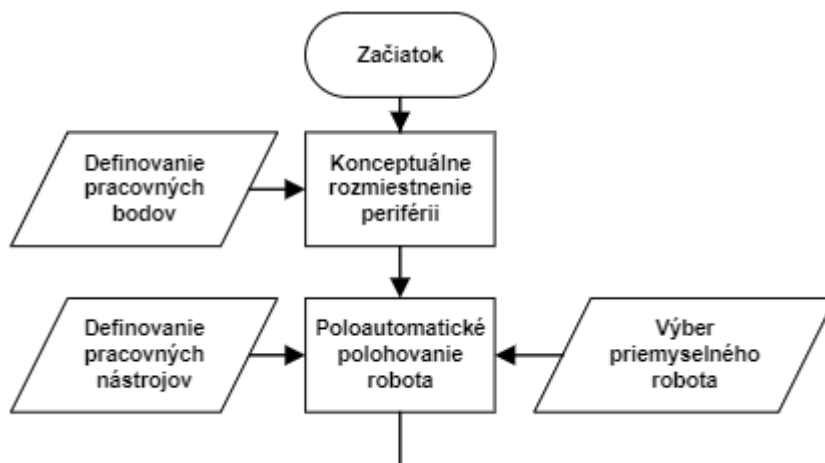


Obr. 5 Sedem krokov tvorby robotizovaných pracovísk

V nasledujúcich podkapitolách je podrobne popísaný vývojový diagram navrhovanej metodiky za účelom zníženia energetickej a časovej náročnosti robotizovaného pracoviska.

5.1 Prvotný dispozičný návrh rozmiestnenia komponentov stanice

Prvotné rozloženie komponentov (Obr. 6) v robotizovanom pracovisku sa týka prvých troch krokov tvorby robotizovaných pracovísk. Jedná sa teda o konceptuálne rozmiestnenie periférnych zariadení, na ktorých môžu byť definované pracovné body a k nim napolohovaný priemyselný robot.



Obr. 6 Prvotné rozloženie komponentov

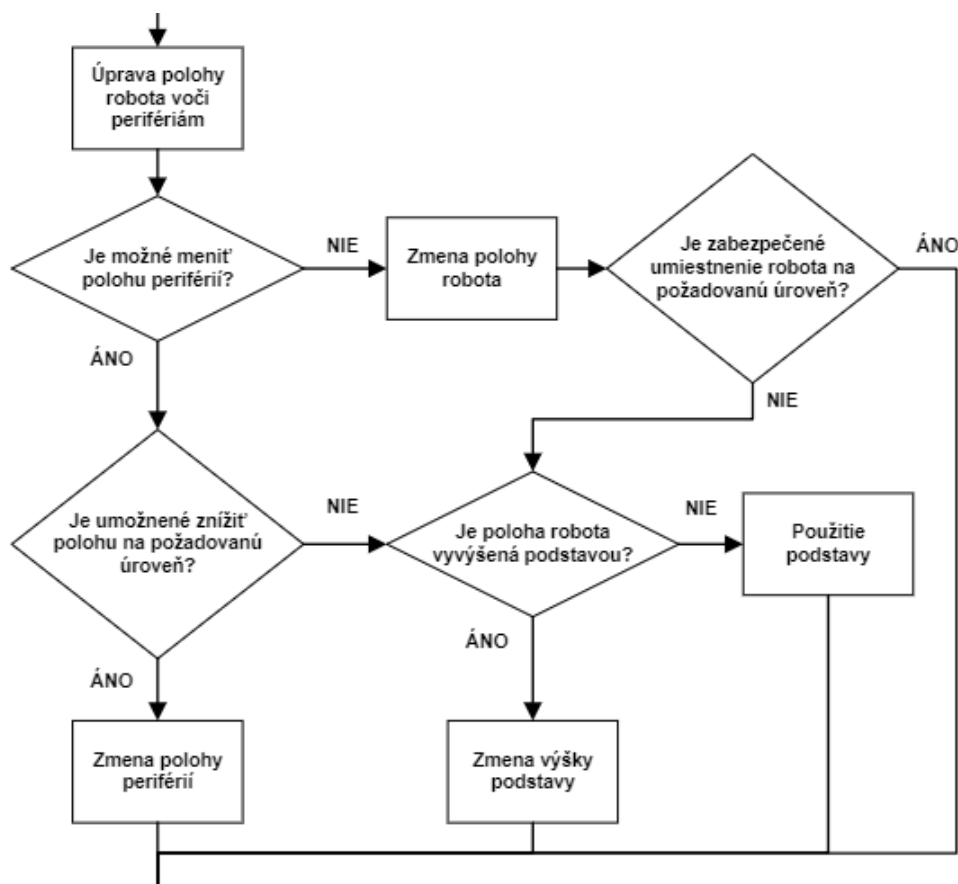
Zvyčajne je konceptuálne rozmiestnenie periférnych zariadení ovplyvnené stanoveným rozmerom robotizovaného pracoviska a prekážkami, ktoré obmedzujú možnosti rozloženia periférií. Periférie môžeme rozdeliť do dvoch skupín. Prvá skupina patrí perifériám, s ktorými robot neprichádza do kontaktu. Druhú skupinu tvoria periférne zariadenia, s ktorými robot prichádza do kontaktu a viažu s k nim pracovné body.

Po konceptuálnom rozmiestnení periférií a definovaní pracovných bodov pokračuje metodika poloautomatickým umiestnením robota a definovaním jeho efektoru. V dnešnej dobe disponujeme pokročilými nástrojmi na definovanie polohy robota voči perifériám. Tieto nástroje si dokážu prepočítať vhodnú polohu robota na základe vybraných pracovných bodov, do ktorých sa robot potrebuje dostať. Podmienkou je vhodne zvolený priemyselný robot a jeho efektor na základe požadovanej operácie.

5.2 Polohovanie na základe pracovnej vzdialenosti od základne robota

Na základe uvedených meraní v kapitole 4 je zrejmé, že vybrané priemyselné roboty majú rozdielnú spotrebu elektrickej energie v závislosti od polohy pracovného objektu voči základni robota. Preto pre zníženie energetickej náročnosti je vhodné upraviť vzájomnú polohu priemyselného robota a okolitých periférií (Obr. 7), s ktorými robot prichádza do kontaktu.

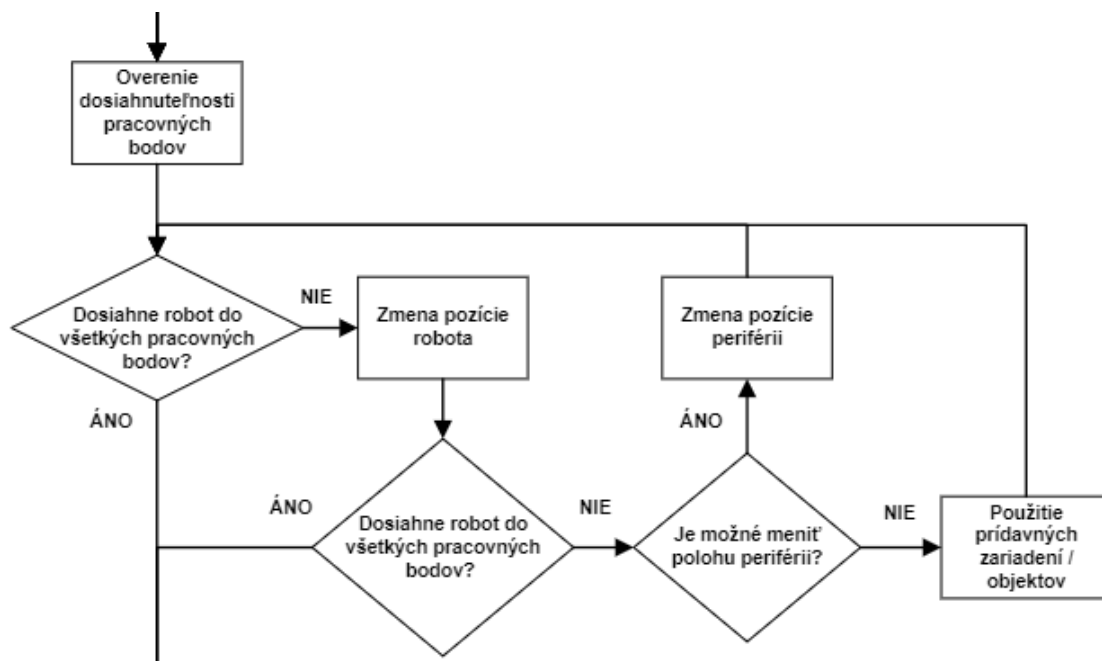
Z nameraných hodnôt vyplýva, že čím nižšie a čím bližšie k základni vybrané roboty vykonávajú svoju činnosť, tým nižšia je ich spotreba elektrickej energie.



Obr. 7 Polohovanie na základe pracovnej vzdialenosti od základne robota

5.3 Overenie dosiahnuteľnosti pracovných bodov

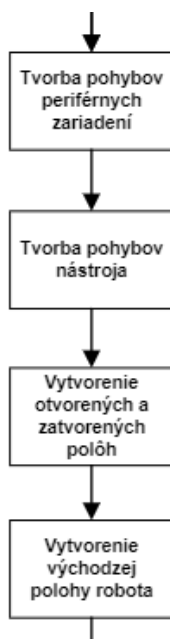
Po rozmiestnení komponentov v robotizovanom pracovisku nasleduje krok, pri ktorom je testované, či je priemyselný robot schopný dosiahnuť každú požadovanú pracovnú pozíciu (Obr. 8). V prípade, že robot nie je schopný dosiahnuť požadovaný pracovný bod, je nutné zmeniť polohu robota. Ak ani po zmene pozície robota nie je robot schopný dosiahnuť všetky pracovné body, nasleduje zmena pozície periférie, ktorej patria nedosiahnuté body. Nie vždy je však zmena pozície periférií možná, vzhľadom na prípadné obmedzenia rozmerov pracoviska alebo kvôli prepojeniu na susediace pracovisko. Ak nie je umožnené meniť polohu danej periférie, je možné použiť prídavné zariadenia alebo objekty. Takýmto zariadením môže byť napríklad prídavná siedma os – pojazd. V prípade, že sa pracovný bod nachádza príliš vysoko na to, aby ho robot dosiahol, sú používané pomocné objekty ako podstava. Ďalšími takýmito pomocnými objektmi môžu byť predĺžovacie príruby umiestnené medzi koncovou osou robota a nástrojom.



Obr. 8 Overenie dosiahnuteľnosti pracovných bodov

5.4 Tvorba pohybov zariadení a definovanie polôh

Pre zvýšenie komplexnosti simulácie robotizovaného pracoviska je nutné rozpohybovať všetky komponenty (Obr. 9), s ktorými príde robot do styku. Jedná sa primárne o samotný nástroj robota a okolité periférie. Pohyby zariadení sú dôležitým prvkom pri overovaní bezkolízneho stavu pracoviska. Kolízny stav môže nastať pri otváraní alebo zatváraní svoriek nástroja alebo prípravku. Taktiež sú dôležité pohyby zväracích alebo nitovacích klieští, kde sa mení uhol roztvorenia.



Obr. 9 Tvorba pohybov zariadení a definovanie polôh

5.5 Tvorba bezpečnostných zón

V dnešnej dobe je kladený veľký dôraz aj na bezpečnosť na pracovisku. Keďže nie všetky robotizované pracoviská sú kompletne automatizované a je potrebný zásah človeka pre chod pracoviska, je nutné pri navrhovaní robotizovaných pracovísk brať do úvahy určité obmedzenia zaisťujúce bezpečnosť operátora na pracovisku. Nejedná sa však len o situácie, kedy človek vchádza do zdieľaného pracovného priestoru s robotom, ale aj o pohyb operátora v blízkom okolí pracovnej stanice. Pre tieto situácie musia byť vytvorené bezpečnostné zóny (Obr. 10), ktoré priemyselný robot nesmie prekročiť. V prípade, že robot prekročí stanovenú zónu, musí okamžite zastaviť, prípadne sa vypnúť.



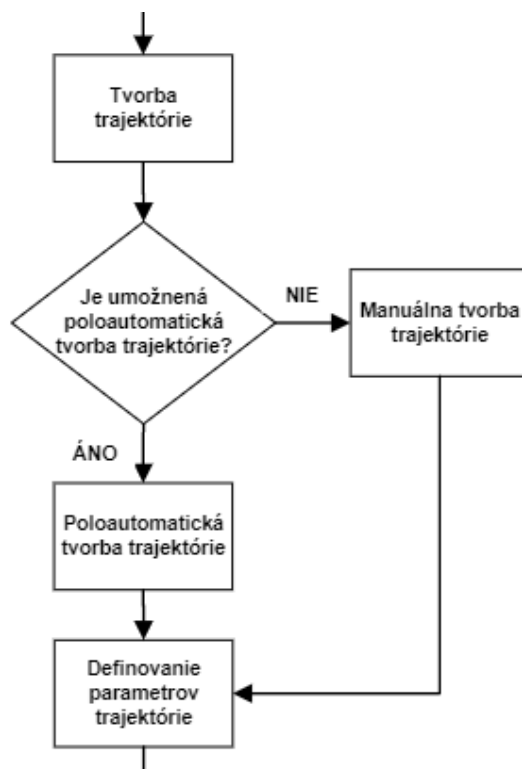
Obr. 10 Bezpečnostné zóny

5.6 Tvorba trajektórie

Keď sú už komponenty v robotizovanom pracovisku rozmiestnené, priemyselný robot má vytýčenú bezpečnú pracovnú plochu a všetky pohyblivé komponenty majú definovanú kinematiku, metodika pokračuje vytvorením požadovaných trajektórií (Obr. 11). Trajektória pozostáva zvyčajne z minimálne dvoch bodov, pričom prvý bod je východzia/koncová poloha a zvyšné body trajektórie sú buď procesné alebo prejazdové. Procesné body sú v priamom kontakte s manipulovaným objektom ako napríklad pri zváraní alebo manipulácii s objektom. Prejazdové body sú používané pri prejazde TCP priemyselného robota z jedného miesta na druhé. Zvyčajne sa používajú pri obchádzaní iných objektov v pracovisku. Tvorba trajektórie môže prebiehať manuálne alebo poloaufomaticky pomocou pokročilých algoritmov.

Pri manuálnej tvorbe trajektórie je programátor odkázaný na vlastné poznatky a skúsenosti s týmto procesom. Je to zdĺhavý proces, pri ktorom musí byť ručne kontrolovaný každý bod

trajektórie, či splňa všetky stanovené podmienky. Poloautomatickým generovaním sa proces tvorby trajektórie výrazne zrýchli. Podmienky pre generovanie trajektórie sú zvolenie počiatočného a koncového bodu a TCP bodu nástroja. Zvyšné body trajektórie sú vygenerované pokročilými algoritmami softvéru. Najnovšie trendy poloautomatickej tvorby robotických trajektórií sa zameriavajú na generovanie trajektórie, ktorá je schopná obísť prekážku a zabezpečiť tým bezkolízny stav.

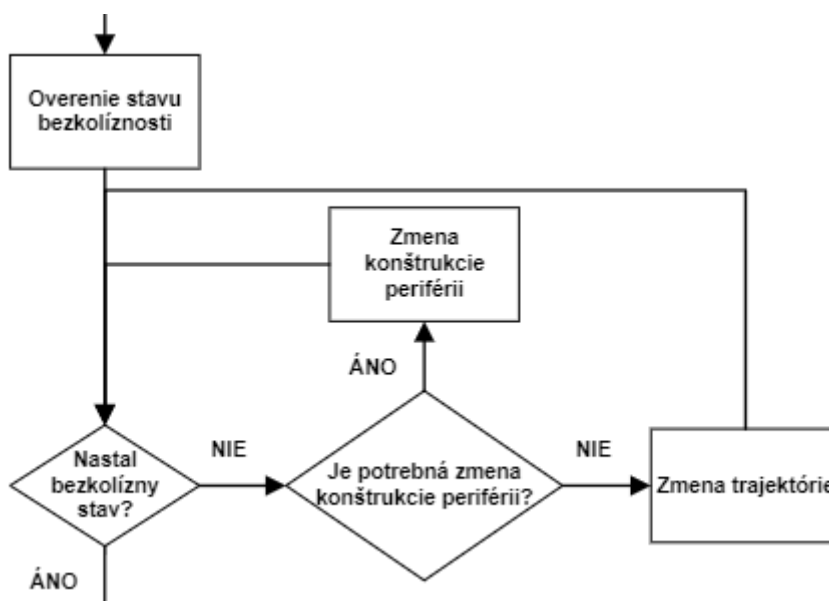


Obr. 11 Tvorba trajektórie

5.7 Overenie stavu bezkolíznosti

Bezkolízny stav je jedna z primárnych požiadaviek pri tvorbe trajektórií priemyselných robotov (Obr. 12). Aj keď sú pracovné body mimo objektu, s ktorým by mohla nastať kolízia, je možné prísť do nežiadúceho kontaktu s cudzím objektom prechádzaním z jedného bodu do druhého. Aby nenastal kolízny stav, je nutné vykonať softvérovú kontrolu pomocou kolíznych setov. Tieto sety rozdelia objekty na pracovisku do dvoch skupín. V prvej skupine sa nachádzajú objekty, ktoré chceme kontrolovať. Zvyčajne sa jedná o priemyselného robota a jeho nástroj. Ak sa jedná o manipulačný nástroj, tento kolízny set zahŕňa aj objekt, s ktorým robot manipuluje. Druhá skupina objektov obsahuje všetky objekty v stanici, s ktorými by robot mohol počas pohybu prísť do kontaktu. Jedná sa o pevné prekážky ako sú stĺpy, ploty alebo okolité periférie priemyselného robota. Najčastejšie sú však kontrolované prípravky, s ktorými robot prichádza do kontaktu. Nie je kontrolovaná len samotná pozícia odoberania/zakladania dielu do prípravku ale aj pohyby

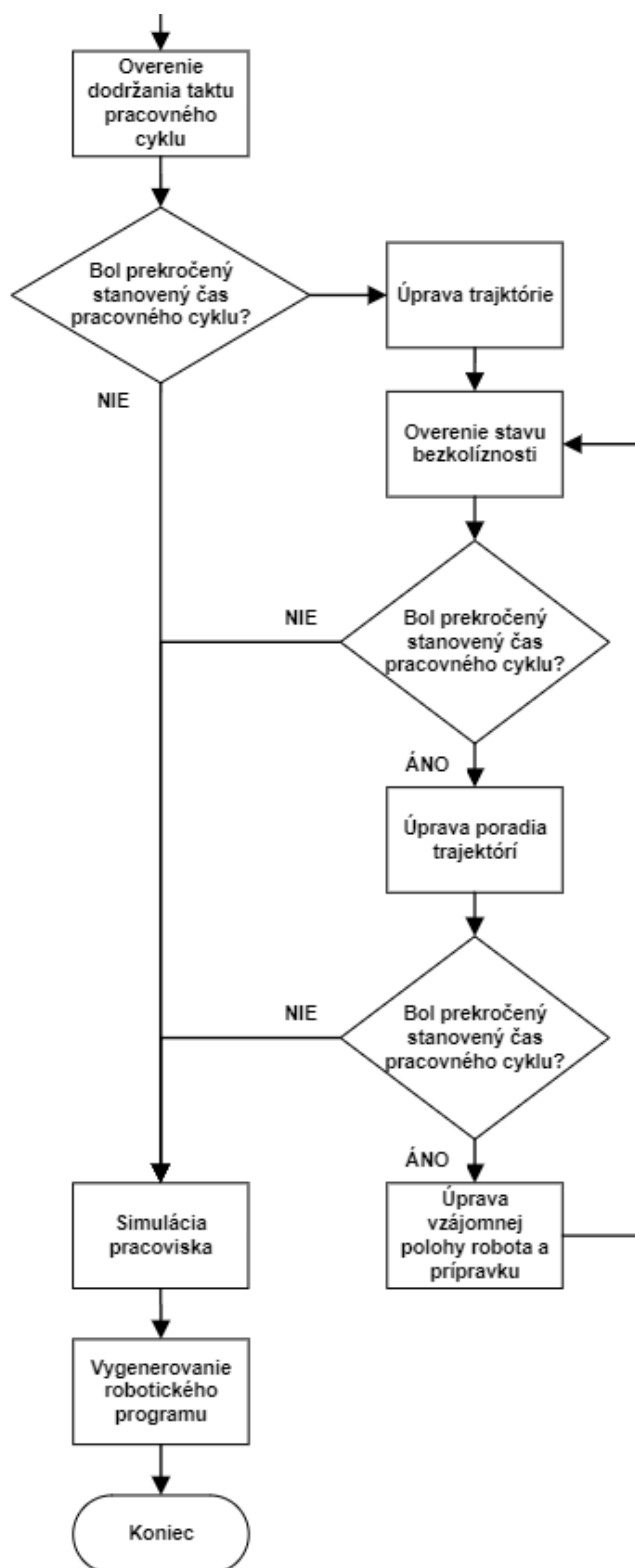
zariadení ako sú pohyby centrovacích kolíkov alebo otváranie/zatváranie svoriek či už na prípravku alebo efektore. V prípade zväracích klieští sa kontroluje, či pri roztváraní nedochádza ku kontaktu s prípravkom. Pri komplikovaných pohyboch je taktiež možné skontrolovať, či samotný nástroj neprichádza do kontaktu s telom robota alebo jeho prídavnými zariadeniami. Ak nastane kontakt dvoch objektov z jednej a druhej skupiny, zvyčajne je tento kontakt znázornený sfarbením objektov v kontakte červenou farbou. Odstránenie kolízneho stavu môže byť uskutočnené zmenou trajektórie alebo konštrukčnými zmenami na nástroji alebo prípravku.



Obr. 12 Overenie stavu bezkolíznosti

5.8 Overenie dodržania taktu pracovného cyklu

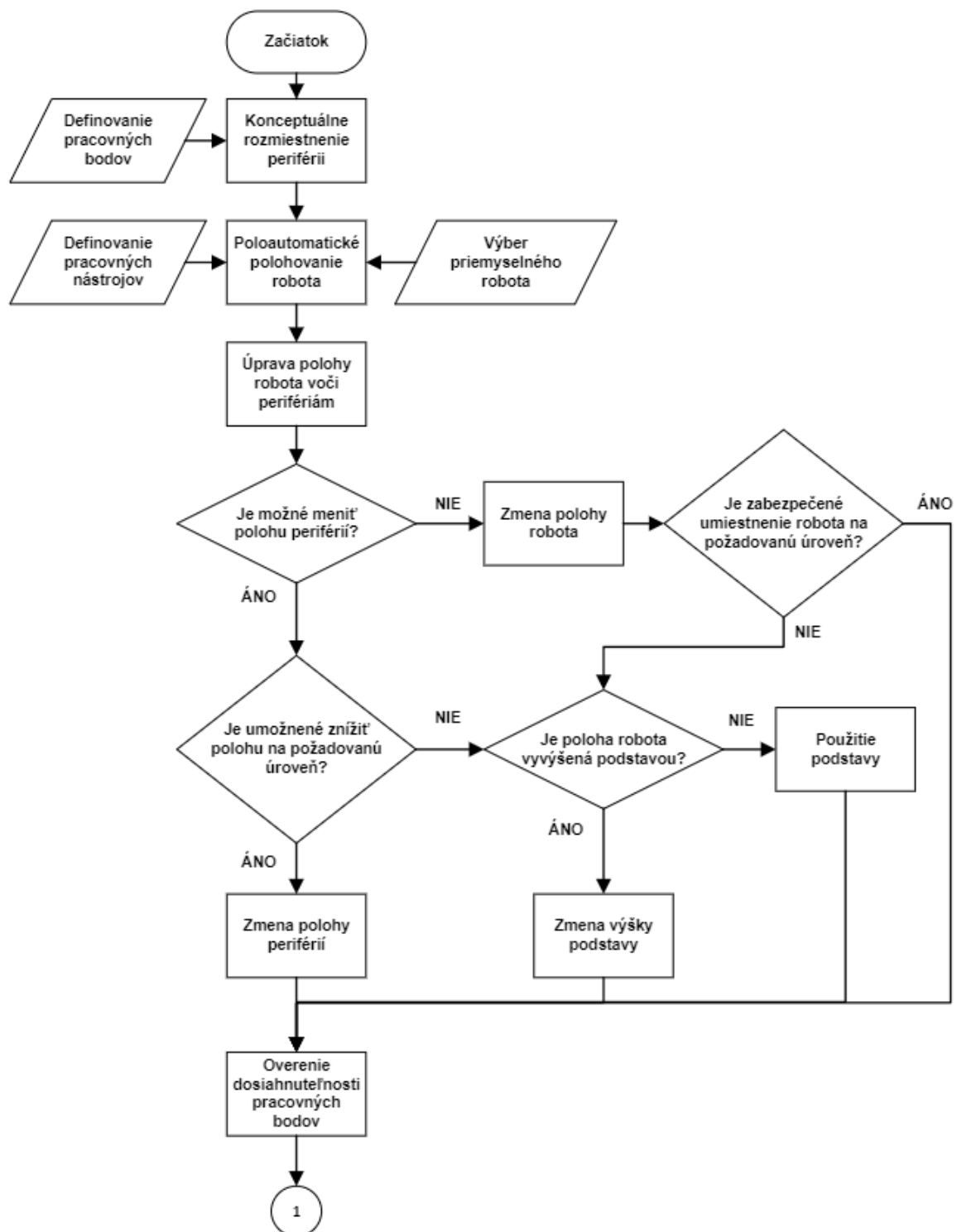
Poslednou časťou navrhovanej metodiky (Obr. 13) je overenie dodržania stanoveného pracovného taktu. Ak je čas pracovného cyklu vyhovujúci, nie je nutné už vykonávať v stanici žiadne zmeny. Avšak ak je prekročený stanovený limit pracovného taktu je nutné pracovný čas znížiť. Znížiť pracovný takt je možné viacerými spôsobmi. Prvým spôsobom je úprava trajektórií a to úpravou polohy a zredukovaním počtu bodov alebo zmenou poradia jednotlivých trajektórií, ktoré robot vykonáva. Ďalší spôsob je zvýšenie rýchlosti robota. Keďže bolo v 3. kapitole vykonané meranie, ktoré preukazuje zmenu pracovného času v závislosti od polohy trajektórie voči základni robota, je možné skrátiť pracovný takt zmenou polohy pozície robota voči okolitým perifériám. Na základe meraní je možné tvrdiť, že čím vyššie a bližšie k stredovej osi základne vybrané priemyselné roboty pracujú, tým je čas na vykonanie požadovanej trajektórie kratší.

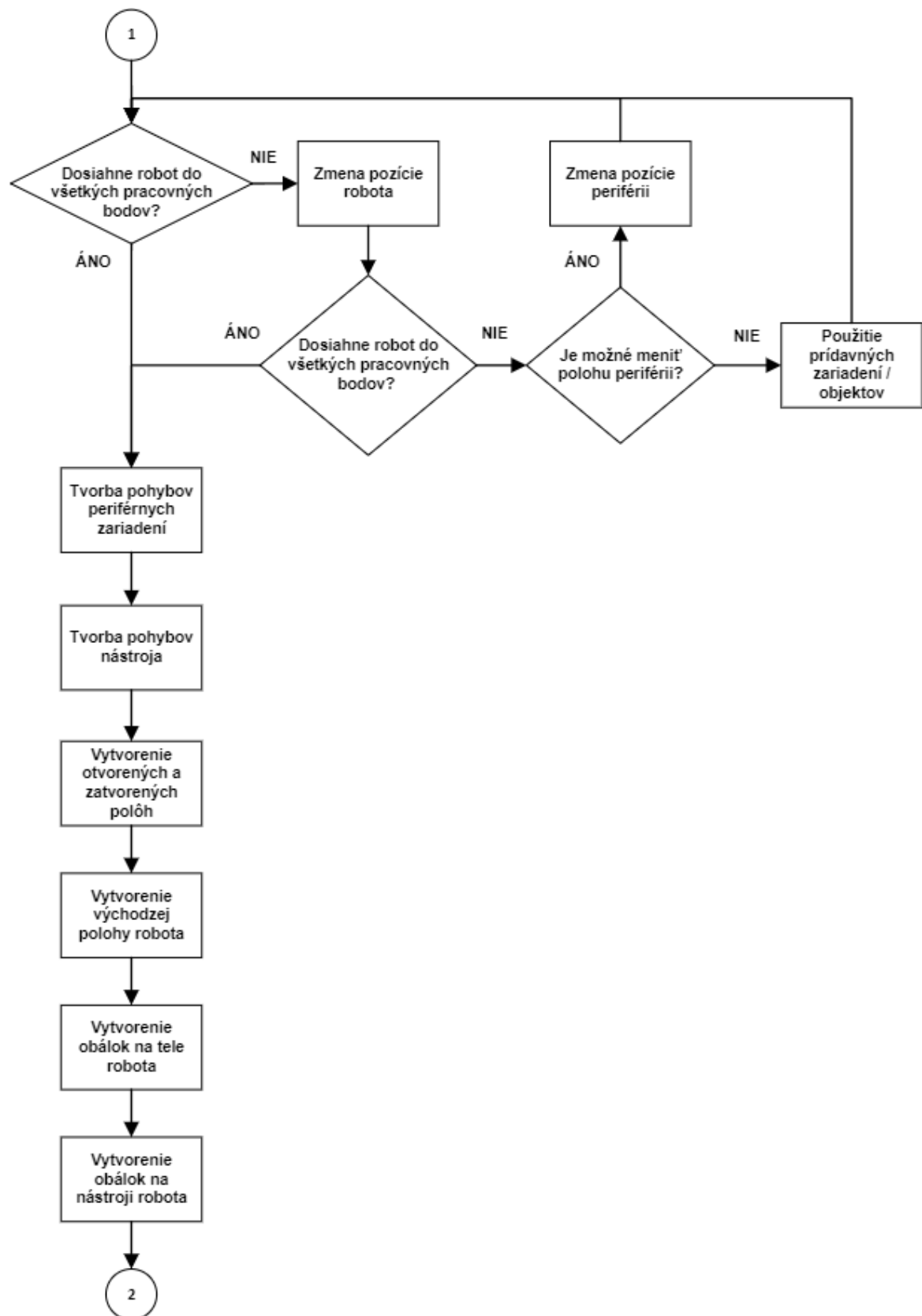


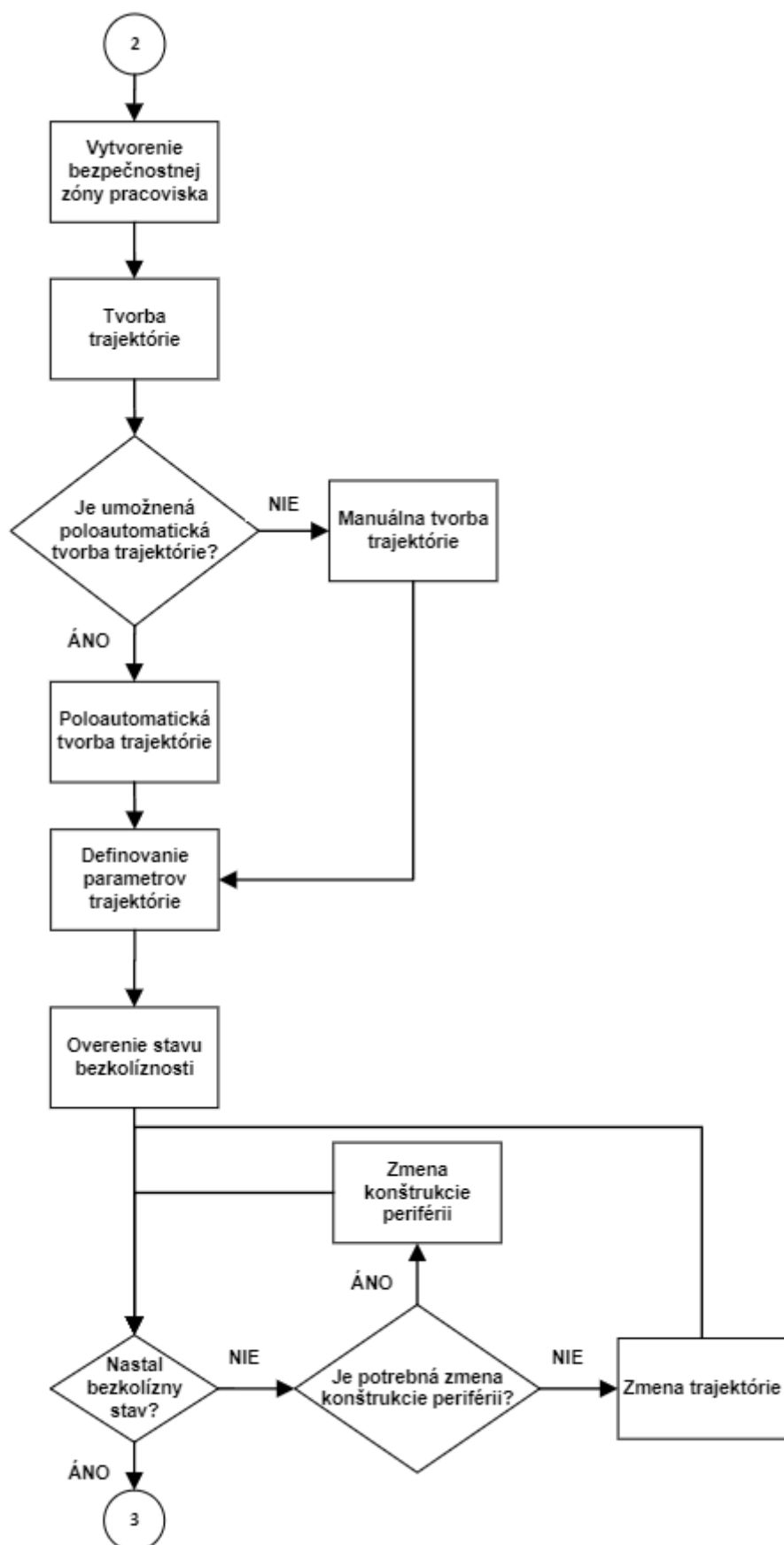
Obr. 13 Overenie dodržania taktu pracovného cyklu

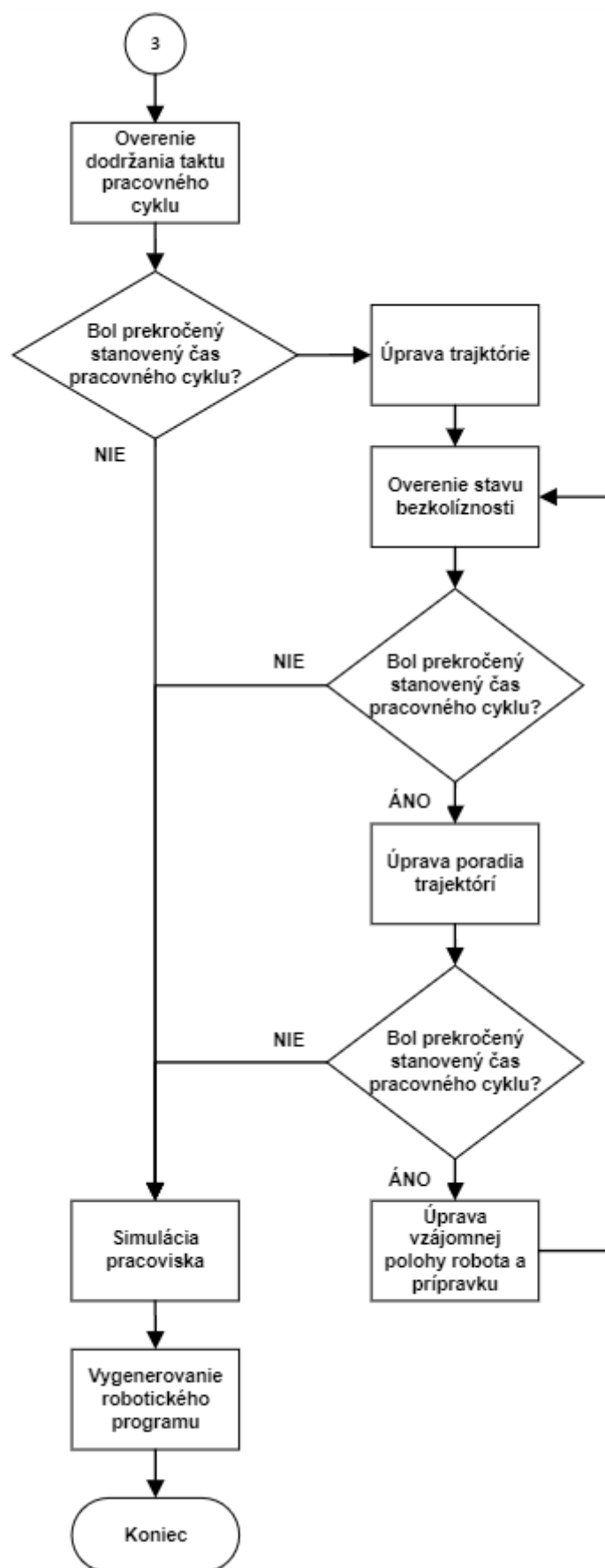
5.9 Celkový vývojový diagram navrhovanej metodiky

Celková navrhnutá metodika projektovania robotizovaných staníc zameraná na zníženie energetickej a časovej náročnosti na základe vzájomnej polohy priemyselného robota a jeho periférií je znázornená na Obr. 14.







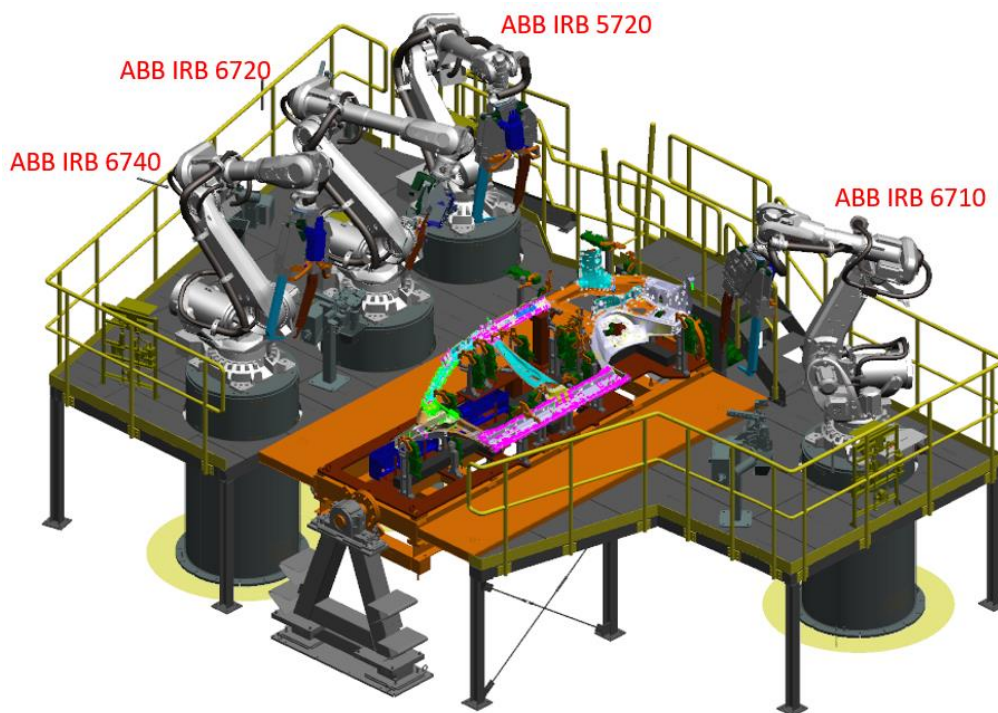


Obr. 14 Celkový vývojový diagram

5.10 Overenie metodiky experimentálnym modelom

Pre overenie vyvíjanej metodiky energetickej a časovej náročnosti priemyselných robotov v závislosti od ich pracovnej výšky bol použitý experimentálny model zvaracej stanice použitej v automobilovom priemysle. Toto zvaracie pracovisko bolo navrhnuté podľa bežne používanej metodiky v praxi a teda museli byť dodržané dve hlavné podmienky – dodržanie stanoveného pracovného času a dosiahnuteľnosť do všetkých pracovných bodov. V tomto pracovisku sú použité priemyselné roboty ABB IRB 6740, ABB IRB 6720, ABB IRB 5720 a ABB IRB 6710, ktoré ako nástroj používajú zvaracie kliešte.

Tento pôvodný model experimentálneho pracoviska (Obr. 15) je možné považovať za východiskový bod pre nasledujúce porovnanie. Súčasťou tohto pracoviska sú aj pôvodné trajektórie, na základe ktorých je možné určiť pracovný rozsah jednotlivých robotov v osiach X a Z.

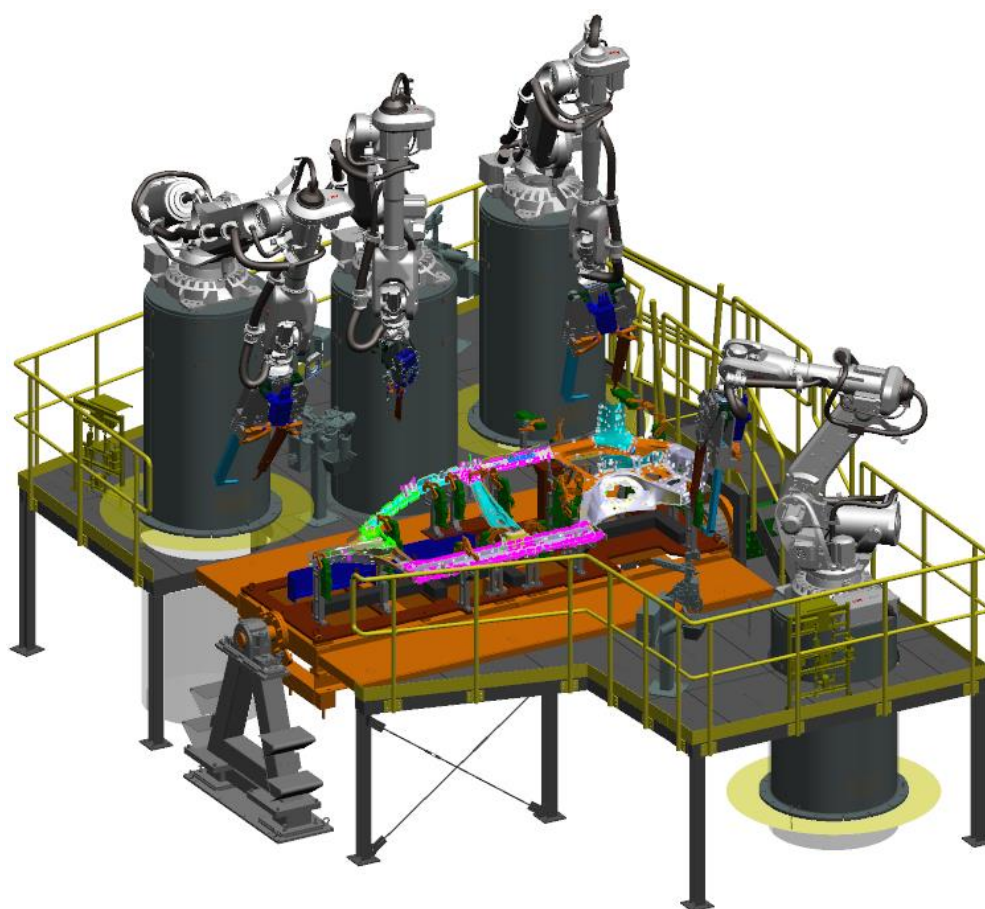


Obr. 15 Pôvodný model experimentálneho pracoviska

Vzhľadom na to, že navrhovaná metodika dispozičného riešenia robotizovaných pracovísk sa zaoberá prvotným dispozičným návrhom rozloženia komponentov v robotizovanom pracovisku, bolo náročné aplikovať navrhnuté zmeny do už existujúceho pracoviska. Z tohto dôvodu zmena polohy priemyselných robotov v osi X nebola možná a zmeny sa aplikovali len zmenením polohy priemyselných robotov v osi Z.

Na základe vyvinutej metodiky bolo toto pracovisko upravené tak, aby bola znížená pracovná výška každého priemyselného robota na čo najnižšiu úroveň. Táto zmena bola docielená zvýšením polohy jednotlivých robotov v osi Z. Priemyselnému robotu ABB IRB 6740 bola posunutá

základňa o 1760 mm smerom nahor. Vplyvom tejto zmeny sa znížila spotreba elektrickej energie o 0,5415 Wh, čo je približne 6,17%. Obdobná zmena nastala aj pri priemyselnom robote ABB IRB 6720, kde bola zvýšená poloha základne robota o 1500 mm. Zmenou polohy bolo docielené zníženie spotreby elektrickej energie o 0,4463 Wh, teda 5,9%. Poloha priemyselného robota ABB IRB 5720 bola zvýšená o 1600 mm. Táto zmena mala za následok zníženie spotreby elektrickej energie o 0,5793 Wh, čo predstavuje 6,46%. Špeciálny prípad pri zvýšení polohy nastal u robota ABB IRB 6710, keďže v tomto prípade bolo možné zvýšiť polohu základne robota len o 300 mm. Je to z toho dôvodu, že pri zmene polohy základne do väčšej výšky sa stali niektoré body nedosiahnuteľné a bola vyžadovaná úplná zmena trajektórie. Táto nepatrná zmena mala za následok zníženie energetickej náročnosti o 0,106 Wh, teda 1,19%.



Obr. 16 Upravený model experimentálneho pracoviska

5.11 Zhodnotenie vyvinutej metodiky

Vyvinutá metodika dopĺňa pôvodných šesť krokov tvorby robotizovaných pracovísk využívaných v praxi o ďalší medzikrok (Polohovanie objektov na základe pracovnej vzdialenosti od základne robota) a posledný krok (Simulácia) upravuje. Navrhnuté zmeny sa týkajú zmeny vzájomnej polohy priemyselného robota a jeho periférií v priestore robotizovaného pracoviska. Pridaný krok nasleduje po prvotnom poloautomatickom rozložení priemyselného robota a jeho

periférií v stanici. Primárne sa jedná o periférie, s ktorými prichádza robot do kontaktu. V pridanom kroku je upravená vzájomná počiatočná poloha robota a periférií do požadovanej výšky a vzdialenosti. Pre vybraných robotov platí, že pracovné body by sa mali nachádzať v polovičnej vzdialenosti ich maximálneho dosahu v osi X a 10% pod úrovňou základne priemyselného robota v osi Z. Tým sa docieli takmer maximálne zníženie energetickej náročnosti priemyselného robota. Upravený krok (simulácia) sa nachádza v závere navrhnutej metodiky.

Pre overenie vyvinutej metodiky bolo použité experimentálne pracovisko, ktoré bolo následne upravené podľa zistených energeticky najmenej náročných polôh priemyselných robotov. Po aplikovaní navrhovaných zmien sa spotreba elektrickej energie priemyselných robotov znížila o 1,6731 Wh na jeden pracovný cyklus. Za predpokladu, že pracovný takt tohto pracoviska je 60 s a nedôjde k príčine, ktorá by zastavila výrobu je možné vyčíslit' ročné zníženie spotreby elektrickej energie priemyselných robotov o 0,8794 MWh. Ročná úspora priemyselných robotov experimentálneho pracoviska je popísaná v Tab. 14. Merania 1 obsahujú namerané hodnoty spotreby elektrickej energie bez aplikovaní navrhovaných zmien. Meranie 2 obsahuje namerané hodnoty spotreby elektrickej energie po aplikovaní navrhovaných zmien. Taktiež je vyčíslená úspora jednotlivých priemyselných robotov, tak ako aj celková úspora elektrickej energie priemyselných robotov. Priemerná trhovú cenu elektrickej energie pre podniky na rok 2024 je stanovená na 149 €/MWh (Energie-portal 2024). Na základe tejto ceny bola vypočítaná ročná úspora 131,03 €. Táto finančná úspora sa však viaže len na samotných priemyselných robotov a nezahŕňa iné objekty v pracovisku ako controller, periférie, či iné prvky použité v pracovisku.

Tab. 14 Ročná úspora priemyselných robotov experimentálneho pracoviska

Robot	Meranie 1 [MWh]	Meranie 2 [MWh]	Úspora [MWh]	Úspora [%]	Úspora [€]
ABB IRB 6740	4,61156184	4,32694944	0,2846	6,17	42,4054
ABB IRB 6720	3,9769524	3,74237712	0,2346	5,90	34,9554
ABB IRB 5720	4,58407296	4,27959288	0,3045	6,64	45,3705
ABB IRB 6710	4,6691676	4,613454	0,0557	1,19	8,2993
Celkovo	17,8418	16,9624	0,8794		131,03

Vyvinutá metodika však môže priniesť aj negatíva spojené s dostupnosťou zariadení pre operátorov alebo technických pracovníkov. Vzhľadom na to, že priemyselný robot musí byť relatívne vysoko voči svojim perifériám aby bola čo najviac minimalizovaná energetická náročnosť, musí technický pracovník použiť schodíky alebo iný objekt pri údržbe priemyselného robota. To môže zapríčiniť zmenšenie pracovného priestoru robota alebo sa môže pracovník zranit' pri práci na schodoch. Preto je na zvážení simulačných inžinierov, či a do akej miery je takáto úprava pracoviska možná, aby boli dodržané všetky bezpečnostné a výrobné podmienky.

ZÁVER

Predložená dizertačná práca sa zaoberá znižovaním energetickej a časovej náročnosti vybraných priemyselných robotov úpravou vzájomnej polohy priemyselného robota a jeho periférií. Teoretická časť tejto práce je venovaná súčasným trendom projektovania robotizovaných pracovísk, ich postupom, obmedzeniam a nástrojom na tvorbu takýchto pracovísk. Následne teoretická časť pokračuje prehľadom spôsobov, ako sa v dnešnej znižuje energetická a časová náročnosť takýchto pracovísk. Táto časť je rozdelená do troch skupín, pričom prvá skupina sa zameriava na softvérové úpravy, ktoré je možné aplikovať až po kompletnom postavení stanice. Najrozšírenejším spôsobom využívaným vo vede aj v praxi je zmena rýchlosti a zrýchlenia priemyselného robota, zmenou postupnosti jednotlivých robotických operácií alebo optimalizáciou trajektórií. Druhá skupina sa zaoberá hardvérovými úpravami priemyselného robota a jeho zariadení. Patria sem úpravy ako výber materiálu a konštrukcia priemyselného robota alebo aj prídavné zariadenia na zdieľanie energie. Tretia časť je najmenej skúmanou časťou v oblasti znižovania spotreby elektrickej energie. Venuje sa prvej fáze dispozičného riešenia pracoviska upravovaním vzájomnej polohy medzi komponentami v osiach X, Y a Z. Aj keď táto oblasť nie je málo skúmaná, prevažná väčšina výskumov je zameraná len na zníženie pracovného času.

Hlavnou úlohou tejto práce bolo vyvinúť metodiku, ktorá by tento problém so znižovaním spotreby elektrickej energie na základe vzájomnej polohy priemyselného robota a jeho periférií zahrnula už do existujúcej metodiky tvorby robotizovaných pracovísk. Keďže fakulta nedisponuje viacerými rozdielnymi priemyselnými robotmi značky ABB, všetky merania prebiehali pomocou simulačných softvérov. Preto ako prvý krok bolo nutné overiť dôveryhodnosť nameraných hodnôt v simulácii v porovnaní so skutočným robotom. Následne bola vybraná vzorka priemyselných robotov od firmy ABB, ktoré majú podobné konštrukčné vlastnosti a dosahy. Ich polohy minimálnej a maximálnej energetickej a časovej spotreby majú podobnú hodnotu, teda sú pre vyvíjajúcu metodiku vhodné. Ďalším krokom bolo vytvorenie parametricky upraviteľnej trajektórie v programe Process Simulate. Táto trajektória bola navrhnutá tak, aby ju bolo možné vykonať všetkými vybranými priemyselnými robotmi v rôznych výškach a vzdialenostiach, pričom bola dodržaná podmienka zachovania konštantnej hodnoty vzdialenosti v osiach X a Z pre každý bod trajektórie. Ďalšou podmienkou bolo, aby vytvorená trajektória bola čo najviac energeticky náročná, preto robot počas vykonávania trajektórie neustále mení svoju konfiguráciu. Následne bolo pridané do trajektórie obmedzenie, ktoré limituje využitie osí priemyselného robota o 5% z jeho maxima. Toto obmedzenie sa využíva v praxi pri projektovaní pracovísk z dôvodu nepresného rozmiestnenia komponentov v skutočnom robotizovanom pracovisku voči simulácii.

Práca pokračuje meraním hodnôt spotreby elektrickej energie a časovej náročnosti každým z vybraných robotov v rôznych výškach a vzdialenostiach od základne robota. Dokopy bolo nameraných 274 trajektórií, pričom len 173 z nich spĺňalo požadované obmedzenie. Z nameraných hodnôt možno usúdiť, že pre vybrané priemyselné roboty je optimálne pracovať v 50% svojho maximálneho dosahu v osi X. Polohovanie pracovného objektu v osi Z má vplyv na dva parametre. Pri znižovaní polohy v osi Z sa znižuje aj spotreba elektrickej energie, avšak zvyšuje sa časová náročnosť. Naopak pri polohovaní pracovného objektu smerom hore sa spotreba elektrickej energie zvýši ale zníži sa pracovný čas. Na základe týchto meraní bola následne vytvorená vyvíjaná metodika tvorby robotizovaných pracovísk, ktorá zahŕňa aj vplyv polohovania jednotlivých komponentov v robotizovanom pracovisku. Metodika vychádza zo šiestich krokov projektovania robotizovaných pracovísk, ktoré sa v dnešnej dobe využívajú v praxi. Vyvíjaná metodika teda zahŕňa aj časť projektovania, kde je zahrnutá podmienka zníženia energetickej a časovej náročnosti na základe dispozičného riešenia pracoviska. Následne bola metodika overená pomocou experimentálneho modelu robotizovaného pracoviska, ktorý vychádza zo skutočného robotizovaného pracoviska použitého v praxi. Aplikovaním navrhovaných zmien polohy priemyselných robotov voči periférii bola znížená spotreba elektrickej energie pre jeden pracovný cyklus o 33,95 Wh. Z finančného hľadiska sa jedná o úsporu 131,03€ za rok. Táto úspora sa však vzťahuje priamo len na spotrebu elektrickej energie priemyselných robotov a nezahŕňa okolité periférie, či spotrebu controllerov alebo iných zariadení v pracovisku.

Výhodou vyvíjanej metodiky je, že vhodným dispozičným riešením komponentov v robotizovanom pracovisku je možné minimalizovať energetickú a časovú náročnosť pracoviska. Táto úspora môže predstavovať až 45% úsporu elektrickej energie a 30% úsporu času v porovnaní maximálnej a minimálnej spotreby elektrickej energie priemyselného robota. Veľká úspora času alebo energie v podobe polohovania komponentov však prináša so sebou aj negatíva. Pre dosiahnutie maximálnej úspory je nutné polohovať periférie priemyselného robota vysoko nad úroveň základne alebo pod jej úroveň v závislosti, či je potrebné zredukovať spotrebu energie alebo času. Tu nastáva problém, ktorý musí vyriešiť simulačný inžinier a je na jeho uvážení, o koľko je možné zmeniť vzájomnú polohu priemyselného robota voči jeho perifériám.

Prínos práce pre vedu

Hlavným prínosom pre oblasť vedeckého výskumu je rozšírenie poznatkov v oblasti dispozičného riešenia robotizovaných pracovísk a úspory elektrickej energie, keďže táto oblasť je primárne skúmaná len z časového hľadiska. Z energetického sa väčšina výskumu zameriava na softvérové nastavenia na zníženie spotreby elektrickej energie a nie na jeho dispozičné riešenie. Spracovaním nameraných dát zo simulácií je ďalej možné rozvíjať problematiku znižovania energetickej a časovej náročnosti robotizovaných pracovísk aj na základe pracovnej vzdialenosti a výšky od základne robota.

Prínosy práce pre prax

Prínosom pre prax je primárne podrobná inovatívna metodika tvorby robotizovaných pracovísk, ktorá môže uľahčiť a urýchliť tvorbu robotizovaných pracovísk. Keďže je v dnešnej dobe kladený veľký dôraz na znižovanie spotreby elektrickej energie, táto metodika zahŕňa aj dodatočné úpravy, ktoré majú na základe výsledkov simulácií za následok zníženie spotreby elektrickej energie alebo zredukovanie pracovného taktu. Táto inovatívna metodika môže znamenať významný pokrok vo vývoji a tvorbe robotizovaných pracovísk nie len v automobilovom priemysle ale aj v iných odvetviach, kde sú nasádzané priemyselné roboty. Aplikovaním vhodného rozmiestnenia a dodatočnou softvérovou alebo hardvérovou úpravou pracoviska je možné zredukovať spotrebu ešte viac, ako sa redukuje v dnešnej dobe. Na základoch tejto metodiky je možné vytvárať nové algoritmy pre automatizované koncepčné rozmiestnenie komponentov v pracovnej stanici, ktoré by neskôr mohli automatizovať celý proces tvorby robotizovaných pracovísk.

Prínos práce pre pedagogiku

Pedagogickým prínosom tejto práce je ucelený prehľad všeobecnej teórie o projektovaní a možnostiach znižovania energetickej a časovej náročnosti robotizovaných pracovísk. Na základe týchto informácií je možné študentom komplexne popísať spôsoby ako znížiť energetickú náročnosť priemyselných robotov a prakticky ukázať postup tvorby robotizovaných pracovísk. Zároveň sú tak tvorené teoretické aj praktické poznatky požadujúce pre budúce zamestnanie študentov v oblasti projektovania robotizovaných pracovísk.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

CARABIN, Giovanni, Erich WEHRLE a Renato VIDONI, 2017. A review on energy-saving optimization methods for robotic and automatic systems. *Robotics* [online]. 2017, roč. 6, č. 4. ISSN 22186581. Dostupné na: doi:10.3390/robotics6040039

CHEMNITZ, Moritz, Gerhard SCHRECK a Jörg KRÜGER, 2011. Analyzing energy consumption of industrial robots. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA* [online]. 2011, s. 2–5. Dostupné na: doi:10.1109/ETFA.2011.6059221

ENERGIE-PORTAL, no date. *Elektrina o 80* [online]. Dostupné na: <https://www.energie-portal.sk/Dokument/ceny-energii-elektřiny-plynu-2024-110180.aspx>

HIRZINGER, G., N SPORER, A. ALBU-SCHAFFER, M. HAHNLE, R KRENN, A PASCUCCI a M SCHEDL, 2002. DLR's torque-controlled light weight robot III-are we reaching the technological limits now? V: *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)* [online]. B.m.: IEEE, s. 1710–1716. ISBN 0-7803-7272-7. Dostupné na: doi:10.1109/ROBOT.2002.1014788

LEE, Gary, ed., 2012. *Advances in Automation and Robotics, Vol.1* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Lecture Notes in Electrical Engineering. ISBN 978-3-642-25553-3. Dostupné na: doi:10.1007/978-3-642-25553-3

LUETH, T.C., 1992. Automated Computer-Aided Layout Planning for Robot Workcells. *IFAC Proceedings Volumes* [online]. 1992, roč. 25, č. 7, s. 473–478. ISSN 14746670. Dostupné na: doi:10.1016/s1474-6670(17)52412-x

RASSÖLKIN, Anton, Hardi HÕIMOJA a Raivo TEEMETS, 2011. Energy saving possibilities in the industrial robot IRB 1600 control. *2011 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics, CPE 2011 - Conference Proceedings* [online]. 2011, č. 1, s. 226–229. Dostupné na: doi:10.1109/CPE.2011.5942236

SIM, Siang Kok, Meng Leong TAY a Ahmad KHAIRYANTO, 2005. Optimisation of a robotic workcell layout using genetic algorithms. *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference - DETC2005* [online]. 2005, roč. 2 B, s. 921–930. Dostupné na: doi:10.1115/detc2005-85518

ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI

Štatistika: kategória publikačnej činnosti od 2022

V2	Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka	7
V3	Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu	1
Súčet		8

V2 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

- V2_01 BOČÁK, Róbert - HOLUBEK, Radovan - TIRIAN, G.O. New approach in assembly, disassembly and maintenance processes I4.0 by displaying in augmented reality environment. In *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2212, iss. 1: International Conference on Applied Sciences (ICAS 2021), Hunedoara, Romania, May 12-14, 2021, online (2022), s. 1-6. ISSN 1742-6588 (2022: 0.183 - SJR). V databáze: DOI: 10.1088/1742-6596/2212/1/012015; SCOPUS: 2-s2.0-85127363136. [Vnútrofakultná kategória: M]. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC
- V2_02 BOČÁK, Róbert - HOLUBEK, Radovan. Methodology of designing robotic workplaces using augmented reality environment. In *International Doctoral Seminar 2022 : 27. - 28. 04. 2022, Smolenice, SR*. 1. vyd. Trnava : AlumniPress, 2022, S. 25-32. ISBN 978-80-8096-292-0. [Vnútrofakultná kategória: M]. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_03 BOČÁK, Róbert - HOLUBEK, Radovan - KUSÁ, Martina. Influence of working height on the energy consumption of an industrial robot. In *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2714, 11th International Conference on Applied Sciences (ICAS 2023), 24.05. - 27.05.2023, Hunedoara, Romania (2024), s. 1-7. ISSN 1742-6588 (2022: 0.183 - SJR). V databáze: DOI: 10.1088/1742-6596/2714/1/012003 ; SCOPUS: 2-s2.0-85186145637. [Vnútrofakultná kategória: M]. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC
- V2_04 HOLUBEK, Radovan - BOČÁK, Róbert - PRAJOVÁ, Vanesa. New approach of designing robotics production systems using immersive virtual reality environment. In *MATEC Web of Conferences [elektronický zdroj]*. Vol. 343, 10th International Conference on

Manufacturing Science and Education – MSE 2021, Sibiu, Romania, June 2-4, 2021 (2021), s. 1-8. ISSN 2261-236X (2021). V databáze: DOI: 10.1051/mateconf/202134308001. [Vnútrofakultná kategória: M*B]. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

- V2_05 HOLUBEK, Radovan - KUSÁ, Martina - BOČÁK, Róbert. The case study of new approach to robot programming and layout design by supporting virtual and augmented reality. In *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2540, International Conference on Applied Sciences (ICAS 2022), 24. - 28. 05.2022, Banja Luka, Bosna and Herzegovina (2023), s. 1-7. ISSN 1742-6588 (2022: 0.183 - SJR). V databáze: DOI: 10.1088/1742-6596/2540/1/012012 ; SCOPUS: 2-s2.0-85173573446. [Vnútrofakultná kategória: M]. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC
- V2_06 KUSÁ, Martina - HOLUBEK, Radovan - BOČÁK, Róbert. Design and analysis of equipment intended for the production of prototypes. In *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2714, 11th International Conference on Applied Sciences (ICAS 2023), 24.05. - 27.05.2023, Hunedoara, Romania (2024), s. 1-9. ISSN 1742-6588 (2022: 0.183 - SJR). V databáze: DOI: 10.1088/1742-6596/2714/1/012014 ; SCOPUS: 2-s2.0-85186137983. [Vnútrofakultná kategória: M]. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC
- V2_07 VOCETKA, Michal - HECZKO, Dominik - BABJAK, Jan - BOBOVSKÝ, Zdenko - KRYŠ, Václav - RUŽAROVSKÝ, Roman - BOČÁK, Róbert. UR10e Robot Drift Compensation for Precision Measurement Applications. In *Advances in Service and Industrial Robotics : 32nd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD 2023)*, 14 -16 June 2023, Bled, Slovenia. 1. vyd. Cham : Springer Nature, 2023, S. 281-288. ISSN 2211-0984. ISBN 978-3-031-32605-9. [Vnútrofakultná kategória: M]. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V3 Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu

- V3_01 BOČÁK, Róbert - HOLUBEK, Radovan. Influential aspects to robotic cell energetic efficiency: overview. In *Vedecké práce MtF STU v Bratislave so sídlom v Trnave. Research papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology in Trnava*. Vol. 30, no. 50 (2022), s. 53-60. ISSN 1336-1589. V databáze: DOI: 10.2478/rput-2022-0007. [Vnútrofakultná kategória: M]. Typ výstupu: článok; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: ADF