



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
MATERIÁLOVOTECHNOLOGICKÁ FAKULTA SO SÍDLOM V TRNAVE

Ing. Dávid Michal

Autoreferát dizertačnej práce

**Výskum energetickej náročnosti
priemyselného robota v koncepte Industry 4.0**

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

v doktorandskom študijnom programe: výrobné zariadenia a systémy

v študijnom odbore: strojárstvo

forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Trnava, dňa 28.5.2020



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

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

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

Oponenti:
.....
.....

.....
.....
.....

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa **o****h.**
na

.....

OBSAH

ÚVOD	4
1 TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ A ANALÝZA SÚČASNÉHO STAVU V OBLASTI ENERGETICKEJ NÁROČNOSTI PRIEMYSELNÉHO ROBOTA V KONCEPTE INDUSTRY 4.0	5
1.1 Priemyselný robot	5
1.2 Programovanie priemyselného robota.....	6
1.3 Plánovanie dráhy priemyselného robota	7
1.4 Koncept Industry 4.0	7
2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	8
3 METODIKA POSÚDENIA ENERGETICKEJ NÁROČNOSTI DRÁHY PRIEMYSELNEHO ROBOTA METÓDOU OFF-LINE PROGRAMOVANIA	9
3.1 Prvá fáza navrhovanej metodiky	9
3.2 Druhá fáza navrhovanej metodiky	10
3.3 Tretia fáza navrhovanej metodiky	11
3.4 Štvrtá fáza navrhovanej metodiky	13
3.5 Piata fáza navrhovanej metodiky	14
3.6 Šiesta fáza navrhovanej metodiky	16
3.7 Sumarizácia navrhovanej metodiky	17
4 EXPERIMENTÁLNE OVERENIE NAVHOVANEJ METODIKY.....	20
4.1 Vyhodnotenie údajov z experimentu.....	22
4.2 Sumarizácia dosiahnutých výsledkov z experimentálneho overenia navrhovanej metodiky	26
4.3 Vyhodnotenie experimentálne časti	27
5 PRÍNOSY	28
5.1 Prínosy dizertačnej práce pre vedu.....	28
5.2 Prínosy dizertačnej práce pre prax	29
5.3 Prínosy dizertačnej práce pre pedagogickú činnosť	30
ZÁVER.....	31
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	33
ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI.....	36

ÚVOD

V súčasnosti predstavujú robotické zariadenia plne rozvinuté technické systémy, ktoré sú implementované do výrobných systémov v rôznych odvetviach priemyslu. Rovnako sa rozširuje ich uplatnenie aj v nevýrobných a nepriemyselných odvetviach. Úlohou robota je vykonávanie úloh, ktoré majú charakter opakovateľnosti, zachovania presnosti, nasadenie v nebezpečných a zdraví škodlivých prostrediach ako zváranie, manipulácia, lakovanie, balenie, kontrola a iné. Inteligentná výroba založená na IoT, inteligentných robotoch, kybernetických systémoch a technológiách veľkých dát prináša ďalšie vrstvy zložitosti. Vzhľadom k tomu, že je neustále kladený dôraz na zvyšovanie efektivity výroby, je nutné hlavné a pomocné procesy vo výrobnom cykle optimalizovať. Jedným z takýchto smerov je aj sledovanie energetickej náročnosti budov, výrobných systémov a zariadení. Optimalizácia trajektórie priemyselného robota sa zameriava na tri optimalizačné kritéria, a to sú minimalizácia času operácie, minimalizácia nežiadúcich dynamických účinkov a minimalizácia spotreby energie. Tieto tri kritéria spolu navzájom súvisia a vzájomne sa ovplyvňujú. Preto je optimalizácia trajektórie založená na kompromise, a teda uprednostnení jedného kritéria, podľa ktorého sa daná trajektória upravuje. Predkladaná dizertačná práca sa zameriava na analýzu problematiky energetickej náročnosti priemyselného robota a návrhom metodiky posúdenia energetickej náročnosti dráhy koncového efektora priemyselného robota metódou off-line programovania. Práca je členená do šiestich hlavných kapitol. V rámci teoretickej časti dizertačnej práce je spracovaná analýza súčasného stavu zameraná na definovanie východísk pre oblasť aplikácie priemyselného robota, plánovanie trajektórie, programovanie priemyselného robota, energetická náročnosť priemyselného robota a problematika ohľadom konceptu Industry 4.0 jeho súvislosti a nadväznosti na priemysel. Druhá časť dizertačnej práce sa zameriava na opis výskumného problému a definovanie cieľov dizertačnej práce. Pokračovaním práce je tretia časť, ktorá je prioritne venovaná návrhu metodiky posúdenia energetickej náročnosti dráhy koncového efektora priemyselného robota. Navrhovaná metodika je znázornená vývojovým diagramom. Ďalšou časťou práce je experimentálna časť. Cieľom tejto časti je overiť navrhovanú metodiku. Experimenty sa zameriavajú na definovanie parametrov a miery vplyvu na celkovú spotrebu energie priemyselného robota. V predposlednej piatej časti je uvedené zhodnotenie dosiahnutých výsledkov a naplnenie definovaných cieľov dizertačnej práce. V poslednej kapitole sú uvedené prínosy, ktoré sú členené z pohľadu prínosov pre vedu, prax a pedagogickú činnosť.

1 TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ A ANALÝZA SÚČASNÉHO STAVU V OBLASTI ENERGETICKEJ NÁROČNOSTI PRIEMYSELNÉHO ROBOTA V KONCEPTE INDUSTRY 4.0

Uvedená kapitola sa zameriava na aspekty vplývajúce na energetickú náročnosť priemyselného robota a bližšie popisuje jednotlivé podkapitoly potrebné pre definovanie problematiky.

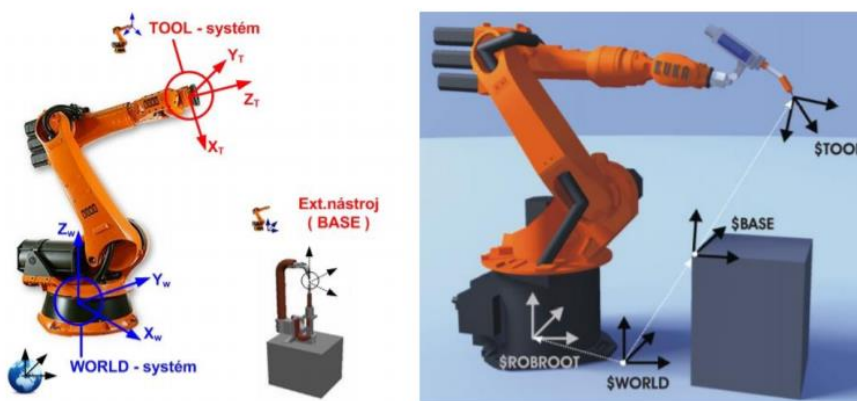
1.1 Priemyselný robot

Priemyselné roboty a manipulátory sa charakterizujú rýchlym a spoľahlivým výkonom práce, zvýšením efektivity a produktivity práce, zabezpečením presnosti, kvality a opakovateľnosti. Svojím vyhotovením sa radia ako náhrada menej efektívnej ľudskej práce a slúžia na uľahčenie ťažkej práce. Základnou časťou robotického manipulátora je nepohyblivá základňa, ktorá môže byť upevnená na statickom podstavci, pojazde alebo mobilnej platforme. Ďalej je to rameno, zápästie a akčný člen. Pod pojmom akčný člen je možné si predstaviť chápadlo (gripper) alebo iný nástroj upnutý v zápästí. Hlavný rozdiel je, že priemyselný robot je predstaviteľ pružnej programovateľnosti a manipulátor vykonáva pevne naprogramovaný technologický cyklus (Velíšek a kol. 2006, Božek a kol. 2011). Priemyselné robotické rameno je zariadenie, ktoré je koncepčne zhotovené od základne až po končiace zápästie s akýmkoľvek efektorom, ktorý je potrebný pre vykonanie zvolenej úlohy. Jednotlivé časti robotického ramena sú spojené s tzv. kĺbmi, ktoré umožňujú vykonať pohyb podobným spôsobom ako ľudská ruka s určitým počtom kĺbov. Pohyb robotického ramena s koncovým efektorom má za úlohu vykonávať procesy ako zdvíhanie, odkladanie, odoberanie predmetov či zváranie alebo odoberanie materiálu v závislosti na predvolenom procese. Čo prichádza po zápästí robota a čo sa pridá okolo robota sa líši v závislosti od predurčenej aplikácie a prostredia, kde je nasadený. Bez ohľadu na aplikáciu, priemyselný robot bude vždy musieť byť vybavený ďalšími komponentmi, aby mohol správne fungovať. Pojmom priemyselný robot označujeme komplexný technický systém zložený zo subsystémov ako je znázornené na obrázku 1 (Subsystémy robota). Tieto subsystémy sú vo vzájomnej interakcii. Komponenty môžu zahŕňať nástroje na konci ramena ako sú chápadlá, zváracie či obrábacie hlavice a prídavné prvky ako sú senzory sily krútiaceho momentu, bezpečnostné senzory či systémy strojového videnia (Velíšek a kol. 2006, Alshidiq A. 2019). Priemyselný robot je charakterizovaný skupinou údajov, ktoré určujú rozsah jeho použitia. Medzi hlavné údaje patrí geometrická charakteristika, ktorá predstavuje súbor parametrov určujúcich geometrické vlastnosti ako sú pracovný a prevádzkový priestor a opakovaná presnosť polohovania. Ďalej medzi hlavné údaje patrí

statická, kinematická a dynamická charakteristika. Výkonové a prevádzkové charakteristiky predstavujú súbor parametrov určujúcich výkon, energetickú náročnosť, rozloženie energetického výkonu v jednotlivých kĺboch, nosnosť špecifikovanú v konkrétnych prevádzkových podmienkach, celkovú hmotnosť konštrukcie, celkový výkon, prevádzkový a maximálny prevádzkový príkon, spotrebu energie za jednotku času (1 hod.) pri referenčnom pracovnom cykle. Okrem spomínaných charakteristík sa sem radia aj charakteristiky spoľahlivosti, riadenia, konštrukcie a cena. Väčšina týchto údajov býva súčasťou technickej dokumentácie (Skařupa 2007).

1.2 Programovanie priemyselného robota

Programovanie priemyselných robotov je proces tvorby a testovania príkazov. Efektivita procesu, do ktorého je programovaný robot závisí od kvality príkazov. Jedným z problémov s využitím robota v procese je práve závislosť na vedomostiach a schopnostiach programátora, plánovača resp. projektanta. Programovanie robotov je možné vykonať tromi základnými spôsobmi, a to spôsobom „play-back“, spôsobom „teach-in“ a spôsobom „off-line“.



Obr. 1 Súradnicový systém pre navádzanie robota

Off-line programovanie robota je metóda, pri ktorej sa nepracuje priamo na pracovisku, ale vo virtuálnom 3D priestore s využitím počítačovej simulácie. Vstupné dáta v tom prípade sú 3D modely robota, efektora a všetky súčasti pracoviska. Je nevyhnutné zabezpečiť rozmerovú a polohovú totožnosť virtuálnych modelov s reálnymi komponentmi. Samotné programovanie je v princípe rovnaké ako pri online metóde. Výsledkom je animácia robota podľa zadaných príkazov. Vďaka simulácii môže programátor otestovať funkčnosť programu, pohyby kĺbov a iných častí robota pred jeho aplikáciou do reálneho pracoviska. Simulácia obdobného charakteru sa využíva aj pri zmene a úprave pôvodného reálneho pracoviska, či už

z pohľadu zmeny rozmiestnenia pracoviska, či zmeny priemyselného robota, kde je nutné overiť jeho dosah, prípadne kolízne stavy.

1.3 Plánovanie dráhy priemyselného robota

Možnosti plánovania dráhy priemyselného robota sú rôzne. Výsledok optimalizácie dráhy závisí od kritérií ako sú dĺžka a tvar dráhy, počet prekážok, cesta obídenia prekážky, čas operácie, celková spotreba energie a iné. Reakciou na množstvo rôznych kritérií je počet možných riešení optimalizácie trajektórie. Sú to genetické algoritmy na báze analýzy a dynamického plánovania (Zha 2002, Toyoda 2004, Wang 2012). Ďalej sú to stratégie na optimalizáciu v 3D priestore, ktorých zložitost' je vhodná pre off-line programovanie. Tieto stratégie sa zameriavajú na minimalizáciu časového intervalu, minimalizáciu spotrebovanej energie a iné (Valero 2006, Ata 2007, Saravanan 2009). Časť autorov uvádza spôsob riešenia založený na neurónových sietiach pomocou učenia a iné spôsoby, ako napr. pomocou rozšírenej reality (Vaz 2004, Koleda 2012, Fang 2012).

1.4 Koncept Industry 4.0

Koncept Industry 4.0 pochádza z Nemecka, kde vznikol ako reakcia na výsledky analýzy dôsledkov zavádzania nových technológií. Samotný koncept Industry 4.0 pojednáva o kombinácii viacerých významných inovácií v oblasti digitálnej technológie a ovplyvnenie energetických, výrobných a iných druhov odvetví priemyslu. Je potrebné, aby podniky popri myšlienke neustále rastúcej produkcie sa zameriavali na inovácie a technológie smerujúce k zníženiu produkcie emisií, materiállovej záťaže a spotrebe energie. Znižovanie emisnej, materiállovej a energetickej náročnosti patrí medzi ciele stratégie konceptu Industry 4.0. Jedným z dôvodov cieľa orientovaného na energetiku je fakt, že Európa nedokáže konkurovať v cenách energií Spojeným štátom americkým, ale vedela by konkurovať v efektívite využitia týchto zdrojov. Prvým krok pre optimalizovanie energie je monitorovanie tejto veličiny a veličín, ktoré ju ovplyvňujú. Zber informácií je úlohou IoT. Tieto monitorovacie riešenia budú mať rôzne formy, vrátane systémov správy budov používaných v komerčných budovách, riešení pre správu infraštruktúry dátových centier a priemyselných riešení na monitorovanie všetkého od ťažobných operácií až po technické zariadenia a výrobné závody.

2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Predkladaná dizertačná práca sa zaoberá energetickou náročnosťou priemyselného robota. Problematika ohľadom energetickej účinnosti zariadení a energetickej efektivity využívania zdrojov v podnikoch je jedným z cieľov konceptu Industry 4.0. Tento koncept reprezentuje myšlienky a spôsoby dosiahnutia vyššej efektivity za pomoci využitia prvkov konceptu Industry 4.0 a spôsob riadenia a prístupu k zvyšovaniu efektivity a dlhodobej udržateľnosti zdravej ekonomiky podniku. Na oblasť energetickej náročnosti sa je možné pozeráť z viacerých strán. Jedným z prístupov je sa zamerať na optimalizačné postupy a návrhy, ktorých úlohou je zvýšiť efektivitu produkcie a znížiť nákladovosť výroby v podnikoch. Cestou ako znížiť nákladovosť výroby je spoznať vstupné veličiny, ktoré vplývajú na energetickú náročnosť.

Hlavným cieľom dizertačnej práce je navrhnúť metodiku posúdenia energetickej náročnosti dráhy koncového efektora priemyselného robota využitím metódy off-line programovania priemyselných robotov na základe korelácie parametrov ovplyvňujúcich energetickú náročnosť priemyselného robota.

Hlavný cieľ dizertačnej práce je možné rozdeliť na čiastkové ciele, sú to:

1. Navrhnúť experiment zameraný na definovanie korelácie parametrov ovplyvňujúcich energetickú náročnosť dráhy priemyselného robota.
2. Stanoviť mieru vplyvu pohybového rozsahu kĺbov a smeru pohybu na energetickú náročnosť angulárneho priemyselného robota ABB IRB 120.
3. Stanoviť mieru vplyvu rýchlosti pohybu na energetickú náročnosť angulárneho priemyselného robota ABB IRB 120.
4. Stanoviť mieru vplyvu hmotnosti koncového efektora na energetickú náročnosť angulárneho priemyselného robota ABB IRB 120.
5. Experimentálne overiť vytvorenú metodiku v laboratórnych podmienkach.

3 METODIKA POSÚDENIA ENERGETICKEJ NÁROČNOSTI DRÁHY PRIEMYSELNEHO ROBOTA METÓDOU OFF-LINE PROGRAMOVANIA

Navrhovaná metodika pozostáva zo šiestich častí. Jednotlivé časti obsahujú postupnosť krokov, ktoré sú bližšie opísané v nasledujúcich kapitolách. Pre plánovanie dráhy metódou off-line programovania bol použitý softvér Robot Studio. Samotné plánovanie dráhy robota začína zberom potrebných údajov. V nasledujúcich podkapitolách sú rozpracované jednotlivé fázy navrhovanej metodiky, ktorých cieľom je zhodnotenie energetickej náročnosti plánovanej dráhy priemyselného robota IRB 120.

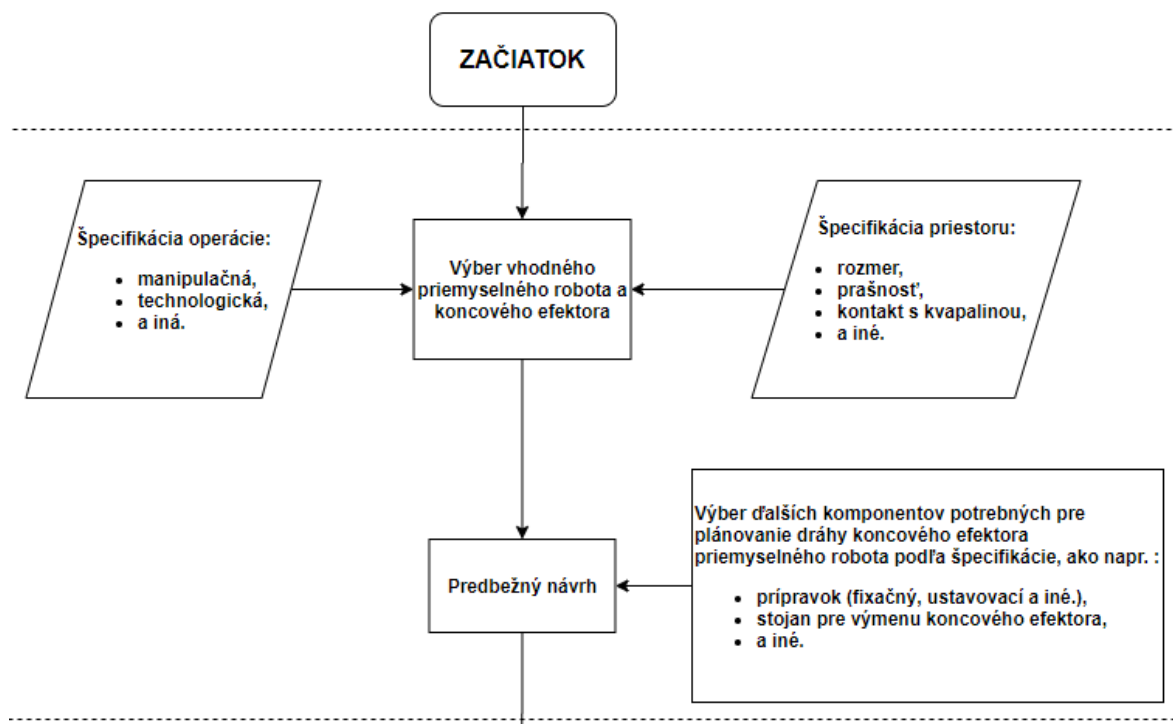
3.1 Prvá fáza navrhovanej metodiky

Cieľom tejto fázy je zhromaždenie potrebných informácií pre návrh dráhy koncového efektora priemyselného robota, ktorý je reprezentovaný TCP. TCP (Tool Center Point) určuje presný pracovný bod nástroja.

Ako prvý krok je poznať operáciu, ktorú bude priemyselný robot vykonávať. V tejto časti je potrebné si určiť parametre, na základe ktorých bude zvolený vhodný priemyselný robot. Sú to informácie o manipulačnej hmotnosti a požadovanej opakovanej presnosti priemyselného robota.

Druhým krokom je vykonať analýzu priestoru, v ktorom bude priemyselný robot nasadený. V tomto bode je nutné definovať požiadavky na prašnosť alebo možný kontakt s kvapalinou. Na základe týchto požiadaviek sa určí stupeň IP ochrany zariadenia. Súčasťou druhého kroku je aj definovanie rozmerov, resp. konštrukčný návrh priemyselného robota. Určenie dosahu robotického ramena je jeden z rozhodujúcich parametrov pri výbere priemyselného robota. Zároveň je potrebné zvážiť umiestnenie priemyselného robota, a to či bude na vyvýšenom statickom podstavci, pohyblivom pojazde alebo pripevnený o stropnú konštrukciu. Po zadefinovaní a zvážení všetkých vstupných informácií do procesu rozhodovania, je možné pristúpiť k výberu vhodného priemyselného robota.

Okrem správneho výberu priemyselného robota je nutné prihliadať aj na ostatné potrebné komponenty, a to hlavne na koncový efektor, čo môže predstavovať manipulačnú alebo technologickú hlavicu podľa zvolenej aplikácie priemyselného robota. Uvedená analytická fáza je znázornená na obrázku 7.



Obr. 7 Algoritmus prvej fázy navrhovanej metodiky

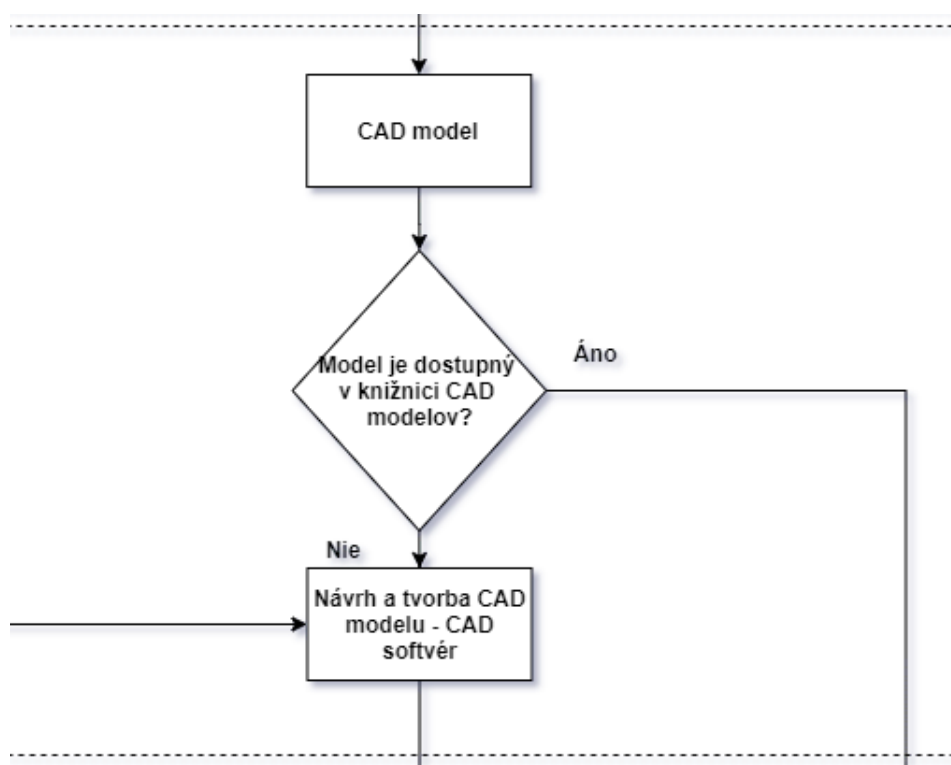
3.2 Druhá fáza navrhovanej metodiky

Druhá fáza navrhovanej metodiky je zameraná na zabezpečenie digitálneho modelu požadovaných komponentov. Možno ju nazvať ako fáza digitalizácie. Táto fáza je dôležitá z pohľadu získania presných dát na výstupe, čo predstavuje vyhotovenie riadiaceho programu s čo najmenšími odchýlkami od reálneho stavu. Túto fázu je možné nazvať aj ako prípravnú fázu z pohľadu plánovania dráhy, keďže sa nejedná o primárny proces plánovania dráhy. Prípravná fáza navrhovanej metodiky predstavuje vytvorenie konceptuálneho modelu súčasného alebo budúceho stavu reálneho modelu. Táto fáza je založená na návrhu a tvorbe digitálnych modelov potrebných pre dispozičný návrh pracoviska a jeho overenie simuláciou.

Prvý krok predstavuje získanie CAD modelov v požadovanom formáte. Tieto CAD dáta je možné zabezpečiť dvoma spôsobmi. Prvý spôsob je založený na využití CAD knižníc, kde sú dostupné modely v požadovanom formáte. Ich rozmerová charakteristika je totožná s reálnymi zariadeniami od výrobcu. Spravovanie týchto knižníc a zodpovednosť za správnosť CAD modelov zabezpečuje výrobca daných zariadení. Druhým spôsobom je možnosť si tieto zariadenia navrhnuť pomocou CAD softvérov. Správnosť a presnosť navrhnutých modelov závisí na skúsenostiach konštruktéra. Následne je navrhnutý model vygenerovaný v požadovanom formáte.

Pre návrh plánovanej dráhy je potrebné zabezpečiť priemyselného robota v požadovanom formáte. Pre tento účel je použitý priemyselný robot IRB 120, ktorý je dostupný z knižnice. Takto získaný digitálny model robota má správne rozmery a kinematickú štruktúru. Na základe digitálneho modelu je v ďalšej fáze vytvorený simulačný model reálneho stavu, ktorý je následne overený z pohľadu funkčnosti a kolíznych stavov.

V prípade potreby je možné takto zabezpečiť aj ostatné komponenty a časti robotizovaného pracoviska, ktoré sú nevyhnutné pre plánovanie dráhy priemyselného robota. Môžu to byť komponenty ako koncový efektor (technologický alebo manipulačný), fixačné prípravky, prípravky pre výmenu nástroja a iné časti pracoviska, na ktoré má priemyselný robot dosah na základe dĺžky svojho ramena a môžu ovplyvňovať plánovanú dráhu (obr.8).



Obr. 8 Algoritmus druhej fázy navrhovanej metodiky

3.3 Tretia fáza navrhovanej metodiky

Tretia fáza predstavuje procesy na zabezpečenie tvorby simulácie plánovanej dráhy priemyselného robota. Túto fázu je možné nazvať aj ako projektová fáza.

Prvý krok je zabezpečiť import potrebných komponentov. Návrh a tvorba modelov bol cieľom predchádzajúcej kapitoly. Cieľom tohto kroku je bezproblémové vloženie digitálnych

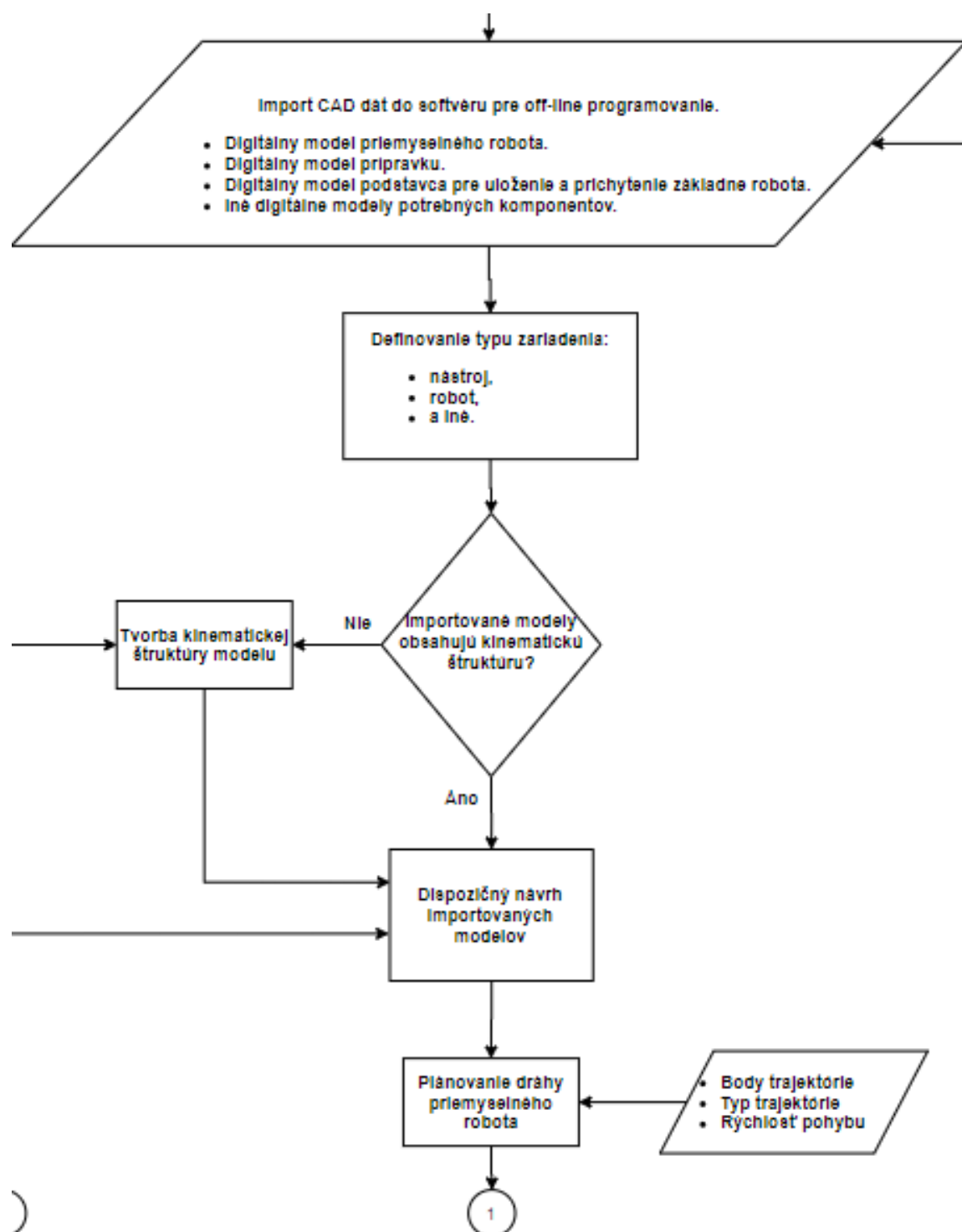
modelov v požadovanom formáte do prostredia softvéru pre plánovanie dráhy a tvorbu simulácie. V našom prípade sa jedná o importovanie digitálneho modelu IRB 120 z knižnice, ktorá je dostupná od výrobcu ABB. Cieľom knižnice je zabezpečiť dostupnosť presných modelov produktov od výrobcu v požadovanom formáte. V prípade ak je do simulačného priestoru vložený iný CAD model, ktorý bol navrhnutý konštruktérom a je mimo spomínanej knižnice, tak je potrebné vytvoriť kinematickú štruktúru, ktorá definuje pohybové vlastnosti daného modelu. V prípade, ak sa jedná o statický model bez pohybových častí, je možné pristúpiť k ďalšiemu kroku. Modely, ktoré boli importované nie z knižnice, a teda nemajú známe vlastnosti, je potrebné zdefinovať. Definíciou sa myslí o aké zariadenie či prípravok, alebo nástroj sa jedná. Na základe tejto definície sú modelu priradené vlastnosti.

Po importovaní jednotlivých modelov potrebných pri návrhu plánovanej dráhy, je možné pristúpiť k druhému kroku, ktorého cieľom je realizovať dispozičný návrh. Pomocou ovládacích prvkov softvéru je možné jednotlivé modely komponentov a zariadení rozložiť v priestore podľa potreby.

Následne sa pristúpi k tretiemu kroku, ktorého cieľom je návrh dráhy priemyselného robota. Plánovanú dráhu si je možné predstaviť ako súbor bodov, spojením ktorých dostaneme dráhu, po ktorej prejde koncový efektor robotického ramena. Jednotlivé body dráhy sú vytvorené a umiestnené do priestoru v požadovanom poradí.

Štvrtým krokom je nastavenie potrebných parametrov. Sú to parametre, ktoré ovplyvňujú celkový čas plánovanej dráhy, resp. proces. Sú to napr. rýchlosť pohybu medzi bodmi, rýchlosť prechodu daným bodom, spôsob prechodu danými bodmi, čas zotrvania v danom bode a iné. Toto je úlohou plánovača dráhy, ktorý sa rozhoduje na základe vedomostí z analytickej fázy a skúseností.

Po vykonaní týchto krokov sa prechádza k samotnému overovaniu funkčnosti plánovanej dráhy koncového efektora priemyselného robota (obr.9).



Obr. 9 Algoritmus tretej fázy navrhovanej metodiky

3.4 Štvrtá fáza navrhovanej metodiky

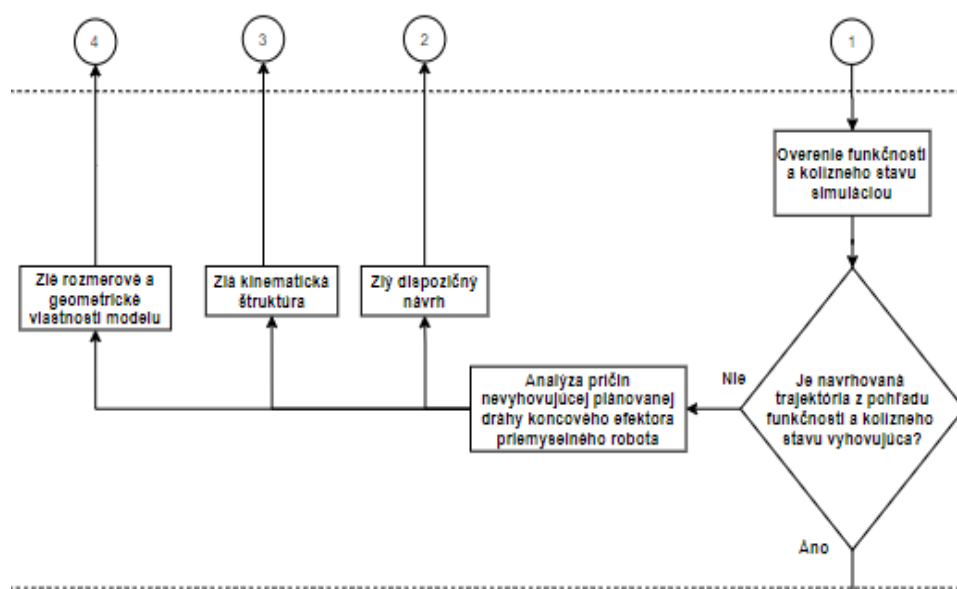
Táto časť sa zameriava na samotné overenie navrhutej trajektórie priemyselného robota. Overenie prebieha formou simulácie. Plánovaná dráha sa overí z pohľadu funkčnosti a kolíznych stavov. V tejto etape dochádza ku zmenám a opravám plánovanej dráhy, a to

prevažne z dôvodu vzniku kolíznych situácií. V prípade, ak taká vznikne, je potrebné navrhovanú trajektóriu upraviť, zároveň upraviť parametre ak si to situácia žiada a opätovne formou simulácie overiť jej funkčnosť a kolízne stavy.

Teda prvým krokom danej fázy je spustenie simulácie, ktorá preukáže funkčnosť plánovanej dráhy. Zároveň sa overí vznik kolízií. V prípade, ak je dráha nevyhovujúca, pristupuje sa k druhému kroku danej fázy.

Druhým krokom je korekcia plánovanej dráhy, ktorej cieľom je úprava jednotlivých bodov v prípade kolízií a úprava parametrov (obr. 10).

Nasledujúcim krokom by bolo generovanie programu pre riadenie robota, avšak v tomto prípade bola dráha navrhnutá na základe skúseností plánovača dráhy priemyselného robota. Cieľom navrhovanej metodiky je, aby plánovaná dráha bola zhodnotená aj z pohľadu energetickej náročnosti, a preto bolo pridaná ďalšia fáza.



Obr. 10 Algoritmus štvrtej fázy navrhovanej metodiky

3.5 Piata fáza navrhovanej metodiky

Piata fáza predstavuje zavedenie prvkov kontroly a zhodnotenia energetickej náročnosti dráhy opísanej koncovým efektorm priemyselného robota, a teda je ju možné nazvať ako implementačná fáza. Po overení funkčnosti plánovanej dráhy a kolíznych stavov, simuláciou nebude vygenerovaný riadiaci program pre priemyselného robota, ale bude vyhodnotenie energetickej náročnosti plánovanej dráhy.

Prvý krok piatej fázy je zmeranie a vyhodnotenie energetickej náročnosti dráhy. Sledované parametre sú:

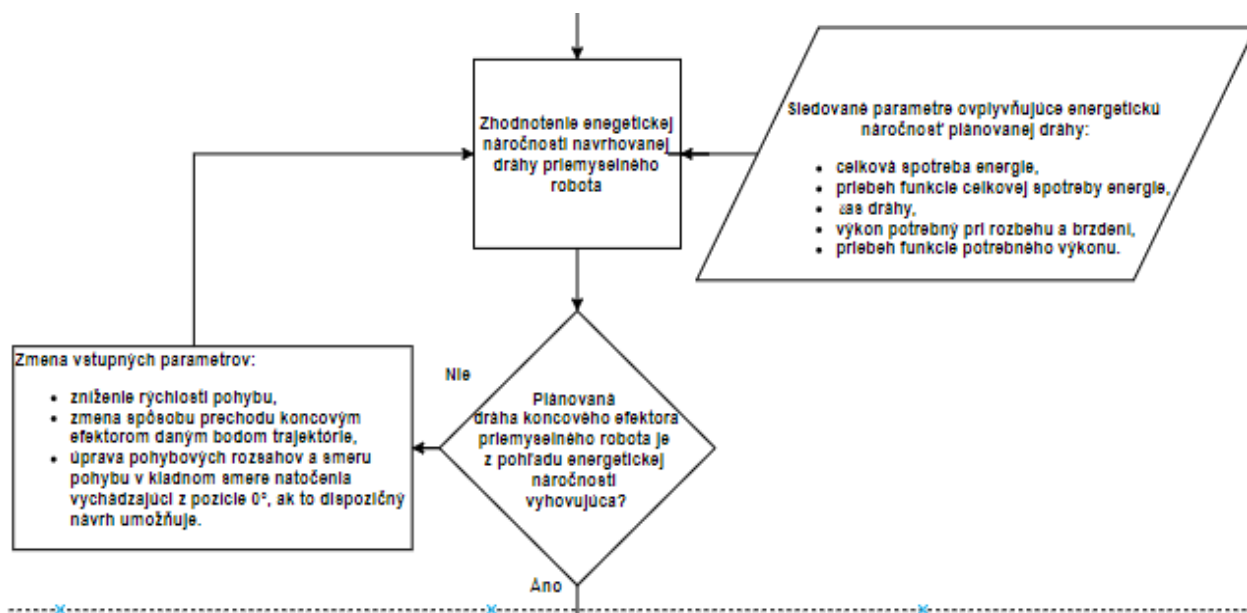
- celková spotreba energie,
- priebeh funkcie celkovej spotreby energie,
- čas dráhy,
- výkon potrebný pri rozbehu a brzdení,
- priebeh funkcie potrebného výkonu.

Na základe týchto parametrov je možné zhodnotiť energetickú náročnosť plánovanej dráhy.

Druhým krokom je minimalizovanie výkyvov potrebných pri rozbehu z bodu trajektórie a brzdením pri príchode do cieľového bodu trajektórie. Toto je možné dosiahnuť úpravou parametrov, ktorými sú:

- rýchlosť,
- spôsob prechodu bodmi plánovanej trajektórie tzv. zóny,
- využitím pohybových rozsahov kĺbov robotického ramena, ktoré reprezentujú kladný smer natočenia kĺbov a vychádzajú z pozície 0°.

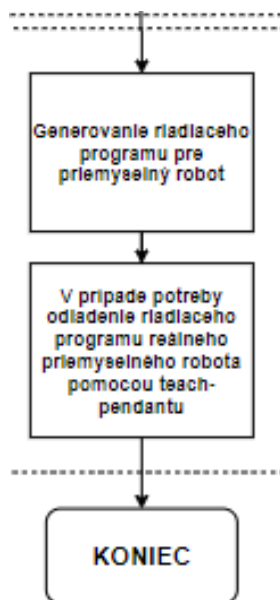
Po korekcii dráhy sa následne zopakuje simulácia a vyhodnotí sa energetická náročnosť plánovanej dráhy. V prípade potreby sa tento proces opakuje, kým sa nepodarí nájsť nastavenie jednotlivých faktorov, ktorých vplyv na energetickú náročnosť plánovanej dráhy bude pozitívny (obr. 11).



Obr. 11 Algoritmus piatej fázy navrhovanej metodiky

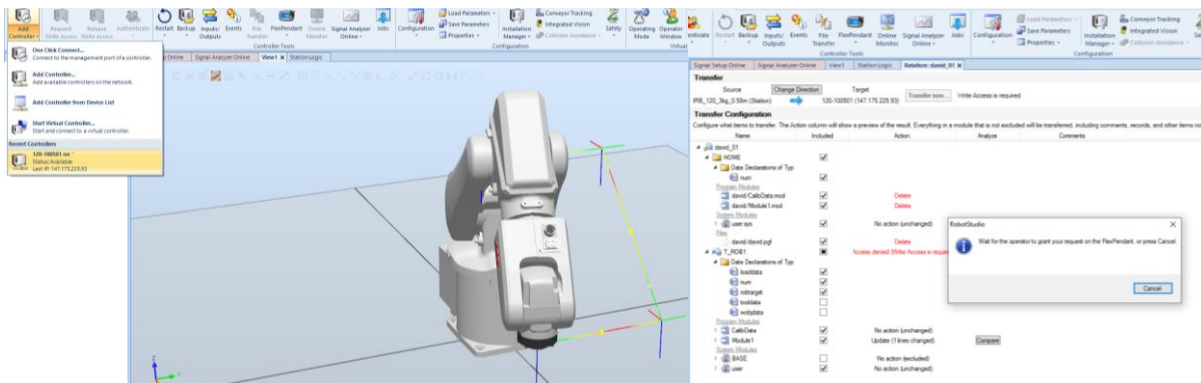
3.6 Šiesta fáza navrhovanej metodiky

Šiesta fáza sa zameriava na generovanie riadiaceho programu vytvoreného metódou off-line programovania priemyselných robotov softvérom Robot Studio. Cieľom tejto fázy je vygenerovaný riadiaci program importovať do reálneho priemyselného robota IRB 120 (obr. 12).



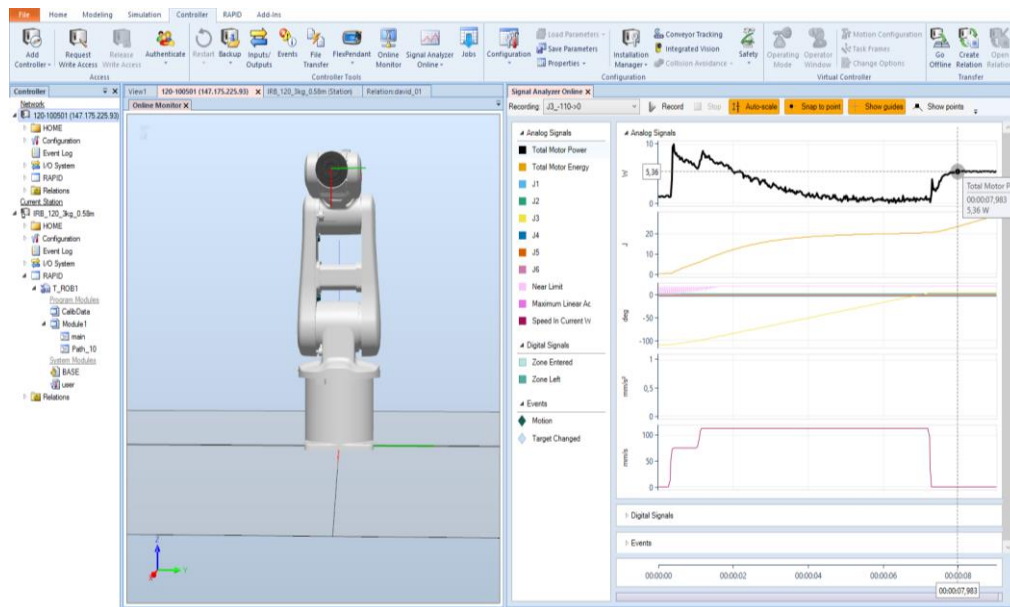
Obr. 12 Algoritmus analytickej fázy navrhovanej metodiky

Prvým krokom je prepojenie softvéru Robot Studio z virtuálneho kontrolera do reálneho, a to z dôvodu prenosu spracovaných dát vo forme riadiaceho programu. Pomocou softvéru Robot Studio je zažiadané o prepojenie (obr. 13). To je potrebné potvrdiť teach-pendantom reálneho robota. Následne je vytvorené prepojenie pomocou IP adresy.



Obr. 13 Spojenie s reálnym robotom

Súčasťou poslednej fázy je aj overenie úpravy parametrov pre zníženie energetickej náročnosti dráhy koncového efektora priemyselného robota. Toto meranie prebieha pomocou modulu Controller, ktoré je prístupné po vytvorení bezpečného prepojenia kontrolérov. Následne pomocou nastavenia signálov sa zvolia sledované parametre. Po spustení riadiaceho programu a uvedení reálneho robota do prevádzky sa v monitore zobrazia vybrané sledované parametre v reálnom čase (obr. 14). Zároveň pomocou teach-pendantu je možné doladiť riadiaci program priemyselného robota.

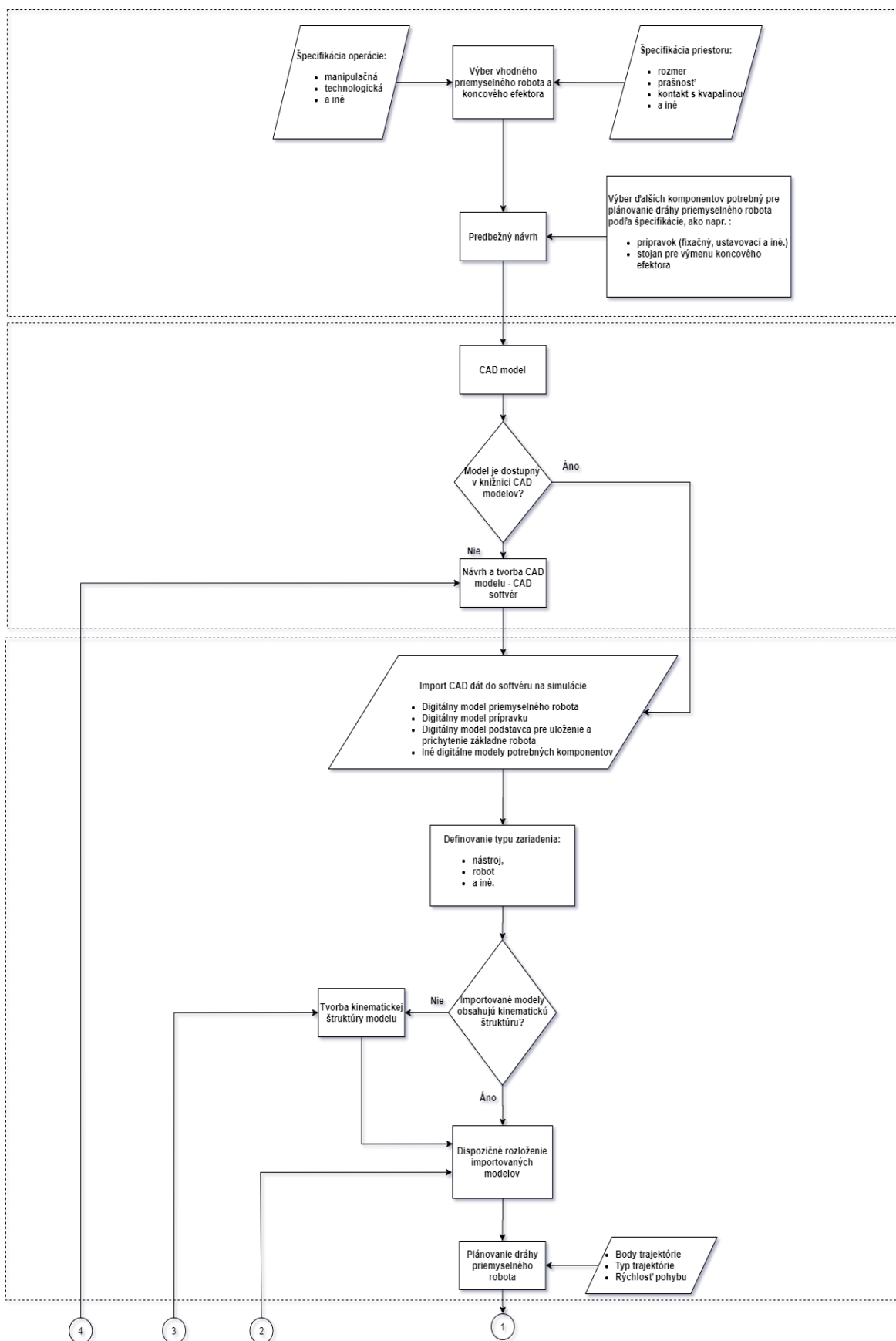


Obr. 14 Záznam z merania po uvedení priemyselného robota do prevádzky

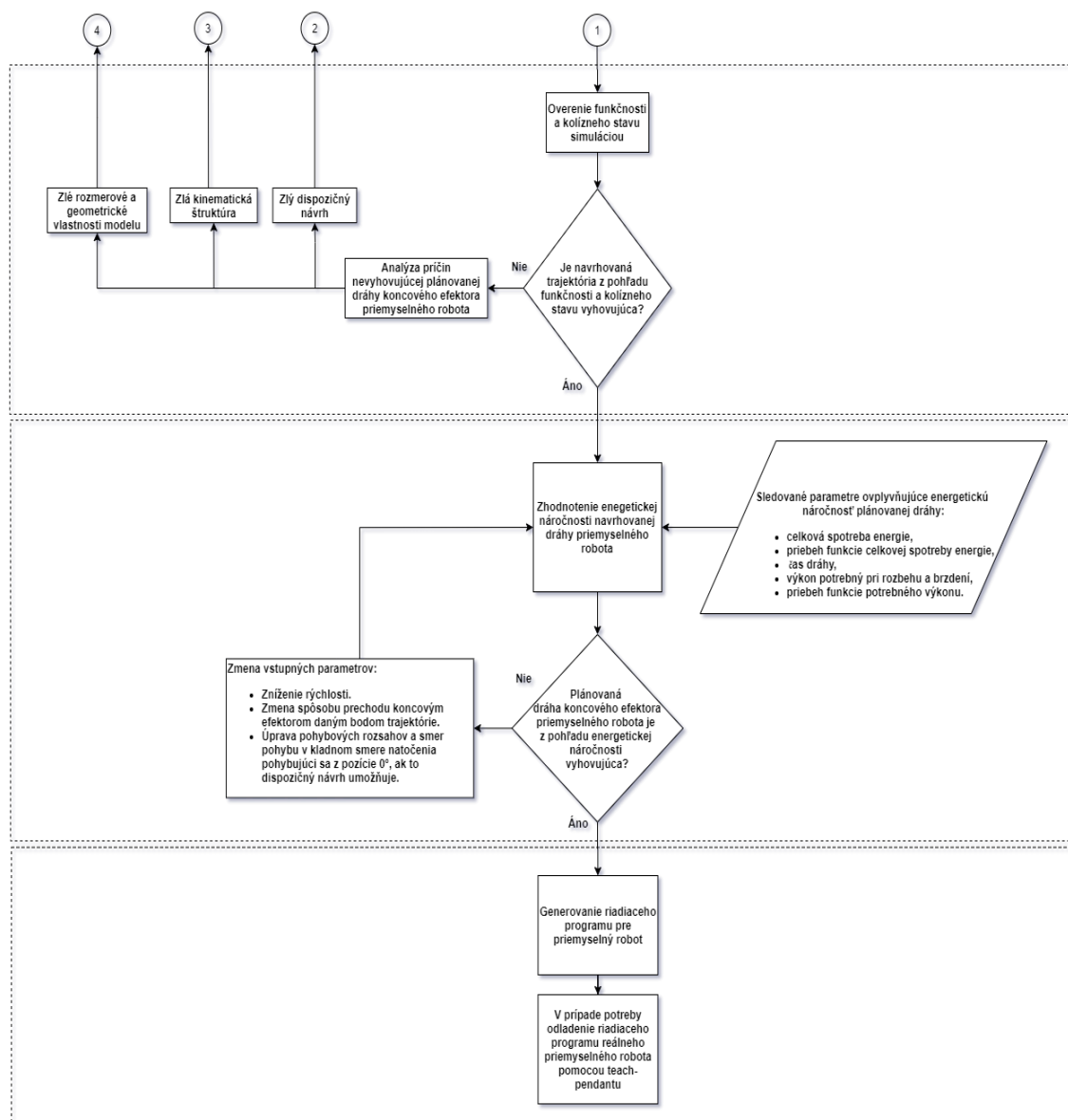
3.7 Sumarizácia navrhovanej metodiky

Navrhovaná metodika posúdenia energetickej náročnosti dráhy priemyselného robota metódou off-line programovania sa zameriava na spôsob zhodnotenia energetickej náročnosti, a teda jej primárnym cieľom nie je nájsť optimálnu dráhu z pohľadu energetickej alebo inej optimalizačného kritéria. Cieľom navrhovanej metodiky je posúdiť a vyhodnotiť energetickú náročnosť plánovanej dráhy metódou off-line programovania priemyselných robotov.

Na základe postupnosti krokov navrhovanej metodiky je možné dospieť k úprave energetickej náročnosti plánovanej dráhy v projekčnej etape návrhu robotizovaného pracoviska alebo pri plánovaní dráhy už existujúceho pracoviska. Jednotlivé kroky navrhovanej metodike sa snažia opísať plánovanie dráhy a generovanie výsledného riadiaceho programu metódou off-line programovania priemyselných robotov využitím softvéru Robot Studio.



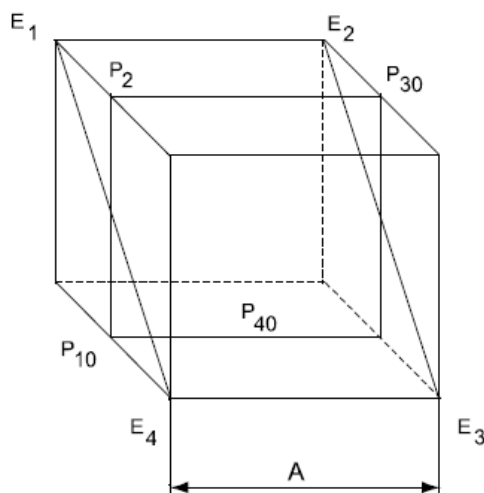
Obr. 15 Vývojový diagram navrhovanej metodiky – časť A



Obr. 16 Vývojový diagram navrhovanej metodiky – časť B

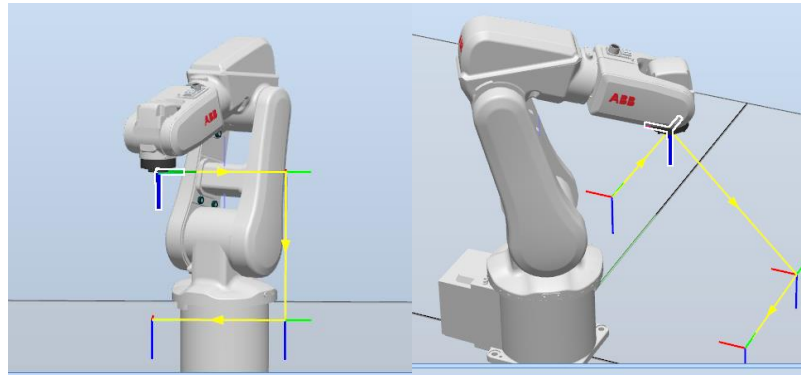
4 EXPERIMENTÁLNE OVERENIE NAVHOVANEJ METODIKY

Ako prvý krok je potrebné zabezpečiť digitálny model robotizovaného pracoviska, ktorý je totožný s reálnym robotizovaným pracoviskom. Pre tento účel je možné použiť ľubovoľný CAD softvér. V tomto prípade bol použitý CAD softvér CATIA, v ktorom je digitálny model navrhnutý. Digitálny model musí byť rozmerovo totožný s reálnym stavom. Následne sú všetky komponenty a časti robotizovaného pracoviska v požadovanom formáte importované do softvéru pre plánovanie dráhy, tvorby simulácie a riadiaceho programu priemyselného robota. Po importovaní jednotlivých častí do softvéru je nevyhnutné tieto časti umiestniť podľa dispozičného rozloženia pracoviska ako je v reálnom stave, vzhľadom na generovanie riadiaceho programu pre pohyb priemyselného robota IRB 120, ktorý je použitý v robotizovanom pracovisku. V rámci realizácie experimentu bola vytvorená dráha, ktorú prejde priemyselný robot IRB 120 koncovým efektorom pomocou metódy off-line programovania priemyselných robotov softvérom Robot Studio. Trajektória, ktorá je opísaná koncovým efektorom priemyselného robota je vyobrazená na obrázku 10. Ide o zobrazenie dráhy formou ISO kocky podľa normy ISO 9283. Spomínaná norma hovorí o pracovných charakteristikách a zodpovedajúcich skúšobných metódach pre manipulačné priemyselné roboty (ISO 9283:1998).



Obr. 40 ISO Cube pre IRB 120 (ABB b) 2019)

Robot musí koncovým efektorom opísať dráhu určenú bodmi v stanovenom poradí E1-E2-E3-E4. Dĺžka strany kocky je stanovená výrobcom vzhľadom na dĺžku ramena, resp. dosažiteľnosť robotického ramena. Dĺžka strany kocky je 250mm a označená písmeno A (ABB b) 2019).



Obr. 41 Trajektória podľa ISO kocky s dĺžkou strany 250mm

Experimentálne overenie navrhovanej metodiky spočíva v sledovaní a vyhodnotení energetickej náročnosti dráhy opísanej koncovým efektorom priemyselného robota pomocou metódy off-line programovania. Hodnoty boli merané pri nasledujúcich stavoch uvedených v tabuľke. Počas merania bola pre všetky navrhované stavy použitá rovnaká záťaž koncového efektora a to 3kg, čo predstavuje maximálne zaťaženie udané výrobcom.

Tab. 27 Použité parametre pri meraní

Úroveň Faktor	1	2	3
Zóna	0	100	200
TCP rýchlosť [mm/s]	50	500	5000

Tab. 28 Namerané hodnoty

P.č.	Zone	TCP rýchlosť [mm/s]	Zaťaženie [kg]	Celková spotreba Energie [J]	Spotrebovaný výkon [W]		Čas [s]	Vypočítaný výkon [W] za čas 1 [s] (Práca[J] / čas [s])
					Max (Rozbeh)	Min (Brzdenie)		
1	0	v50	3	498,2	35,8	12,18	24,07	20,70
2	0	v500	3	227,9	239,32	-16,8	2,69	84,72
3	0	v5000	3	274,7	578,78	-164,28	1,56	176,09
4	100	v50	3	455,1	28,65	14,49	22,32	20,39
5	100	v500	3	200,2	191,54	4,88	2,38	84,12
6	100	v5000	3	232,5	561,37	-120,09	1,27	183,07
7	200	v50	3	443,3	28,17	14,48	21,62	20,50
8	200	v500	3	196,8	178,18	5,28	2,35	83,74
9	200	v5000	3	225,9	555,04	-109,56	1,2	188,25

Tab. 29 Hodnoty výkon [W] z jednotlivých prechodov medzi bodmi trajektórie

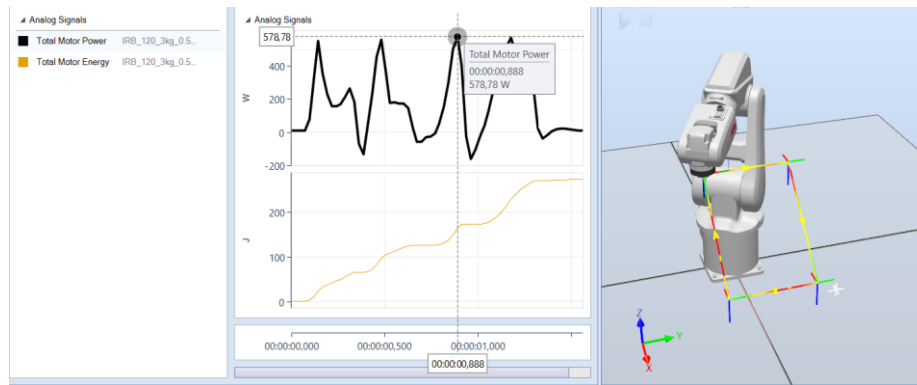
P.č.	Zóna	TCP rýchlosť [mm/s]	Zaťaženie [kg]	Výkon [W]		Výkon [W]		Výkon [W]		Výkon [W]	
				E1 do E2		E2 do E3		E3 do E4		E4 do E1	
				Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
1	0	v50	3	27,78	12,18	26,59	19,34	26,5	25,96	35,8	19,42
2	0	v500	3	197,47	-16,8	119,88	-18,37	128	5,49	239,32	10,01
3	0	v5000	3	555,04	-135,81	559,9	-57,88	579	-164,28	574,53	-37,87
4	100	v50	3	16,99	14,49	22,37	15,69	25	17,87	28,65	19,43
5	100	v500	3	191,54	86,95	113,57	59,21	69	46,71	165,54	4,88
6	100	v5000	3	502,92	152,74	341,28	-55,84	387	-79,51	561,37	-120,09
7	200	v50	3	16,48	14,48	21,62	16,58	25	18,08	28,17	19,44
8	200	v500	3	178,18	86,47	111,82	60	69,4	44,99	156,61	5,82
9	200	v5000	3	555,04	157,2	350,49	-33,36	331	8,81	539,05	-109,56

Hodnota označená ako „Výkon Max“ reprezentuje hodnotu potrebného výkonu pre dôjsenie koncového efektora do bodu trajektórie. Hodnota označená ako „Výkon Min“ reprezentuje hodnotu, na ktorú výkon klesne pri príchode do bodu trajektórie vplyvom brzdenia.

4.1 Vyhodnotenie údajov z experimentu

Zmenou TCP rýchlosti a parametra spôsobu prechodu bodom trajektórie sa podarilo upraviť plánovanú trajektóriu tak, aby jej celková spotreba energie bola nižšia a dráha bola zachovaná v rovnakom tvare.

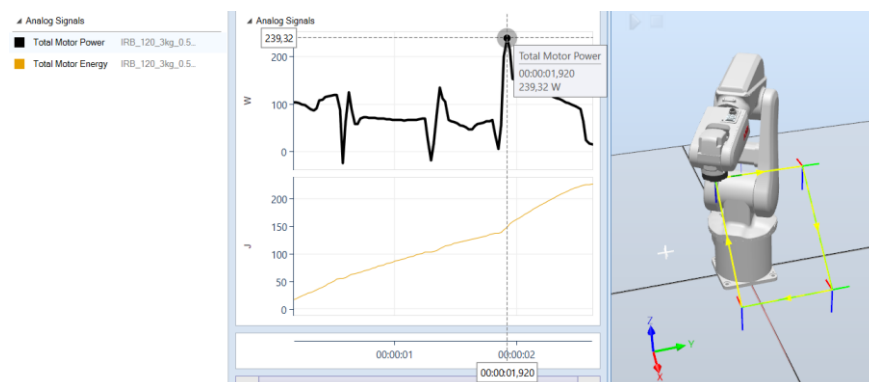
Prvotne bola dráha nastavená na takmer najvyššiu prípustnú TCP rýchlosť v5000, čo umožňovalo prejsť dráhu za najkratší čas. V tomto prípade nebola trajektória zhodnotená z pohľadu energetickej náročnosti. Namerané hodnoty tejto dráhy sú zobrazené v tabuľke 28 a 29. V tabuľkách je možné vidieť, že dané nastavenia spôsobili spotrebu najvyššieho výkonu pri rozbehu. Táto hodnota je znázornená na obrázku. Avšak, vzhľadom na čas prejsť dráhu bola celková spotreba energie 274,7 J, čo z pomedzi nameraných hodnôt nepredstavovalo najvyššiu spotrebu energie.



Obr. 42 Trajektória pri v5000 a zóna 0

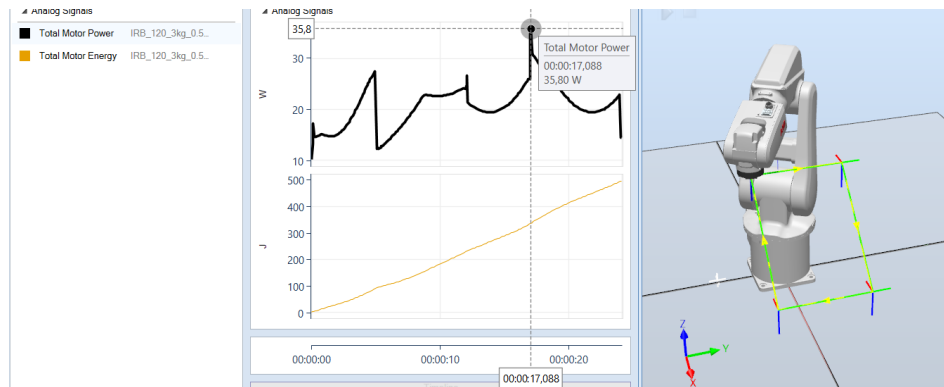
Energetická náročnosť dráhy je farebne zobrazená priamo pri prechode efektorom danou dráhou, čo umožňuje okamžite vizuálne zhodnotiť energetickú náročnosť dráhy.

Znížením TCP rýchlosti z v5000 na v500 sa podarilo znížiť aj spotrebovaný výkon pri rozbehu po prejdení bodov trajektórie E1, E2 a E3. Namerané hodnoty sú uvedené v tabuľke. Celková spotreba energie klesla o 17%. Čas prejdenia dráhy vzrástol z 1,56s na 2,69s. V tabuľke 28 je možné vidieť hodnotu maximálneho výkonu pri rozbehu, ktorý zmenou TCP rýchlosti klesol o vyše 58% a pri brzdení klesol o takmer 85%.



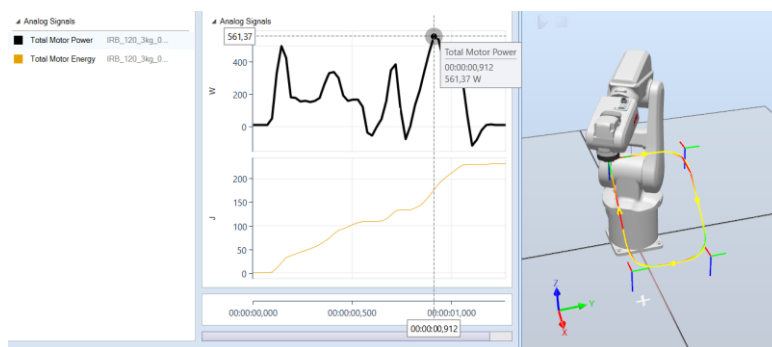
Obr. 43 Trajektória pri v500 a zóna 0

Výrazným znížením TCP rýchlosti na hodnotu v50 sa výkyvy výkonu pri rozbehu a brzdení podarilo znížiť, avšak celková spotreba energie zrástla takmer dvoj-násobne, vzhľadom na dobu trvania opisu trajektórie koncovým efektorom, v porovnaní s celkovou spotrebovanou energiou pri TCP rýchlosti v500.



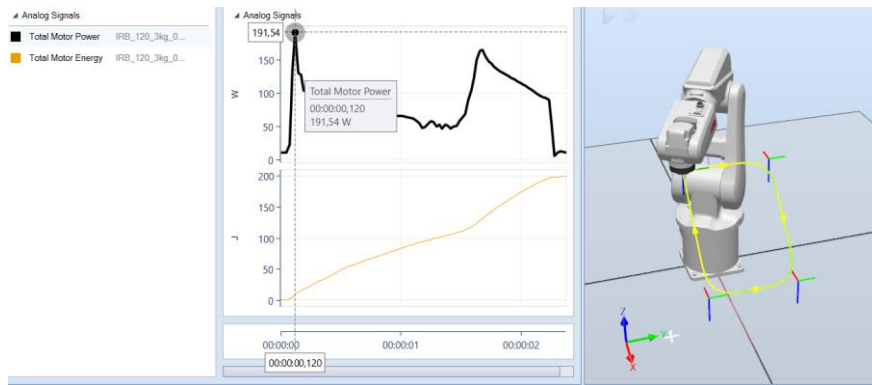
Obr. 44 Trajektória pri v50 a zóna 0

Úpravou spôsobu prechodu cez daný bod sa celková spotrebovaná energia znížila iba o 13% pri porovnaní celkovej spotreby energie pri TCP rýchlosti v5000 a zmene zo zóny 0 na zónu 100. Tak isto klesol aj maximálny výkon pri rozbehu o 3%, avšak výrazná zmena nastala pri brzdení, kde sa hodnota výkonu znížila o takmer 27%.



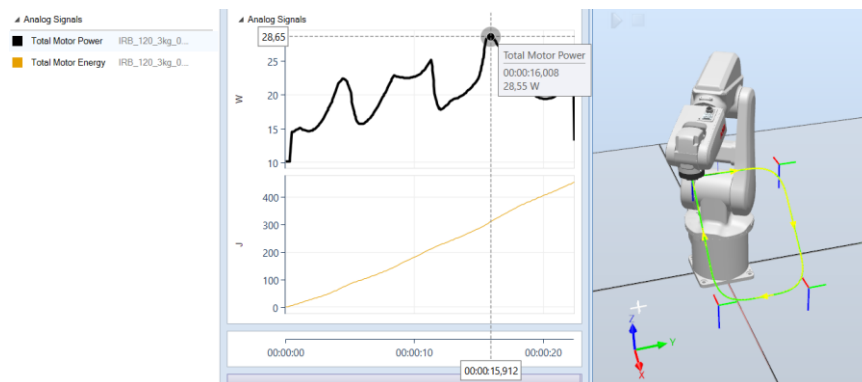
Obr. 45 Trajektória pri v5000 a zóna 100

Úpravou TCP rýchlosti z v5000 na v500 pri zachovaní zóny100, sa celková energia znížila o takmer 14%. Výrazná zmena nastala pri maximálnej hodnote výkonu pri rozbehu a to pokles o 65% a pri hodnote výkonu pri brzdení a to až o necelých 96%. V tomto prípade je nutné uviesť, že sa nejedná o porovnanie hodnôt z rovnakej časti dráhy (body trajektórie), ale ide o najvyššiu nameranú hodnotu výkonu z pohľadu celej dráhy. To znamená, že v prípade porovnania výkonu rozbehu a brzdenia jednotlivých bodov dráhy sa percentuálne vyjadrenie môže líšiť od percentuálneho vyjadrenia rozdielu medzi maximálnymi hodnotami.



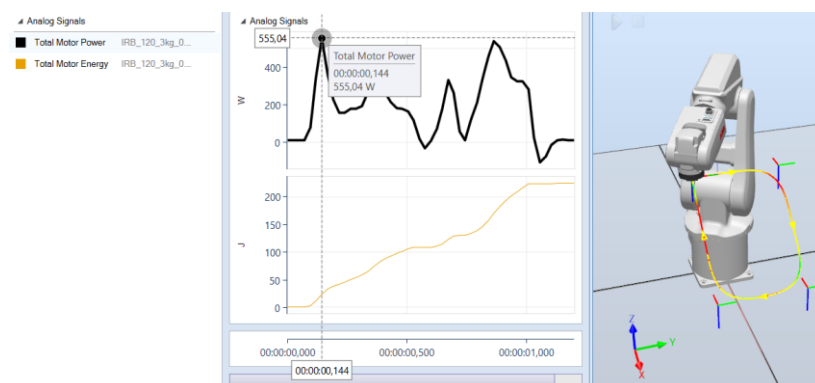
Obr. 46 Trajektória pri v500 a zóna 100

Opačný efekt malo zníženie TCP rýchlosti z v500 na v50, čo spôsobilo, že celková spotreba energia vzrástla o 127%, maximálna hodnota výkonu pri rozbehu klesla o 85% a hodnota výkonu pri brzdení vzrástla na dvojnásobok.



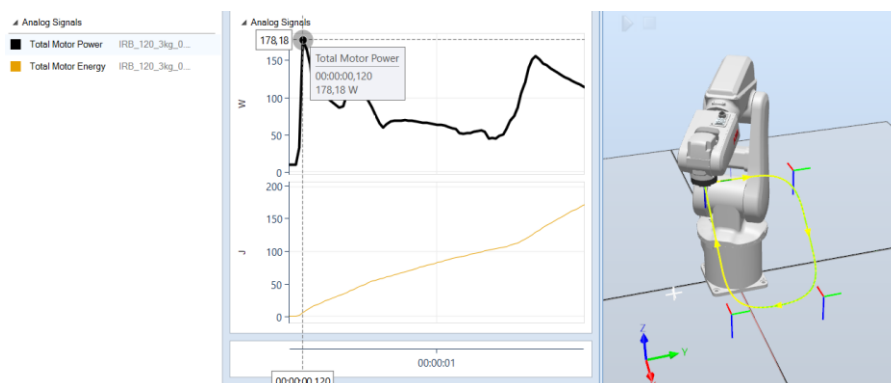
Obr. 47 Trajektória pri v50 a zóna 100

V prípade zmeny zo zóny 100 na zónu 200, hodnota celkovej spotreby energie pri TCP rýchlosti v5000, klesla o takmer 3%. Tak isto nenastala významná zmena ani pri ostatných sledovaných parametroch.



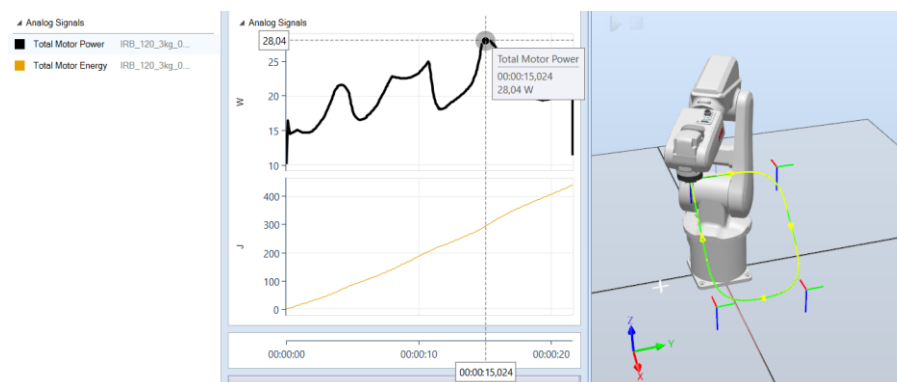
Obr. 48 Trajektória pri v5000 a zóna 200

Pri znížení TCP rýchlosti z v5000 na v500 sa celková spotreba energie zmenila o 12%, a to sa prejavilo poklesom celkovej spotreby energie. Zmena TCP rýchlosti významne ovplyvnila aj hodnotu maximálneho výkonu pri rozbehu a to poklesom o necelých 68% a hodnotu výkonu pri brzdení poklesom o 95%.



Obr. 49 Trajektória pri v500 a zóna 200

Zmenou TCP rýchlosti z v500 na v50 sa celková spotreba energie zvýšila o 300%. zároveň čas prejdania dráhy sa zvýšil z 2,35s na 21,6s. Hodnota výkonu pri rozbehu klesla o 84% a hodnota výkonu pri brzdení vzrástla o vyše 91%.



Obr. 50 Trajektória pri v50 a zone 200

4.2 Sumarizácia dosiahnutých výsledkov z experimentálneho overenia navrhnuitej metodiky

Na základe experimentu bolo preukázane, že zhodnotením plánovanej dráhy z pohľadu energetickej náročnosti je možné doceliť optimálne nastavenia vstupných parametrov za pomoci návrhu dráhy metódou off-line programovania priemyselných robotov. Je možné konštatovať, že na základe výsledkov z experimentu, nie je vždy vhodné použitie najvyššej rýchlosti pohybu priemyselného robota vzhľadom na zvýšenú energetickú náročnosť. Z dlhodobého hľadiska by boli náklady na proces vykonávaný priemyselným robotom vyššie,

ako pri parametroch zhodnotených z pohľadu energetickej náročnosti plánovanej dráhy koncového efektora priemyselného robota.

Zároveň je potrebné poukázať na energetickú náročnosť plánovanej dráhy z pohľadu jednotlivých bodov trajektórie a spôsobom prechodu koncovým efektorm danými bodmi. Zmena tohto parametra sa významne podpísala na znížení energetickej náročnosti a potrebného výkonu pri rozbehu a brzdení. Z dlhodobého hľadiska by sa tento faktor prejavil aj na opotrebení jednotlivých častí zariadenia, ktoré sú potrebné pri rozbehu a brzdení.

4.3 Vyhodnotenie experimentálne časti

Na základe výsledkov je možné konštatovať, že smer pohybu jednotlivých osí má vplyv na celkovú spotrebu energie a v závislosti od konkrétneho kĺbu priemyselného robota. Dôvodom je, že pozícia 0° sa u jednotlivých kĺboch líši. Vzhľadom na pozíciu 0° u jednotlivých kĺbov a dĺžky častí robotického ramena sa energetická náročnosť jednotlivých kĺbov menila vplyvom smeru pohybu. Každý kĺb bol meraný v šiestich stavoch, čo umožňovalo sledovať rastúcu alebo klesajúcu charakteristiku celkovej spotreby energie voči kĺbom samotným a voči smeru pohybu natočenia konkrétneho kĺbu. Rozdiel spotrebovanej energie v závislosti na pohybe v smere z kladného do záporného a v opačnom smere je 30 - % podľa jednotlivých kĺbov. Rozdiel spotrebovanej energie pri pohybe v smere z pozície 0° do krajnej hodnoty a opačne v smere do 0° sa pohybuje v rozmedzí 50%, avšak v prípade kĺbu J2 tento rozdiel spotrebovanej energie bol vyše 200% pri pohybe z 0° do -110° a z -110° do 0° . Namerané hodnoty celkovej spotreby energie pri kĺbe J2, resp. v závislosti na smere pohybu a východzej pozície sa výrazne líšia, a to z dôvodu, že na teleso pôsobí tiažová sila, ktorú je nutné prekonať pri pohybe z krajnej pozície do pozície 0° . Pri pohybe v opačnom smere, a teda pri pohybe z pozície 0° do krajných pozícií táto sila pôsobí v prospech pohybu, a teda aj celková spotreba energie je nižšia. Porovnávané hodnoty celkovej spotreby energie boli vykonané pri rovnakých podmienkach rýchlosti a záťaže koncového efektora. Tak isto aj zmena rýchlosti mala pozitívny vplyv na celkovú spotrebu energie. Použitie vyšších rýchlostí (v5000) malo za následok rýchlejšie prejdenie dráhy, ale za cenu vyššej spotreby energie. Táto zmena spotreby energie sa hlavne prejavila pri prechode koncového efektora jednotlivými bodmi navrhovanej trajektórie, a to z dôvodu vplyvu akcelerácie rýchlosti, resp. uvedenie telesa do pohybu pri rozbehu z bodu A do bodu B a následnom brzdení pred cieľovým bodom dráhy. V prípade vyššieho počtu bodov v trajektórii sa tieto výkyvy potrebného výkonu znásobovali počtom týchto prejdených bodov. Výška amplitúdy sa menila v závislosti na smere pohybu koncového efektora, a teda záležalo či sa robot pohybuje z pozície 0° do kladného alebo záporného smeru natočenia,

prípadne či sa koncový efektor pohybuje v smere do pozície 0° z kladného alebo záporného smeru v závislosti na konkrétnom kĺbe priemyselného robota. Použitím nižšej rýchlosti (v50) sa celková spotreba energie zvýšila, a to z dôvodu zvýšenia času prejdania plánovanej dráhy koncovým efektorom priemyselného robota. Znížená rýchlosť mala pozitívny dopad na výkyvy, resp. amplitúdy potrebného výkonu pri rozbehu z bodu a pri brzdení pohybu do cieľového bodu. Zmena rýchlosti pohybu z v50 na v500 mala za následok zníženie celkovej spotreby energie a to až o 35 - 55%. Zmena rýchlosti z v500 na v5000 spôsobila nárast spotreby celkovej energie približne o 20 – 50% v závislosti na konkrétnom kĺbe a smere pohybu, teda natočenie do kladného alebo záporného smeru z pozície 0° alebo do pozície 0° z oboch smerov. Vplyv zmeny záťaže koncového efektora malo dopad na celkovú spotrebu energie, a to so zvýšením záťaže z 0kg na 1,5 a z 1,5kg na 3kg, čo spôsobilo nárast približne 30 – 60% v závislosti na smere pohybu koncového efektora, a teda záležalo, či sa robot pohybuje z pozície 0° do kladného alebo záporného smeru natočenia, prípadne či sa koncový efektor pohybuje v smere do pozície 0° z kladného alebo záporného smeru v závislosti na konkrétnom kĺbe priemyselného robota. Vplyv spôsobu prechodu koncového efektora daným bodom trajektórie (aproximácia) má výrazný vplyv na výkyvy, a teda na maximálne a minimálne hodnoty výkonu potrebného pri prechode bodmi trajektórie. Rozdiely celkovej spotreby energie vzhľadom na spôsob prechodu bodmi trajektórie (nazývaných ako „Zóna“) bol nasledovný. Pri zmene zóny 0 na zónu 100, celková spotreba energie klesla o 8% pri rýchlosti v50, o 11% pri rýchlosti v500 a o 15% pri rýchlosti v5000. Rozdiely pri zmene zóny 100 na zónu 200, boli nasledujúce. Pri rýchlosti v50 to bol pokles celkovej spotreby energie o 2,6%, pri rýchlosti v500 to bol pokles o 2% a pri rýchlosti v5000 to bol pokles o 3%. Hodnoty celkovej spotreby energie pri zmene spôsobu prechodu koncového efektora bodmi trajektórie sa viaže na realizovaný experiment, a teda na konkrétnu dráhu. Percentuálne rozdiely sa môžu líšiť vzhľadom na tvar trajektórie.

5 PRÍNOSY

Súčasťou predkladanej dizertačnej práce boli experimenty, ktorých výsledky majú pozitívny vplyv vo viacerých oblastiach priemyslu, vzhľadom na vysoké nasadenie priemyselných robotov do aplikácií rôzneho charakteru.

5.1 Prínosy dizertačnej práce pre vedu

- Návrh metodiky, ktorej cieľom je zhodnotenie energetickej náročnosti plánovanej dráhy koncového efektora priemyselného robota.

- Experimentálne overenie vplyvu pohybového rozsahu a smeru pohybu jednotlivých kĺbov na energetickú náročnosť dráhy koncového efektora priemyselného robota IRB 120
- Experimentálne overenie vplyvu zmeny TCP rýchlosti na energetickú náročnosť plánovanej dráhy koncového efektora priemyselného robota IRB 120.
- Experimentálne overenie vplyvu zmeny spôsobu prechodu bodmi trajektórie koncového efektora na energetickú náročnosť priemyselného robota IRB 120.
- Vyjadrenie miery vplyvu faktora smeru pohybu natočenia jednotlivých kĺbov priemyselného robota IRB 120 na jeho celkovú spotrebu energie.
- Vyjadrenie miery vplyvu faktora TCP rýchlosti na celkovú spotrebu energie priemyselného robota IRB 120
- Vyjadrenie miery vplyvu faktora záťaže koncového efektora na celkovú spotrebu energie priemyselného robota IRB 120
- Vyjadrenie miery vplyvu spôsobu prechodu bodmi dráhy koncového efektora na celkovú spotrebu energie priemyselného robota IRB 120

5.2 Prínosy dizertačnej práce pre prax

- Spôsob zhodnotenia energetickej náročnosti dráhy koncového efektora off-line metódou (metóda prístupná v praxi).
- Navrhovaná metodika je ľahko aplikovateľná v praxi vzhľadom na dostupnosť off-line softvérov určených pre simulácie.
- Na základe zhodnotenia energetickej náročnosti možno lepšie vyčíslieť predpokladané náklady v rámci určitého časového obdobia v projektovej fáze návrhu nového robotizovaného pracoviska.
- Na základe zhodnotenia energetickej náročnosti je možné predikovať opotrebenie funkčných komponentov
- Využitie v oblasti údržby v rámci plánovania odstávky predikčnej údržby. Neočakávané prestoje spôsobené poruchou stroja majú negatívny vplyv na chod a financie podniku. Aby sa takýmto situáciám predišlo, podniky majú vypracovaný plán údržby, ktorý je založený na odhade životného cyklu strojov a zariadení. Monitorovanie úrovne spotreby energie je cesta ako by sa dalo predikovať opotrebenie stroja či zariadenia, a tak vytvoriť novú stratégiu založenú na údajoch v reálnom čase.

5.3 Prínosy dizertačnej práce pre pedagogickú činnosť

- Poznatky vhodné pre študijný predmet „Priemyselné roboty a manipulatory“
- Poznatky vhodné pre študijný predmet „Programovanie výrobných a manipulačných techník“
- Poznatky vhodné pre študijný predmet „Automatizované výrobné a montážne systémy“
- Poznatky vhodné pre študijný predmet „Projektovanie výrobných systémov“
- Poznatky vhodné pre študijný predmet „Údržba výrobných systémov“
- Poznatky vhodné pre študijný predmet „Programovanie strojov a výrobných systémov“

ZÁVER

Predkladaná dizertačná práca sa v úvode a prvej časti zaoberá teoretickými východiskami a analýzou súčasného stavu v oblasti energetickej náročnosti priemyselných robotov. V rámci teoretického východiska bol stručný popis priemyselného robota a jeho klasifikácie vzhľadom na požiadavky. Práca ďalej v teoretickej časti obsahuje stručný popis plánovania dráhy koncového efektora, popis optimalizačných kritérií a spôsobov programovania priemyselných robotov. V rámci bližšieho zdôraznenia riešenej problematiky bol predstavený koncept Industry 4.0, ktoré jednotlivé prvky predstavujú súbor oblastí, ktoré už dnes existujú, prípadne tie, ktoré by v blízkej dobe mohli vzniknúť. Myšlienkou konceptu Industry 4.0 je viesť tieto prvky spojiť a správne využiť na dosiahnutie ekonomickej prosperity. Oblasť energetickej náročnosti a efektivity je jednou z častí na ktorú sa koncept zameriava. Ide o lepšie hospodárenie so zdrojmi a zvýšenie energetickej efektivity. Tento cieľ je možné dosiahnuť správnym používaním a nastavením zariadení, ktoré sa nachádzajú v podnikoch. Za takéto zariadenie je možné považovať priemyselného robota, ktorého rýchly vývoj umožňuje aplikovať do širokej škály procesov, čím sa stáva jedno z najviac používaných zariadení vo výrobných a logistických podnikoch.

Úlohou predkladanej dizertačnej práce bolo definovať faktory a ich mieru vplyvu, ktoré svojím pôsobením ovplyvňujú energetickú náročnosť priemyselného robota. Cieľom dizertačnej práce nebolo nájsť optimálnu trajektóriu robota na základe optimalizačných kritérií, ale definovať a vyjadriť mieru vplyvu jednotlivých parametrov na energetickú náročnosť priemyselného robota a koreláciu medzi jednotlivými parametrami, ktoré vplyvajú na energetickú náročnosť priemyselného robota. V rámci práce boli realizované experimenty s cieľom overiť navrhovanú metodiku a definovať mieru vplyvu vybraných faktorov. Na základe experimentov bolo preukázané, že zhodnotením plánovanej dráhy z pohľadu energetickej náročnosti je možné docieľiť lepšie nastavenia vstupných parametrov za pomoci návrhu dráhy metódou off-line programovania priemyselných robotov. Je možné konštatovať, že na základe výsledkov z experimentov, nie je vhodné vždy použiť najvyššiu prípustnú rýchlosť pohybu priemyselného robota, a to vzhľadom na zvýšenú energetickú náročnosť. Zároveň je potrebné poukázať na energetickú náročnosť plánovanej dráhy z pohľadu jednotlivých bodov trajektórie a spôsobom prechodu koncovým efektorom danými bodmi. Zmena tohto parametra sa môže významne podpísať na znížení energetickej náročnosti a potrebného výkonu pri rozbehu a brzdení. Z dlhodobého hľadiska by sa tento faktor mohol prejavovať aj na opotrebení jednotlivých častí zariadenia.

Z ekonomického hľadiska by náklady na proces, v ktorom pôsobí priemyselný robot, vplyvom zhodnotenia energetickej náročnosti dráhy koncového efektora a následnej korekcie vybraných faktorov, mohli byť nižšie. Ekonomický ukazovateľ v tomto prípade nie je možné vyjadriť, nakoľko sa jednalo o experimentálne meranie plánovanej dráhy koncového efektora priemyselného robota v laboratórnych podmienkach. Zároveň je potrebné dodať, že s ohľadom na merania, ktoré prebiehali v laboratórnych podmienkach sa môžu v prevádzke líšiť. Tiež je potrebné dodať, že v praxi sa veľakrát používajú vyššie rýchlosti pohybov vzhľadom na produktivitu výroby, prípadne sa rýchlosť robota prispôsobuje taktu výrobného procesu. Tak isto je potrebné brať do úvahy aj fakt, že nie vždy je možné meniť plánovanú dráhu, natočenie jednotlivých kĺbov či smer pohybu. V neposlednom rade je nutné prihliadať na tvar a rozmer koncového efektora, ktorý môže do značnej miery ovplyvniť celkovú spotrebu energie.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- ABB a). IRB 120 Data sheet. 2019. Dostupné na internete: https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROBO149EN_D&LanguageCode=en&DocumentPartId=2&Action=Launch
- ABB b). Product specification IRB 120. 2019. Dostupné na internete: <https://new.abb.com/products/robotics/sk/roboty/irb-120>
- Ahmad Alshidiq. Industrial Automation Asia (IAA). Controlling Robotic Arms [Online] 2019. Dostupné na internete: https://www.iaasiaonline.com/controlling-robotic-arms-2/?fbclid=IwAR2jjk46WkT2yMDCgkf9h7lpc_-UkUudAqIY_ez3aCqjt1YnlCeFEcywGn4
- Ata A. Optimal trajectory planning of manipulators: a review. 2007. Journal of engineering Science and Technology vol. 2.
- Zbíralová K. Factory Automation [Online] 2019. Dostupné na internete: <https://factoryautomation.cz/svet-automatizace-v-roce-2019-jake-jsou-aktualni-trendy/?fbclid=IwAR2nBK5gpOLnJqf28O3-o0csJiif2NhuMeZdDfAhccjS7sNfC6kKSqQvRM>
- Božek P. a kol. Špecializované robotické systémy. 2011. ISBN 978-80+904766-3-9
- Bingul Z, Ertunc HM, Oysu C. Applying Neural Network to Inverse Kinematic Problem for 6R Robot Manipulator with Offset Wrist. 2005. Adaptive and Natural Computing Algorithms. pp.
- Bílik P., Kudláč M., ANASOFT. Anatomia inteligentného priemyslu [Online] 2019. Dostupné na internete: http://vedanadosah.cvtisr.sk/anatomia-inteligentneho-priemyslu?fbclid=IwAR1T722xuYLpy_JpxhuhOgW0jE8396xilAD-OfaVaOYYBNDSdSROSMADvHQ
- Bohan M. Next Level: 9 Components of Industry 4.0 [online]. 2016 [cit. 6.12.2017]. Dostupné na internete: <https://news.heidelbergusa.com/2016/08/9componentsof4-0/>
- Carbone G., Gomez-Bravo F. a) Motion and Operation Planning of Robotic Systems. 2015. Background and Practical Approaches. ISBN 978-3-319-14704-8.
- Carbone G., Gomez-Bravo F. b) Off-line and On-line trajectory planning. 2015. Springer International Publishing Switzerland. Issn: 2211-0984
- Chettibi T., Lehtihet H. E., Haddad M., Hanchi S. Minimum cost trajectory planning for industrial robots. 2004. European Journal of Mechanics A/Solids 23 (2004) 703–715
- Daniel E., Kandray P.E. 2010. Programmable automation technologies. Industrial Press Inc NY
- Drexler S. The 5 Factors of Industry 4.0. Industrial IoT/Industrie 4.0 Viewpoints [online]. 2016 [cit. 5.12.2017]. Dostupné na internete: <https://industrial-iot.com/2016/08/5-factors-industry-4-0/>
- Dutton W. H., Grant Blank. International Economics and Economic Policy, The emergence of next generation internet users. 2014, Volume 11, Issue 1–2, pp 29–47
- Fang H.C., Ong S.K., Nee A.Y.C. Interactive robot trajectory planning and simulation using Augmented Reality. 2012. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing vol.28, Issue 2. pp. 227-237.
- Flordala, H., Fabiana, M., Akessona K., Spensieri, D. 2007. Automatic model generation and PLC-code implementation for interlocking policies in industrial robot cells. Control Engineering Practice Volume 15, Issue 11, November 2007, Pages 1416-1426
- Owen-Hill A. Why is motion planning a big trend right now. 2019. RoboDK [online]. Dostupné na: <https://robodk.com/blog/motion-planning-trend/>
- Duka Adrian-Vasile. Neural network based inverse kinematics solution for trajectory tracking of a robotic arm. 2014. Procedia Technolog 12, pp. 20-27.

- Gadaleta M., Berselli G., Pellicciari M., Andrisano O. Towards Energy-Optimal Layout Design of Robotic Work Cells. 2015. Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Wolverhampton, pp.362 – 369.
- Geissbauer, R., Vedso, J., Schrauf, S., Industry 4.0: Building the Digital Enterprise- PwC. 2016 [cit. 19. 11. 2017]. Dostupné na internete: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>
- Gregor M., Magvaši P. Inteligentné výrobné systémy – Žilinský model [online]. 2007. [cit. 22.3.2018]. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/profile/Milan_Gregor/publication/280731448_Inteligentne_vyrobn%C3%A9_syst%C3%A9my_%C4%B8ilinsk%C3%BD_model/links/55c3868208aea2d9bdc1bf7b/Inteligentne-vyrobn%C3%A9_syst%C3%A9my-%C4%B8ilinsky-model.pdf
- Hajduk, M. – Baláž, V. – Daneshjo, N.: Simulácia a off-line programovanie priemyselných robotických systémov. AT&P journal. 2/ 2005. s. 84 - 85
- Harpaly B. How to survive the Fourth Industrial Revolution: a guide to Digital Manufacturing for SME decision makers [online]. 2017 [cit. 13.11.2017]. Dostupné na internete: <https://www.slideshare.net/kerberos56/how-to-survive-the-fourth-industrial-revolution-a-guide-to-digital-manufacturing-for-sme-decision-makers>
- Helbig J., Wahlster W., Kaggerman, H. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. [online]. 2013. [cit. 22. 9. 2017]. Dostupné na internete: http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf
- Holubek R., Ružarovský R., Delgado Sobrino D.R. An innovative approach of industrial robot programming using virtual reality for the design of production systems layout. 2019. In Advances in Manufacturing II : vol. 1 - Solutions for Industry 4.0. Cham, Switzerland : Springer Nature Switzerland AG. pp. 223-235. ISSN 2195-4356. ISBN 978-3-030-18714-9.
- IFR. Robots double worldwide by 2020. 2019. Dostupné na internete: <https://ifr.org/news/robots-double-worldwide-by-2020>
- Jay Lee, Hung-An Kao, Shanhu Yang. Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment. 2014. Proceedings of the 6th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems. 3-8.
- Koleda P., Naščák Ľ. Generovanie trajektórie pomocou neurónovej siete. 2012. ACTA FACULTATIS TECHNICAЕ. roč. XVII.
- Králik M. Projektovanie výrobných systémov pre Ústav manažmentu STU. Strojnícka fakulta. Bratislava 2019.
- Kuka. Robotic system - Industrial robot. 2019 [Online]. Dostupné na internete: <https://www.kuka.com/en-gb/products/robotics-systems/industrial-robots>
- Kukuc S., Zafer B., Robot Kinematics – Forward and inverse kinematic. 2006.
- Lihui Wang, Törngren M. , Onori M., Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. 2015. Journal of Manufacturing Systems 37.517-527,.
- Moravčík O., Božek P., Iringová M., Bezák P., Vidová E. Control of angular robot in a virtual environment. 2005.
- Noor A. The connected life: The internet of everything coming to building near you. Mechanical engineering. 2015: 137 (9): 36-41. ISSN 0025-6501
- Oltean S, Șoaita D, Dulau M, Jovrea T. Aspects of Interdisciplinarity in the MRIP 02 System Design, International Conference. 2007. Optimization of the Robots and Manipulators. pp.:
- Paryanto Brossong M., Kohl J., Merhof J., Spreng S., Franke J. 2014. Energy Consumption and Dynamic Behavior Analysis of a Six-axis Industrial Robot in an Assembly System. Procedia CIRP Volume 23, 2014, Pages 131-136

- Poppeová V., Čuboňová N., Uriček J., Kumičáková D. Automatizácia strojárskkej výroby. 2002. ISBN 80-8070-009-5
- Ružarovský R., Holubek R., Delgado Sobrino D. R. Virtual commissioning of a robotic cell prior to its implementation into a real flexible production system, generation of the robot offline programming (OLP) and validation of the PLC code. 2018. Research papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology in Trnava. Vol. 26, no. 42. pp. 93-102. ISSN 1336-1589.
- Saravanan R., Ramabalan S., Balamurugan C. Evolutionary multi-criteria trajectory modeling of industrial robots in the presence of obstacles. 2009. Engineering Applications of Artificial Intelligence vol. 22. Issue 2. pp.329-342.
- Skařupa J. Průmyslové roboty a manipulátory. 2007. Ostrava. ISBN 978-80-248-1522-0
- Spath D. a kol. Studie Produktionsarbeit der zukunfft – Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer IAO, 2013. ISBN 978-3-8396-0570-7. [cit. 11.09.2017].
- Tian L., Collins C. An effective robot trajectory planning method using a genetic algorithm. 2004. Mechatronics 14. pp.455–470.
- Toyoda Y., Yano F. Optimizing Movement of A multi-Joint Robot Arm with Existence of Obstacles Using Multi-Purpose Genetic Algorithm. 2004. IEMS Vol. 3. No.1. pp.78-84.
- Yongrui Qin, Quan Z. Sheng, Nickolas J.G. Falkner, Schahram Dustdar, Hua Wang, Athanasios V. Vasilakos. 2016. When things matter: A survey on data-centric internet of thing. Journal of Network and Computer Applications vol. 64. 137–153, ISSN: 1084-8045.
- Carbone G., Gomez-Bravo F. Motion and Operation Planning of Robotic Systems. Background and Practical Approaches. January 2015. ISBN 978-3-319-14705-5.
- Nagy F., Siegler A. Engineering foundations of robotics. 1987. ISBN 0132787970.
- Riives, J. 2018. Reconfigurable manufacturing based on industrial robots. [cit. 8.4.2018] Dostupné na internete: https://www.ttu.ee/institutes/departament-of-mechanical-and-industrial-engineering/research-71/research-topics-10/reconfigurable-manufacturing-based-on-industrial-robots/?op=_print
- Števo S., Sekaj I., Dekan, M. 2014. Optimization of Robotic Arm Trajectory Using Genetic Algorithm. IFAC Proceedings Volumes Volume 47, Issue 3, 2014, Pages 1748-1753
- Valero F., Mata V., Besa A. Trajectory planning in workspaces with obstacles taking into account the dynamic robot behaviour. 2006. Mechanism and Machine Theory vol. 41. Issue 5. pp.525–536.
- Vaz A.I.F., Fernandes E.M.G.P., Gomes M.P.S.F. Robot trajectory planning with semi-infinite programming. 2004. European Journal of Operational Research. pp. 607–617.
- Velíšek K., Katalinič B., Javorová A. Priemyselné roboty a manipulátory. 2006. ISBN 80-227-2492-0
- Velíšek K., Košťál P. Mechanizácia a automatizácia. 2007. ISBN 978-80-227-2753-2
- Vitralab. Príručka. Automatizačná a robotická technika. 2011. Košice
- Wang L-CT, Chen CC. A combined optimization method for solving the inverse kinematics problems of mechanical manipulators. 1991 Robotics and Automation, IEEE Transactions on. 7(4). pp.: 489-499.
- Weyer S., Schmitt M., Ohmer M., Gorecky D., Towards Industry 4.0 -Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. 2015. IFAC-Papers On Line, 2015. Vol. 48, Issue 3, 579-584.
- Zha Xuan F. Optimal pose trajectory planning for robot manipulators. 2002. Mechanism and Machine Theory. Vol. 37. Issue (10):1063-1086.
- ISO 9283:1998. Manipulating Industrial Robots – Performance criteria and related test methods.(Manipulačné priemyselné roboty. Pracovné charakteristiky a zodpovedajúce skúšobné metódy).

ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI

ADF	Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch	2
AEC	Vedecké práce v zahraničných recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách	5
AFC	Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách	11
AFD	Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách	1
BFB	Abstrakty odborných prác z domácich podujatí (konferencie...)	1
Súčet		20

ADF Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch

ADF01 LECKÝ, Šimon - VÁCLAV, Štefan - MICHAL, Dávid - NECPAL, Martin. Production systems planning and databases in assembly. 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. 26, no. 42 (2018), s. 63-68. ISSN 1336-1589. V databáze: DOI: 10.2478/rput-2018-0007 ; INSPEC.

ADF02 MICHAL, Dávid - KOŠTÁL, Peter - LECKÝ, Šimon - VÁCLAV, Štefan. Rationalization of robotic workstation in welding industry. 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. 26, no. 42 (2018), s. 159-164. ISSN 1336-1589. V databáze: DOI: 10.2478/rput-2018-0019 ; INSPEC.

AEC Vedecké práce v zahraničných recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách

AEC01 KOŠTÁL, Peter - MUDRIKOVÁ, Andrea - VÁCLAV, Štefan - MICHAL, Dávid - LECKÝ, Šimon - DÍAZ CAZAÑAS, Ronald. Manufacturing component base broadening in the flexible manufacturing system by using a group technology. In *Novel Trends in Production Devices and Systems V (NTPDS V) : Special topic volume with invited peer reviewed papers only*. 1. vyd. Zurich : Trans Tech Publications, 2019, S. 45-54. ISSN 0255-5476. ISBN 978-3-0357-1515-6. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85066240438.

AEC02 LECKÝ, Šimon - VÁCLAV, Štefan - MICHAL, Dávid - HRUŠECKÝ, Róbert - KOŠTÁL, Peter - MOLNÁR, Ivan. Assembly tool manufacturing and optimization for polylactic acid additive manufacturing. In *Novel Trends in Production Devices and Systems V (NTPDS V) : Special topic volume with invited peer reviewed papers only*. 1. vyd. Zurich : Trans Tech Publications, 2019, S. 152-162. ISSN 0255-5476. ISBN 978-3-0357-1515-6. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85066279572.

AEC03 MICHAL, Dávid - HRUŠECKÝ, Róbert - KOŠTÁL, Peter - MOLNÁR, Ivan. Analysis of shape and dimensional deformation of the model with a precision circular hole produced by digital light processing (DLP) additive technology. In *Materials Science Forum*. Vol. 994, (2020), s. 213-220. ISSN 0255-5476 (2018: 0.173 - SJR, Q3 - SJR Best Q).

AEC04 MICHAL, Dávid - HRUŠECKÝ, Róbert - GÖRÖG, Augustín - MILDE, Ján - ŠIMON, Štefan. Analysis of shape and dimensional deformation of the gear made by digital light processing (DLP) additive technology and measured by industrial tomography.

In *Materials Science Forum*. Vol. 994, (2020), s. 205-212. ISSN 0255-5476 (2018: 0.173 - SJR, Q3 - SJR Best Q).

- AEC05 MOLNÁR, Ivan - MOROVIČ, Ladislav - DELGADO SOBRINO, Daynier Rolando - LECKÝ, Šimon - MICHAL, Dávid. Medical applications of biomaterials: the case of design and manufacture of orthopedic corsets made of polylactic acid by additive manufacturing. In *Novel Trends in Production Devices and Systems V (NTPDS V) : Special topic volume with invited peer reviewed papers only*. 1. vyd. Zurich : Trans Tech Publications, 2019, S. 223-232. ISSN 0255-5476. ISBN 978-3-0357-1515-6. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85066244687.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC01 HRUŠECKÝ, Róbert - MOLNÁR, Ivan - GÖRÖG, Augustín - MICHAL, Dávid. The influence of computed tomography detector resolution on measured values of shape and dimensional accuracy of component produced by material jetting process. In *Annals of DAAAM International Symposium 2019 [USB] : Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, 20. - 27. 10. 2019, Zadar, Croatia. 1. vyd. Viedeň : DAAAM International, 2019, S. 1-7. ISSN 2304-1382. ISBN 978-3-902734-23-5. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85077861255.
- AFC02 KOŠTÁL, Peter - VÁCLAV, Štefan - MICHAL, Dávid - LECKÝ, Šimon. Reachability planning of industrial robot in concept of digital factory. In *Industry 4.0 [elektronický zdroj] : Proceedings : International Scientific Conference , 13. - 16. 12.2017, Borovets, Bulgaria*. 1. vyd : Scientific-technical Union of Mechanical Engineering Industry 4.0, 2017, CD-ROM, s. 91-94. ISSN 2535-0153 (print).
- AFC03 KOŠTÁL, Peter - VÁCLAV, Štefan - MICHAL, Dávid - LECKÝ, Šimon. Analysis of manufacturing systems with use of simulation software. In *Industry 4.0 [elektronický zdroj] : Proceedings : International Scientific Conference , 13. - 16. 12.2017, Borovets, Bulgaria*. 1. vyd : Scientific-technical Union of Mechanical Engineering Industry 4.0, 2017, CD-ROM, s. 95-98. ISSN 2535-0153 (print).
- AFC04 KOŠTÁL, Peter - MUDRIKOVÁ, Andrea - DELGADO SOBRINO, Daynier Rolando - MICHAL, Dávid - LECKÝ, Šimon. Comparison of the NC data preparation methods for drawingless production. In *Advances in Manufacturing II : Volume 1 - Solutions for Industry 4.0*. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2019, S. 62-71. ISSN 2195-4356. ISBN 978-3-030-18714-9. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85065328754 ; DOI: 10.1007/978-3-030-18715-6_6 ; WOS: 000490710700006.
- AFC05 KOŠTÁL, Peter - MUDRIKOVÁ, Andrea - MICHAL, Dávid. Possibilities of intelligent flexible manufacturing systems. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 659, iss. 1 (2019), s. 1-8. ISSN 1757-8981 (2018: 0.192 - SJR). V databáze: DOI: 10.1088/1757-899X/659/1/012035 ; SCOPUS: 2-s2.0-85075340344.
- AFC06 KOŠTÁL, Peter - MUDRIKOVÁ, Andrea - MICHAL, Dávid. Group technology in the flexible manufacturing system. In *Modern Technologies in Manufacturing (MTeM 2019) : 14th International Conference, 09. - 12. October 2019, Cluj-Napoca, Romania*. 1. vyd. United Kingdom : EDP Sciences, 2019, S. 1-8. ISBN 978-2-7598-9083-5. V databáze: DOI: 10.1051/mateconf/201929902001.

- AFC07 MICHAL, Dávid - LECKÝ, Šimon - KOŠŤÁL, Peter - VÁCLAV, Štefan. Welding workstation planning with use of CAD software and simulation. In *Advances in Manufacturing II : Volume 2 - Production Engineering and Management*. Cham, Switzerland : Springer Nature Switzerland AG, 2019, S. 97-105. ISSN 2195-4356. ISBN 978-3-030-18788-0. V databáze: DOI: 10.1007/978-3-030-18789-7_9 ; SCOPUS: 2-s2.0-85065339741.
- AFC08 MOLNÁR, Ivan - MICHAL, Dávid - ŠIMON, Štefan - MOROVIČ, Ladislav - KOŠŤÁL, Peter. Design and manufacture of life size human model using material extrusion and vat photopolymerization additive processes. In *Modern Technologies in Manufacturing (MTeM 2019) : 14th International Conference, 09. - 12. October 2019, Cluj-Napoca, Romania*. 1. vyd. United Kingdom : EDP Sciences, 2019, S. 1-6. ISBN 978-2-7598-9083-5. V databáze: DOI: 10.1051/mateconf/201929901010.
- AFC09 VÁCLAV, Štefan - KOŠŤÁL, Peter - LECKÝ, Šimon - MICHAL, Dávid. Influence of selected attributes in assembl systems planning ith use of simulation software. In *Industry 4.0 [elektronický zdroj] :] : Proceedings : International Scientific Conference , 13. - 16. 12.2017, Borovets, Bulgaria*. 1. vyd : Scientific-technical Union of Mecanical Engineering Industry 4.0, 2017, CD-ROM, s. 103-106. ISSN 2535-0153
- AFC10 VÁCLAV, Štefan - KOŠŤÁL, Peter - LECKÝ, Šimon - MICHAL, Dávid - BAKO, Branislav. Assembly system planning in automotive industry with use of discrete event simulation. In *Vehicle and Automotive Engineering 2 : proceedings of the 2nd VAE 2018, Miškolc, Hungary*. 1. vyd. Cham : Springer, 2018, S. 503-515. ISBN 978-3-319-75676-9. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85046945905 ; DOI: DOI: 10.1007/978-3-319-75677-6_44.
- AFC11 VÁCLAV, Štefan - KOŠŤÁL, Peter - MICHAL, Dávid - LECKÝ, Šimon. Assembly systems planning with use of databased and simulation. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 659, iss. 1 (2019), s. 1-5. ISSN 1757-8981 (2018: 0.192 - SJR). V databáze: DOI: 10.1088/1757-899X/659/1/012023 ; SCOPUS: 2-s2.0-85075342681.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD01 VÁCLAV, Štefan - KOŠŤÁL, Peter - LECKÝ, Šimon - MICHAL, Dávid. Application of computer aided technology in production system planning. In *New Trends in Process Control and Production Management : proceedings of the International Conference on Marketing Management, Trade, Financial and Social Aspects of Business (MTS 2017), May 18-20, 2017, Košice, Slovak Republic and Tarnobrzeg, Poland*. 1. vyd. Balkema : CRC Press Taylor & Francis Group, 2018, s. 299-304. ISBN 978-1-138-05885-9 (print).

BFB Abstrakty odborných prác z domácich podujatí (konferencie...)

- BFB01 LECKÝ, Šimon - VÁCLAV, Štefan - MICHAL, Dávid - KOŠŤÁL, Peter. Application of computer aided technology in production system planning. In *Marketing manažment, obchod, finančné a sociálne aspekty podnikania - MTS 2017 : zborník abstraktov z 5. ročníka medzinárodnej vedeckej konferencie, 18. - 20. 05. 2017, Košice (the Slovak Republic), Tarnobrzeg (the Republic of Poland)*. 1. vyd. Bratislava : Ekonóm, 2017, S. 80. ISBN 978-80-225-4384-2.