

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dāvis MEIKE

**ENERGOEFEKTIVITĀTES
PAAUGSTINĀŠANAS METOŽU IZSTRĀDE
AUGSTI AUTOMATIZĒTĀS ROBOTU
RAŽOTNĒS**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2013

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Dāvis MEIKE

Doktora studiju programma “Elektrotehnoloģiju datorvadība”

**ENERGOEFEKTIVITĀTES
PAAUGSTINĀŠANAS METOŽU IZSTRĀDE
AUGSTI AUTOMATIZĒTĀS ROBOTU
RAŽOTNĒS**

Promocijas darba kopsavilkums

Scientific supervisor:
Dr.habil.sc.ing. profesors
L.Ribickis

RTU Izdevniecība
Rīga 2013

UDK 004.896(043.2)

Me 220 e

Meike D. Energoefektivitātes paaugstināšanas metožu
izstrāde augsti automatizētās robotu ražotnēs.
Promocijas darba kopsavilkums: RTU, 2013, 30 lpp.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā “Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

© Rīgas Tehniskā universitāte, 2013

ISBN 978-9934-10-501-2

**PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS
INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA
IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ
UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013.g.18.decembrī Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, 117. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr.sc.ing. Agris Ņikitenko
Rīgas Tehniskā universitāte

Asoc. prof. Anastasija Žiravecka
Rīgas Tehniskā universitāte

Prof. Eugenio Dragoni
University of Modena and Reggio Emilia, Itālija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Dāvis Meike(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā uz 214 lappusēm, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus. Darbā izmantoti 74 attēli un 20 tabulas. Darbam pievienots literatūras saraksts ar 176 ierakstiem un 6 pielikumi.

Anotācija

Bez robotikas autoindustrija šodien nav iedomājama-industriālie roboti ļauj sasniegt vēlamos ražošanas apjomus, kvalitāti un ātrumu. Taču augošās elektroenerģijas cenas, kā arī dažādi politikas instrumenti industrializētājās valstīs ir galvenie iemesli kļūt energoefektivitātei par vienu no ražošanas uzņēmumu galvenajiem stūrakmeņiem.

Šajā darbā izpētītas dažādas metodes industriālo robotu energoefektivitātes palielināšanai. Darbā izstrādāts robota sistēmas modelis, kas izmantots robotizētu ražošanas uzdevumu energopatēriņa analīzei un pielietojams dažādiem 6-asu manipulatoriem. Darbā piedāvātas vairākas metodes un shēmas plaša mēroga robotizētas ražošanas energoefektivitātes celšanai, kā, piemēram, manipulatora tipa izvēle, stratēģijas efektīvai mehānisko bremžu pielietošanai un ražošanas intervālu izmantošanai. Analizēta programmu loģika un kustību vadības algoritmi. Praktiski pierādīta metode dinamiskai kustību vadības optimizācijai robotizētā ražošanas šūnas modelī. Izpētīti pasīvie enerģijas uzkrājēji, kā arī izstrādāta jauna tipa jaudas pārveidotāja shēma robotu rekuperatīvās enerģijas savstarpējai apmaiņai.

Darbs orientēts uz praktiski realizējamiem ražošanas uzlabojumiem un vairums minēto metožu ir eksperimentāli pārbaudītas. Balstoties uz robotu faktisko izmantošanu autoindustrijā, kopējo robotu energopatēriņu iespējams samazināt par 30%, pielietojot visas metodes vienlaicīgi.

Saturs

Darba vispārīgais raksturojums	6
Tēmas aktualitāte un problēmas apraksts	6
Darba mērķis	7
Metodika	7
Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti	7
Praktiskais pielietojums	8
Darba struktūra	8
Darba aprobācija	9
1 Motivācija un esošās tehnikas apraksts	14
2 Robota sistēmas modelēšana	16
3 Ražošanas analīze un robota sistēmas uzlabojumi	17
4 Kustību vadības optimizācija	19
5 Rekuperatīvās enerģijas izmantošana	21
Secinājumi	24
Teorētiskie rezultāti	24
Praktiskie rezultāti	26
Darba turpinājums	27
Literatūra	29

Darba vispārīgais raksturojums

Tēmas aktualitāte un problēmas apraksts

Enerģijas un citu resursu efektīva izmantošana ir viens no ilgtspējīgas attīstības pamatprincipiem ražošanas industrijā. Aktuālās politikas nostādnes ES un pasaulē, vides aizsardzība un pastāvīgs elektroenerģijas cenu kāpums ir galvenā motivācija lielapjoma ražošanas uzņēmumiem ieviest dažādus tehniskus un stratēģiskus paņēmienus ražošanas iekārtu energoefektivitātes veicināšanā.

Industriālā robotika ir pamata tehnoloģija auto ražošanā, un tai ir pieaugoša loma citās nozarēs. Autoražošana ir energoietilpīga nozare, un robotu sistēmu elektroenerģijas patēriņš sasniedz 5-10% no koppatēriņa. Kaut arī atsevišķas komponentes- elektriskās mašīnas, piedziņas elektrotehnika vai paši roboti nereti ir ļoti efektīvi, bieži atsevišķas komponentes efektivitāte maz ietekmē kopējās sistēmas rezultātu. Metaforiskā salīdzinājumā var minēt auto, kura patiesais degvielas patēriņš tikpat ļoti ir atkarīgs no paša vadītāja braukšanas manieres kā no motora tilpuma, auto tipa, u.tml. Arī augsti automatizētās robotu ražotnēs, lielākais energoefektivitātes uzlabošanas potenciāls ir ražošanas plānotāju un sistēmu inženieru skatu punkta.

Metodoloģijas trūkums robotu sistēmu energopatēriņa prognozēšanā un optimizēšanā liela mēroga ražošanas plānošanas procesos ir pētījuma galvenā problēma, un izstrādātā promocijas darba rezultāti dod virkni jaunu risinājumu un zinātnisku novitāti.

Darba mērķis

Darba galvenais mērķis ir augsti automatizētu robotizētu ražošanas iekārtu kopējās ietekmes uz vidi samazināšana, izstrādājot jaunas metodes un shēmas energoefektīvai industriālo robotu izmantošanai.

Metodika

Darbā ir veikta autoražošanas robotizēto sistēmu darbības analīze un klasifikācija. Izmantotas matemātiskās modelēšanas metodes robotu energoefektivitātes paaugstināšanai un kustības optimizācijai. Izstrādāti un testēti jauni datormodeļi, veiktas to eksperimentālās pārbaudes. Veikta mērījumu datu statistiskā apstrāde.

Darba apjoms aprobežojas ar 6 brīvības pakāpju industriālo robotu manipulatoriem ar celjspēju virs 100kg, to vadības sistēmām un veidojošajām robotu šūnām.

Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

- Izstrādāts jauns spēka elektronikas pārveidotājs enerģijas apmaiņai starp vairākiem robotiem.
- Izstrādāta analīzes metode robotu pielietojumam autoindustrijā no energoefektivitātes aspekta.
- Izstrādāts un eksperimentāli pārbaudīts robotu sistēmas datormodelis.
- Izveidota jauna metodika vairāku robotu darbības enerģētiskai salīdzināšanai un veikts darbs pie RRS1[1] standarta paplašināšanas.

- Izstrādāti jauni priekšlikumi energoefektīvai robota statisko bremžu pielietošanai.
- Izstrādāts jauns kustības vadības dinamiskās optimizācijas piemērs robotu šūnā.

Pierādīts, ka vairāki galvenie rezultāti un optimizācijas metodes pielietojamas arī citiem robotu tipiem, tehnoloģijām vai izmantojami arī nozarēs ārpus auto ražošanas.

Praktiskais pielietojums

Katra no izstrādātajām, modelētajām, analītiski vai eksperimentāli pārbaudītajām robotizētas ražošanas optimizācijas metodēm izvērtēta pēc tās praktiskās un ekonomiskās nozīmes, balstoties uz reālo ražošanu *Mercedes-Benz* rūpnīcā Sindelfingenā, Vācijā. Priekšlikumi efektīvai robota statisko bremžu izmantošanai ieviesti rūpnīcā.

Modelēšanas principi dažādu robotu sistēmu energopatēriņa noteikšanai ieviesti starptautiskajā RRS1 standartā. Prognozētais enerģijas ietaupījums un CO₂ samazinājums uz 1000 robotiem gada laikā sniegts katras metodes aprakstā apakšnodaļās.

Darba struktūra

Pētījums strukturēts tematiski nevis hronoloģiski. Tas sadalīts piecās galvenajās nodaļās, kas atbilst pieciem darba uzdevumiem. 1.nodaļa izklāsta darba motivāciju, sniedz ieskatu saistošās normās un identificē tehnoloģiju tendences. Nodaļā analizēti arī citu autoru pētījumi, dots esošās tehnikas apraksts un svarīgākās definīcijas. 2.nodaļā

tiek izklāstīts izveidotais robota sistēmas modelis un doti tā eksperimentālās validēšanas rezultāti. 3.nodaļā piedāvātas vadlīnijas plaša mēroga robotizētas ražošanas energoefektivitātes celšanai, kā, piemēram, manipulatora tipa izvēle, stratēģijas efektīvai mehānisko bremžu pielietošanai un ražošanas intervālu izmantošanai. Programmu loģika un kustību vadības algoritmi analizēti 4.nodaļā. 5.nodaļā apskatīti pasīvi enerģijas uzkrājēji, kā arī izstrādāta jauna tipa jaudas pārveidotāja shēma robotu rekuperatīvās enerģijas savstarpējai apmaiņai.

Darba nobeigumā doti secinājumi un autora ieteikumi pētījuma turpinājumam. Katras nodaļas beigās sniegts īss tās kopsavilkums. Darbs apkopots uz 214 lappusēm, izmantoti 74 attēli (65 oriģināli attēli) un 20 tabulas.

Darba aprobācija

Darba galvenās idejas un rezultāti publicēti 14 starptautiskās konferencēs un 1 zinātniskajā žurnālā. Iesniegti 7 patenta pieteikumi, no kuriem 4 apstiprināti līdz 2013.gadam.

Izvēlētas publikācijas

1. Davis Meike, Giovanni Berselli, Marcello Pellicciari “Energy Efficient Use of Multi-Robot Production Lines in the Automotive Industry: Detailed System Modeling and Novel Optimization Approaches” in *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013.
2. Davis Meike, Armands Senfelds, Leonids Ribickis “Power Converter For DC Bus Sharing To Increase The En-

- ergy Efficiency In Drive Systems” in *The 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp.7197-7202, 2013.
3. Davis Meike, Marcello Pellicciari, Giovanni Berselli, Alberto Vergnano, Leonids Ribickis, “Increasing the energy efficiency of multi-robot production lines in the automotive industry,” in *The IEEE 8th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pp. 299-303, 2012.
 4. Christian Hansen, Julian Oltjen, Davis Meike and Tobias Ortmaier, “Enhanced approach for energyefficient trajectory generation of industrial robots,” in *The IEEE 8th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pp. 1-7, 2012.
 5. Davis Meike, Leonids Ribickis, “Energy Efficient Use Of Robotics In The Automobile Industry,” in *The IEEE 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pp. 507-511, 2011.

Citas publikācijās¹

6. Armands Senfelds, Davis Meike, “Utilization of Regeneration Energy in Industrial Robots System,” in *Proceedings of the 54th Annual International Scientific Conference of Riga Technical University*, pp. 95-100, 2013.
7. Marcello Pellicciari, Giovanni Berselli, Federico Balugani, Davis Meike, Francesco Leali, “On Designing Optimal Trajectories for Servo-Actuated Mechanisms Through

¹Hronoloģiskā secībā sākot ar jaunāko.

- Highly Detailed Virtual Prototypes” in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp.1780-1785, 2013.
8. Ivars Rankis, Davis Meike, Armands Senfelds, “Utilization of Regeneration Energy in Industrial Robots System” in *11th International Symposium “Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering”*, 2013.
 9. Davis Meike, “Multi-domain model for the evaluation of large scale robotic applications within production,” in *Proceedings of the 53rd Annual International Scientific Conference of Riga Technical University*, p.113, 2012.
 10. Davis Meike and Ivars Rankis, “New type of power converter for common-ground DC bus sharing to increase the energy efficiency in drive systems,” in *Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), 2012 IEEE International*, pp.225-230, 2012.
 11. Davis Meike, “Development of the Energy Efficiency Improvement Methods for Industrial Robots,” in *International Symposium and Doctoral School of Electrical Engineering*, pp.96-99, 2012.
 12. Davis Meike, “A study of time-energy optimal trajectory planning algorithms of robot manipulators,” in *Proceedings of the 52nd Annual International Scientific Conference of Riga Technical University*, pp.100-105, 2011.
 13. Davis Meike and Leonids Ribickis, “Recuperated energy savings potential and approaches in industrial robo-

tics,” in *The IEEE 7th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pp. 299-303, 2011.

14. Davis Meike and Leonids Ribickis, “Industrial robot path optimization approach with asynchronous fly-by in joint space,” in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 911-915, 2011.
15. Davis Meike, Leonids Ribickis, “Analysis of the Energy Efficient Usage Methods of Medium and High Payload Industrial Robots in the Automobile Industry” in *10th International Symposium “Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering”*, pp.1-5, 2011.

Patenti²

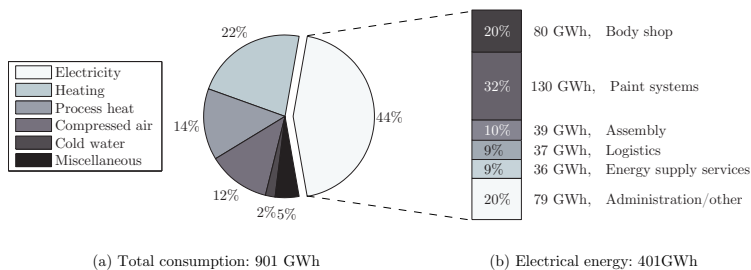
1. Davis Meike, Michael Lebrecht, Armands Senfelds, Ivars Rankis, “Produktionsanordnung mit wenigstens zwei Antriebssystemen”, P826268/DE/1, 24.06.2013, Note: submission.
2. Davis Meike, Michael Lebrecht, Thomas Schneider, “Verfahren zum Betreiben einer Mehrzahl von Robotern” P826274/DE/1, 24.06.2013, Note: submission.
3. Davis Meike, Michael Lebrecht, “Verfahren zum Auswählen von Robotervarianten”, P826273/DE/1, 24.06.2013, Note: submission.
4. Michael Lebrecht, Davis Meike, Ivars Rankis, Thomas Schneider, “Fertigungs- und/oder Transportanordnung,” DE 10 2011 122 427 A1, 28.06.2012.

²Hronoloģiskā secībā sākot ar jaunāko.

5. Michael Lebrecht, Thomas Schneider, Davis Meike, "Verfahren zur Steuerung und oder Regelung von Antriebsmotoren eines Roboters," DE 10 2011 102 297 A1, 12.01.2012.
6. Michael Lebrecht, Thomas Schneider, Davis Meike, "Verfahren und Vorrichtung zur Steuerung und/oder Regelung eines Roboters," DE 10 2011 008 169 A1, 27.10.2011.
7. Michael Lebrecht, Thomas Schneider, Davis Meike, "Verfahren zur Steuerung und/oder Regelung von Antriebsmotoren eines Roboters," DE 10 2011 008 170 A1, 27.10.2011.

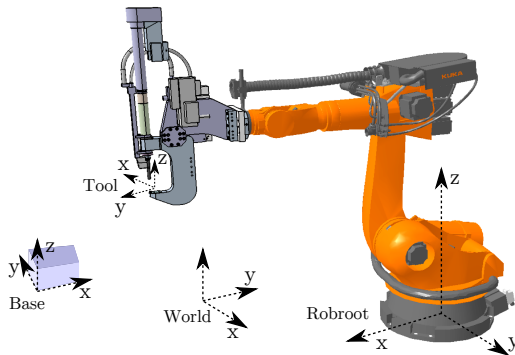
1 Motivācija un esošās tehnikas apraksts

Vairākās industriālajās lielvalstīs elektroenerģijas cenas pēdējā desmitgadē ir pastāvīgi augušas [16, 17]. Energopārvaldību nosaka ISO 50001[18], uzņēmuma atbildību pret vidi nosaka ISO 14001[19], savukārt direktīva 2009/125/EU nosaka kārtību, kā iedalīt atsevišķus enerģiju izmantojošus produktus[20]. Līdzīga iniciatīva sagaidāma arī ražošanas iekārtām un arī industriālajiem robotiem. Tādēļ robotu energoefektivātes palielināšana ir būtiska gan to lietotājiem, gan arī kā pārdošanas arguments to piegādātājiem.



Att. 1.1: Enerģijas koppatēriņš *Daimler AG* rūpnīcā Sindelfingenā[21]

Ilustratīvu piemēru sniedz [22] dati: specifiskā enerģija uz 1 saražoto automobili ir 3.3MWh *Mercedes-Benz* vieglo pasažieru automobiļu ražotnēs 2011.gadā. Ņemot vērā dažādus enerģijas veidus, vidēji 1kWh atbilst 0.33kg CO₂ izmešiem. Att.1.1 dota enerģijas bilance vienā no uzņēmuma ražotnēm. No kopējiem patērētajiem 901GWh, 44% ir elektroenerģija. Auto virsbūvju ražošanā, kur nodarbināti vairāk kā 95% robotu, tiek patērēts 20% elektroenerģijas.



Att. 1.2: KUKA KR2210 industriālais robota manipulators

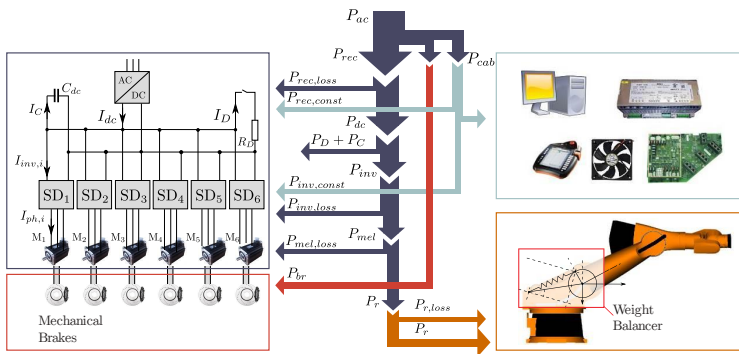
Industriālais robota manipulators KUKA KR2210 ar punkta metināšanas iekārtu attēlots att.1.2 pozīcijā $\mathbf{q}_h = \pi/180[0, -90, 90, 0, 0, 0]^T$, kur uzdotas katras ass leņķis grādos. Tā kā šis tips ir viens no visizplatītākajiem, tas pieņemts kā *references manipulators*.

Līdzšinējie komerciālie pētījumi par energoefektivitātes palielināšanu autoražotnēs ir galvenokārt veltīti visas ražotnes augsta līmeņa procesu pārvaldei. Vairums akadēmisko pētījumu veltīti robotu inteligēntai kustību vadībai, kas nereti ir izrādījušies pārāk teorētiski un tāli no praktiskas realizācijas. Ļoti maz ir tehniska rakstura pētījumu par robotizētas ražošanas kontroles optimizācijas metodēm, kas pielietojamas robotiem, sagrupētiem pa vienai vai vairākām ražošanas šūnām.

Avotā [23] inteligēnti energotīkli, *gudrās ražotnes* un energoefektivitāte ir atpazīti kā galvenās tehnoloģiju tendences nākamajai desmitgadei.

2 Robota sistēmas modelēšana

Dēļ kompleksās robota uzbūves, intuitīva enerģijas patēriņa paredzēšana nav iespējama. Robota modeļa izstrādes nepieciešamību pamato arī fakts, ka komerciālajiem robotiem enerģijas modelēšana nav pieejama nevienā no pazīstamākajām ražošanas simulācijas datorprogrammām (piem. Delmia, Siemens PLM, Kuka.Sim, RobotStudio, u.c.).



Att. 2.1: Robota sistēmas modeļa blokhēma

Šajā nodaļā piedāvāts robota sistēmas modelis, kas iekļauj manipulatora dinamikas modeli, elektriskās piedziņas un kontrolera apakšmodeļus (Att.2.1). Modelēt iespējams robotu programmas no reālām iekārtām, un ģenerētas tiek *reālistiskas robotu trajektorijas* izmantojot servera aplikāciju kopā ar robota ražotāja RCS moduli (balstīts uz RRS1 standartu[1]). Izejas dati ir kustības profils katrai locītavai, trajektorija darba telpā, motoru griezes momenti, kontrolera līdzsprieguma posma spriegums un strāva, kā arī kopējā

jauda ieskaitot dažādus statistiskos patērētājus. Eksperimentāli validēšanas rezultāti parāda relatīvo kļūdu zem 3.7%.

Modelis ļauj identificēt svarīgus parametrus optimizācijas metodēm, kas sniegtas turpmākajās nodaļās.

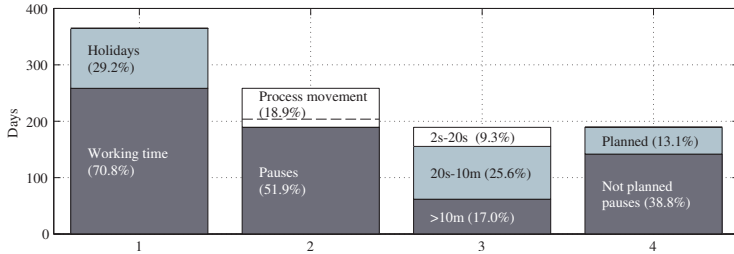
3 Ražošanas analīze un robota sistēmas uzlabojumi

Šajā nodaļā piedāvātas un apkopotas optimizācijas metodes, kas nav tieši saistītas ar kustību vadības plānošanu vai rekuperatīvo enerģiju. Nodaļa sākas ar reālas ražošanas analīzi: att.3.1 uz laika un enerģijas skalas attēlotas dažāda tipa pauzes un ražošanas pārtraukumi. Redzams *Pareto* princips: kustībā robots pavada līdz 19% laika, taču šajā fāzē tiek patērēts 68% enerģijas. Detalizētāki analīzes rezultāti parāda arī robotizētas ražošanas paužu sīkāku sadalījumu. Šī pētījuma rezultātu ņemšana vērā pie konkrētas metodes sagaidāmā rezultāta aprēķina ļauj atšķirt teorētiskus priekšlikumus no ekonomiski pamatotiem.

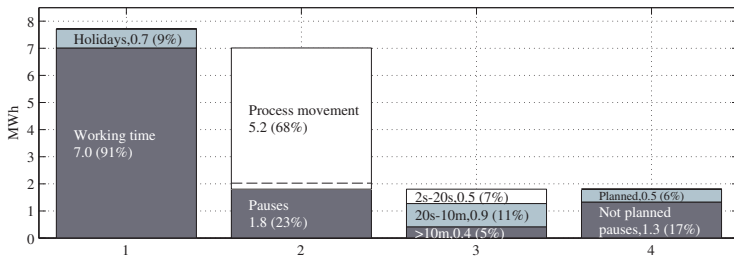
Liels skaits uzlabojumu iespējams realizēt agrīnā ražošanas plānošanas stadijā. Šajā nodaļā apkopotie priekšlikumi sadalāmi grupās:

- kontrolera *gaidīšanas* režīmu izmantošana,
- inteliģenta statisko bremžu izmantošana,
- energoefektīva robota darba telpas atpazīšana,
- manipulatora izvēle atbilstoši veicamajam uzdevumam.

Demonstrējot metināšanas procesu, nodaļā tiek definēta *references programma* ar ilgumu $t_{appl} = 34.2s$, no kuras $t_{stand} = 11.3s$ aizņem gaidīšanas pauzes, bet $t_{wld} = 4.7s$



(a) Vidējais ražošanas paužu sadalījums uz 1 robotu

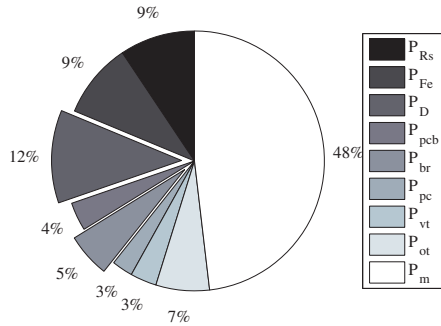


(b) Vidējais enerģijas sadalījums pa ražošanas pauzēm

Att. 3.1: Statistiski vidējā robota laika un enerģijas patēriņš attiecīgos blokos auto virsbūvju ražotnē (Pieņēmumi: $P_{mov} = 3150W$, $P_{stand} = 650W$, $P_{cab} = 275W$)

ir metināšanas procesu kopējais laiks. Att.3.2 sniegta zudumu analīze šīs programmas laikā. Divi izceltie lielumi ir īpašas nozīmes: P_D un P_{br} apzīmē attiecīgi zudumu proporciju uz bremzēšanas prettestības un statistiskajām bremzēm.

Turpmāk sniegti priekšlikumi efektīvai bremžu izmantošanai: optimāls statisko bremžu aizvēršanās aizkaves laiks pēc kustības, to aizvēršana ar programmas kodu un jaudas samazinājums robota kustības laikā. Kā pārējos analītiskos pētījumus un modeļošanas rezultātus var minēt efektīvas



Att. 3.2: Jaudas sadalījums pie references programmas, $\bar{P}_{ac} = 2293W$

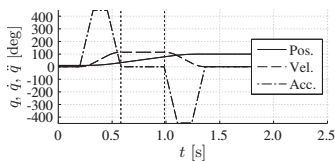
darba telpas izvēle, robotu salīdzināšana pēc to energoefektivitātes, kas balstās uz 2.nodaļā aprakstītā modeļa paplašināšanu. Pielietojot visas šajā nodaļā aprakstītās metodes (kurām šāds aprēķins iespējams), kopējais gada enerģijas samazinājums uz robotu ir 17%.

4 Kustību vadības optimizācija

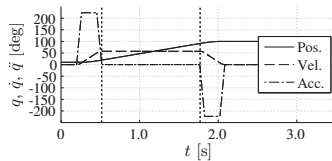
Dažādu robota manipulatora trajektoriju ģenerēšanas algoritmu izvērtēšana parāda, ka vienmēr jāatrod kompromiss starp enerģijas patēriņu šajā kustībā un tās izpildes laiku. Šajā nodaļā matemātiski izanalizēti 13 dažādi kustības algoritmi un praktiski īstenoti references robota manipulatoram. Galvenie secinājumi ir:

- Lielākais enerģijas patēriņš vienas kustības laikā galvenokārt ir kustības paātrinājuma un palēninājuma dēļ, turklāt palēninājumā galvenie zudumi ir uz bremsēšanas pretestības piedziņas sistēmas līdzstrāvas posmā.

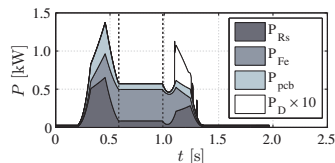
- *Pilnīgi sinhronizētām* trajektorijām parasti ir mazāki maksimālie paātrinājumi, kas noved pie mazāka enerģijas patēriņa kā citām trajektorijām.
- Trajektorijas ģenerēšanas algoritma maiņu ir sarežģīti ieviest komerciālos robotu kontroleros trūkstošās pieejas (attiecīga programmas interfeisa) dēļ.
- Paātrinājuma un ātruma vērtību iestatīšana katrai kustībai vai to kopumam atsevišķi ir praktiska metode tuvinātai optimālās enerģijas patēriņa atrašanai.



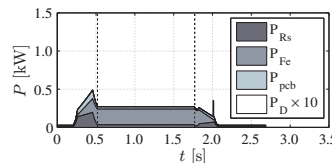
(a) Kustību profils, $\dot{q}_{i,max}$, $\ddot{q}_{i,max}$



(b) Kustību profils, $1/2\dot{q}_{i,max}$, $1/2\ddot{q}_{i,max}$



(c) Zudumi pie $\dot{q}_{i,max}$, $\ddot{q}_{i,max}$



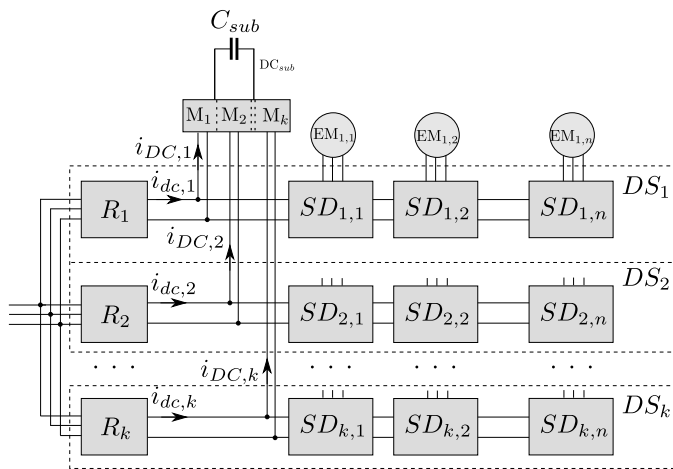
(d) Zudumi pie $1/2\dot{q}_{i,max}$, $1/2\ddot{q}_{i,max}$

Att. 4.1: No kustību profila atkarīgie sistēmas zudumi

Trajektorijas mērogošanas paņēmieni- vienkāršota paātrinājuma un ātruma proporcionāla maiņa, izmantots, lai demonstrētu pielietojumu reālas četru robotu šūnas virtuālā modelī. Simulācijas rezultāti parāda enerģijas sama-

zinājumu 7.3% apmērā no kopējā robotu šūnas patēriņa. Ņemot vērā robotu savstarpējos bloķēšanas un gaidīšanas signālus (šūnas iekšējās loģikas dēļ), tiek iegūti daudz precīzāki rezultāti kā līdzīgos akadēmiskos pētījumos. *Trajektorijas mērogošanas* metode ir praktiska un to ir salīdzinoši vienkārši īstenot ar pieejamām kustību vadības komandām komerciālos robotu kontroleros, kā, piemēram, β faktors un statisko bremžu aizkaves laiks T_b .

5 Rekuperatīvās enerģijas izmantošana



Att. 5.1: Blokskāme enerģijas apmaiņas jaudas pārveidotājam

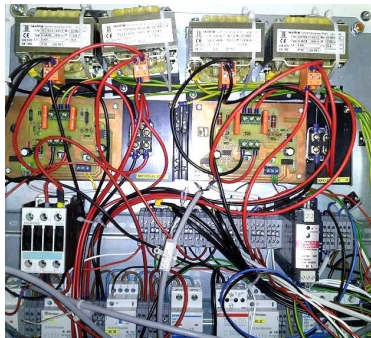
Dinamisko robota kustību dēļ- biežajiem paātrinājumiem un palēninājumiem, ļoti liela daļa enerģijas tiek zaudēta uz bremzēšanas pretestības kontrolera piedziņas sistēmas līdzsprieguma posmā. Šī nodaļa analizē alternatīvas un sniedz priekšlikumus šīs enerģijas otrreizējai izmantoša-

nai. Tiek izšķirti trīs varianti:

- līdzsprieguma posma maksimālā sprieguma palielināšana,
 - pasīvi enerģijas uzkrājēji,
 - enerģijas apmaiņa starp vairākiem robotu kontrolieriem,
- no kuriem visi izanalizēti ar datormodeļa palīdzību, bet pēdējie divi arī eksperimentāli pārbaudīti ar KUKA tipa robotiem. Kaut arī pasīvie enerģijas uzkrājēji tehniski savu funkcionalitāti pierāda, ņemot vērā to salīdzinoši augstās izmaksas, pie šodienas elektroenerģijas cenām industriālajā robotikā to ieviešana vēl nav ekonomiska.



(a) Robota šūna ar izmantoto mēraparatūru



(b) Jaudas pārveidotāji

Att. 5.2: Izstrādātā enerģijas apmaiņas sistēma

Att.5.1 redzama principiālā blokshēma jaudas pārveidotāju grupai: katra robota kontrolera DS_i līdzsprieguma posms savienots (starp taisngriezi R_i un invertoriem SD_1 ,

..., $SD_{i,n}$) ar jaudas pārveidotāja moduli M_i . Ja kāda robota kontrolerī rodas enerģijas pārpalikums (kustības rekuperatīvā bremzēšana) attiecīgais jaudas pārveidotājs īslai cīgi saglabā enerģiju vienā centrālā pasīvā uzkrājējā C_{sub} . Tātad šajā sistēmā nepieciešams vairs tikai viens enerģijas uzkrājējs uz teorētiski neierobežota skaita robotiem. Nav nepieciešama robota kontroleru pārbūve, taču ir nepieciešama atsevišķu sistēmas datu komunikācija ar robota kontroleri.

Nodaļas zinātniskā novitāte ir trīs evolucionāri attīstītas jaudas pārveidotāju shēmas, kas arī eksperimentāli ir pārbaudītas- att.5.2 redzami jaudas pārveidotāju moduļi diviem robotiem un eksperimenta stends. References manipulators ar references programmu kopā ar izstrādāto sistēmu spēj ietaupīt 8.3% enerģijas gadā.

Secinājumi

Darbā sniegti priekšlikumi energoefektivitātes palielināšanai augsti automatizētās ražošanas iekārtās, kurās tiek izmantoti industriālie robotu manipulatori. Kopumā rasti 14 priekšlikumi, kurus var iedalīt četrās grupās:

- dažādu režīmu izmantošana ražošanas pauzēs gan robota kontrolerī, gan augstāka līmeņa vadības ierīcēs,
- robotu šūnas inženiertehniskais dizains agrā tās plānošanas stadijā,
- robota kustības vadības optimizācija,
- efektīva rekuperatīvās enerģijas izmantošana.

Turpmāk apkopotī galvenie darba secinājumi un rezultāti.

Teorētiskie rezultāti ¹

- Izstrādāts robota sistēmas modelis, kas ir balstīts uz reālām robotu trajektorijām, ņemot vērā gan manipulatora mehāniskos zudumus, gan arī citus zudumus robota kontrolerī.
- Detalizēta analīze robotu pielietojumam autoindustrijā no energoefektivitātes aspekta atklāj, kādas pauzes ir tipiskas virsbūvju ražošanā, kur nodarbināti visvairāk robotu.
- Katru paužu grupu var izmantot, lai iestatītu robota kontroleri attiecīgā *gaidīšanas* režīmā. Taču ne vienmēr pauzes ilgums ir zināms iepriekš, tādēļ ir nepieciešamība pēc augstāka līmeņa vadības un simulācijas sistēmas.
- Detalizēta jaudas zudumu analīze references program-

¹Kārtots pēc secības darbā.

mai atklāj, kuras komponentes robota sistēmā ir *vis-energoietilpīgākās*.

- Veikta analīze attiecībai starp enerģijas ietaupījumiem un statisko bremžu ieslēgšanās aizkaves laiku.
- Metodika vairāku robotu enerģētiskai salīdzināšanai.
- Sākta starptautiska diskusija par standartizētu manipulatoru salīdzināšanu pēc energoefektivitātes kritērijiem. Modelēšanas rezultāti parāda, ka robotu iedalīšanai pēc to energoefektivitātes bez citu parametru ņemšanas vērā (celtspēja, darba telpa, ātrums, funkcionalitāte) ir maz praktiskās nozīmes.
- Priekšlikumi energoefektīvai robota statisko bremžu pielietošanai.
- Darba telpas analīze parāda, ka tipiski aizņemtā robota darba telpa tikai daļēji sakrīt ar robota energoefektīvākajām pozīcijām.
- Manipulatora darba instrumenta (piem. metināšanas iekārta, satvērēji) masas samazināšana un/vai gravitācijas centra nobīde tuvāk robota *plaukstai* ievērojami samazina tā kopējo enerģijas nepieciešamību.
- Dažādu trajektoriju ģenerēšanas algoritmu (kustību profilu) analīze parāda, ka atsevišķos gadījumos profila maiņa noved pie manipulatora kustības enerģijas samazinājuma. Trūkstošās programmatūras saskarnes dēļ, šādus algoritmus ir sarežģīti īstenot komerciālos robotu kontrolieros.
- Eksperimentālie un modelēšanas rezultāti parāda, ka robota sistēmas zudumi rodas galvenokārt strauju paātri-

nājumu un palēninājumu dēļ, turklāt vislielākā zudumu proporcija ir uz bremsēšanas pretestības.

- Pie vispārējas manipulatora ātruma samazināšanas jāņem vērā, ka enerģijas samazinājums ir U formā: kopējais patēriņš sarūk tikai līdz kādai specifiskai ātruma vērtībai, pēc kuras tas atkal pieaug statisko zudumu dēļ. Reālas robota šūnas datorsimulācija parāda, ka ietaupījums sasniedz 7.3% no kopējās šūnas patēriņa, ja izvēlēti optimālie kustību izpildes ātrumi.
- Simulācijas rezultāti parāda, ka piedziņas līdzsprieguma posma maksimālā sprieguma palielināšanai ir pozitīvs efekts.
- Simulācijas rezultāti parāda, ka pasīva enerģijas uzkrājēja (piem., kondensatoru) izmantošana līdzsprieguma posmā ļauj uzkrāt visu manipulatora rekuperatīvo enerģiju. Taču katra nākamā uzkrājamā enerģijas vienība ir dārgāka kā iepriekšējā, izteikti pīķveida un īslaicīgu rekuperācijas jaudas impulsu dēļ.
- Rekuperatīvās enerģijas apmaiņas sistēmai, savienojot kontroleru līdzsprieguma posmus ar jaudas pārveidotāju, nepieciešams daudz mazāks enerģijas uzkrājējs rēķinot uz vienu robotu.

Praktiskie rezultāti ²

- Piedāvātas trīs topoloģijas jaudas pārveidotājam, lai īstenotu enerģijas apmaiņu starp robotu kontroleriem. Izgatavotās eksperimentālās izstrādes pierāda savu funk-

²Svarīguma secībā pēc autora ieskatiem.

cionalitāti un spēj ietaupīt visu rekuperatīvo enerģiju bez nepieciešamības modificēt pašu robota kontroleri.

- Statisko bremžu ieslēgšana ar robota programmas koda palīdzību īstenota uz KR C2 tipa kontrolera. Paņēmiens iesniegts sērijveida realizācijai KR C4 kontrolerī (abi KUKA roboti).
- Eksperimentālajās pārbaudēs secināts, ka robota sistēmas modeļa relatīvā kļūda ir zem 3.7%.
- Izstrādāts modelis vairāku robotu salīdzināšanai (pēc to energopatēriņa, izpildes laika, u.c. parametriem), kas realizēts datorprogrammas formā.
- Simulācijas principi iesniegti īstenošanai starptautiskajā RRS1 standartā [1].
- Eksperimentālie rezultāti parāda augstus enerģijas ietaupījumus ar pasīvām enerģijas uzkrāšanas sistēmām pie dažādiem robotu uzdevumiem.
- Sniegts priekšlikums statisko bremžu enerģijas samazinājumam robota kustības laikā.

Realizējot visus praktiskos priekšlikumus, vidēji iespējams ietaupīt 30% enerģijas patēriņa uz vienu robotu tipiskā vieglo pasažieru auto virsbūvju ražotnē.

Darba turpinājums

Vairums patērētāju ražošanas iekārtās šodien izmanto līdzstrāvu vai kādā to sistēmas posmā tā tiek izmantota. *Nākotnes ražotnei* jābūt balstītai uz efektīvākas formas elektroapgādi: maīnstrāvas vietā kā standartu izmantojot līdzstrāvu visā ražošanas iekārtā, tiktu panākta ne tikai

augstāka energoefektivitāte, bet arī būtu nepieciešams mazāk taisngriežu, samazinātos tīkla kvalitātes un kompensācijas problēmas, globāli ražotāji nebūtu atkarīgi no dažādiem ārējā tīkla parametriem dažādās valstīs (frekvence, spriegums), kā arī būtu vienkāršota atjaunojamo energoresursu tieša izmantošana mazās ražotnēs. *Nākotnes ražotnei* jābūt arī gana inteliģentai, kuras ražošanas jaudu var automātiski balansēt ar tās resursu pieejamību un izmaksām reālā laikā.

Šādas vīzijas īstenošanai nepieciešami kompleksi simulācijas modeļi, kas ļautu paredzēt procesus lielā apjomā un fleksiblas vairāku līmeņu vadības sistēmas, lai to realizētu. Turpmākais darbs uzsākts Eiropas Savienības finansētā zinātnes projekta formā “*Automation and Robotics for European Sustainable Manufacturing*” [24] (AREUS).

Literatūra

- [1] *Realistic Robot Simulation*, RRS-Interface Maintenance Group Std., Rev. 1.3, Sep 1997.
- [2] J.Engelmann, “Methoden und Werkzeuge zur Planung und Gestaltung energieeffizienterFabriken,” Ph.D. dissertation, TU Chemnitz, 2008.
- [3] R. M. Murray, Z. Li, and S. S. Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, 1994.
- [4] J. Denavit and R. S. Hartenberg, “A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices,” in *J. Appl. Mechanics*, vol. 22, 1955, pp. 215–221.
- [5] J. D. Carlson, J. C. Holzheimer, D. F. Leroy, R. H. Marjoram, and D. R. Prindle, “Magnetorheological fluid brake,” U.S. Patent WO1998000649 A1, 1998.
- [6] D. Kugelmann, “Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern,” Ph.D. dissertation, Technische Universität München, 1999.
- [7] A. Vergnano, C. Thorstensson, B. Lennartson, P. Falkman, M. Pellicciari, C. Yuan, S. Biller, and F. Leali, “Embedding detailed robot energy optimization into high-level scheduling,” *IEEE CASE2010 Int. Conf on Automation Science and Engineering*, pp. 386–392, 2010.
- [8] A.Heim and O.v.Stryk, “Trajectory Optimization of Industrial Robots with Application to Computer-Aided Robotics and Robot Controllers,” in *Optimization*, vol. 47, 2000, pp. 407–420.
- [9] S. Moon and S. Ahmad, “Time scaling of trajectories for cooperative multi-robot systems,” in *Decision and Control, 1990., Proceedings of the 29th IEEE Conference on*, 1990, pp. 1120–1125 vol.2.
- [10] A. Wijenayake, T. Gilmore, R. Lukaszewski, D. Anderson, and G. Waltersdorf, “Modeling and analysis of shared/common DC bus operation of AC drives.” in *Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97., Conference Record of the 1997 IEEE*, vol. 1, Oct. 1997, pp. 599 – 604.
- [11] P. Karlsson, “DC Distributed Power Systems Analysis, Design and Control for a RenewableEnergy System,” Ph.D. dissertation, Lund University, 2002.

- [12] Allen-Bradley, *PowerFlex AC Drives in Common Bus Configurations*, Rockwell Automation, 2011.
- [13] M. Baumann and J. Kolar, "Parallel Connection of Two Three-Phase Three-Switch Buck-Type Unity-Power-Factor Rectifier Systems With DC-Link Current Balancing," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 6, pp. 3042–3053, 2007.
- [14] G. Terorde, J. Driesen, and R. Belmans, "Drive DC bus voltage control during power interruptions using kinetic energy recovery," in *Harmonics and Quality of Power, 2002. 10th International Conference on*, vol. 1, oct. 2002, pp. 243 – 247 vol.1.
- [15] R. W. D. Doncker, "Future DC Grid Technology for more Decentralized Power Production and Renewable Power Supplies," in *IEEE PEDG2012*, 2012.
- [16] "Strompreise für die Industrie in ausgewählten europäischen Ländern im Jahr 2011," Statista GmbH, January 2012. [Online]. Available: <http://de.statista.com/>
- [17] *Index zur Entwicklung der Industrie-Strompreise*, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, June 2011, Energiemarkt Deutschland.
- [18] *DIN EN ISO 50001*, Deutsches Institut Für Normung Std., 2012.
- [19] "Umweltmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung DIN EN ISO 14001," Umwelt Gutachter Ausschuss, Tech. Rep., 10 2011.
- [20] *Directive 2009 125 EC*, Official Journal of the European Union, European Parliament Std., 2009.
- [21] "Werk Sindelfingen," Internal Documentation, Daimler AG, 2012.
- [22] *Daimler Nachhaltigkeitsbericht 2011*, Daimler AG, 2011. [Online]. Available: <http://nachhaltigkeit.daimler.com>
- [23] "VDE-Trendreport 2013, Elektro- und Informationstechnik," Vde Verband Der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik E.v., Tech. Rep., 2013.
- [24] "AREUS: Automation and Robotics for European Sustainable manufacturing," European Commission, Sept. 2013. [Online]. Available: http://cordis.europa.eu/projects/rcn/108857_en.html