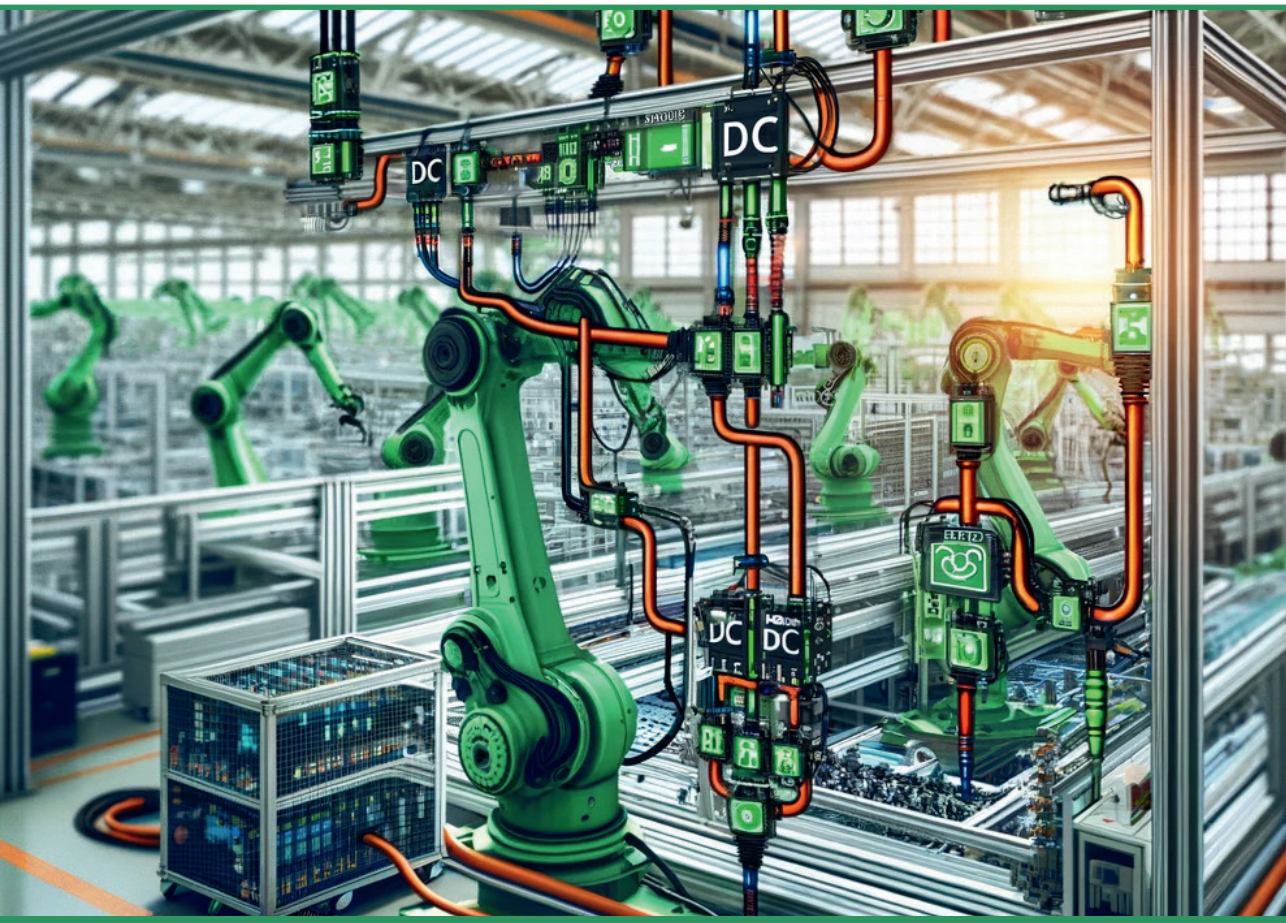
RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Armands Šenfelds

ROBOTIZĒTAS RAŽOŠANAS LĪDZSTRĀVAS MIKROTĪKLU IZPĒTE UN IZSTRĀDE

Promocijas darba kopsavilkums



RTU Izdevniecība
Rīga 2023

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Armands Šenfelds
Doktora studiju programmas "Elektrotehnoloģiju datorvadība" doktorants

ROBOTIZĒTAS RAŽOŠANAS LĪDZSTRĀVAS MIKROTĪKLU IZPĒTE UN IZSTRĀDE

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Akadēmiķis, profesors *Dr. habil. sc. ing.*
LEONĪDS RIBICKIS

RTU Izdevniecība
Rīga 2023

Šenfelds, A. Robotizētas ražošanas līdzstrāvas mikrotīklu izpēte un izstrāde. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. 73 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-14" 2023. gada 4. oktobra lēmumu, protokols Nr. 04030-9.12.2/6.

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas "Izaugsme un nodarbinātība" 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa "Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās" projektā Nr. 8.2.2.0/20/I/008 "Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās".

NACIONĀLAIS ATTĪSTĪBAS PLĀNS 2020

EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Sociālais fonds

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

1862
RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Vāka attēls ģenerēts ar *openAI DALL-E/ChatGPT 4.0*.

https://doi.org/10.7250/9789934370205
ISBN 978-9934-37-020-5 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 29. decembrī plkst. 11.30 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 212. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors, vadošais pētnieks *Dr. sc. ing.* Jānis Zaķis,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr. Ir. Rik W. De Doncker*,
RWTH Aachen universitāte, Vācija

Vadošais pētnieks *Ph. D. Toomas Vaimann*,
Tallinas Tehniskā universitāte, Igaunija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Armands Šenfelds ……. (paraksts)

Datums: ……

Promocijas darbs ir sagatavots kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa. Tajā ir kopsavilkums, 19 publikācijas un viens patents. Publikācijas uzrakstītas angļu valodā, to kopējais apjoms ir 200 lpp.

PATEICĪBAS

Vislielākais paldies promocijas darba vadītājam akadēmiķim, profesoram *Dr. habil. sc. ing.* Leonīdam Ribickim par veltīto laiku, motivēšanu un atbalstu darba tapšanai!

Paldies arī visiem RTU Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūta darbiniekiem, jo īpaši profesoram Ivaram Raņķim, profesoram Pēterim Apsem-Apsītim, asociētajam profesoram Dāvim Meikem ar pieredzē balstītiem padomiem darba tapšanas laikā, pētniekiem Ansim Avotiņam, Mārcim Priedītim, Genādijam Zaļeskim eksperimentālo pētījumu posmā un saviem studentiem Artūram Pauguram un Oskaram Bormanim, kā arī pētniekam Kristapam Vītolam par motivējošām konsultācijām un laboratorijas tehnisko līdzekļu lielisku organizāciju!

Darba izstrādes laikā nenovērtējams ir bijis ģimenes un vecāku man dotais laiks un atbalsts, par to – īpašs paldies!

SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS 6
Tēmas aktualitāte 6
Galvenās hipotēzes, mērķi un uzdevumi 6
Promocijas darba pētījuma līdzekļi un metodes 7
Zinātniskās novitātes 7
Praktiskās novitātes 8
Darba praktiskā nozīme 8
Darba struktūra un apjoms 8
Darba aprobācija 8
IEVADS 11
1. MAIŅSTRĀVAS INDUSTRIĀLO ROBOTU RAKSTURĪGO ELEKTRISKĀS PIEDZIŅAS SISTĒMU ANALĪZE 12
2. MAIŅSTRĀVAS INDUSTRIĀLO ROBOTU REGULĒJAMU PIEDZIŅU AR TRADICIONĀLIEM FREKVENCES PĀRVEIDOTĀJIEM IZPĒTE UN JAUNU PĀRVEIDOTĀJU SISTĒMU IZSTRĀDE 20
3. LĪDZSTRĀVAS INDUSTRIĀLO ROBOTU DARBĪBAS ANALĪZE UN LIETOJUMA IZPĒTE RAŽOŠANAS MIKROTĪKLĀ LABORATORIJAS MĒROGĀ 32
4. LĪDZSTRĀVAS MIKROTĪKLA EKSPERIMENTĀLĀ PĀRBAUDE LABORATORIJĀ UN ROBOTIZĒTĀ AUTOMOBIĻU RAŽOŠANAS IECIRKNĪ 50
Robotizētas ražošanas līdzstrāvas mikrotīkla ieviešana automobiļu ražošanai 50
Laboratorijas mēroga robotizētas ražošanas *DC* tīkls 63
SECINĀJUMI 71
LITERATŪRAS SARAKSTS 72

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Automatizētas ražošanas attīstības tendences ir cieši saistītas ar industriālo robotu iekārtu lietojumu. Saskaņā ar Starptautiskās Robotikas federācijas (*International Federation of Robotics*) veikto izpēti ikgadējais jaunu uzstādītu robotu skaits pasaulē sasniedz vēsturiski augstākos rādītājus un pārsniedz pusmiljonu vienību. Tiek lēsts, ka kopējais industriālo robotu iekārtu skaits pasaulē 2022. gadā ir 3 903 633 vienības un ikgadējo pieaugumu 12 % [1]. Apskatot Eiropas reģionu, tiek lēsts, ka kopējais robotu skaits ir 728 390 vienības ar stabilu ikgadējā pieauguma tendenci 6 % [2]. Ņemot vērā to, ka modernu un robotizētu ražošanas procesu nodrošināšanai galvenais enerģijas avots ir elektriskā enerģija, jautājums par energoefektīvu elektroapgādes risinājumu nepieciešamību saglabā savu aktualitāti. Kontekstā ar iespējamu ražošanas procesu pārvietošanu no Āzijas uz Eiropas reģionu un augstākām elektroenerģijas izmaksām iniciatīvas optimālu enerģijas izmantošanas tehnoloģiju ieviešanai ir saistītas ar tiešu saimniecisko ieguvumu. Arī sabiedrības vēlme un apņēmība mainīt esošo enerģijas avotu struktūru un virzīties klimatneitrālu risinājumu virzienā definē jaunus sadarbības modeļus un pieprasa elastīgāku pieeju, veidojot elektriskās enerģijas vadības sistēmas ražošanas vajadzībām. Saskaņā ar Eiropas Komisijas definēto ceļakarti *Green Deal* [3] ar mērķi 2050. gadā kļūt par klimatneitrālu kontinentu ir radītas programmas, kas veicina energosistēmu pārmaiņas ražošanas sektorā [4]. Jaunu atjaunojamo enerģijas avotu kombinācijas ar enerģijas uzkrāšanu, elektromobilitātes un efektīvu apgaismojuma un apkures patēriņu veicina inženieru interesi, apsverot esošo maiņstrāvas infrastruktūras kombinēšanu vai aizstāšanu ar līdzstrāvas elektroenerģijas pārvades tehnoloģiju [5]. Šajā promocijas darbā izpētīti un demonstrēti risinājumi energoefektīvai un elastīgai elektriskās enerģijas izmantošanai robotizētas ražošanas apstākļos, ieviešot līdzstrāvas elektriskās enerģijas pārvades elementus.

Galvenās hipotēzes, mērķi un uzdevumi

Hipotēzes

1. Industriālu robotu lietojumiem iespējama energoefektivitātes uzlabošana ar elektriskās enerģijas atgūšanas un atkārtotas izmantošanas paņēmienu.
2. Līdzstrāvas tipa elektroapgādes risinājumi ir piemēroti dinamisku enerģijas apmaiņas procesu realizācijai.
3. Līdzstrāvas mikrotīkla lietojums ir piemērots energoefektīvas robotizētas ražošanas sistēmu ieviešanai.

Mērķis

1. Analizēt esošas industriālo robotu iekārtas kā tipveida elektriskas piedziņas sistēmas un izpētīt jaunas metodes lietderīgai enerģijas atgūšanai, kas iespējama robota manipulatora kustības uzdevumu realizācijas procesā.

2. Izpētīt jaunu robotizētu ražošanas iekārtu energoefektivitātes un funkcionalitātes parametru uzlabojumus, izmantojot līdzstrāvas tipa elektroapgādes risinājumus un mezglus.

Darba mērķu sasniegšanai tiek definēti vairāki **uzdevumi**.

- Analizēt tipisku maiņstrāvas robota piedziņu sistēmu darbību, noteikt raksturīgos parametrus bremzēšanas enerģijas izkliedēšanas procesa vadībai.
- Izstrādāt esošu robotu piedziņas sistēmu modifikācijas risinājumu, bremzēšanas enerģijas atgūšanas, uzkrāšanas un pārdales funkcionalitātes nodrošināšanai vairāku robotu sistēmās.
- Izveidot lokāla līdzsprieguma mikrotīkla elektroapgādes risinājuma piemērus pilnvērtīgai robotizēta ražošanas procesa energoapgādei laboratorijas iekārtu un matemātisku datormodeļu veidā.
- Veikt jaunu darbības režīmu izpēti un svarīgāko mezglu efektivitātes analīzi līdzstrāvas mikrotīklā.

Promocijas darba pētījuma līdzekļi un metodes

Elektrisko sistēmu analīzei un jaunu risinājumu izstrādei un pārbaudei lietotas vairākas metodes. Elektrisko mērījumu un darbības režīmu raksturojošo datu ieguvei izmantoti *Fluke*, *N4L* jaudas analizatoru un mērīšanas iekārtas, kā arī laboratorijas osciloskopi. Datu ierakstīšanai izmantota *DataTranslation universala DAQ* platforma, pievienojot atbilstošus strāvas un sprieguma mērīšanas papildrīkus.
Matemātiska datu apstrāde un analīze veikta, izmantojot *Matlab* un *Excel* rīkus. Elektrisko shēmu un sistēmu fizikālai modelēšanai izmantoti *Simulink* un *LTSpice*, *Pspice* rīki. Spiesto plašu projektēšana veikta, izmantojot *Eagle* un *OrCAD* programmatūru. Iekārtu montāža un prototipu dizains veidots, izmantojot *Solidworks* un *FreeCAD* rīkus.
Eksperimentu veikšanai iekārtota laboratorijas telpa un integrēta speciāli veidota jaudas plūsmu mērīšanas iekārta laikā sinhronizētiem datiem, kā arī izstrādāti vadāmas līdzstrāvas jaudas un slodzes stendi.

Zinātniskās novitātes

- Jaunu starpsavienojumu spēka elektronikas topoloģiju izstrāde industriālo robotu un centralizēta uzkrājēja sistēmām.
- Jauna risinājuma izstrāde elektrisko iekārtu dinamisku jaudas profilu fizikālai atkārtošanai līdzstrāvas tīklā laboratorijas mērogā.
- Izstrādāts un eksperimentāli pārbaudīts industriālu robotu piedziņu elektriskās sistēmas un to starpsavienojumu datormodelis.
- Veikta ekvivalentā datormodeļa izstrāde līdzstrāvas mikrotīkla centralizētam *AC/DC* pārveidotājam.

- Izstrādāts analīzes paņēmiens laikā ciklisku procesu veikšanai nepieciešamās jaudas un strāvas parametru iegūšanai elektriskās sistēmas mērogošanas un aprīkojuma izvēles vajadzībām.

Praktiskās novitātes

Izveidota un patentēta industriālo robotu un centralizēta uzkrājēja starpsavienojuma topoloģija un iekārtas prototipi modulāras enerģijas atgūšanas sistēmas izveidei.
Iegūta detalizēta un laikā sinhronizēta elektriskās enerģijas plūsmu mērījumu datu kopa industriālā līdzstrāvas mikrotīklā ar 13 mērīšanas punktiem.
Veikta līdzstrāvas mikrotīkla jaudas plūsmu analīze un atgūtās enerģijas apjomu un lietderības noteikšana reālā ražošanas procesā.
Izveidotas jaunas eksperimentālas testēšanas iekārtas dažādu industriālo patērētāju ekvivalento jaudas profilu emulēšanai reālā laikā līdzstrāvas tīklā un saistīto efektu izpētei.

Darba praktiskā nozīme

Veikta eksperimentāla analīze reālā līdzsprieguma mikrotīklā, tās rezultāti apstiprina hipotēzi par atgūtās enerģijas atkārtotas izmantošanas iespējamību.
Izveidota līdzsprieguma mikrotīkla demonstrācijas un eksperimentālas pārbaudes sistēma laboratorijas mērogā.
Darba gaitā iegūtas padziļinātas zināšanas par līdzstrāvas mikrotīklu ieviešanu ražošanas vajadzībām un industriālu robotu sistēmu elektrisko uzbūvi.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs sagatavots kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa par līdzstrāvas elektrosistēmu un saistīto elementu lietojumu industriālo robotu iekārtu darbības uzlabošanai. Darbs organizēts četrās nodaļās, sākot ar esošu industriālu robotu elektrisko piedziņas sistēmu izpēti, to modifikāciju izpēti ar līdzstrāvas starpsavienojumu elementiem un noslēdzot ar pilna līdzstrāvas tipa mikrotīkla lietojumu un praktisku demonstrāciju robotizētai ražošanai.

Darba aprobācija

Promocijas darba kopsavilkumā apkopotas 19 publikācijas un viens patents. Promocijas darba rezultāti prezentēti 12 konferencēs un trīs zinātniskajos žurnālos.

1. Stupāns, A., Maksimkins, P., Šenfelds, A., Ribickis, L. Industrial Robot Energy Consumption Analysis for Gravity-induced Opposing Force Minimization. In: 2022 7th IEEE International Energy Conference (ENERGYCON 2022), Latvia, Riga, 9–12 May, 2022. Piscataway: IEEE, 2022, pp. 678–682. DOI: 10.1109/ENERGYCON53164.2022.9830240.
2. **Šenfelds, A**. Analysis of Motion Modelling Approaches for Industrial Robot Applications. In: *2019 IEEE 7th Workshop on Advances in Information, Electronic*

and Electrical Engineering (AIEEE 2019): Proceedings, Latvia, Liepāja, 15–16 November, 2019. Piscataway: IEEE, 2019, pp. 145–148. DOI: 10.1109/AIEEE48629.2019.8977112.

3. P. Apse-Apsitis, K. Vitols, E. Grinfogels, **A. Senfelds** and A. Avotins, "Electricity meter sensitivity and precision measurements and research on influencing factors for the meter measurements," in *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 7, no. 2, pp. 48–52. DOI: 10.1109/MEMC.2018.8410661.
4. **Šenfelds, A**., Avotiņš, A., Apse-Apsītis, P., Grīnfogels, E., Ribickis, L. Investigation on Power Quality Parameters of Industrial 600V DC Microgrid Hardware. In: *2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe): Proceedings*, Latvia, Rīga, 17–21 September, 2018. ISBN 978-907581528-3.
5. **Šenfelds, A**., Apse-Apsītis, P., Avotiņš, A., Ribickis, L., Hauf, D. Industrial DC Microgrid Analysis with Synchronous Multipoint Power Measurement Solution. In: *2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '17 ECCE Europe): Proceedings*, Poland, Warsaw, 11–14 September, 2017. Piscataway, NJ: IEEE, 2017, pp.3685-3690 DOI: 10.23919/EPE17ECCEEurope.2017.8099322.
6. Paugurs, A., **Šenfelds, A.**, Ribickis, L. Impact of Industrial Robot Tool Mass on Regenerative Energy. In: *Proceedings of 19th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'17 ECCE Europe*, Poland, Warsaw, 11–14 September, 2017. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 1–6. DOI: 10.23919/EPE17ECCEEurope.2017.8099185.
7. Grēbers, R., Gadaleta, M., Paugurs, A., **Šenfelds, A**., Avotiņš, A., Pellicciari, M. Analysis of the Energy Consumption of a Novel DC Power Supplied Industrial Robot. *Procedia Manufacturing*, 2017, Vol. 11, pp. 311–318. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.111.
8. **Šenfelds, A**., Bormanis, O., Paugurs, A. Analytical Approach for Industrial Microgrid Infeed Peak Power Dimensioning. In: *2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2016): Proceedings*, Latvia, Riga, 13-14 October, 2016. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, pp. 328–331. DOI: 10.1109/RTUCON.2016.7763140.
9. **Šenfelds, A.**, Bormanis, O., Paugurs, A. Modelling of AC/DC Power Supply Unit for DC Microgrid. In: *Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE 2015) : Proceedings of the 2015 IEEE 3rd Workshop*, Latvia, Riga, 13–14 November, 2015. Piscataway: IEEE, 2015, pp. 81–84. DOI: 10.1109/AIEEE.2015.7367294.
10. **Šenfelds, A.** Analysis of Cyclic DC Load Currents for Intelligent Electrical Protection. In: *2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) : Proceedings*, Latvia, Rīga, 14–14 October, 2015. Riga: Riga Technical University, 2015, pp. 165–168. DOI: 10.1109/RTUCON.2015.7343162.
11. Paugurs, A., **Šenfelds, A**. Design of a Motor Drive System for Bidirectional DC Power Flow Control. In: 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Latvia, Riga, 14–14 October, 2015. Riga: 2015, pp. 265–268. DOI: 10.1109/RTUCON.2015.7343145.
12. **Šenfelds, A**., Vorobjovs, M., Meike, D., Bormanis, O. Power Smoothing Approach within Industrial DC Microgrid with Supercapacitor Storage for Robotic Manufacturing Application. In: 2015 IEEE International Conference on Automation

Science and Engineering (CASE 2015) : Automation for a Sustainable Future: Proceedings, Sweden, Gothenburg, 24–28 August, 2015. Piscataway: IEEE, 2015, pp. 1333–1338. DOI: 10.1109/CoASE.2015.7294283.

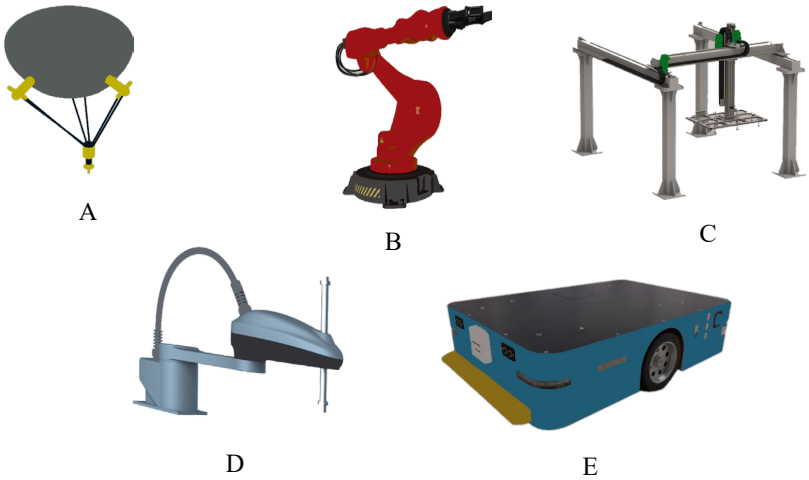
13. Apse-Apsītis, P., **Šenfelds, A.**, Avotiņš, A., Paugurs, A., Priedītis, M. Power Measurement and Data Logger with High-Resolution for Industrial DC-Grid Application. *Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), 2017 19th European Conference on*, 2015, Vol. 9, pp. 36–42. DOI: 10.1515/ecce-2015-0010.
14. **Šenfelds, A.**, Paugurs, A. Electrical Drive DC Link Power Flow Control with Adaptive Approach. In: *2014 55th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) : Proceedings*, Latvia, Riga, 14 October, 2014. Riga: RTU Press, 2014, pp. 30–33. DOI: 10.1109/RTUCON.2014.6998195.
15. Meike, D., **Šenfelds, A.**, Ribickis, L. Power Converter for DC Bus Sharing to Increase the Energy Efficiency in Drive Systems. In: IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society: Proceedings, Austria, Vienna, 10–13 November, 2013. Piscataway, NJ: IEEE, 2013, pp. 7197–7202. DOI: 10.1109/IECON.2013.6700329.
16. Priedītis, M., Meike, D., **Šenfelds, A.** Micro Controller Unit Process Time Sharing and Digital Filter Analysis in Industrial Energy Exchange System. Power and Electrical Engineering. Vol. 31, 2013, pp. 106–111. ISSN 14077345.
17. **Šenfelds, A.**, Meike, D. Industrial Shared DC Bus Application: Common Ground Current Observation. In: *54th International Scientific Conference of Riga Technical University. Section of Power and Electrical Engineering: Digest Book and Electronic Proceedings*, Latvia, Rīga, 14 October, 2013. Riga: RTU Press, 2013, pp. 11–13. ISBN 978-9934-10-470-1.
18. **Šenfelds, A.**, Raņķis, I. Common Node Circular Current Examination in Shared DC Bus Power System. In: *13th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering. Doctoral School of Energy and Geotechnology II"*, Estonia, Pärnu, 14–19 January, 2013. Pärnu: Elektriajam, 2013, pp. 85–88. ISBN 978-9985-69-054-3.
19. Raņķis, I., Meike, D., **Šenfelds, A.** Utilization of Regeneration Energy in Industrial Robots System. *Enerģētika un elektrotehnika*. Nr. 31, 2013, 95.–100. lpp ISSN 14077345.
20. Lebrecht, M., Meike, D., Rankis, I., **Senfelds, A.** Produktionsanordnung mit wenigstens zweiAntriebssystemen. German Patent DE 10 2013 010 462 A1, Patent publication date: 27.03.2014.

IEVADS

Mūsdienīgu ražošanas procesu, kas rada fiziskus produktus ar augstu pievienoto vērtību un ievērojamu vienību skaitu, ir grūti iedomāties bez augsti automatizētiem tehnoloģiskiem risinājumiem. Procesos, kas raksturīgi ar produktu tipu atkārtojamību, precīzas montāžas nosacījumiem, bīstamību cilvēkam un kaitīgiem apstākļiem tiek bieži lietotas industriālu robotu iekārtas. Industriāls robots ir kompleksa iekārta, kas nodrošina datora vadītu procesu ar elektromehāniskas sistēmas palīdzību un visbiežāk izmanto elektrisko enerģiju savai darbībai, kā arī iekļaujas plašākā ražošanas organizācijas un nepieciešamo materiālu un enerģijas apgādes sistēmā. Aktualitātes, kas saistītas ar ģeopolitisku procesu ietekmi un būtisku energoresursu cenu pieaugumu, ir veicinājušas nepieciešamību pēc jaunas pieejas, dažādojot enerģijas avotus, veicinot sistēmu elastību un efektīvu enerģijas galaizmantošanu, kam tiek veidoti veicinoši pasākumi [6]. Ņemot vērā apjomīgu procesu, kas saistīts ar jaunu tehnoloģiju ieviešanas ceļu no eksperimentāla prototipa līdz pilnībā definētam ikdienas lietojumam un saistīto standartu un normatīvu piemērošanu, ir izveidojušās vairākas fokusgrupas un inženieru apvienības, kā arī pētniecības projekti *AREUS* [7], *DC Industrie* [8], lai veicinātu līdzstrāvas sistēmu praktisku ieviešanu. Ņemot vērā to, ka līdzstrāvas sistēmu priekšrocības iespējams izmantot plašā lietojumu spektrā no liela mēroga enerģijas ražošanas un pārvades kā atkrastes vēja parkos un *HVDC* augstsprieguma līdzstrāvas pārvades līnijās līdz, piemēram, sadzīves iekārtu vienotam barošanas standartam *USB-C* [9], ir izveidojušās organizācijas ar orientētu lietojuma virzienu izpētes nodomu. Organizācijas *Current OS foundation* [10] un *DC Systems* [11] ir ieinteresētas plaša lietojuma zemsprieguma līdzstrāvas lietojumu veicināšanā un attiecīga sistēmas vadības un koordinācijas standarta ieviešanā. Pētniecības organizācija *FEN – Flexible Electrical Networks* [12] veicina līdzstrāvas sistēmu lietojumu ieviešanu sadales tīkla un pārvades piemērošanai nākotnes elastīgu energosistēmu ieviešanai. Promocijas darbā veiktās aktivitātes un lietojums lielā mērā saskan ar nesen izveidotās *ODCA – Open DC Alliance* darbības sfēru industriālu līdzstrāvas produktu un risinājumu izpētei. Ņemot vērā to, ka līdzstrāvas industriāli tīkli sāk attīstības posmu kā ilgtermiņa investīciju projekti praktiskam lietojumam [13], [14], saimnieciskais pamatojums un industrijas interese ir paredzama arī nākamajos gados. Promocijas darba izstrādes gaitā iegūtās zināšanas un pieredze ir izmantojama arī nacionāla mēroga nelielu līdzstrāvas sistēmu izveidē, ņemot vērā nepieciešamību sasniegt atjaunojamās enerģijas un efektīvas enerģijas izmantošanas mērķus saskaņā ar nacionālo klimata un enerģētikas plānu 2030. gadam [15].

1. MAIŅSTRĀVAS INDUSTRIĀLO ROBOTU RAKSTURĪGO ELEKTRISKĀS PIEDZIŅAS SISTĒMU ANALĪZE

Šajā nodaļā aplūkotas industriālo robotu kinemātisko sistēmu, kustību izpildes un elektriskās piedziņas sistēmu galvenās īpašības. Ar 1. nodaļu saistītas autora publikācijas 1 un 2. Industriālā robota iekārtas raksturīgo īpašību un funkcionalitātes apskatam, kas saistāms ar sekojošu elektriskās piedziņas sistēmu analīzi, ir lietderīgi apskatīt robotizētu iekārtu klasifikāciju. Kā visaptveroša metode robotizētu iekārtu klasifikācijai, tai skaitā lietojumiem ražošanā, tiek apskatīta Starptautiskās Robotikas federācijas piedāvātā metodika [16]. Saskaņā ar izvēlēto klasifikācijas kārtību iespējams izšķirt vairākus iekārtu tipus, kas attiecināmi uz robotizētas iekārtas ražošanas vajadzībām. Pirmkārt, iespējams iedalīt iekārtas pēc to novietojuma rakstura – stacionārās un mobilās.



1.1. att. Industriālo robotu tipi: A) delta; B) artikulēts manipulators; C) Dekarta (lineārs); D) *SCARA* tips; D) Autonoma platforma.

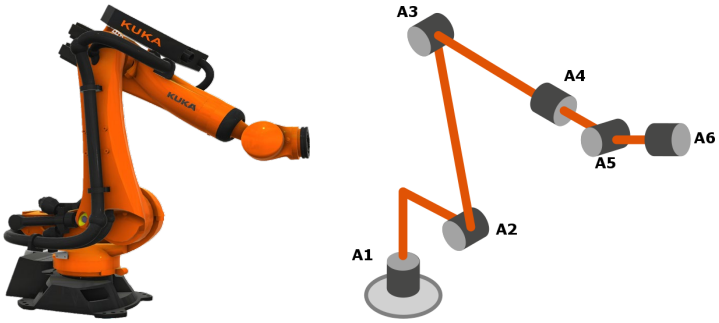
- Delta (paralēlais) robots veidots no bāzes platformas, kas ietver elektrisko piedziņu un darba platformas ar darba instrumentu, kas tiek vadīta ar trīs sviru palīdzību. Šādas konstrukcijas īpatnība ir iespēja samazināt kustīgās konstrukcijas svaru, iegūt ātru pārvietojumu un darba platformas precizitāti. Raksturīgie lietojuma virzieni ir iepakošana, precīza montāža un materiālu pārvietošana. Lietderīgā slodze masveidā ražotām iekārtām – līdz 15 kg [16].
- Artikulēts robots ir iekārta, kurā ir vismaz trīs rotējoši savienojumi un kinemātiskajai sistēmai piemīt plašas elastības iespējas, kas zināmā mērā būtu salīdzināmas ar cilvēka rokas kustības amplitūdu, sākot no pleca. Šādas sistēmas priekšrocības ir liela sniedzamība un darba telpa, salīdzinot ar paša robota izmēru. Artikulēts robots ir ļoti plaši izmantots kā tipveida manipulators tādos izteikti automatizētos ražošanas procesos kā autobūvē, metālapstrādē un elektroiekārtu ražošanā.

- Dekarta (lineāras) robota darba telpa ir taisnstūrveida formas apgabals telpā, ko iespējams aprakstīt ar Dekarta koordinātu sistēmā pieņemtām koordinātām X, Y, Z, kas savstarpēji novietotas perpendikulāri. Šāda tipa robotizēti manipulatori tiek plaši izmantoti dažāda veida *CNC* apstrādes iekārtās, pacēlāju un materiālu pārvietošanas uzdevumiem. Iekārtas konstrukcija ļauj realizēt salīdzinoši vienkāršu kustības vadību, taču ir ierobežojumi, piemēram, nespēja sasniegt darba telpu zem objektiem.
- *SCARA* tipa robotizēti manipulatori ir vēl viens manipulatora veids, kas salīdzināms ar cilvēka rokas darbības principu, taču ar ierobežotāku kustības elastību, galvenokārt izmantojot spēju saliekt roku elkoņa daļā. Gala instrumenta pārvietojums vertikālā virzienā tiek realizēts tikai ar pēdējo manipulatora posmā iebūvētu piedziņu, un pozicionēšana horizontālā plaknē tiek veikta ar divām paralēli novietotām rotējošām asīm. Arī šī manipulatora trūkums ir spēja veikt operācijas no augšpuses, taču iekārta plaši tiek izmantota automatizētos montāžas procesos, īpaši elektronikā.
- Autonomas platformas arī tiek uzskatītas par robotizētām iekārtām, kuru vadību var realizēt ar iebūvētu elementu (kameras, sensori) un apkārtējā vidē integrētu objektu (magnētiskās joslas, punkti, signāla vadi) palīdzību. Iekārtas tiek plaši lietotas automatizētā ražošanā, materiālu piegādē ieviešot tipveida iepakojuma elementus. Attīstoties jaunām elastīgas ražošanas organizēšanas koncepcijām, mobilas platformas tiek apskatītas arī kā bāze citu ražošanas iekārtu uzstādīšanai pielāgojamā vidē.

Promocijas darbā tiek plašāk apskatīti populārākie industriālie robotu manipulatori, kas balstīti artikulēta virknes manipulatora uzbūves principā un tiek izmantoti rūpnieciskā ražošanā. Kā aktuālie lietojumi tiek apskatīti tādi montāžas un ražošanas palīguzdevumi, kuros robots kalpo kā platforma instrumentu uzstādīšanai ar būtisku pašu svaru virs 100 kg.

Elektriskās piedziņas uzdevums un dinamika

Elektriskās piedziņas loma industriāla robota iekārtā ir realizēt laikā mainīgu pozicionēšanas pieprasījumu individuālām robota asīm. Katras individuālas ass rotācijas pozīcijas izmaiņas komandas tiek definētas saskaņā ar robota galainstrumenta plānotās trajektorijas izpildi, kas ietver visu asu pozicionēšanas vienlaikus aprēķinu. Tas tiek realizēts ar robota kontroliera palīdzību. 1.2. attēlā redzams tipisks industriālā robota manipulators un tā shematiskā struktūra. Šajā gadījumā iekārta ir veidota kā sešu rotējošu savienojumu virknes kombinācija, kurā ar apzīmējumiem A1–A6 norādīts rotācijas asu novietojums.



1.2. att. Artikulēta sešasu industriālā robota manipulatora struktūra.

Industriālā robota manipulatoru kā virknē saistītu cietu ķermeņu sistēmu, ietverot savstarpējus kustīgus savienojumus, iespējams aprakstīt ar atbilstošu kinemātisku modeli [17]. Šādā veidā iespējams analītiski izpētīt iespējamās individuālo savienojumu pozīciju variācijas un arī manipulatora gala elementam pieejamos apgabalus jeb darba telpu.

Taču, lai varētu aprakstīt un analizēt manipulatora kustības procesu un saistītos lielumus, kas ir savienojumu pozīciju izmaiņas laikā un attīstītie griezes momenti, tiek izmantotas metodes, kas balstītas atbilstoša dinamiska modeļa lietojumā. Līdzīgi kā kinemātikas pieejas gadījumā, arī dinamikas procesam iespējams izšķirt tiešo un inverso dinamikas modeli attiecīgai robotizētā manipulatora iekārtai. Industriālā manipulatora individuālo asu griezes momentu un robota manipulatora pozīcijas izmaiņas sakarību iespējams aprakstīt, izmantojot inversās dinamikas aprēķinu.

1.1. vienādojums nosaka nepieciešamo individuālo asu griezes momentu kopas τ momentānās vērtības individuāliem piedziņas mezgliem, lai realizētu manipulatora kustību.

$$\tau = f(q, \dot{q}, \ddot{q}, f_{ext}) \tag{1.1}$$

Aprakstītā manipulatora kustība tiek izteikta kā atsevišķo asu kopas leņķisko pozīciju q, leņķisko ātrumu $\dot{q}$ un leņķisko paātrinājumu $\ddot{q}$ sistēma. Robota manipulatora radītā ārējās iedarbības spēka komponente uz katru no asīm tiek aprakstīti ar kopu f_{ext}. Šī funkcija apraksta sistēmas ieejas lieluma, tas ir, piedziņas radītā griezes momenta, atkarību no manipulatora sistēmas izejas parametru kopas, tāpēc šādu pieeju dēvē par **inverso dinamikas modeli**.

Reālās sistēmas darbība ir aprakstāma ar **tiešo dinamikas modeli** (1.2. vienādojums), kur katras ass paātrinājums $\ddot{q}$ ir atkarīgs no asu attīstīto momentu τ , aktuālo pozīciju q un ātrumu $\dot{q}$, kā arī ārējā spēka f_{ext} mijiedarbības.

$$\ddot{q} = f(\tau, q, \dot{q}, f_{ext}) \tag{1.2}$$

Detalizētai virknes kombinācijas robota manipulatora inversās dinamikas (1.1. vienādojums) procesa analīzei to apraksta izvērstā formā saskaņā ar 1.3. vienādojumu.

$$\tau = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + f(\dot{q}) + g(q) + e(q) \tag{1.3}$$

Asu griezes momenti τ tiek iegūti, kombinējot šādas iedarbes uz robota asīm:

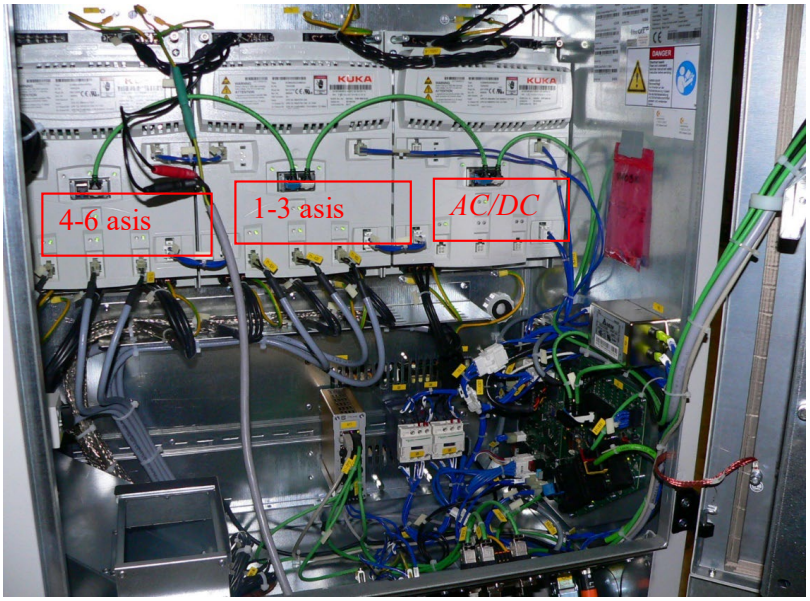
$D(q)$ – matrica, kuras elementi atkarīgi no aktuālo robota asu novietojuma un individuālu robota daļu masas, kas apraksta radīto inerces efektus;

$C(q, \dot{q})$ – matrica, kuras elementi apraksta Koriolisa un centrbēdzes spēkus;
$f(\dot{q})$ – vektors, kas apraksta berzes procesu radītos momentus;
$g(q)$ – vektors, kas apraksta gravitācijas spēka projekciju radītos momentus uz asīm;
$e(q)$ – vektors, kas apraksta ārējo spēku iedarbības momentu projekcijas uz asīm.

Industriālā robota darba pamatā ir reālā laikā nepārtraukta darba instrumenta pozicionēšanas uzdevuma izpilde, kas tiek izvērsta individuālu asu piedziņu pozīcijas komandās un tiek izpildītas sinhronizēti. Ņemot vērā precīzas kustības realizācijas nepieciešamību, industriālā robota piedziņas mezgli mūsdienās visbiežāk ir realizēti ar elektrisko piedziņu. Industriālo manipulatoru agrīnas attīstības posmos ir bijuši populāri arī hidrauliski un pneimatiski vadāmi mezgli, taču, ņemot vērā elektriskās piedziņas attīstības tendences un pieejamību no izmaksu viedokļa, šis ir kļuvis par primāro pozicionēšanas risinājumu robotu tehnikā.

Robota kontroliera arhitektūras apskats

Saskaņā ar iepriekš minēto robota konfigurāciju robota kontroliera struktūra tiek veidota, lai nodrošinātu sešasu piedziņu sinhronizētu darbību. 1.3. attēlā redzama *KUKA KRC4* industriālā robota kontroliera iekšējā uzbūve. No elektriskās piedziņas analīzes viedokļa svarīgi identificēt trīs mezglus – maiņstrāvas taisngriezi, kas nodrošina līdzspriegumu divām kombinētām invertoru iekārtām. Invertori attiecīgi nodrošina *PMSM* servodzinēju vadību, kas grupēta pēc asu noslodzes: 1–3 asis un 4–6 asis.



1.3. att. *KUKA KRC4* robota kontroliera piedziņas iekārtu izvietojums.

Robotu ražotājs *KUKA* veido robota kontrolieri kā modulāru sistēmu, un tiek lietoti ražotāja specifiski iekārtu apzīmējumi *KPP – KUKA Power Pack* un *KSP – KUKA Servo pack.*

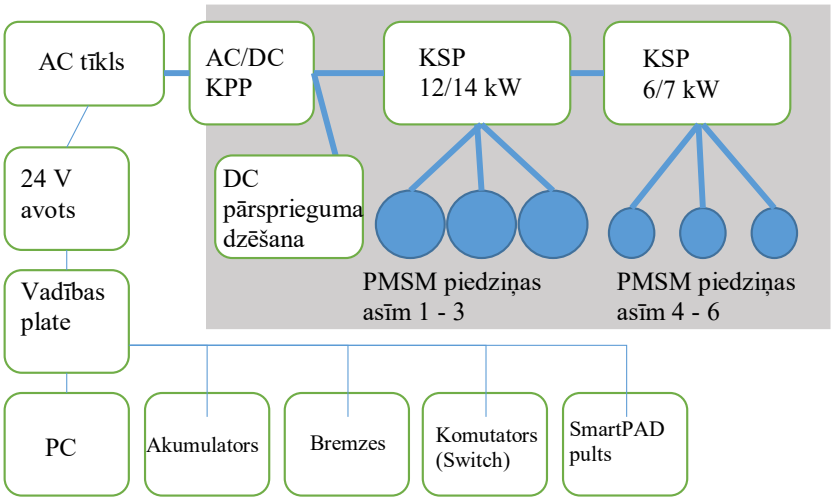
Promocijas darbā tika izmantots industriālais robots ar 210 kg celtspēju, kuram atbilstoši tika konfigurēts maiņstrāvas *KRC4* kontrolleris ar *KPP* un *KSP* parametriem, kas apkopoti 1.1. tabulā.

1.1. tabula

KUKA KRC4 robota kontroliera piedziņas elementu nominālie dati

Iekārta	Ieejas parametri	Izejas parametri
KPP 600-20	3PE AC 400/480 V 20 A 50/60 Hz 14/17 kW	2 PE DC 565/675V 25 A 14/17 kW
KSP 600-3X40	2 PE DC 565/675 V 25 A	3 PE AC 0-400/480V 17 A 0-500 Hz 12/14 kW
KSP 600-3X20	2 PE DC 565/675 V 25 A	3 PE AC 0-400/480 V 9 A 0-500 Hz 6/7 kW
Servo drives 1-3	Uph 201 V, Iph 9,5 A	Nn/Nmax 3000/5000 rpm, 4,9 kW
Servo drives 4-6	Uph 152 V, Iph 5,6 A	Nn/Nmax 3000/7200 rpm, 2,3 kW

1.4. attēlā redzama paplašināta *KRC4* kontroliera struktūrshēma, kurā nodalītas 24 V sprieguma līmeņa iekārtas un līdzstrāvas kopnei pievienotās iekārtas (uz pelēkā fona).

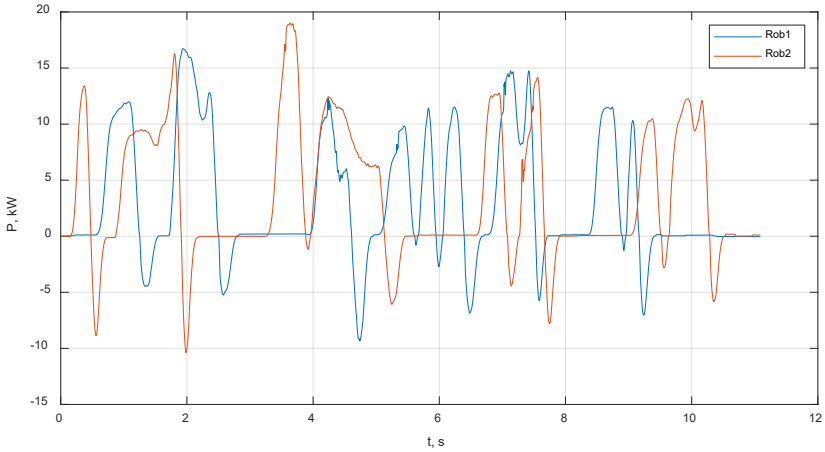


1.4. att. *KUKA KRC4* kontroliera uzbūves struktūrshēma un elektriskās barošanas princips.

Elektrisko piedziņu enerģijas patēriņš vai rekuperācija ir atkarīga no robota plānotās darba programmas izpildes [20]. Praktiski šādus datus par individuālu dzinēju vai to grupas patērēto jaudu programmas izpildes laikā iespējams iegūt ar vairākiem paņēmieniem.

- Detalizēta robota modelēšanas pieeja, kā aprakstīts [18], [19], paredz secīgu industriālā robota enerģijas plūsmu aprēķinu, ņemot vērā atsevišķu iekārtu un berzes zudumu jaudu. Šāda pieeja ļauj iegūt universālu modeli, kas piemērots arī kustību optimizācijas uzdevumu risināšanai, ņemot vērā enerģijas patēriņu.

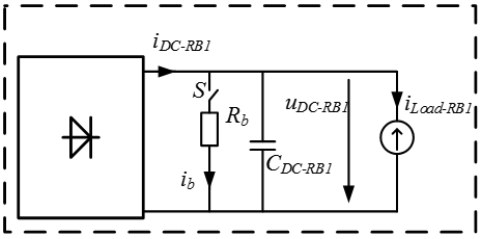
- Praktiski mērījumi, pieslēdzot strāvas un sprieguma mērījumus līdzstrāvas posmā. Šādi iespējams veikt iegūto datu ierakstīšanu, kas ar vēlāku apstrādi, kombinējot atsevišķu invertoru patērētās jaudas mērījumu, ļauj iegūt summāru līdzstrāvas posma jaudas izmaiņu laikā. 1.5. attēlā redzamas iegūtas summārās līdzstrāvas posma jaudas izmaiņas divu robotu praktiska mērījuma rezultātā.



1.5. att. Eksperimentāli iegūti līdzstrāvas posma jaudas profili divu robotu darbībā.

- Kā alternatīvs risinājums individuālu asu jaudas patēriņa vai tā saistīto lielumu – strāvas un sprieguma datu – iegūšanai ir minams arī robota kontroliera iekšējo parametru ierakstīšanas funkcija. Šāda iespēja pastāv, izmantojot, piemēram, *KUKA Trace* programmatūras funkciju, kas galvenokārt paredzēta robota iekšējo procesu diagnostikas vajadzībām, bet kustības laikā iegūtie dati var tikt izmantoti arī tālākai modelēšanas vai optimizācijas uzdevumu veikšanai (1), (2).

Ja ir pieejami dati par dinamisku industriāla robota sešasu piedziņas elektriskās jaudas profilu, iespējams izveidot ekvivalento elektriskās sistēmas modeli, kas galvenokārt paredzēts elektriskās piedziņas un līdzstrāvas posma darbības izpētei. Modeļa struktūra redzama 1.6. attēlā.



1.6. att. Industriālā robota manipulatora elektriskās sistēmas modelis *AC* barošanas gadījumā.

Primārais enerģijas avots ir *AC* tīkls, un enerģija tiek piegādāta *DC* posmam ar nevadāma tainsgrieža palīdzību. Līdzsprieguma vērība tukšgaitā taisngrieža gadījumā ir atkarīga no tīkla

sprieguma saskaņā ar 1.4. formulu, kur U_{L-L} – spriegums starp fāzēm trīsfāzu sistēmā, U_{DCidle} – taisngrieztā līdzsprieguma vērtība tukšgaitā.

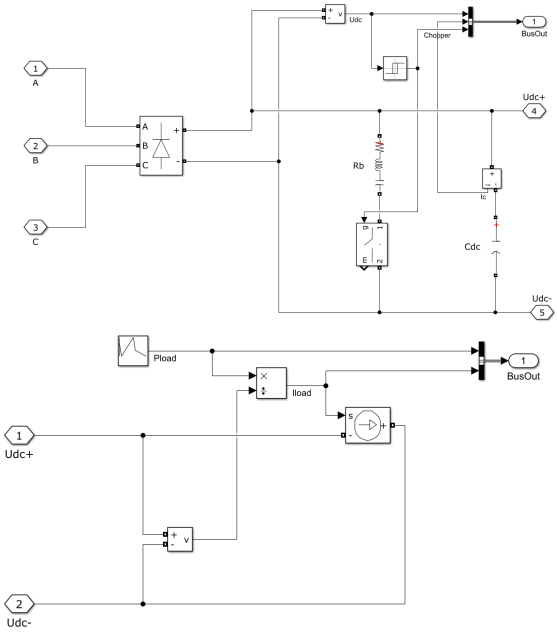
$$U_{DCidle} = \sqrt{2}U_{L-L} \tag{1.4}$$

Tādējādi secināms, ka pie 400 V sprieguma sistēmas, kas izplatīta Eiropā, līdzsprieguma posma spriegums tukšgaitā ir 565 V.

Praktiska *KRC4* robota kontroliera izpēte ir ļāvusi noteikt kopējo līdzstrāvas posma kapacitāti C_{DC-RB}, kuras vērtība ir 1,3 mF. Līdzīgi noteikta arī bremzešanas rezistora R_B vērtība 11 Ω. Bremzēšanas rezistora lietojums izriet no histerēzes tipa vadības principa, kas, mērot līdzsprieguma posma spriegumu U_{DC}, veic salīdzinājumu ar diviem sprieguma līmeņiem U_{RbON} – 685 V un U_{RbOFF} – 665 V. Sasniedzot 685 V līdzspriegumu, tiek sākta enerģijas izkliede rezistorā, līdz notiek samazinājums līdz 665 V, un bremzēšanas rezistors tiek atslēgts. Industriāla robota dinamisks jaudas profils $P_{Load}(t)$ tiek realizēts ar ekvivalenta strāvas avota modelēšanas paņēmienu saskaņā ar 1.5. vienādojumu.

$$I_{Load}(t) = P_{Load}(t)/U_{DC}(t) \tag{1.5}$$

1.7. attēlā redzama modeļa struktūras īstenošana *Matlab Simulink* vidē.

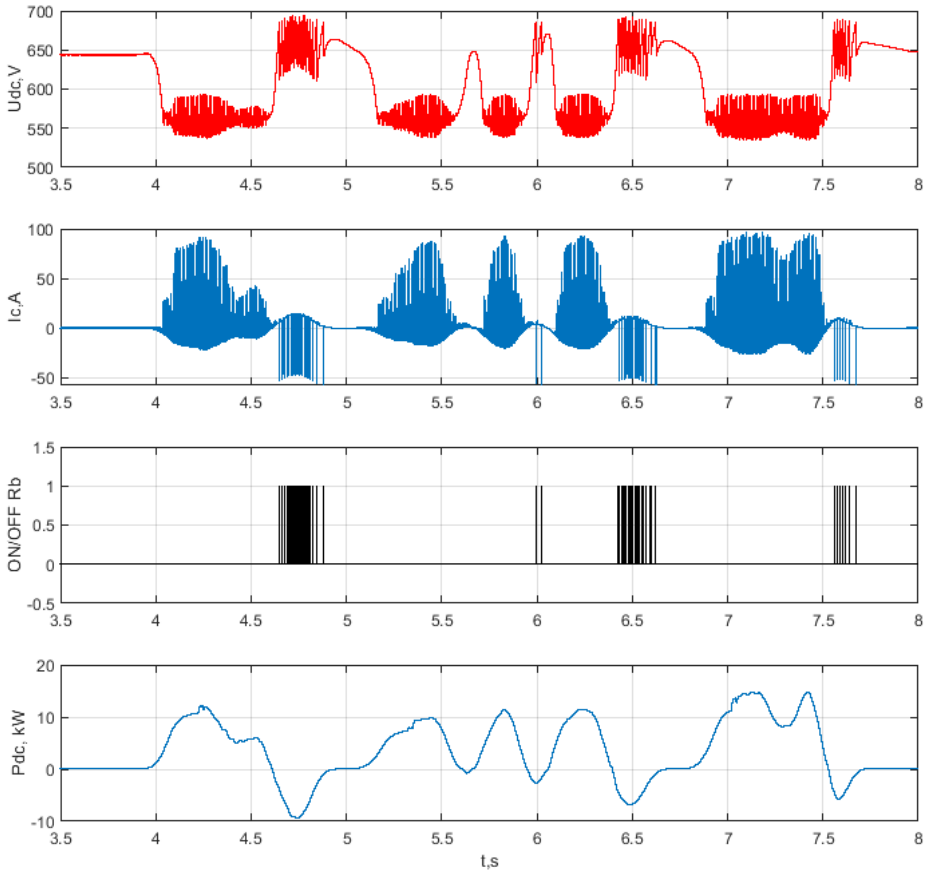


1.7. att. *AC* industriālā robota elektriskā modeļa realizācija *Matlab/Simulink*: taisngrieža, filtra kondensatora un bremzēšanas rezistora slēgums (augšā), dinamiskas asu slodzes elements (apakšā).

.

Izpildot eksperimentāli iegūtās slodzes profila modelēšanu ar iepriekšminēto modeli, iegūts līdzsprieguma sprieguma izmaiņu un bremzēšanas rezistora darbības rezultāts (1.8. att.).

Izveidotais modelis ir vērtīgs instruments tālākai energoefektivitātes uzlabošanas pasākumu izpētei. Darbā nākamajā nodaļā īpaši apsvērtas iespējas esošu maiņstrāvas industriālo robotu piedziņu modifikācijas ar līdzstrāvas tīkla elementu ieviešanu.



1.8. att. Industriālā robota ekvivalentā elektriskā modeļa rezultāti: *Udc* – līdzsprieguma posma sprieguma izmaiņas, *Ic* – līdzsprieguma posma kondensatora strāva, bremzēšanas rezistora darbības komanda un izpildītās programmas jaudas līkne *Pdc.*

2. MAIŅSTRĀVAS INDUSTRIĀLO ROBOTU REGULĒJAMU PIEDZIŅU AR TRADICIONĀLIEM FREKVENCES PĀRVEIDOTĀJIEM IZPĒTE UN JAUNU PĀRVEIDOTĀJU SISTĒMU IZSTRĀDE

Nodaļā izklāstīta pieeja energoefektivitātes uzlabošanai, pārveidojot tipisku maiņstrāvas elektrosistēmai veidotu rūpniecisko robotu. Saistītās autora publikācijas (15.–20. publikācija) atspoguļo nodaļā sniegtos secinājumus.

Apskatot tipisku maiņstrāvas robotu kotrolieru uzbūvi, secināms, ka atkarībā no izpildāmā kustības uzdevuma ir sastopamas bremzēšanas kustības. Šādu kustību laikā rekuperētā enerģija tiek uzkrāta līdzstrāvas posma kondensatorā un, sasniedzot augtāku sprieguma līmeni, tiek dzēsta ar bremzēšanas rezistora palīdzību. Tādējādi tieši novērojams potenciāls energoefektivitātes uzlabošanai, ja tiktu samazināta izkliedētās enerģijas daļa normālā darba režīmā. Tālāk tekstā apkopoti vairāki iespējamie paņēmieni energoefektivitātes uzlabošanai no elektriskās sistēmas optimizācijas skatpunkta, taču eksistē arī vēl citas ar kustību trajektoriju un programmatūras optimizāciju saistītas metodes [21]. Katrs no minētajiem risinājumiem piešķir arvien lielāku nozīmi līdzstrāvas enerģijas pārvades lietojumam robotizētās sistēmās.

- Divvirzienu taisngrieža lietojums.

Vienkārša nevadāma taisngrieža aizstāšana ar divvirzienu taisngriezi ir būtiski dārgāks risinājums nekā papildu kapacitātes ievietošana līdzstrāvas posmā. Ņemot vērā saistītās prasības attiecībā uz *AC* tīkla jaudas kvalitāti un relatīvi mazo slodzi uz vienu pārveidotāju, šāds risinājums apskatāms kontekstā ar plašāku līdzstrāvas puses sistēmu un pieslēgto jaudu.

- Līdzstrāvas posma kapacitātes palielināšana.

Šāds risinājums paredz papildu kondensatoru uzstādīšanu katrā robotu kontrolierī, kas rada papildu izmaksas [22], taču tiek minēti arī iespējamie pozitīvie aspekti no sistēmas uzticamības pieauguma viedokļa [23]. Kondensatora kapacitātes optimāla izvēle ir atkarīga no lielākā rekuperācijas enerģijas pīķa, kas rodas saistībā veikto kustības uzdevumu. Šāds risinājums izskatāms kā piemērots gadījumos, ja ir viens vai daži robotu kontrolieri un tie nav izvietoti vienkopus telpā.

- Vairāku robotu līdzsprieguma posmu savstarpējs savienojums.

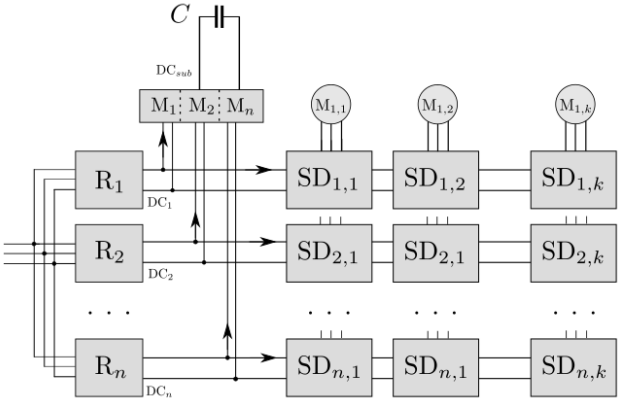
Alternatīva pieeja ir papildu kapacitātes ieviešana un tās pieejamība, veidojot vairāku robotu dalītu līdzsprieguma posmu pieslēgumu kopīgai kondensatoru baterijai, bremzēšanas enerģijas lietderīgai izmantošanai. Šī pieeja un tās praktiskā ieviešana plašāk tiek apskatīta nākamajā nodaļā.

- Līdzstrāvas barošanas nodrošināšana.

Kā liela mēroga risinājums, kas ietver ne tikai robotu, bet arī citu saistīto ražošanas iekārtu divvirzienu enerģijas apmaiņas potenciāla izmantošanu, ir vienota līdzstrāvas mikrotīkla izveide ar vienu centralizētu maiņsprieguma pieslēgumu. Šāda pieeja tiek analizēta darba noslēguma nodaļās.

Vairāku robotu līdzsprieguma posmu savstarpējs savienojums

Bremzēšanas enerģijas īslaicīgai uzkrāšanai un tās atkārtotai izmantošanai lietderīgi var tikt izmantota līdzsprieguma posma kapacitāte, ja iekārtas darbības principi pieļauj individuālu līdzsprieguma posma spriegumu U_{DC_i} variāciju. 2.1. attēlā redzams princips atsevišķu piedziņu līdzsprieguma posmu slēgumam ar kopīgu kondensatoru moduli *C*.



2.1. att. Vairāku elektrisko piedziņu invertoru *SD* grupu ar ieejas taisngriežiem *R* starpsavienojums ar dalītu līdzsprieguma posmu un papildu kapacitātes *C* lietojumu (15).

Katra piedziņas sistēma saglabā esošo ieejas taisngriezi un līdzsprieguma posma struktūru. Papildus tiek ieviests staprsavienojuma modulis *M*, kas ļauj vadīt enerģijas plūsmu starp individuāliem robotiem un kopēju kondensatoru *C* un tā spriegumu U_C.

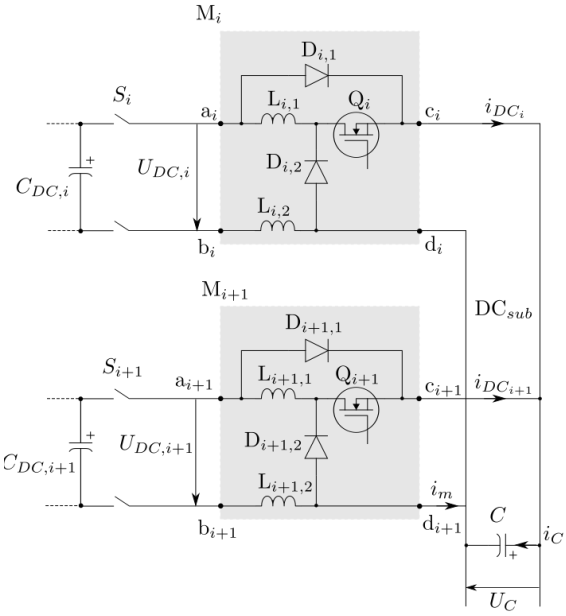
Starpsavienojuma moduļu svarīgākie darbības principi:

- rekuperētās enerģijas uzkrāšana un lietderīga izmantošana;
- neietekmēt esošās piedziņas sistēmas konfigurācijas normālu darbību, nodrošinot enerģiju no maiņstrāvas tīkla.

Darba gaitā izveidoti vairāki starpsavienojuma slēguma shēmas varianti, ko var iedalīt asimetriskā (viens variants) un simetriskā slēguma (divi varianti) risinājumos.

Asimetriskā starpsavienojuma slēguma izpēte

Lai praktiski realizētu iecerēto, tika izveidota elektriskā slēguma shēma (2.2. att.).



2.2. att. Asimetriskā līdzstrāvas starpsavienojuma shēma.

Lai nodrošinātu rekuperētas enerģijas apmaiņu caur ārējo kondensatoru bateriju, tiek piemērots histerēzes tipa vadības princips un ieviesti kondensatora sprieguma vadības parametri U_{ON} un U_{OFF}. Rekuperētās enerģijas plūsma uz galveno kondensatoru *C* notiek ar dabiskas komutācijas un diodes *D* palīdzību. Enerģijas plūsma un iepriekš uzkrātās enerģijas atkārtota izmantošana katrā no robotu piedziņām notiek, izmatojot pusvadītāju slēdzi *Q*, kas tiek vadīts pēc 2.1. vienādojumā redzamā principa.

$$Q \text{ state} = \begin{Bmatrix} ON \ if \ U_C > U_{ON} \\ OFF \ if \ U_C \leq U_{OFF} \\ previous \ state \text{ otherwise} \end{Bmatrix} \tag{2.1}$$

Moduļa pieslēgšanas līmenis U_{ON} histerēzes vadībā ir augstāks par atslēgšanas līmeni U_{OFF}, kas ļauj nodrošināt stabilāku darbību, ieviešot nejutības zonu starp šiem lielumiem.

$$U_{ON} \geq U_{OFF} \tag{2.2}$$

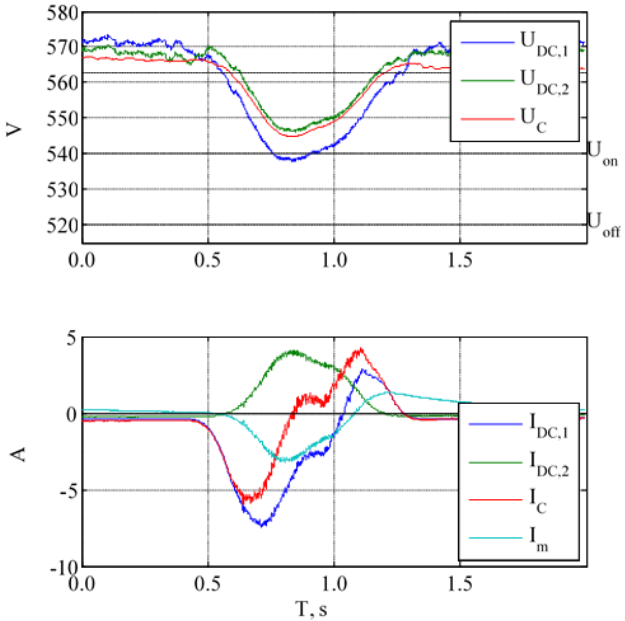
Tika veikta praktiska šāda slēguma iekārtas testēšana, kas aprakstīta (19), ar divu industriālo robotu savstarpēju slēgumu. Iegūtais rezultāts vienu stundu garam darba periodam patērētās enerģijas izteiksmē apkopots 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Enerģijas patēriņa rezultāti divu robotu asimetriskajam slēgumam

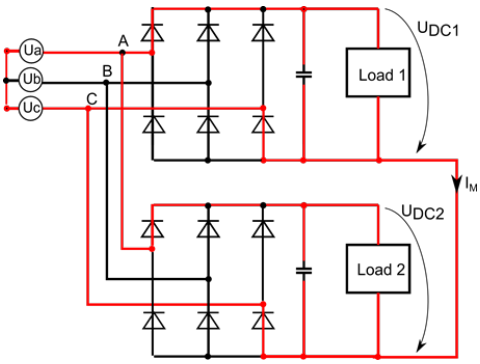
Robota pielietojums	**Metināšana**	**Pārvietošana**
Bez *DC* starpsavienojuma, kWh	3,66	6,44
Ar *DC* starpsavienojumu, kWh	3,45	5,11
Starpība, %	-5,6	–20,5

Eksperimentāli nomērītas sprieguma izmaiņas un atbilstošās strāvas darbības laikā redzamas 2.3 attēlā.



2.3. att. Asimetriskā starpsavienojuma darba režīms pie vadības sprieguma vērtībām U_{ON} = 540 V un U_{OFF} = 520 V.

Eksperimentālās testēšanas laikā novērota strāvas pūsma *Im,* kas ir potenciālu izlīdzināšanas efekta rezultāts cieši savienotu negatīvo līdzsprieguma posmu polu dēļ, tas plašāk apskatīts (17), (18).



2.4. att. Izlīdzinošās strāvas kontūrs asimetriska savienojuma gadījumā.

Šāda efekta klātbūtne rada jaunu režīmu taisngriežu noslodzei un, ņemot vērā esošu iekārtu modifikāciju no iespējamo diagnostikas kļūdu veidošanās viedokļa, tika pieņemts lēmums apsvērt simetrisku komutācijas moduļu ieviešanu turpmākajā darbā. Svarīga atslēgšanas līmeņa

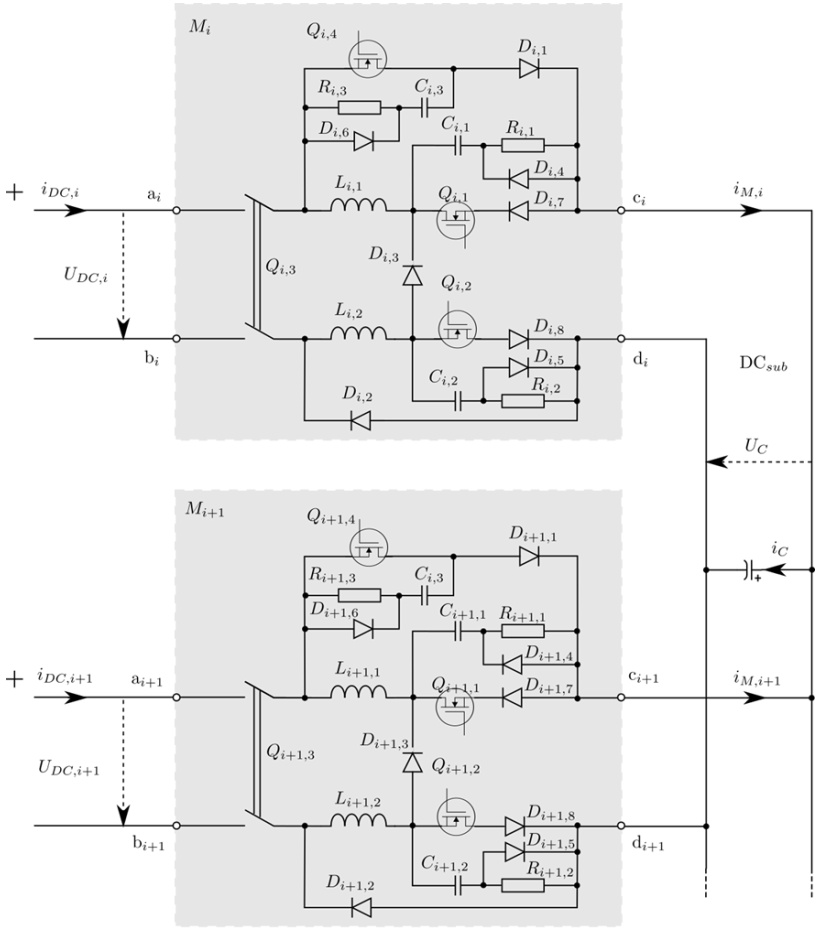
U_{OFF} īpašība ir nodrošināt arī galvenā kondensatora Uc izlādes pārtraukšanu, pirms tiek sasniegts tukšgaitas taisngrieža izejas spriegums U_{DCidle}, kas ir 565 V, ja tiek izmantota 230 V fāzes sprieguma sistēma.

$$U_{OFF} \geq U_{DCidle} \tag{2.3}$$

Tādējādi tika turpināts darbs, veidojot jauna tipa starpsavienojuma risinājumu apskatītajam uzdevumam.

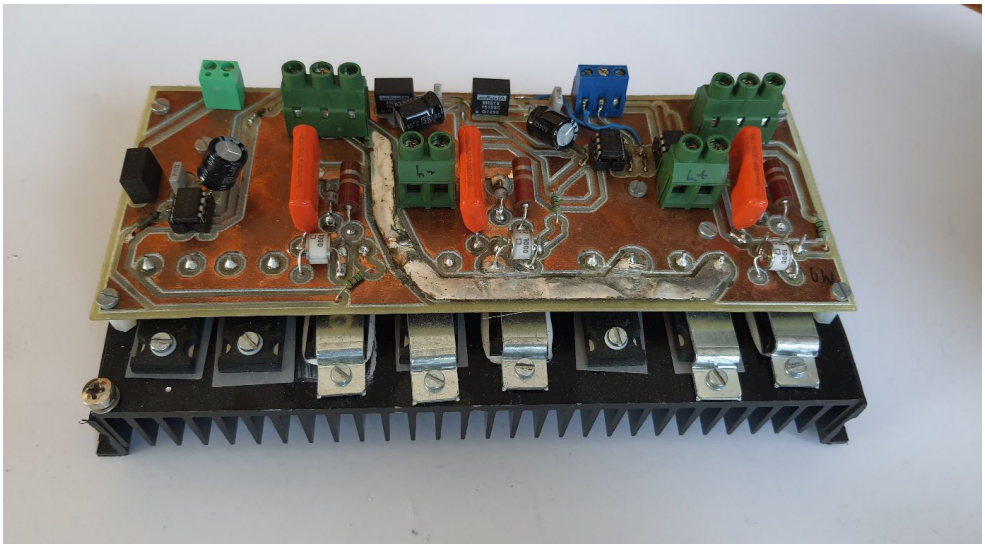
Simetriskā starpsavienojuma slēguma izpēte

Balstoties nepieciešamajā modifikācijā un iepriekšējo testu pieredzē, tika izstrādāta un patentēta (20) jauna tipa līdzstrāvas posmu starpsavienojumu shēma, kas nodrošinātu abu polu sinhronu komutāciju starpsavienojuma gadījumā.



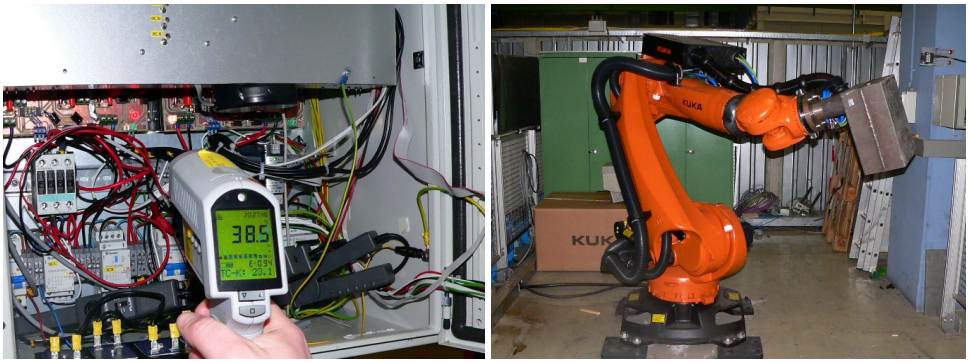
2.5. att. Simetriskā līdzstrāvas starpsavienojuma shēma.

Kā būtiskākās atšķirības ir papildu pusvadītāju slēdža ieviešana otra pola komutācijai, kā arī iespēja veikt galvenā kondensatora vadāmu priekšuzlādi no kāda no pieslēgtajiem industriālo robotu līdzstrāvas posmiem. Starpsavienojuma prototipa jaudas slēdžu modulis bez perifērijas iekārtām redzams 2.6. attēlā.



2.6. att. Simetriskā savienojuma jaudas slēdžu plates prototips.

Tālākā darba gaitā tika veikta iekārtas montāža un eksperimentāla testēšana industriāla lietojuma apstākļos sadarbībā ar uzņēmumu "*Daimler AG*", Vācijā, izmantojot industriālos robotu manipulatorus *KUKA KR210* ar papildu svara elementiem 150 kg un 200 kg, kā redzams 2.7. attēlā.



2.7. att. Eksperimentāla pārbaude ražošanas apstākļos. Starpsavienojuma moduļu ar perifērijas iekārtām (pa kreisi), viens no pieslēgtajiem *KUKA KR210* industriālajiem robotiem (pa labi).

Testēšanas gaitā tika veikta elektrisko parametru datu ierakstīšana un enerģijas patēriņa noteikšana ar 2.8. attēlā redzamajām iekārtām – *FLUKE* maiņstrāvas jaudas analizatoru un datu logēšanas sistēmu.

2.8. att. Līdzstrāvas starpsavienojuma elektrisko parametru datu ierakstīšanas un maiņstrāvas jaudas analizatora pieslēgums.

Tika veikta 20 minūšu darba perioda analīze pēc patērētās jaudas divu robotu savstarpēju savienotai sistēmai. Iegūtie rezultāti apkopoti 2.2. tabulā.

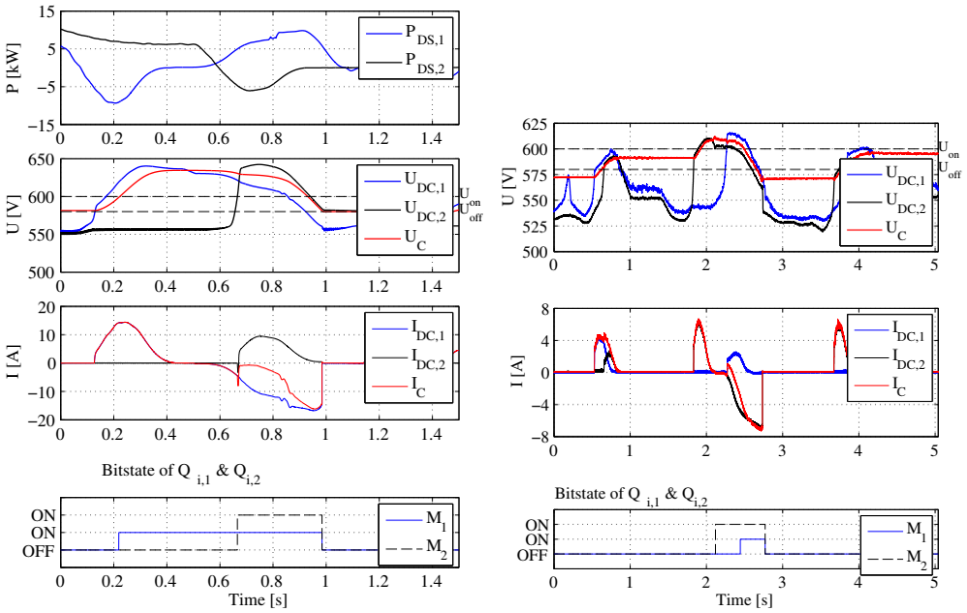
2.2. tabula

Vidējā patērētā jauda divu robotu sistēmas gadījumam

Robota lietojums	**Pārvietošana 20 min. (bez papildu svara)**	**Pārvietošana 20 min. (ar papildu svariem 150 kg un 200 kg)**
Vidējā jauda bez *DC* starpsavienojuma, kW	6,23	8,67
Vidējā jauda ar *DC* starpsavienojumu, kW	4,92	5,11
Starpība, %	–21,1	–22,7

Eksperimentālā pārbaude apliecina izvēlētā risinājuma pozitīvu ietekmi uz energoefektivitātes palielināšanu šāda tipa robotizēta lietojuma vajadzībām, sasniedzot līdz pat 22,7 % ietaupījumu vidējā enerģijas patēriņā. Ir svarīgi ņemt vērā, ka reālos ražošanas apstākļos individuālu robotu darba uzdevumi var krietni atšķirties pēc nepieciešamās kustības dinamikas un šajā testā tika izmantoti salīdzinoši ātras kustības un spēcīgu rekuperācijas režīmu kustības profili, lai pārbaudītu arī izveidotā prototipa elektriskos parametrus.

Darba gaitā tika veikti sistēmas reāla darba parametru līdzsprieguma mērījumi gan individuālu robotu, gan dalītajā līdzstrāvas posmā, tāpēc radās iespēja attīstīt ekvivalentu datormodeli, izmantojot *Matlab* un *Simulink* modelēšanas rīkus, kā arī salīdzināt modeļa un reāli mērīto sistēmas darbību (15). 2.9. attēlā redzams raksturīgāko parametru dinamisko izmaiņu rezultātu salīdzinājums līdzīgā darba režīmā ar vienādiem U_{ON} = 600 V un U_{OFF} = 580 V vadības parametriem.

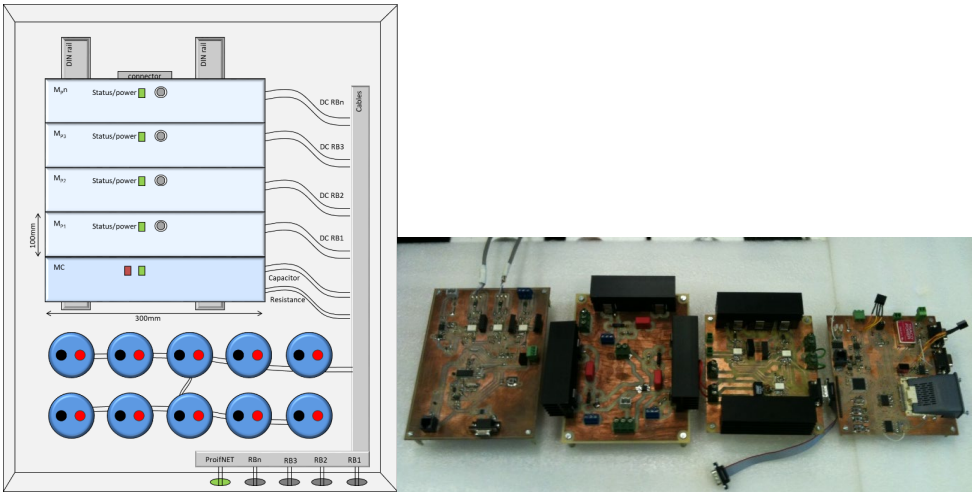


2.9. att. Starpsavienojuma darbības piemēru salīdzinājums modelētā (pa labi) un reāli mērītā sistēmā (pa kreisi).

Iegūtie dati ļāva veikt tālāku sistēmas optimizāciju. Piemēram, redzams, ka reāli U_C spriegums sasniedz zemāku vērtību par U_{OFF}, kas demonstrē laika aizturi reālās sistēmas pusvadītāju komutācijas darbībā. Plašāka analīze veikta (16).

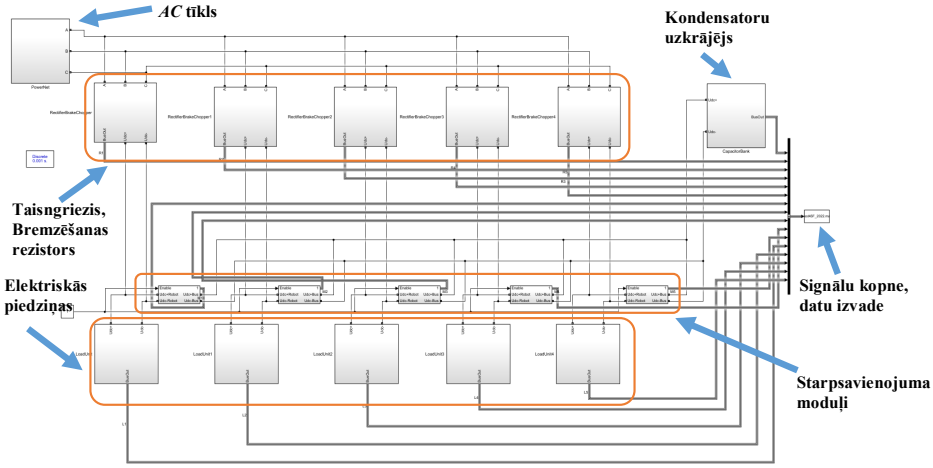
Modulāras sistēmas prototipa izstrāde

Ņemot vērā paredzamo lietojumu industriālā vidē, kur būtu nepieciešams organizēt individuālu industriālo robotu savstarpēju enerģijas apmaiņu līdzīgā mērogā, kā tas ir veikts, no ražošanas viedokļa secināts, ka tipisks vienkopus novietotu robotu skaits ir līdz piecām vienībām. Šāda tipa iekārta būtu lietojama, lai optimizētu vienas ražošanas šūnas darbību, modificējot esošos robotus. Balstoties iegūtajos datos un izveidotajā modelī, tika izvērsta analīze piecu robotu iekārtu sistēmas izveidei ar modelēšanas rīku palīdzību, kā arī veikta praktiska iekārtas dizaina modifikācija, ņemot vērā modulāras sistēmas nepieciešamību.



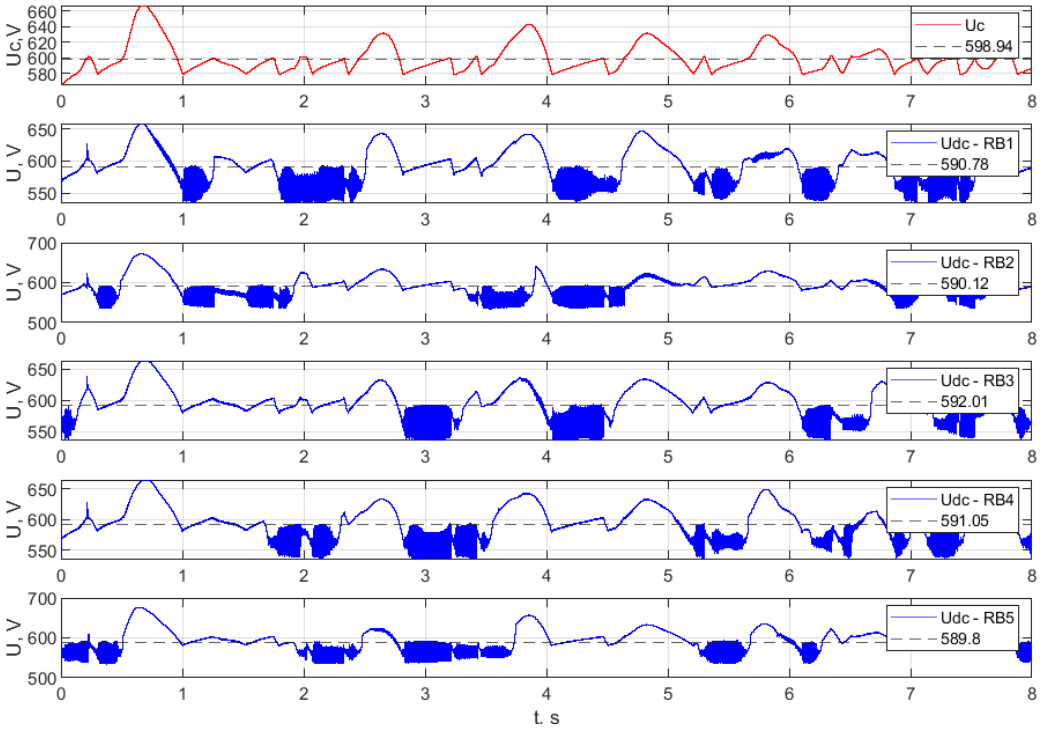
2.10. att. Modulāras sistēmas pieejas principa konceptuāla skice (pa kreisi) un funkcionālo moduļu pirmie prototipi (pa labi).

2.11. attēlā redzama sistēmas ekvivalentā modeļa realizācija *Simulink* vidē, lai noteiktu elektriskās sistēmas darba režīmus un saistītos elektriskos lielumus.



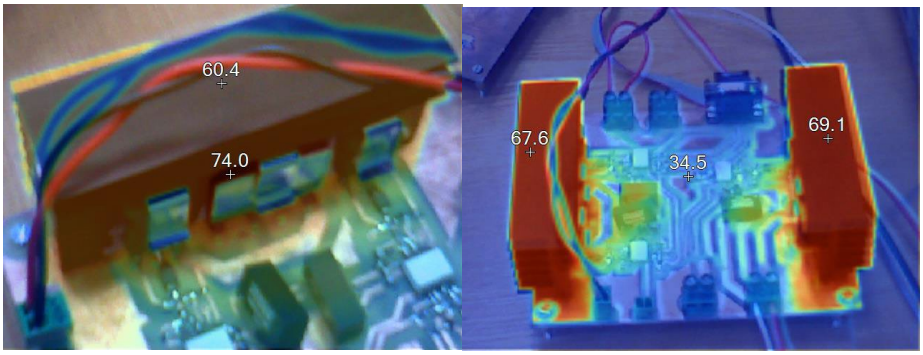
2.11. att. Modeļa struktūra piecu savstarpēji savienotu industriālu robotu darbības analīzei.

Modelēšanas rezultāti ļauj izpētīt starpsavienojuma moduļu komutācijas procesus un ietekmi uz kopējo sistēmas darbu. Tālāk kopsavilkumā dota daļa no iegūtajiem datiem, grafiski attēlota atsevišķu līdzsprieguma posmu spriegumu dinamika (2.12. att.).



2.12. att. Modelēšanas rezultātu piemērs piecu moduļu sistēmai – individuālu līdzsprieguma posmu dinamika.

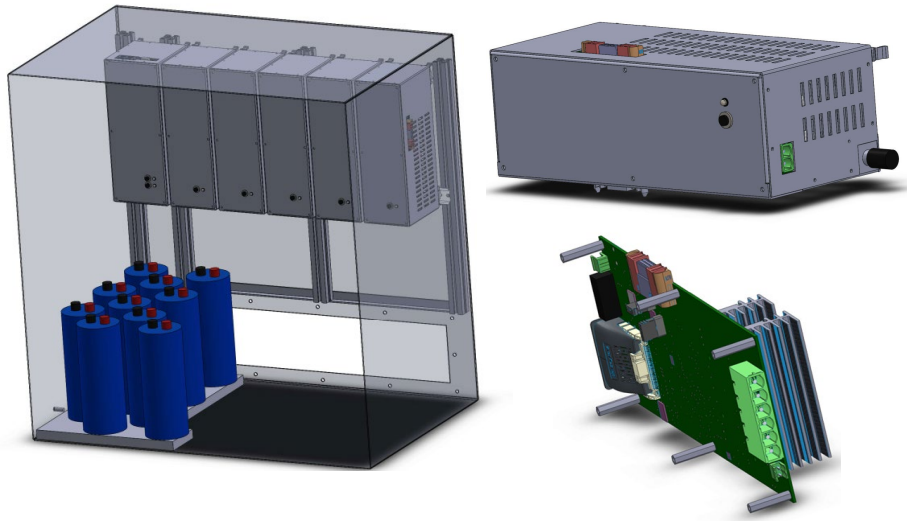
Tika optimizēta arī galveno pusvadītāju elementu tranzistoru un diožu izvēle, pētot atbilstošos termiskos procesus, kā arī elementu korpusu galvanisko izolāciju un iespējas tos apvienot uz vienotiem radiatoriem pasīvās dzesēšanas lietojuma gadījumam.



2.13. att. Termisko procesu izpētes un testēšanas procesa piemērs ar paaugstinātu jaudu, lai noteiktu kritiskās temperatūras iekārtas projektēšanas gaitā.

Secīgi attīstot risinājumu, izstrādāta versija, kas paredz iekārtas montāžas un attiecīgo korpusu risinājumus, ņemot vērā tipiskus elektriskā un automatizācijas aprīkojuma instalācijas

apstākļus, sadarbībā ar uzņēmumu "*Daimler AG*". 2.14. attēlā redzams izveidotās iekārtas montāžas risinājuma un pašu moduļu projekts veidots ar 3D *CAD* programmatūras palīdzību.



2.14. att. Modulāras iekārtas montāžas un moduļu praktiskas realizācijas iecere *CAD* vidē.

Tika izveidots reāls iekārtas prototips (2.15. att.), ņemot vērā iepriekš aprakstītos optimizācijas un modulāras sistēmas aspektus lietojumam industriālā vidē ražošanas uzņēmumā.

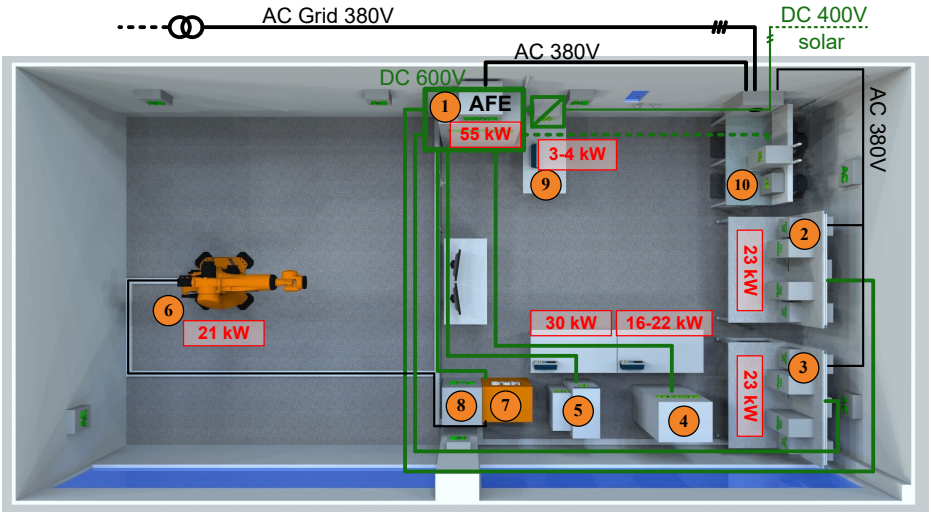
2.15. att. Praktiski realizēts modulārs industriālo robotu līdzstrāvas posmu starpsavienojumu risinājums.

3. LĪDZSTRĀVAS INDUSTRIĀLO ROBOTU DARBĪBAS ANALĪZE UN LIETOJUMA IZPĒTE RAŽOŠANAS MIKROTĪKLĀ LABORATORIJAS MĒROGĀ

RTU Industriālās elektronikas un elektrohnikas institūtā ir bijusi aktuāla praktiska līdzstrāvas tīkla ieviešana, kas veicinātu jaunu enerģijas pārveidotāju prototipu un sistēmas darbības analīzi. Aktivitātes un ar tām saistīti autora pētījumu rezultāti līdzstrāvas mikrotīkla laboratorijas izveidē atspoguļoti 3., 4., 8.–14. publikācijā.

RTU interese ir demonstrēt tirgū pieejamās līdzstrāvas tehnoloģijas rūpnieciskai līdzstrāvas tīkla ieviešanai un nepieciešamajām turpmākajām izstrādnēm saskaņā ar Eiropas Savienības pētniecības projekta *AREUS* mērķiem. 3.1. attēlā redzams RTU *AREUS Demo* laboratorijas telpas izkārtojuma modelis tā galaversijā (skats no augšas):

1) Maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja iekārta (55 kW);
2) un 3) universāli industriālu robotu elektriskās jaudas emulatoru stendi (23 kW);
4) litija jonu akumulatora enerģijas uzkrāšanas sistēma (*BESS*) 16–22 kW;
5) superkondensatora enerģijas uzglabāšanas sistēma (30 kW);
6) un 7) 600 V *DC* industriāla robota prototips un *KUKA DC* robota kontrolleris ar 21 kW jaudu;
8) galvenais *PLC* kontrolleris (šūnas kontrolleris);
9) saules *DC/DC* pārveidotājs (3–4 kW) 3,3 kW saules paneļu parkam;
10) papildu vēja enerģijas emulatora iekārta.



3.1. att. RTU *DC* mikrotīkla laboratorijas sistēma (*AREUS* laboratorija) (5).

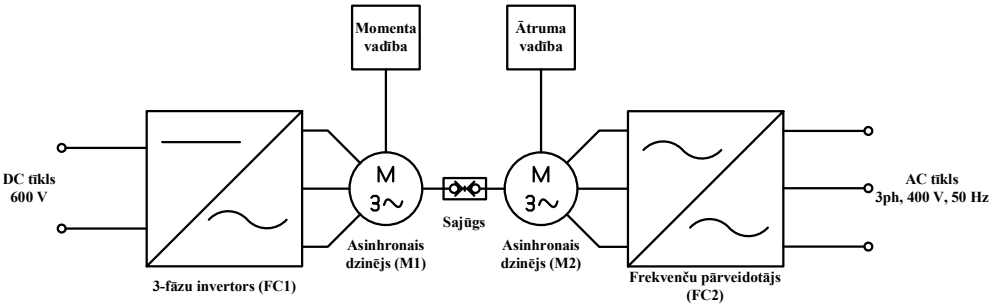
Šādi *DC* mikrotīkla projektēšanas aspekti un uzdevumi eksperimentālai *DC* mikrotīkla ieviešanai laboratorijā ir atrisināti un iekļauti promocijas darbā.

- Dinamiskās *DC* jaudas plūsmas darbības demonstrācija, kas atkārto trīs industriālos robotus ierobežotā telpas platībā.

- Sinhronā daudzpunktu jaudas plūsmas mērīšanas risinājuma ieviešana eksperimentālai datu ierakstīšanai un analīzei.
- Centrālās divvirzienu maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja darbības režīmu analīze līdzstrāvas mikrotīkla barošanai.
- Cikliskā ražošanas procesa darbības analīze un iespējamie elektroiekārtu optimizācijas pasākumi.

Līdzstrāvas jaudas plūsmas emulatora izstrāde

Maza mēroga rūpniecisko mikrotīklu laboratorijas vide ir paredzēta kā vairāku industriālo robotu uzstādīšanas fizisks modelis ražošanas uzdevumu izpildei. Galvenā uzdevuma ieviešana vairāku dinamisku līdzstrāvas slodzes demonstrācijai ieviešanai kopā ar ierobežojumiem, kas saistīti ar pieejamo telpas platību, ieguldījumu budžetu un IEEI pētniecības jomām, ļāva pieņemt lēmumu par elektromehānisku sistēmu ar savienotu asinhronā tipa elektrisko piedziņu stendu ieviešanu, kā redzams 4.2. attēlā, apvienojot griezes momenta un ātruma kontrolētas piedziņas, lai sasniegtu vispārējo sistēmas darbības mērķi attiecībā uz kontrolētu līdzstrāvas pieslēguma jaudas plūsmu.



3.2. att. Divvirzienu līdzstrāvas jaudas plūsmas emulatora galvenā shematiskā shēma.

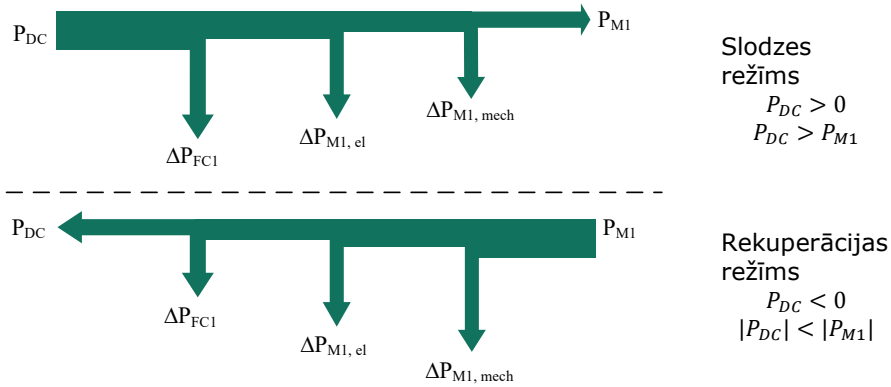
Elektriskās piedziņas frekvences pārveidotāja *FC2* uzdevums ir uzturēt stabilu sajūgtās piedziņu sistēmas rotācijas ātrumu. Otru frekvences pārveidotāju *FC1* darbina ar ārējo griezes momenta komandu, ko sniedz lietotājs saistībā ar līdzstrāvas jaudas plūsmas pieprasījumu. Abi frekvenču pārveidotāji ir identiski tirgū pieejami *ABB ACS* sērijas 22 kW piedziņas pārveidotāji kur viena no iekārtām tieši pieslēgta *DC* mikrotīklam, apejot ieejas taisngriezi. *DC* puses jaudas plūsmas vadības galvenais regulēšanas princips ir saistīts ar uzdotā griezes momenta vadību, ja mehāniskā jauda un attiecīgā elektriskā jauda tiek patērēta vai ģenerēta, kā aprakstīts 3.1.–3.3. vienādojumā.

$$P_{M1} = T_{M1}\omega = \frac{T_{M1} \cdot n}{9{,}550} \tag{3.1}$$

P_{M1} ir elektriskās mašīnas *M1* izejas mehāniskā jauda un attiecīgais mehāniskais griezes moments T_{M1} ar motora vārpstas rotācijas ātrumu n. Ja sajūgto vārpstu rotācijas ātrums tiek saglabāts nemainīgs, vēlamo elektroenerģijas plūsmu P_{DC} var vadīt ar uzdotā griezes momenta iestatījumu. Tomēr reālā sistēmā ir arī zudumi, ko var apvienot vienā parametrā ΔP saskaņā ar

3.2. vienādojumu un attiecīgajām jaudas plūsmām motora un ģenerēšanas režīmos, kā redzams 3.3. attēlā.

$$\Delta P = \Delta P_{FC1} + \Delta P_{M1,el} + \Delta P_{M1,mech} \tag{3.2}$$

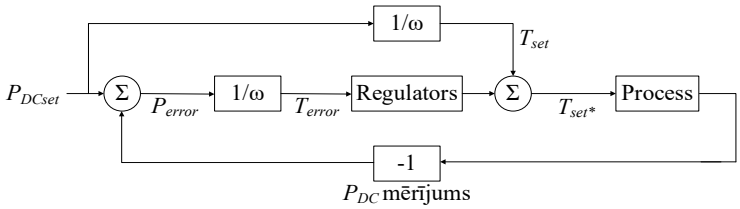


3.3. att. Elektriskās enerģijas plūsma: motora režīmā (augšā); reģeneratīvajā režīmā (apakšā).

DC pusē savienotas elektriskās piedziņas *M1* jaudas bilance, kā norādīts 3.3. vienādojumā.

$$P_{DC} = P_{M1} \pm \Delta P \tag{3.3}$$

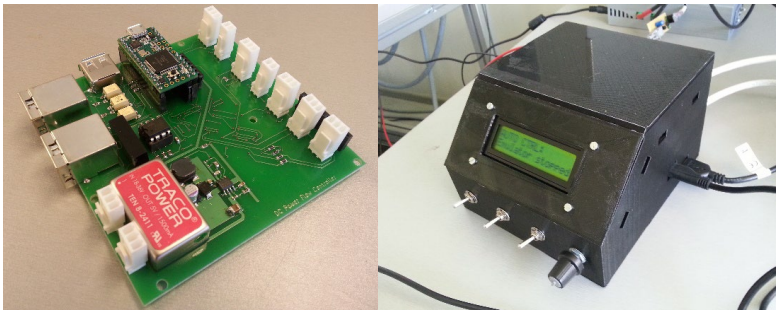
Jāizveido regulators, kas dinamiski varētu mainīt griezes momenta komandu atbilstoši vēlamajam līdzstrāvas jaudas plūsmas profilam. Darbības laikā var mainīties vairāki parametri (ātruma svārstības, sistēmas zudumi ir atkarīgi no temperatūras, slodzes apstākļiem, jaudas plūsmas utt.), tāpēc tiek piedāvāta 3.4. attēlā redzamā motora *FC1* kompensētās griezes momenta komandas aprēķināšana, pamatojoties uz uzdoto un mērītajām līdzstrāvas kopnes jaudas vērtībām un enerģijas zudumiem.



3.4. att. Piedāvātā regulatora struktūra dinamiskai līdzstrāvas jaudas plūsmas emulācijai ar elektriskās piedziņas griezes momenta vadību.

Regulatoram jākompensē tikai relatīvi nelielas novirzes no vēlamās izejas jaudas. Līdzstrāvas jaudas plūsmas regulatoram apsteidzošas griezes momenta vadības komandas *T* pieeja, pamatojoties uz dominējošo sistēmas uzvedību saskaņā ar 4.1. vienādojumu, ir piemērota. Starpību starp uzdoto un izmērīto jaudas plūsmu rada sistēmā esošie elektromehāniskie zudumi.

Kontroliera (4.5. att.) uzdevums ir mainīt griezes momenta komandu, lai kompensētu zudumus reālā piedziņas iekārtā, kā redzams 4.6. attēlā.



3.5. att. Līdzstrāvas plūsmas emulatora regulatora plate un korpuss.

3.6. att. Izstrādātie *DC* jaudas plūsmas emulatori RTU *AREUS demo* laboratorijā.

Galīgie darbības parametri attiecībā uz līdzstrāvas plūsmas fizikālas emulācijas iespējām ir apkopoti 3.1.tabulā.

3.1. tabula

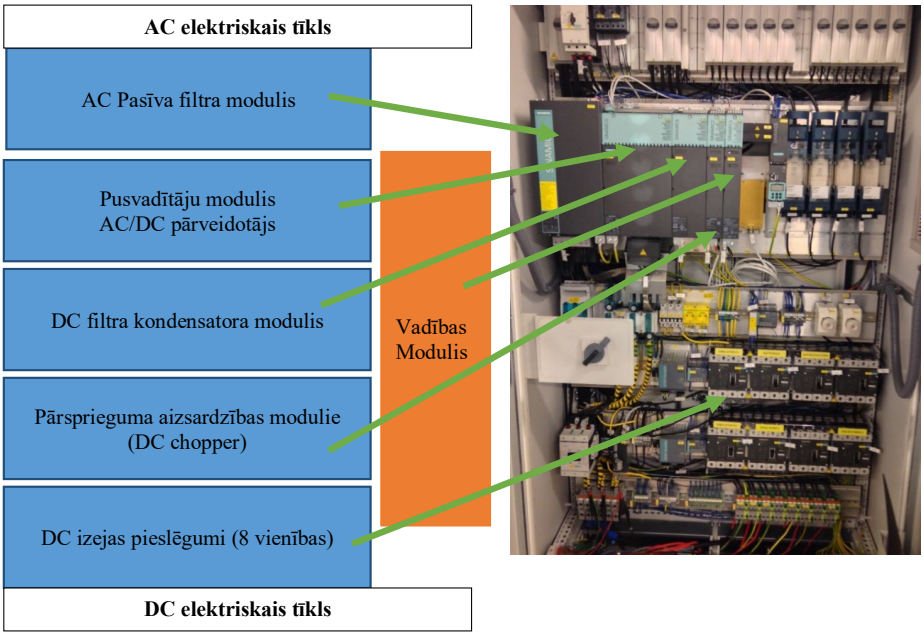
DC jaudas plūsmu emulatora veiktspējas parametri

DC jauda	P_{DC} (rekuperācija)	–18 kW
	P_{DC} (slodze)	+22 kW
Jaudas izmaiņu ātrums	*dP/dt* (rekuperācija)	–378 kW/s
	dP/dt (slodze)	+448 kW/s

Visaptveroša izstrādes procedūra aprakstītajai divvirzienu jaudas plūsmas emulatora sistēmai ir izklāstīta (11). Ir norādītas iespējamās alternatīvas piedziņas vadības pieejas, pamatojoties uz piltuves (*Funnel*) tipa regulatoru [24], attiecībā uz konkrēto lietojumu (14).

Aktīva ievada maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja analīze un modelēšana

Maiņstrāvas/līdzstrāvas elektriskā savienojuma pārveidotājs divvirzienu elektroenerģijas apmaiņai starp 600 V līdzstrāvas lokālo rūpniecisko mikrotīkla sistēmu un esošo maiņstrāvas infrastruktūru ir izmantots, lai radītu jaudas plūsmas nosacījumus līdzīgi kā reālajā ražošanas procesā.



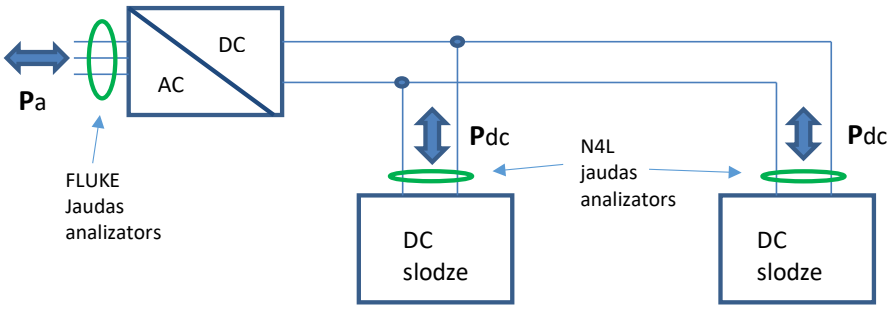
3.7. att. Maiņstrāvas/līdzstrāvas saskarnes pārveidotāja (pa labi) un funkcionālā bloka montāžas struktūras (pa kreisi) praktiska realizācija.

Elektroiekārtu pamatā ir rūpnieciskās klases komponenti, kas izvēlēti konkrētai prototipa darbībai saskaņā ar plānoto līdzstrāvas tīkla demonstrēšanu *AREUS* projekta ietvaros. Centrālā maiņstrāvas/līdzstrāvas saskarnes pārveidotāja ietekme uz līdzstrāvas mikrotīklu ir jānovērtē, mērot gan ar maiņstrāvu, gan ar līdzstrāvu saistītos elektriskās sistēmas darbības apstākļus, kā arī tipiskos raksturlielumus, kas ir efektivitāte, jaudas kvalitāte un līdzīgi parametri. Darbā izmantota ideja par vispārinātu pārveidotāja darbības modeļa izveidi, pamatojoties uz fiziskiem mērījumiem, jo pieeja modeļos balstītai līdzstrāvas tīkla projektēšanai ir interesanta turpmākai attīstībai un praktiskam lietojumam gan rūpniecībā, gan pētniecības vidē.

- **Eksperimentālās testēšanas metodes**

Lai novērtētu maiņstrāvas/līdzstrāvas elektrisko saskarņu pārveidotāju veiktspēju, ir izstrādāta elektriskā shēma divvirzienu jaudas plūsmas darbībai. Ir veikti 40 kW jaudas diapazonā gan slodzes, gan rekuperācijas režīmos attiecībā pret maiņstrāvas tīklu. Shematiskais slēgums,

izmantojot divas jaudas plūsmas emulācijas iekārtas, tika realizēts tā, kā redzams 3.8. attēlā. Elektriskās jaudas mērīšana ir veikta ar augstas precizitātes jaudas analizatora aprīkojumu. Ir izmērītas divas līdzstrāvas puses jaudas plūsmas ar *N4L PPA3300* jaudas analizatoriem, kas savienoti ar elektriskās piedziņas stendiem jaudas plūsmas eksperimentam, kā redzams 3.9. attēlā.



3.8. att. Maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja darbības eksperimentālo mērījumu shēmas struktūra.

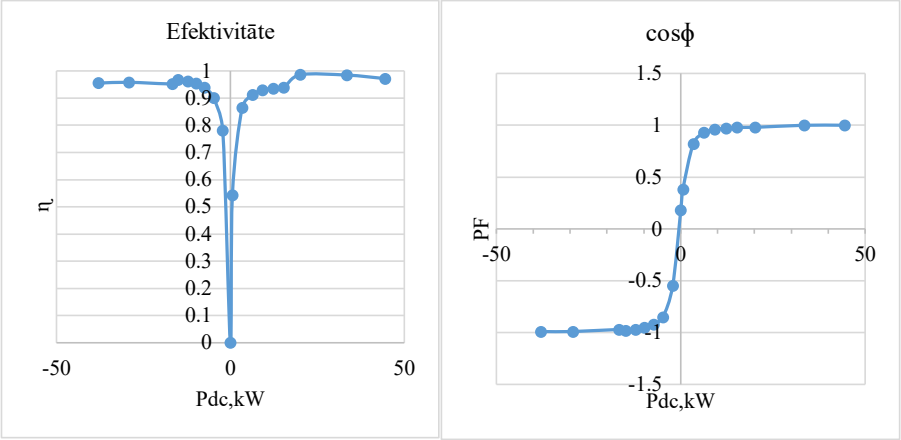
3.9. att. *FLUKE 434 II* sērijas mēriekārta ir uzstādīta maiņstrāvas tipa elektriskās jaudas mērījumiem (pa kreisi) un *N4L PPA3300* jaudas analizatori un līdzstrāvas elektroenerģijas plūsmas emulatori fonā (pa labi).

Uzrādītā testēšanas konfigurācija ir izmantota dažādos slodzes vai ģenerētās jaudas līmeņos diapazonā no –36 kW (ģenerators) līdz 45 kW (slodze). Dažādos jaudas līmeņos ir iegūti pārveidotāja darbības rezultatīvie rādītāji.

Efektivitāte iegūta, novērojot jaudas mērījumus abās maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja pusēs un to attiecību atkarībā no jaudas plūsmas. Negatīvā līdzstrāvas jauda ir darbība enerģijas atgriešanai maiņstrāvas tīklā, savukārt pozitīvā – enerģija, kas tiek ņemta no maiņstrāvas tīkla. Pārveidotāja efektivitāte ir iegūta diapazonā no –36 kW līdz 45 kW. Efektivitātes parametri augstāki par 0,9 ir plašā darbības diapazonā, kas pārsniedz 5 kW gan patēriņam, gan reģenerācijai.

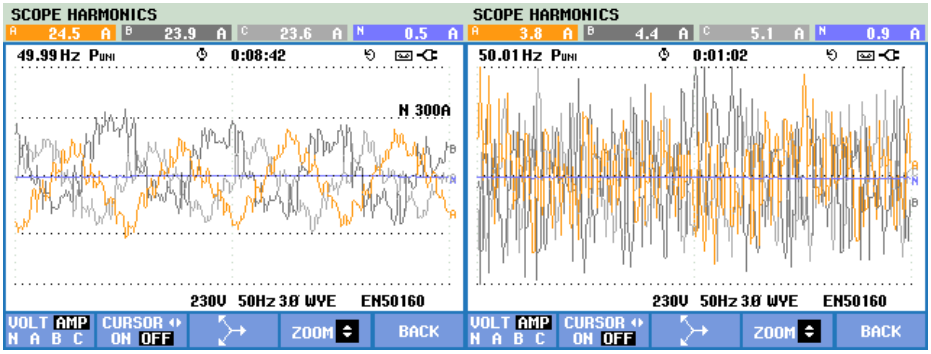
Jaudas koeficients norāda iekārtu spēju efektīvi izmantot elektrisko infrastruktūru un patērēt aktīvo jaudu bez reaktīvās jaudas komponentes. Ideāls jaudas koeficienta gadījums, kas

sasniedz vērtību 1, nozīmē, ka no maiņstrāvas tīkla ir iegūta tīra aktīvā jauda. Reģenerācijas maiņstrāvas tīklā gadījumā attiecīgā ideālā jaudas koeficienta vērtība ir –1.
Attiecīgie efektivitātes un jaudas koeficienta rezultāti saistībā ar pārveidotāja līdzstrāvas puses jaudas plūsmu redzami 3.10. attēlā.



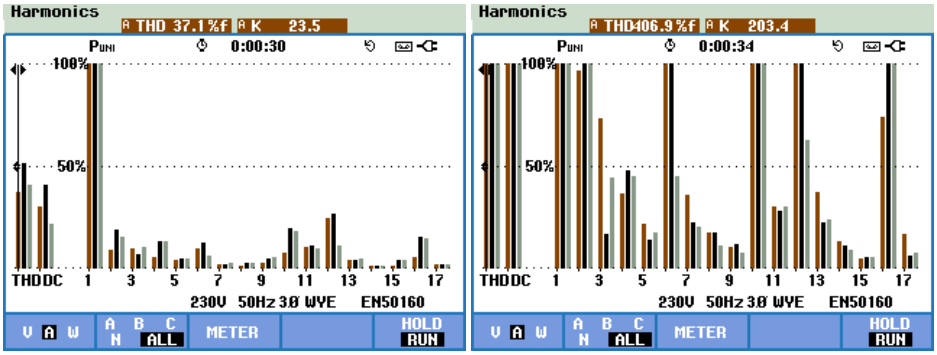
3.10. att. Maiņstrāvas-līdzstrāvas pārveidotāja efektivitāte un jaudas koeficients, kas saistīts ar pārveidotāja līdzstrāvas puses jaudu.

Kopējais harmonisko kropļojumu koeficients (*THD*). Maiņstrāvas sistēmas nominālā frekvence ir 50 Hz, tāpēc maiņstrāvas sprieguma līknēm un strāvas formai ideālā gadījumā jābūt tikai 50 Hz sinusoidālam. Reālos lietojumos ir citas harmonikas vai komutācijas frekvences trokšņi, un tie rada papildu zudumus un samazina elektroenerģijas kvalitātes parametrus. Attiecīgais parametrs, ko sauc par kopējo harmonisko kropļojumu koeficientu (*THD*), kas izteikts procentos, ļauj novērtēt sprieguma vai strāvas harmonisko saturu. Ideālā gadījumā *THD* vērtībai jābūt 0, ja analizētajā līknē ir tikai bāzes frekvence. Var novērot, ka pašreizējās formas kvalitāte tiek ievērojami pasliktināta vieglas slodzes apstākļos, kā redzams 3.11. attēlā.



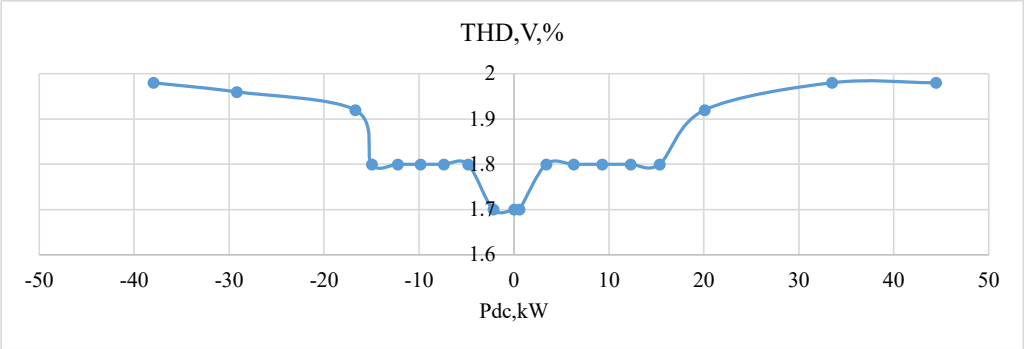
3.11. att. Maiņstrāvas fāzes forma pie P_{DC} = 15,3 kW, vidējā strāva 24A (pa kreisi) un P_{DC} = –2,2 kW, vidējā strāva 4,5 A (pa labi).

Ir iegūta harmoniska analīze un *THD* koeficienta aprēķins abām līknēm ar attiecīgio rezultātu, kas redzams 3.12. attēlā.

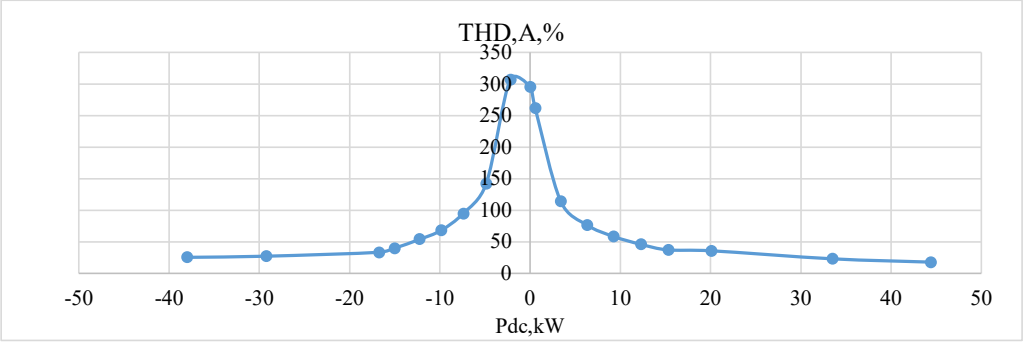


3.12. att. Maiņstrāvas fāzes strāvas harmoniskā analīze pie P_{DC} = 15,3 kW, vidējā strāva 24 A (pa kreisi) un P_{DC} = –2,2 kW, vidējā strāva 4,5 A (pa labi).

Izmērītie iegūtā ekspluatācijas režīma raksturlielumi – 3.13. un 3.14. attēlā, kur ir redzamas būtiskas maiņstrāvas puses strāvas līkņu svārstības vieglas slodzes apstākļos, bet sprieguma kropļojumi ir mazāk izteikti.



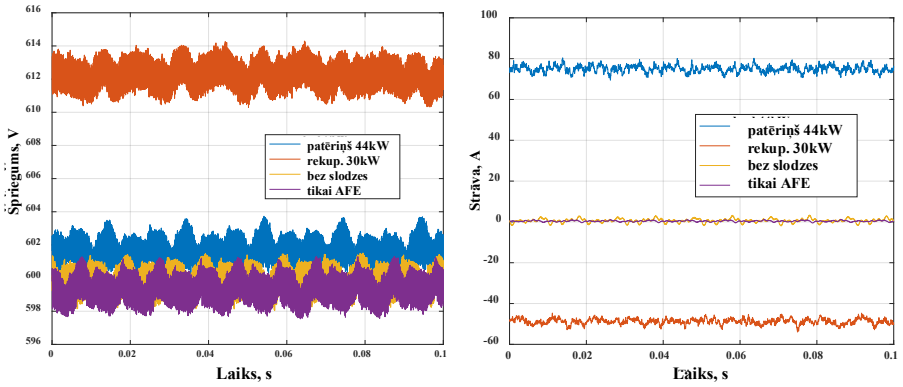
3.13. att. Iegūtā sprieguma *THD* izmaiņas attiecībā pret līdzstrāvas puses jaudu un slodzes darbību.



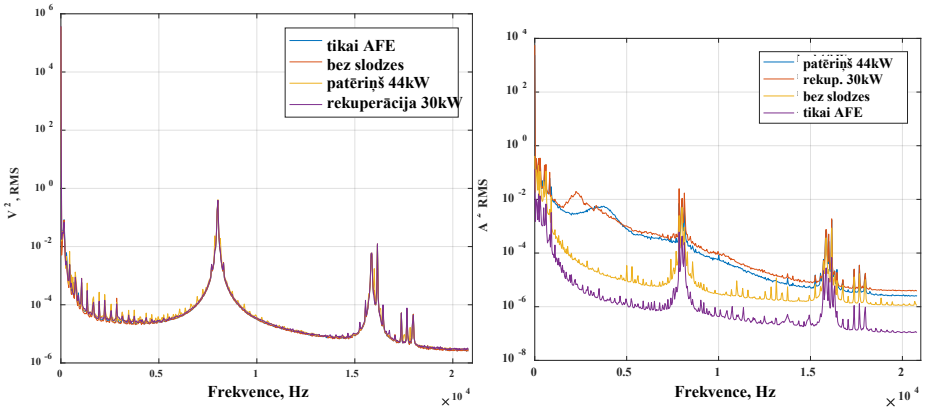
3.14. att. Iegūtās strāvas *THD* izmaiņas attiecībā pret līdzstrāvas puses jaudu un slodzes darbību

Līdzstrāvas puses mērījumi

Līdzstrāvas tīkla darbības īpašību analīzei maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotājs ir darbināts dažādos slodzes un rekuperācijas jaudas līmeņos, ko aktivizē iepriekš aprakstītās līdzstrāvas jaudas plūsmas emulatora iekārtas. Sprieguma un strāvas līknes ir iegūtas, izmantojot *DataTranslation DAQ* ieraksta moduli ar maksimālo nolasīšanas frekvenci 44 kHz. Turpmāk norādītie skaitļi attēlo *AC/DC* pārveidotāja darbības parametrus laika (3.15. att.) un frekvenču (3.16. att.) izteiksmē.



3.15. att. *DC* posma spriegums un strāvas forma uz *AFE* pārveidotāja *DC* pieslēguma spailēm laikā.



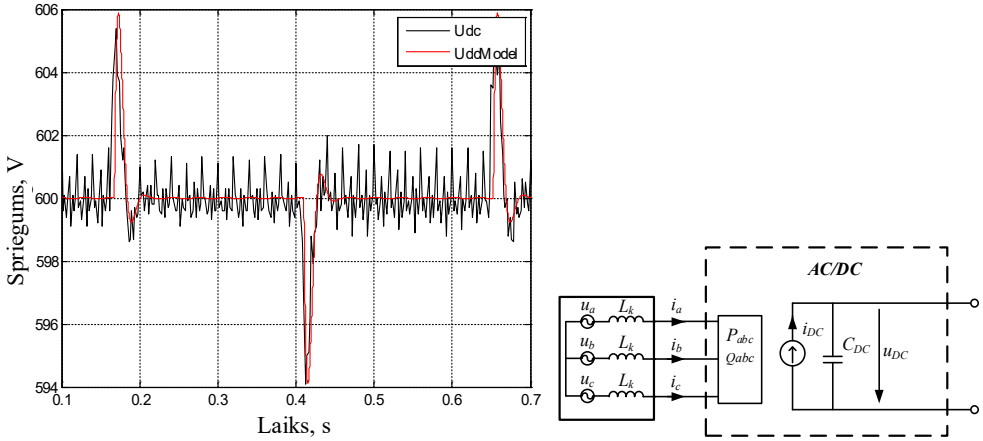
3.16. att. Līdzstrāvas posma sprieguma un strāvas frekvences harmoniskā sastāva analīzes rezultāti dažādos slodzes stāvokļos.

Iegūtie dati atspoguļo pamata 8 kHz maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja komutācijas frekvenci un līdzstrāvas puses sprieguma izmaiņas, paaugstinoties par 10 V reversās jaudas plūsmas darbības rezultātā. Tiek novērota iegūtā strāvas līknes spektra izplešanās augstākas slodzes apstākļos un identificēti ievērojami galvenās komutācijas frekvences radītie efekti, lai labāk izstrādātu saistītās mērīšanas iekārtas un apzinātu signāla filtrēšanas vajadzības. *DC* frekvenču satura un ar to saistīto *EMC* jautājumu prasības ir viena no apspriestajām jomām (8), un, lai gan daži standarti jau ir piemērojami, piemēram, ar *PV* saistītām *LVDC* sistēmām [26], daudzi aspekti ir jāapskata turpmākajās standartizēšanas darbībās [25].

Vienkāršota maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja modeļa izstrāde

Pamatojoties uz pieejamajiem datiem, ir ieviesta pieeja atbilstoša maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja modeļa izstrādei, kā publicēts autora 9. un 12. publikācijā. Pulsveida slodzes izmaiņu testēšana sprieguma dinamiskajām izmaiņām līdzstrāvas kopnē ir veikta ar

pakāpienveida slodzes izmaiņām 6,5 kW. Vienkāršotais dinamiskais modelis ir izstrādāts atbilstoši 3.17. attēlā redzamajai struktūrai.

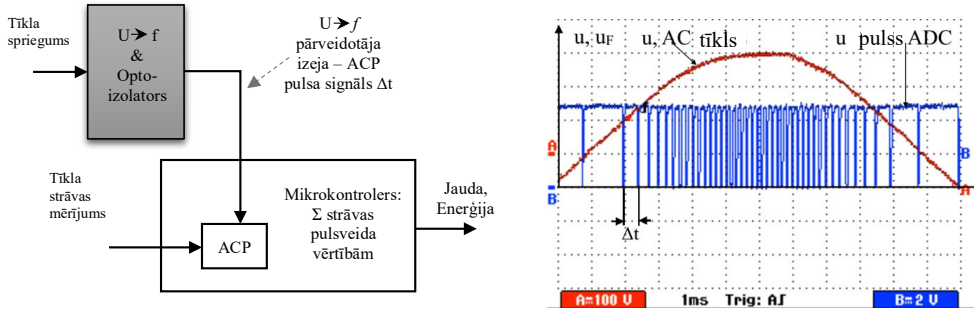


3.17. att. Reālā un modelētā līdzstrāvas kopnes sprieguma dinamika (pa kreisi) un ieviestā modeļa struktūra (pa labi).

Dinamiskā procesa modelēšanas pamatprincips ir vadāma avota nodrošināta strāva kondensatorā, kas atbilst 4,1 mF *DC* filtra kondensatoram Kondensatora izejas spriegums ir iestatīts 600 V, kas atbilst mikrotīkla nominālajam spriegumam. Kondensatora uzlādi un izlādi ir vada *PI* tipa regulators, kas mēra izejas spriegumu attiecībā pret nominālo un attiecīgi vada strāvas avotu. Citi aspekti, piemēram, maiņstrāvas un līdzstrāvas posmu jaudas bilance un pārveidotāja zudumi, ir balstīti iepriekš aprakstītajā efektivitātes un jaudas koeficienta datu, kas iegūti mērījumos, aproksimācijā.

Sinhronizētas jaudas plūsmas mērīšanas sistēmas lietojums

Lai veiktu sinhronizētus jaudas plūsmas mērījumus maiņstrāvas un līdzstrāvas elektroapgādes sistēmām, laboratorijas un rūpnieciskajā līdzstrāvas apgādes infrastruktūrā ir izstrādāts un pielāgots mērīšanas ierīču komplekts. Motivācija piemērot pielāgotu jaudas mērīšanas aprīkojumu ir saistīta ar ātru un laika ziņā koordinētu datu vākšanas vajadzību un datu pārsūtīšanu, izmantojot rūpnieciskos komunikāciju tīklus, piemēram, *Profinet*. Arvien pieaugošajai nesinusoidālo, divvirzienu, maiņstrāvas un līdzstrāvas enerģijas plūsmu atbilstībai reālās elektroietaisēs ir nepieciešami lēti un izkliedēti jaudas monitoringa un mērīšanas risinājumi. Iepriekšējās pētniecības aktivitātes ir radījušas jaunu jaudas plūsmas mērīšanas pieeju, izmantojot nevienmērīga laika nolasījumus [27].



3.18. att. Sprieguma vadīta mainīga oscilatora datu nolasīšanas sistēmas darbības princips [27].

Nolasījumu veikšanai tiek izmantots mainīgas frekvences oscilators, kas atbilst momentāni izmērītam spriegumam *u* ar lineāro koeficientu *K*, kā redzams 3.4. vienādojumā.

$$f_{sample} = Ku \tag{3.4}$$

Mērījumu biežums nosaka integrācijas laika periodus *Δt* enerģijas aprēķināšanai, kā redzams 3.5. vienādojumā.

$$\Delta t = \frac{1}{f_{sample}} = \frac{1}{Ku} \tag{3.5}$$

Enerģijas aprēķinu noteiktajā laikposmā *T* iegūst atbilstoši 3.6. vienādojumam.

$$\mathrm{W} = \sum_{0}^{T} p\Delta t = \sum_{0}^{T} ui\Delta t \tag{3.6}$$

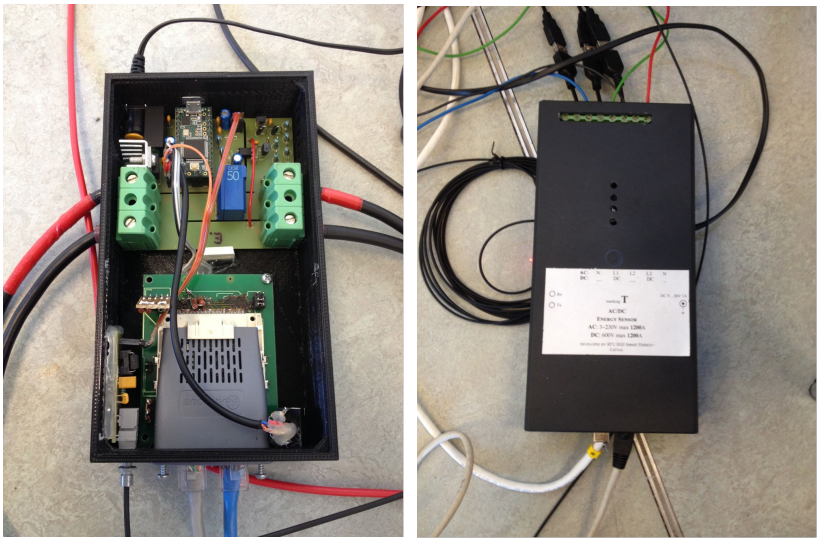
Laika periodi *Δt* ir saistīti ar mainīgu paraugu ņemšanas procesu lineārā attiecībā pret sprieguma vienādojumu, tāpēc tos var pārkārtot saskaņā ar 3.7. vienādojumu.

$$\mathrm{W} = \sum_{0}^{T} ui\Delta t = \sum_{0}^{T} \frac{ui}{Ku} = \frac{1}{K}\sum_{0}^{T} i \tag{3.7}$$

Pamatojoties uz apskatīto mērīšanas darbības principu kopumu, ir izstrādātas iekārtas lietošanai rūpnieciskajā mikrotīklā un analīzei atsevišķām ražošanas iekārtām un attiecīgajai jaudai. Praktiski elektriskajā instalācijā ir sastopamas dažādu veidu elektriskā savienojuma tehnoloģijas un metodes, tāpēc arī elektriskās jaudas mērīšanas aprīkojums ir pielāgots gan integrētiem, gan ārējas strāvas mērīšanas risinājumiem. Rūpniecisko robotu elektroenerģijas mērierīces konstruktīvi ir veidotas kā pagarinājuma kabelis esošajiem rūpnieciskajiem savienojumiem, kā redzams (3.19. att.).

3.19. att. Jaudas mērītājs kā rūpnieciskā robota pagarinājuma kabelis.

Tiek lietots integrēto līdzstrāvas jaudas mērīšanas ierīču komplekts ar iekšējās strāvas mērīšanas sensoru. Lielāku jaudas līmeņa mērījumos un trīsfāžu sistēmā ir izmantotas mērierīces ar ārēji pieslēgtām strāvas mērīšanas cilpām (3.20. att.). Papildu komunikācijas moduļi optisko datu pārsūtīšanai un rūpniecisko datu protokola standartam *Profinet* kas integrēti vienā ierīcē.



3.20. att. Jaudas mērītājs ar integrētiem strāvas mērījumiem un ārējās strāvas klemmēm.

Lai apkopotu laika sinhronizētus un nepārtrauktus izkliedētās jaudas plūsmas mērīšanas iekārtas datus, ir ieviesta optiskā datu komunikācija. 3.21. attēlā attēlots centrāls optiskās šķiedras savienojumu modulis centralizētai datu ieguvei.

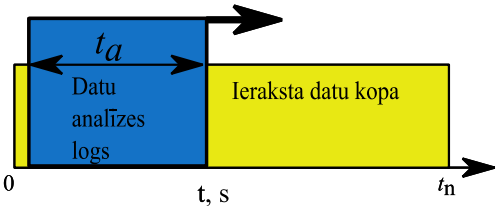
3.21 att. Optisko šķiedru datu pārraides un apkopošanas ierīce.

Sinhronizēta datu kopa tiek izveidota, apkopojot atsevišķu mērierīču datus ar divvirzienu optisko sakaru datu tīklu, kas nodrošina sinhronu pieprasījumu katram jaudas plūsmas mērītājam ik pēc 20 ms. Iekšēji katra jaudas mērītāja bloka paraugu ņemšanas frekvence ir 2,8 kHz, un tas nodrošina vidējo vērtību pēc pieprasījuma par iepriekšējo 20 ms iegūšanas laikposmu.

Cikliskās darbības parametru analīze

DC mikrotīkla uzstādīšana tiek īstenota laboratorijas mērogā, tāpēc ir aktuāla arī attiecīgā sistēmas darbības analīze un ar to saistītā strāvas aizsardzības aprīkojuma izvēle vai energoapgādes mezglu dimensionēšana. Raksturīga īpašība rūpnieciskās ražošanas plietojumos ir saistīta ar automatizēto procesu ciklisku atkārtošanos un attiecīgo elektroenerģijas patēriņa dinamiku.

Parasti dati par konkrēto paraugu ņemšanas biežumu f_{sample} attiecīgajā laika periodā ar garumu t_n tiek iegūti mērījumos vai simulācijās. Darbā tiek izmantota pieeja ievades datu analīzei, pamatojoties uz slīdoša analīzes loga piemērošanu ilgāka darbības perioda eksperimentālo datu kopas apstrādei. Slīdošās analīzes logs, kas tiek pārvietots pa visu datu kopu ar mainīgu loga platumu, var nodrošināt metodi datu kategorizācijai vai ar laiku saistītai sadalījuma analīzei, kā redzams 3.22. attēlā.



3.22. att. Slīdošās analīzes loga pieejas grafiska vizualizācija jaudas datu analīzei.

Šī ideja tiek izmantota dinamiskās jaudas variācijas analīzei, lai gūtu pārskatu par elektriskās slodzes raksturu, maksimālo momentāno jaudas pieprasījumu un attiecīgo kombinēto jaudas pieprasījumu slodžu grupai kas aprakstīts autora 8. publikācijā.

Tādējādi minimālās un maksimālās bīdāmā loga platuma opcijas var definēt, pamatojoties uz 3.8. un 3.9. vienādojumu.

$$T_{min} = \frac{1}{f_{sample}} \tag{3.8}$$

$$T_{max} = t_n \tag{3.9}$$

Minimālo analīzes intervālu nosaka datu paraugu ņemšanas frekvence un attiecīgo attālumu laikā starp diviem blakus esošiem paraugiem. Analīzei pieejamo maksimālo logu ierobežo kopējais datu paraugu ņemšanas laikposms t_n. Mainot loga platumu T_a, var noteikt attiecīgu skaitu šādu paraugu novērtēšanai analīzes logā saskaņā ar 3.10. vienādojumu.

$$n = \frac{T_a}{f_{sample}}, T_a \in [T_{min}, T_{max}] \tag{3.10}$$

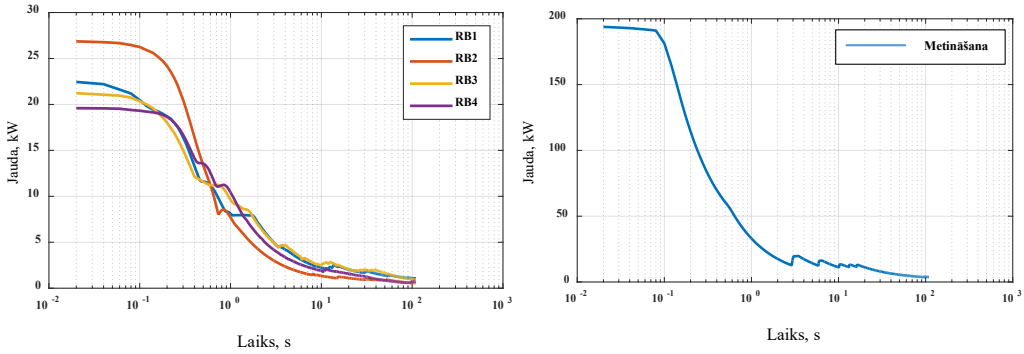
Vidējās jaudas P_{avg} novērtēšana analīzes loga ietvaros tiek pārvietota atbilstoši paraugu skaitam i, kas attēlots ar šādu 3.11. vienādojumu.

$$P_{avg}(i, T_a) = \frac{1}{n}\sum_{i}^{i+n} P_i, i \in [1, t_n - n] \tag{3.11}$$

Galīgo analīzes rezultātu konkrētam analīzes loga platumam, kas tiek pārvietots pa sākotnējiem datiem, nosaka saskaņā ar 3.12. vienādojumu.

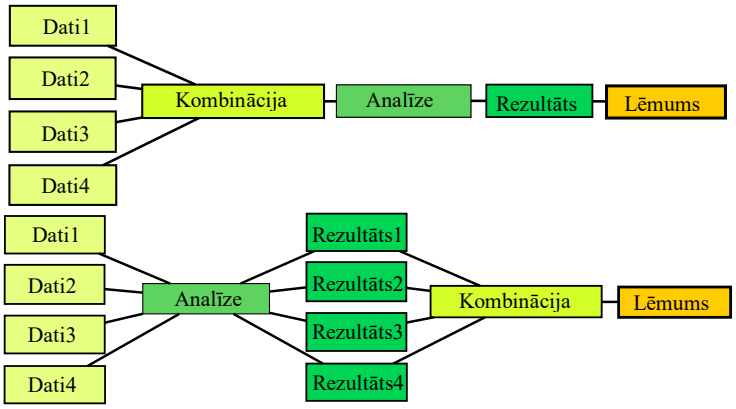
$$P(T_a) = \max(P_{avg}(i, T_a)) \tag{3.12}$$

Veicot analīzi saskaņā ar vienādojumiem 3.8 līdz 3.12, var noteikt elektriskās slodzes raksturīgo izturēšanos momentānās maksimālās jaudas prasības, kā redzams 3.23. attēla piemērā.



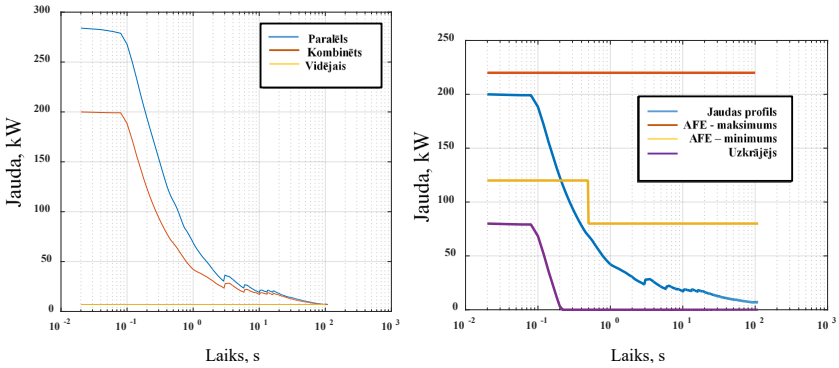
3.23. att. Četru manipulatoru komplekta (pa kreisi) un metināšanas procesa (pa labi) maksimālās jaudas analīzes rezultāti.

Apskatīto analītisko pieeju turpmāk piemēro savstarpēji savienotam *DC* mikrotīkla maksimālās jaudas novērtējumam un attiecīgam ievada pārveidotāja jaudas novērtējumam. Šajā grafiskajā darba plūsmā (3.24. att.) ir attēlotas divas pieejas, kuru pamatā ir pieejamā informācija, ja ir pieejams tikai atsevišķs elektroenerģijas vienības jaudas profils vai ir pieejama arī informācija par kombinēto sistēmas darbību un koordinēšanu laikā.



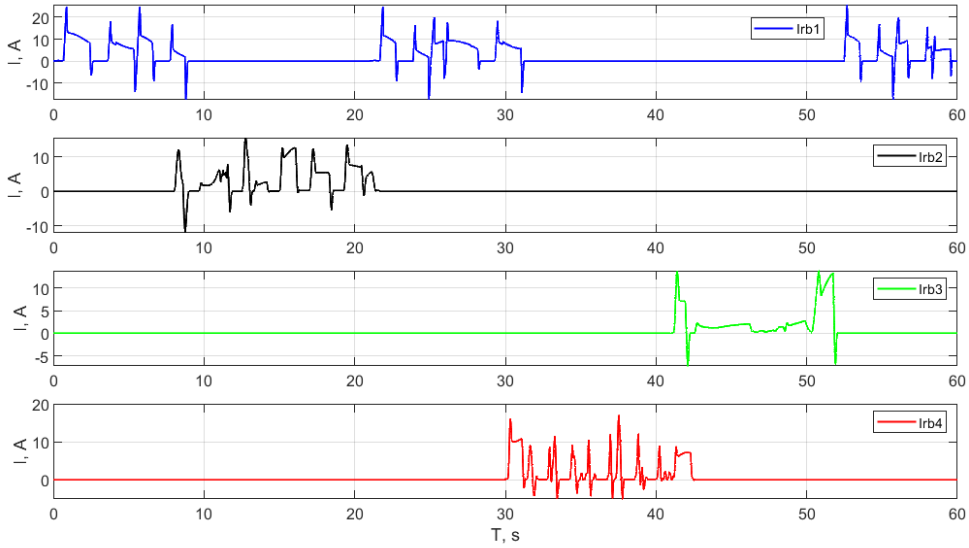
3.24. att. Paralēlās jaudas maksimuma pieprasījuma analīzes pieejas (attēlā augšā un kombinētās pieejas (attēlā lejā) salīdzinājums.

Iegūtie rezultāti liecina par panāktā maksimālā jaudas pieprasījuma būtiskām atšķirībām, attiecīgi –arī sistēmas modelēšanas vajadzības nozīmi, lai iepriekš pieņemtu lēmumu attiecībā uz elektrisko sistēmu un komponentu dimensionēšanu.



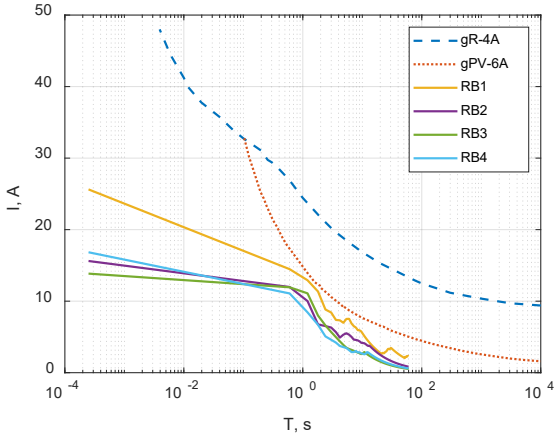
3.25. att. Jaudas pieprasījuma paralēlas un kombinētās analīzes rezultāts (pa kreisi) un pārveidotāja nominālās jaudas izvēles pieeja ar dinamiska enerģijas uzkrājēja lietojumu (pa labi).

Līdzīga pieeja ir izmantota rūpniecisko robotu cikliskās strāvas profilu analīzei (10). Interese par atsevišķu iekārtu strāvas plūsmas rakstura analīzi ir bijusi saistīta ar optimālu atbilstoša ķēdes aizsardzības elementa izvēli, kā arī unikālu modeļu identificēšanu katram robotam turpmākai diagnostikai. Kombinācijā ar pusvadītāju ķēdes aizsardzības attīstību [28] var izmantot arī adaptīvu pieeju galveno parametru pielāgošanai. Kā rūpniecisko robotu analīzes ieejas datu kopu izmanto pieejamos strāvas patēriņa profilus, kā redzams 3.26. attēlā.



3.26. att. Patērētāju elektriskās slodzes strāvas profilu piemērs 60 s atkārtotam rūpnieciskās ražošanas ciklam, ja četri rūpnieciskie roboti palīdz veikt vairākas darbības: *IRB1* – materiālu padeve; *IRB2* – pārvieto metināšanas iekārtu; *IRB3* – līmes dozators; *IRB4* – pārvieto kniedēšanas iekārtu.

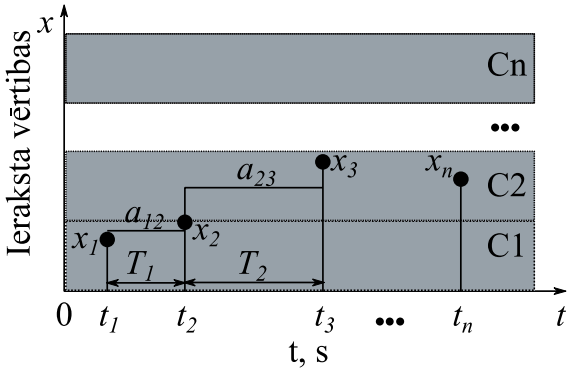
Iegūto maksimālo vidējo vērtību analīze attiecībā uz laika ilgumu redzama 3.27 attēlā, un tā salīdzināta ar dažiem tipiskiem drošinātāju raksturlielumiem, kas pieejami datu lapās par *PV* un vispārējām tipa slodzēm.



3.27. att. Slīdošā loga analīzes salīdzinājums attiecībā uz lielākajām vidējām strāvas vērtībām un tipiskām *GR-4A* un *GPV-6A* tipa drošinātāju strāvas laika līknēm.

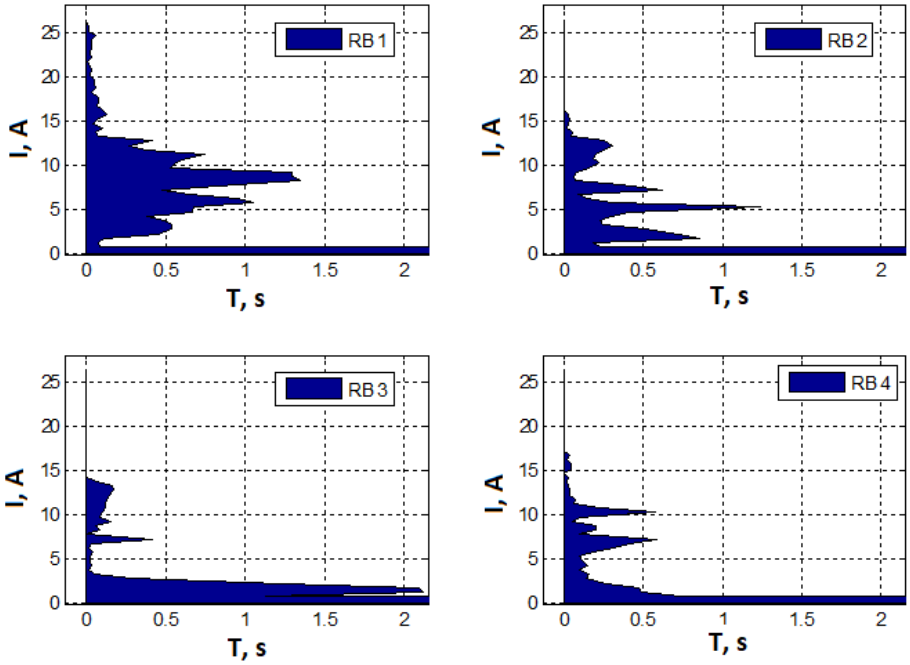
Cita pieeja ir veikta, izmantojot slīdošā loga pieeju, lai iegūtos mērījumu paraugu datus iedalītu kategorijās C no izmērītajām vērtībām x. Tādējādi kopējais darbības perioda laikposms no 0

līdz pēdējam paraugam t_n saskaņā ar attiecīgajām parauga mērījumu vērtībām ir piešķirts kategorijām no C_1 līdz C_n, aptverot visu izmērīto pašreizējo strāvas profila vērtību diapazonu.



3.28. att. Strāvas nolasījumu x kategorizācijas analīzes grafisks attēlojums C_n klasēs.

Šāda pieeja tika apsvērta turpmākai darbībai tiešsaistes analītiskam monitoringa rīkam, kas radītu modeli katrai atsevišķai robota darbībai konkrētajā ražošanas ciklā. Ja cikla laiks ir fiksēts, tad arī iegūtais analīzes modeļa rezultāts, kas iegūts ar reģistrētu pašreizējo strāvas profilu, būtu līdzīgs. 3.29. attēlā redzams slodzes strāvas darbības grafisks attēlojums.



3.29. att. Palielināts analīzes rezultātu skats laika posmam, kas mazāks par 2 s.

4. LĪDZSTRĀVAS MIKROTĪKLA EKSPERIMENTĀLĀ PĀRBAUDE LABORATORIJĀ UN ROBOTIZĒTĀ AUTOMOBIĻU RAŽOŠANAS IECIRKNĪ

Robotizētas ražošanas līdzstrāvas mikrotīkla ieviešana automobiļu ražošanai

Lai eksperimentāli izpētītu ar līdzstrāvas mikrotīkliem saistītas iekārtas un demonstrētu pieejamās jaunākās tehnoloģijas, "*Daimler AG*" uzņēmums ir ieviesis jaunu līdzstrāvas mikrotīkla sistēmu rūpnīcā, kas atrodas Sindelfingenā, Vācijā.

Kopā ar Rīgas Tehnisko universitāti ir veikti kopīgi pētniecības un attīstības pasākumi pētniecības projektā *AREUS*, tāpēc ļoti vērtīga ir rūpnieciskas līdzstrāvas sistēmas pieejamība tās darbības analīzei, kas atspoguļots autora 5. publikācijā. Īstenojot *AREUS* projektu, tika projektēts un izbūvēts tīkls, ko dēvē par *AREUS DC demo* šūnu un kas tika izmantots eksperimentos. Uzņēmumam "*Daimler AG*" ir zināšanas un pieredze automobiļu ražošanā un attiecīgās automatizācijas infrastruktūras attīstībā, tāpēc arī jauna līdzstrāvas elektrosistēma ir ieviesta saskaņā ar tipisku pieeju nepārtrauktam automobiļu ražošanas procesam, kas sadalīts vairākos apgabalos, ko dēvē par ražošanas šūnām.

Konkrētas *DC* demostrācijas šūnas uzbūve un funkcionalitāte ir balstīta šādos mērķos un veicinošos apstākļos, no kuriem galvenie ir šādi:

- kopēt daļu no reālā ražošanas procesa un demonstrēt projektēšanu un ieviešanu maiņstrāvas elektriskās infrastruktūras pārveidošanai līdzstrāvas elektroapgādes infrastruktūrā;
- piemērot esošos tehnoloģiju un automatizācijas standartus un vadlīnijas, ko "*Daimler AG*" globāli ievieš vairākās rūpnīcās;
- iekļaut vairākus tehnoloģiju rīkus un savienošanas tehnoloģijas automobiļu virsbūves ražošanai un veikt atbilstošu aprīkojuma pielāgošanu līdzstrāvas mikrotīkla darbībai;
- iegūt zināšanas par tirgū pieejamām līdzstrāvas elektroiekārtām un piegādātāju bāzi un apzināt nākotnē izstrādājamos tehnoloģiskos risinājumus.

Noteikto mērķu ietvaros ir izvēlēts viens esošs ražošanas iecirkņa jeb šūnas projekts, kas paredzēts vairāku metāla detaļu montāžai vienā lielākā, lai tās varētu izmantot tālākā montāžas procesā. Galvenās operācijas veic četru rūpniecisko robotu manipulatoru grupa apvienojumā ar punktmetināšanu, kniežu caurduršanu un līmēšanu, izmantojot savienojumu izgatavošanas tehnoloģijas. Praktiskā sistēmas uzbūve redzama 4.1. attēlā.

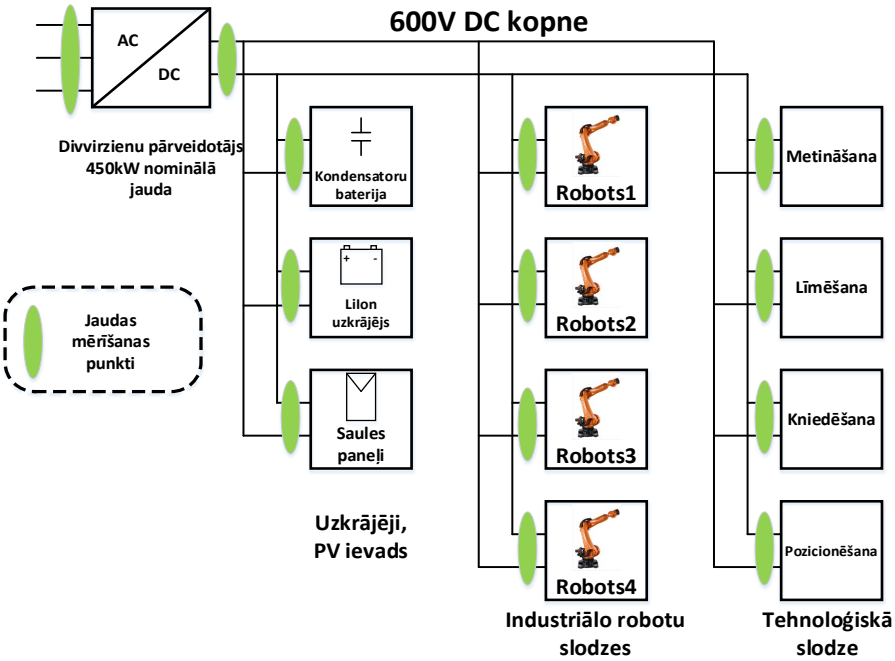
4.1. att. Līdzstrāvas mikrotīkla demonstrēšanas sistēma kā automobiļu ražošanas šūna eksperimentālai analīzei (5).

DC mikrotīkla šūna ir izbūvēta kvadrātveida formas telpā ar aptuveni 10 m sānu garumu un atdalīta ar drošības žogu. Gar ārējo malu izvietoti industriālo robotu kontrolleri un citi elektrotehnoloģiju iekārtu skapji, un kā gredzenveida konstrukcija, kas pacelta virs drošības žoga, ir ieviesta līdzstrāvas elektroapgādes kopne. 4.2. attēlā redzams lietoto iekārtu kopums un saistītās mērījumu vietas jaudas plūsmas analīzes datu apkopošanai ar RTU uzstādītajām, telpā izkliedēti novietotajām jaudas plūsmas mērīšanas iekārtām.

Sistēmas komponentu pārskats

DC mikrotīkla šūnas galvenie sistēmas komponenti ir:

- vadāma taisngrieža maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja bloks (*AFE*) ar nominālo jaudu 450 kW, kas samontēts no tirgū pieejamiem enerģijas pārveidošanas tehnoloģiju moduļiem;
- četru rūpniecisko robotu grupa *KUKA KRC4*, 210 kg celtspējas manipulatori;
- Litija-jonu akumulators un energoelektronikas pārveidotājs ar nominālo jaudu 30 kW;
- *PV* ievada *DC/DC* pārveidotājs;
- elektrolītisko kondensatoru modulis, 132 mF;
- tehnoloģiskie rīki, kas pielāgoti līdzstrāvas darbināšanai (punktmetinātājs, kniežu caurumošanas instruments, līmes dozators, rotējošs konveijera galds).



4.2. att. Izpētītā *DC* mikrotīkla struktūra izmantošanai automobiļu ražošanā.

Pieejamā konfigurācija tika izmantota vairākiem eksperimentāliem rūpnieciska lietojuma *DC* mikrotīkla sistēmas jaudas un energoefektivitātes novērtējuma testiem.

Atsevišķs robota iekārtas tests

- Rūpniecisko robotu elektroapgādes pārveide no maiņstrāvas uz līdzstrāvu un ar to saistītās energoefektivitātes izmaiņas.

DC tipa mikrotīkla darbības testi:

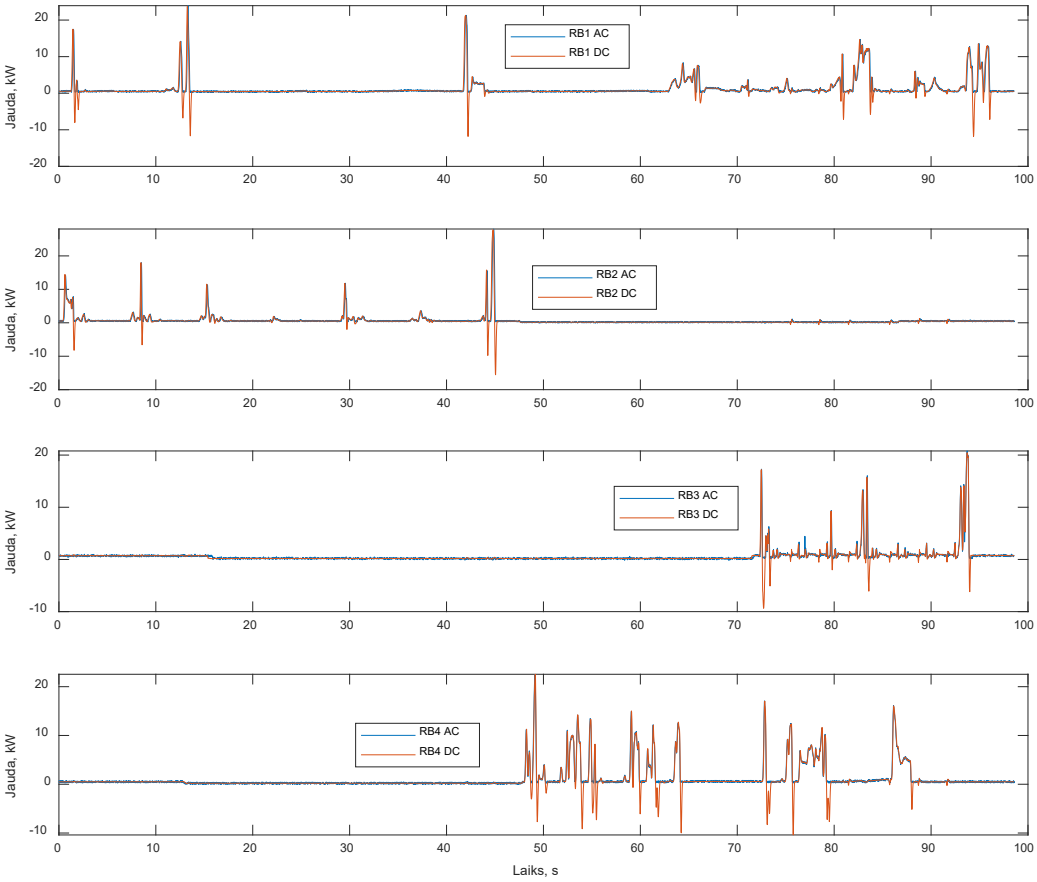
- Atkārtoti izmantotās enerģijas potenciāla aplēse atsevišķu iekārtu rūpnieciskam lietojumam.
- Augsta jaudas pieprasījuma režīma dinamiskie efekti.
- *DC* tipa mikrotīkla sistēmas jaudas bilance un centrālā *AC/DC* pārveidotāja veiktspējas novērtējums.

Atsevišķa robota darbības analīze, pārveidojot vadības kontrolieri no maiņstrāvas uz līdzstrāvas elektroapgādi

Šajā jaudas plūsmas mērījumu sērijā ir izmantota pieeja *KUKA KRC4* tipa rūpniecisko robotu vadības skapju fiziskai aizstāšanai no tradicionālā, kas paredzēts maiņstrāvai, ar līdzstrāvas lietojuma prototipu. Izmantotās jaudas plūsmas mērīšanas iekārtas spēj iegūt gan maiņstrāvas, gan līdzstrāvas tipa elektroenerģijas datus, tāpēc tās pašas ierīces tiek izmantotas un īpaši konstruētas rūpnieciskā robota korpusa *KUKA KRC4* elektriskā starpsavienojuma vajadzībām, kā aprakstīts iepriekšējā nodaļā. Ražošanas procesa laikā ir veikti mērījumi un ir novērots, ka robotu kustības veids ir mainījies atsevišķu montāžai izmantoto detaļu novietojuma dēļ. Detaļas

tiek piegādātas vertikāli, un pacelšanas laiks palielinās, ja nākamā vienība jāsatver zemākā pozīcijā, kā tas parasti ir bijis iepriekš. Maiņstrāvas un līdzstrāvas kontrolieru aizstāšanas analīzei ir iegūts tipisks pilna ražošanas cikla garums 98 s visiem četriem industriālajiem robotiem.

Nākamajā attēlā (4.3) redzams grafisks industriālo robotu jaudas plūsmas profilu salīdzinājums kombinētai četru rūpniecisko robotu darbībai ražošanas šūnā maiņstrāvas un līdzstrāvas tipa elektroapgādes izmantošanas gadījumos.



4.3. att. Četru industriālo robotu komplekta jaudas plūsma vienam ražošanas ciklam (maiņstrāvas un līdzstrāvas režīmos).

Vidējās jaudas aprēķins ražošanas ciklā veikts katram rūpnieciskajam robota kontrolierim, kā arī visu agregātu kombinētajam patēriņam. Rezultāti apkopoti 4.1. tabulā. Visos gadījumos maiņstrāvas elektroapgādei projektētā kontroliera aizstāšana ar līdzstrāvas kontrolieri ir samazinājusi vidējo patērēto jaudu robežās no 5,64 % līdz 12,55 %. Visbūtiskāk samazinājusies jauda robotam, kas veic mazo metāla detaļu savākšanu un izvietošanu vēlākiem savienošanas

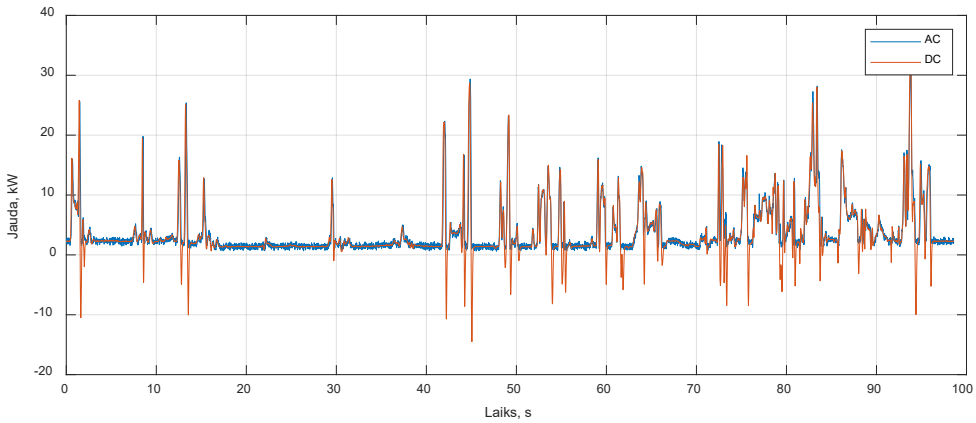
procesiem, ko atbalsta citi rūpnieciskie roboti. Visi iesaistītie roboti ir aprīkoti ar papildu instrumentiem, kuru svars pārsniedz 100 kg.

4.1. tabula

Rezultātu apkopojums kontrolieru aizvietošanas testam no *AC* uz *DC* tīklu

Robots Nr.	**Uzdevums**	**Vid. jauda, *AC* tīklā; kW**	**Vid. jauda, *DC* tīklā; kW**	**Starpība (*DC* tīkls *VS AC* tīkls); kW**	**Starpība, % no *AC* tīkla**
RB1	Līmēšana	1,274	1,161	–0,113	–8,87 %
RB2	Kniedēšana	0,693	0,634	–0,059	–8,51 %
RB3	Metināšana	0,638	0,602	–0,036	–5,64 %
RB4	Detaļu pad.	1,211	1,059	–0,152	–12,55 %
Kopā (4 vienības)	–	3,818	3,457	–0,361	–9,45 %

Maiņstrāvas rūpniecisko robotu lietojuma pārveidošana līdzstrāvas rūpniecisko robotu lietojumam ļauj izmantot enerģiju, ko nodrošina rekuperācija, un šādā piemērā četri rūpnieciskie roboti uzrāda kopējo vidējo patērētās jaudas samazinājumu par 9,45 %. *AC* un *DC* sistēmas kopējās četru industriālo robotu jaudas plūsmas grafiskais attēlojums dots 4.4. attēlā.



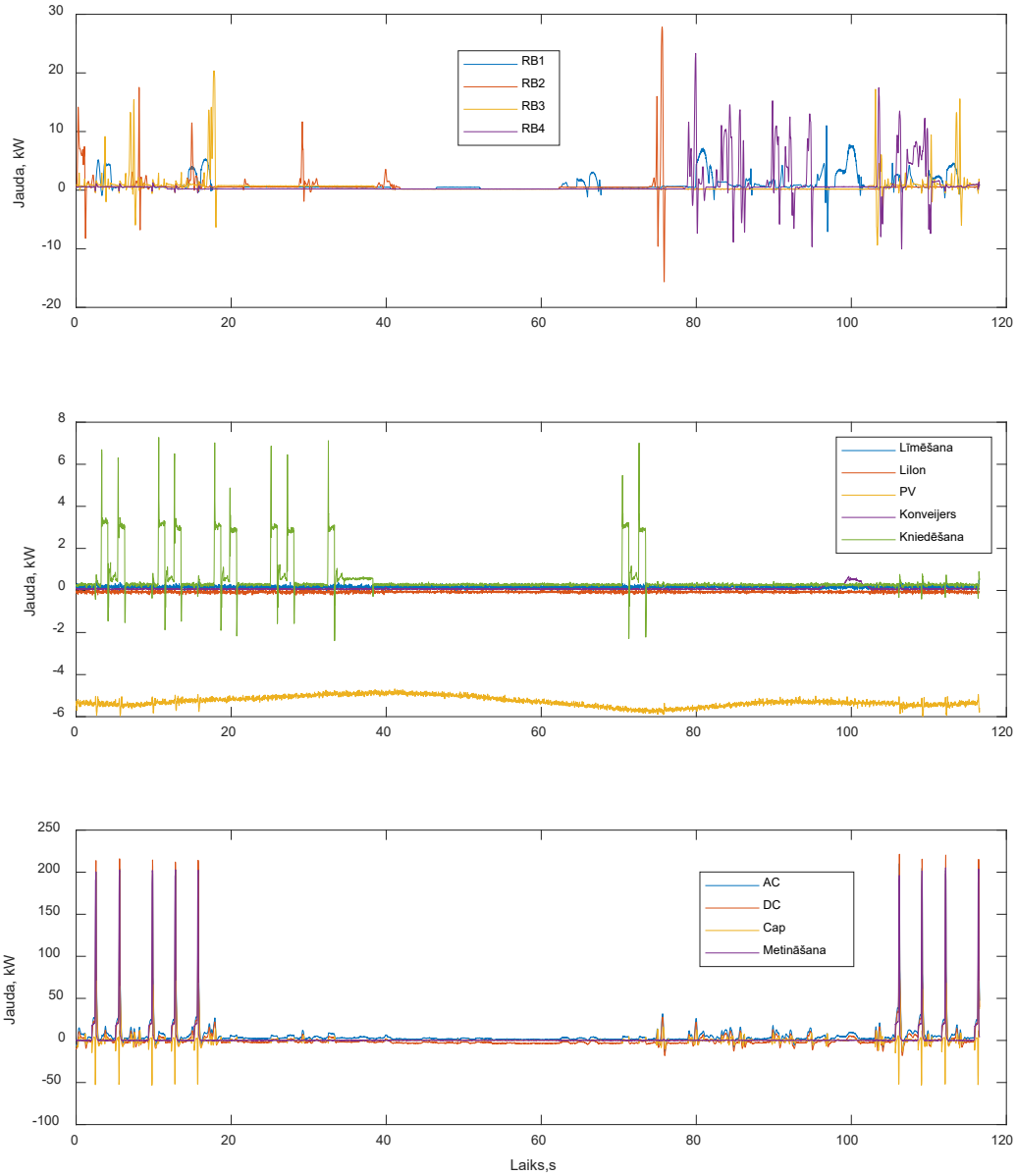
4.4. att. Četru rūpniecisko robotu grupas kopējā jaudas plūsma (maiņstrāvas un līdzstrāvas darbībā).

Veiktais eksperimentālais tests, aizstājot atsevišķus tirgū pieejamus maiņstrāvas rūpniecisko robotu kontrolierus ar līdzstrāvas tipa elektroapgādes prototipiem, apstiprina hipotēzi par energoefektivitātes uzlabošanu saistībā ar energoapgādes sistēmas pārveidošanu.

DC mikrotīkla darbības testi

Nākamajā nodaļā analizēti vairāki pilnvērtīgas *DC* demonstrācijas ražošanas šūnas darbības aspekti kā *DC* mikrotīkla sistēmai.

4.5. attēlā redzami eksperimentāli iegūtie jaudas plūsmas rezultāti 13 mērījumu vietās mikrotīklā. Atsevišķu vienību jaudas pieprasījuma izmaiņu un mēroga atšķirību dēļ attēls ir sadalīts trīs ierīču grupās. Visām četram rūpnieciskajām robotu vienībām ir līdzīgs darba režīms, un tās ir attēlotas uz augšējās ass. Tehnoloģiju instrumentiem, litija-jonu akumulatora un *PV* ievada pārveidotāja darbībai ir zemākas jaudas vērtības zem 10 kW, un tās ir attēlotas vidējā asī. Lieljaudas bloki, kas ir *AFE* maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotājs un punktmetināšanas instrumenta jauda, tiek apvienoti trešajā asī. Attēlā 4.5 redzams darbības periods 116 s laikā, aptverot vienu daļējas montāžas nepārtraukta procesa ciklu, kas ietver metināšanu, kniedēšanu, līmēšanu un ar to saistītu materiālu apstrādi. Testa periodā ir bijusi pieejama arī strāva no *PV* paneļiem, kas ievadīta kopējā *DC* kopnē.



4.5. att. Sinhronizēta jaudas plūsmas mērījuma rezultātu attēlojums 13 vietas rūpnieciskajā līdzstrāvas mikrotīkla sistēmā.

Atkārtoti izmantotās enerģijas potenciāla aplēse atsevišķu iekārtu rūpnieciskam lietojumam

Viens no konkrētajiem interesējošiem aspektiem ir divvirzienu enerģijas plūsmas un relatīvā enerģijas daudzuma novērtēšana, kas ir bijusi pieejama atkārtotai izmantošanai, pateicoties vienkāršotai enerģijas apmaiņai līdzstrāvas tipa sistēmā dinamiskos darbības apstākļos un rūpniecisko robotu rekuperācijas gadījumos. 4.1. un 4.2. vienādojums apraksta vidējo jaudas aprēķinu, noteiktā T analīzes periodā atdalot pozitīvās un negatīvās jaudas plūsmas P komponentes.

$$P_{pos} = \frac{\int_0^T P(t)}{T}; P(t) \in [0, \infty) \tag{4.1}$$

$$P_{neg} = \frac{\int_0^T P(t)}{T}; P(t) \in [-\infty, 0) \tag{4.2}$$

4.2. tabulā norādīti divvirzienu enerģijas plūsmas aprēķina rezultāti industriālo robotu iekārtām un elektrolītiskā kondensatora modulim, kas pievienots ražošanas šūnas *DC* kopnei.

4.2. tabula

Vidējo pozitīvas un negatīvas jaudas plūsmu aprēķina rezultāti atsevišķiem līdzstrāvas mikrotīkla elementiem

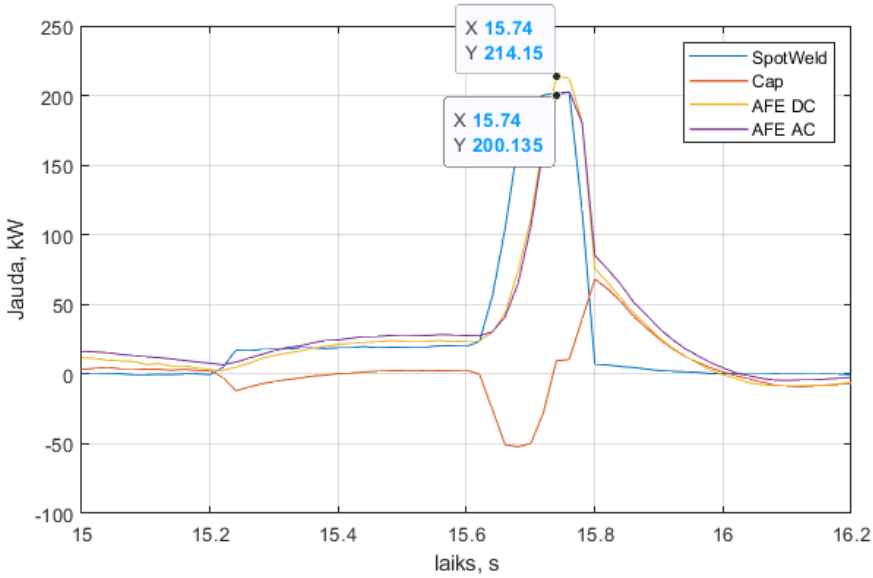
***DC* vienība**	**Uzdevums**	P_{pos}**, kW**	P_{neg}**, kW**	P_{neg}**/** P_{pos}**, %**
RB1	Līmēšana	1,123	0,044	3,92
RB2	Kniedēšana	0,660	0,040	6,10
RB3	Metināšana	0,582	0,029	4,95
RB4	Detaļu pad.	1,011	0,098	9,71
Kopā (4 roboti)	–	3,376	0,211	6,26
Kondensatoru modulis		1,089	0,677	62,21

Iegūtie rezultāti atspoguļo robotu bremzēšanas enerģijas atkārtotas izmantošanas gadījuma ieguvumus, kas izteikti kā negatīvas vidējās jaudas vērtības. Apvienojot četrus robotus, vidējā atgūtās jaudas attiecība pret patērēto jaudu ir 6,26 %. Atsevišķu robotu vērtības svārstās no 3,92 % līdz 9,71 % atkarībā no kustību profiliem un ražošanas procesa vajadzībām.

Vēl viens interesējošais *DC* mikrotīkla elements ir kondensatora modulis, kas uzstādīts kā enerģijas uzkrāšanas elements līdzstrāvas sprieguma stabilizēšanai. Iegūtie rezultāti atspoguļo ievērojamas kondensatora darbības vidējās jaudas plūsmas vērtības, kas salīdzināmas ar viena rūpnieciskā robota vienībām. Attiecīgi, ņemot vērā to, ka kondensatora modulis ir lietots kā dinamisks enerģijas akumulācijas elements, arī līdzstrāvas kopnē atgrieztajai elektroenerģijas plūsmai ir ievērojami lielāka vērtība nekā rūpnieciskajiem robotiem. Atkārtoti izmantotās enerģijas attiecība pret kondensatora moduļa piegādāto enerģiju ir 62,21 %. Šāds rezultāts atspoguļo dinamiskās darbības vispārējo efektivitāti un ar to saistītos elektrolītiskā kondensatora zudumus kā dinamiskās darbības balansēšanas elementam, kas aplūkots nākamajā nodaļā.

Punktmetināšanas jaudas analīze un dinamiskā ietekme

Līdzstrāvas demo ražošanas šūnā ir izmantotas vairākas ražošanas tehnoloģijas detaļu savienošanai. Īpaši svarīga tehnoloģija ir alumīnija punktmetināšanas metode, ko veic punktmetināšanas kanibles, ko pozicionē industriālais robota manupulators. Līdzstrāvai pielāgotu punktmetināšanas iekārtas barošanas un vadības bloka prototipu ir izgatavojis uzņēmums "*Bosch Rexroth*", un tas ir paredzēts darbībai, aizstājot parasto maiņstrāvas metināšanas pistoles barošanas bloku. Punktmetināšanas process rada sarežģītus elektroapgādes infrastruktūras darbības apstākļus, jo atsevišķos punktmetināšanas gadījumos īsos laika periodos ir liels jaudas pieprasījums. Izmantojot jaudas plūsmas mērīšanas sistēmu, tika iegūta pilnīga mērījumu datu kopa 13 vietās līdzstrāvas mikrotīklā. Būtiskākās dinamiskās jaudas plūsmas izmaiņas metināšanas procesa dēļ redzamas 4.6. attēlā. Tiek parādīts jaudas plūsmas līdzsvars, kas apvienots ar punktmetināšanas rīku divvirzienu maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja abās pusēs, un kondensatora moduļa jaudas plūsma.



4.6. att. Punktmetināšanas gadījuma jauda punktmetināšanas rīkam, divvirzienu maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja līdzstrāvas puses un kondensatora modulim.

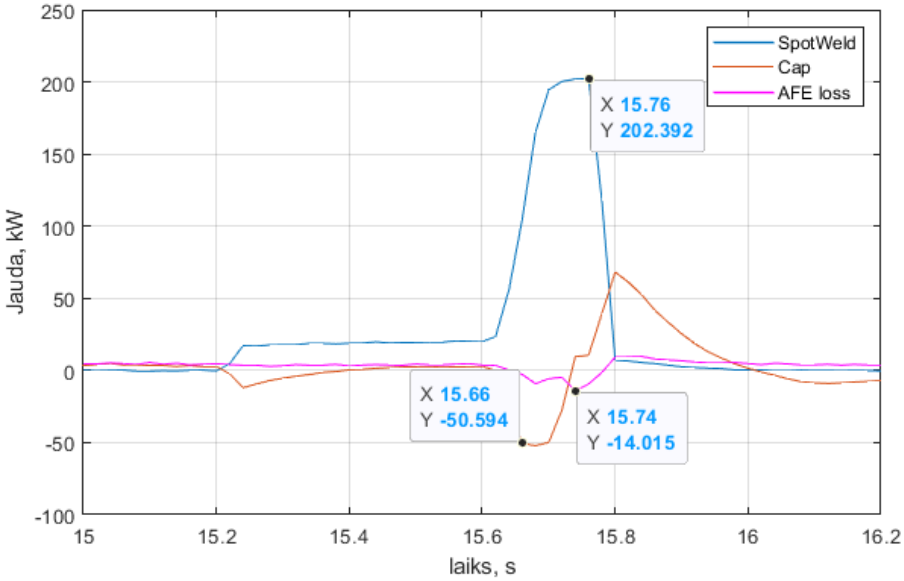
Viena punkta metināšanas darbības ilgums ir aptuveni 0,6 s, un tās apvieno iepriekšējas uzsildīšanas un galvenās metināšanas procedūras. Maksimālā jauda, ko patērē punktmetināšanas iekārta, sasniedz 200 kW. Kondensatora moduļa jaudas plūsmas ātrās slodzes pieprasījuma reakcijas dēļ ir skaidri redzama. Lielas jaudas maksimālā pieauguma laikā līdzstrāvas kopnes kondensatora modulis sasniedz 50 kW izlādes līmeni. Pēc slodzes jaudas impulsa barošanas avota stabilizēšanas to nodrošina galvenais maiņstrāvas/līdzstrāvas divvirzienu pārveidotājs. Var novērot, ka *AFE* pārveidotāja *DC* tīkla puses jaudas vērtības

pārsniedz *AC* tīkla puses jaudas vērtības. Starpību var aprēķināt pēc 4.3. vienādojuma, kur $P_{AFE\ AC}$ – divvirzienu maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja maiņstrāvas tīkla puses patērētā jauda, $P_{AFE\ DC}$ – līdzstrāvas puses piegādātās jauda mikrotīklā.

$$P_{AFE\ loss} = P_{AFE\ AC} - P_{AFE\ DC} \tag{4.3}$$

Jaudu starpība atspoguļo kombinētu pārveidotāja zudumu jaudu $P_{AFE\ loss}$, tostarp jaudu, ko izmanto papildu patēriņam, piemēram, 24 V automatizācijai un drošības aprīkojuma elektroapgādei, *SCADA* sistēmai un jaudas komutācijas aprīkojuma vadībai.

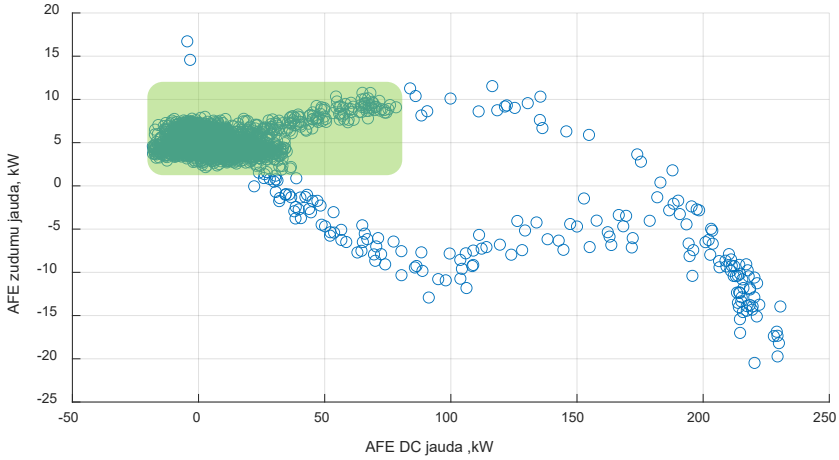
Tāpēc detalizētākā *AFE* pārveidotāja zuduma jaudas plūsmas kombinētā metināšanas procesa analīze redzama 4.7. attēlā.



4.7 att. Piemērs reversai jaudas plūsmai, kas iegūta no kondensatora moduļa un maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja iekšējām iekārtām.

Enerģijas patēriņa dinamika atspoguļo režīmu, kad jauda, kas nepieciešama punktmetināšanas instrumentam, tiek ņemta arī no perifērijas iekārtām maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotājā. Maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotājam ir arī iekšējie filtra kondensatori, kas darbojas līdzīgi galvenajam kondensatora modulim un nodrošina jaudu, ja galvenā kondensatora moduļa jauda tiek samazināta.

AFE iekšējo zudumu jaudas izmaiņas attiecībā uz *AFE DC* puses jaudas pieprasījumu ir kartētas (4.8 att.).



4.8. att. *AC/DC* pārveidotāja iekšējo zudumu jaudas plūsma atkarībā no *AC/DC* pārveidotāja nodrošinātās līdzstrāvas jaudas.

Pēc darbības režīmu punktu blīvuma novērojuma laikā visā ražošanas procesā ir redzams, ka iekšējie maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja zudumi un palīgiekārtu jaudas pieprasījums stabilas ekspluatācijas laikā koncentrēti apgabalā līdz 75 kW jaudas pieprasījumam līdzstrāvas pusē. Retie darbības punkti ārpus zaļās zonas attēlo impulsa jaudas efektus, kas saistīti ar punktmetināšanas jaudas pieprasījumu.

Līdzstrāvas puses jaudas plūsmas līdzsvara novērtēšana, izmantojot superpozīcijas pieeju

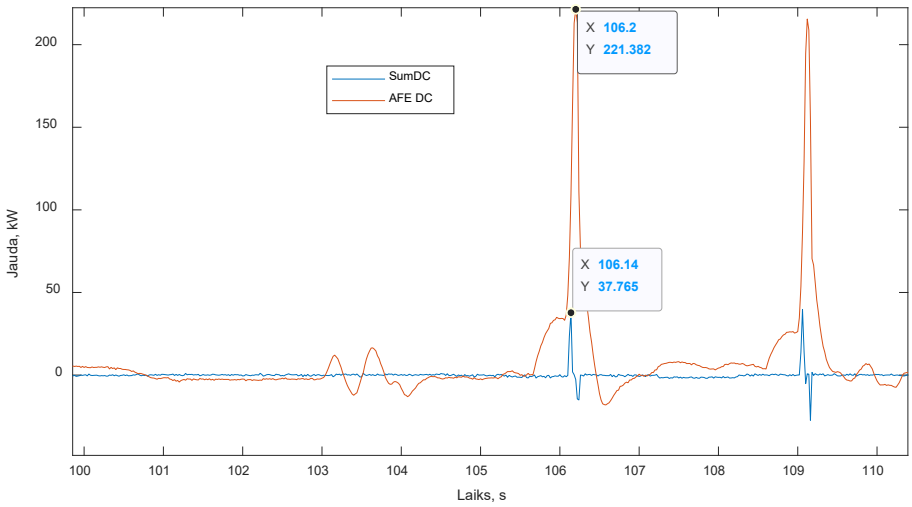
Lai pārbaudītu lietotās daudzpunktu sinhronās jaudas plūsmas mērīšanas sistēmas dinamisko veiktspēju un mērījumu rezultātu datu kvalitāti, ir veikts 12 atrašanās vietas jaudas bilances aprēķins. Pieskaitot visas 12 *DC* kopnei pievienotās elektroenerģijas plūsmas, idealizētā gadījumā tiktu nodrošināta nulles summa, ja netiktu ņemti vērā fiziskie elektriskie zudumi un nebūtu mērījumu kļūdu. Saskaņā ar šādu superpozīcijas pieeju ir ieviesta vērtība *SumDC*. Rezultāti, kas iegūti laika gaitā, apkopoti 4.3. tabulā.

4.3. tabula

Galvenie rezultāti *DC* kopnes jaudas plūsmu bilances *SumDC* aprēķinam

	Maks. vērtība, kW	**Min. vērtība, kW**	**Vid. vērtība, kW**
SumDC	44,29	–27,64	0,180

Iegūtā *SumDC* parametra analīze attiecībā uz *DC* sistēmas darbības dinamiku atklāj, ka maksimālās jaudas pieprasījuma gadījumos ir iegūta palielināta *DC* kopnes jaudas plūsmas bilances aprēķina novirze. 4.9. attēlā redzama novērotā līdzsvara novirze attiecībā uz metināšanas jaudas maksimuma pieprasījumu.

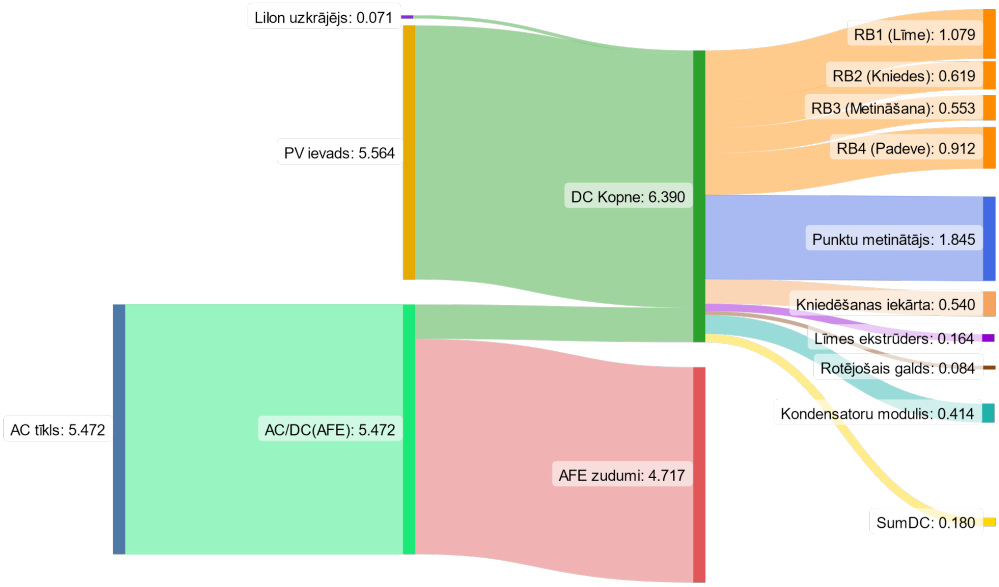


4.9. att. Līdzstrāvas kopnes jaudas plūsmas bilances parametra *SumDC* variācija punktmetināšanas procesā, salīdzinot ar maiņstrāvas/līdzstrāvas *AFE* pārveidotāja piegādāto līdzstrāvas jaudu.

SumDC jaudas plūsmas vērtības vidējā vērtība visā *DC* mikrotīkla novērošanas laika posmā sasniedz vērtību 180 W. Dinamisko variāciju strauja jaudas plūsmas pieauguma vai krituma laikā var izskaidrot ar iespējamām mērījumu kļūdām, ko varētu izraisīt lietotās strāvas mērīšanas iekārtas dinamiskā darbība, pamatojoties uz Holla efekta tipa strāvas mērījumiem.

Līdzstrāvas ražošanas šūnas jaudas bilance

Lai gūtu pārskatu par vidējām elektroenerģijas plūsmām nepārtrauktā ražošanas procesā un ar to saistīto enerģijas sadali mikrotīkla sistēmā, izstrādāts 4.10. attēls.



4.10. att. Pilna *DC* ražošanas šūnas vidējā jaudas sadale, pamatojoties uz sinhrono 13 punktu jaudas plūsmas mērīšanas sistēmas testa datiem.

- Jaudas avoti.

Līdzstrāvas mikrotīkla īpašajai konfigurācijai ir divi galvenie energoapgādes avoti: maiņstrāvas tīkls un *PV* paneļi (*PV infeed*) ar vidējo atjaunojamās jaudas plūsmu 5,64 kW. Pievienotais litija-jonu akumulatora modulis ir darbojies gaidīšanas režīmā ar nenozīmīgu jaudu.

- Centrālā maiņstrāvas/līdzstrāvas aktīvā pārveidotāja (*AFE*) darbība.

Galvenā maiņstrāvas/līdzstrāvas divvirzienu pārveidotāja darbība ir analizēta, aprēķinot iekšējo jaudas pieprasījumu $P_{AFE\ loss}$ darbības periodā. Vidējā vērtība 4,72 kW var šķist liela, salīdzinot ar ražošanas tehnoloģiju saistītām slodzēm, kas apspriestas tālāk tekstā un līdzvērtīga saules paneļu nodrošinātajai jaudai.. Tomēr šī enerģijas plūsma atspoguļo vairākas funkcionālās vajadzības visā līdzstrāvas iekārtā, proti, 24 V automatizācijas un drošības aprīkojuma barošanu un vairākus vadības un operatora paneļus. Visbūtiskākie ir elektrosadales skapju gaisa kondicionēšanas un pārveidotāja zudumi. Ņemot vērā iespēju izvēlēties ievada pārveidotāja konfigurāciju lielam rūpnieciskam līdzstrāvas mikrotīkla sistēmas barošanas avotam, šādu papildu elektroenerģijas pieprasījumu var uzskatīt par pamatotu.

- Industriālo robotu un tehnoloģisko rīku patēriņš.

Četru rūpniecisko robotu grupai ir līdzīgas vidējās slodzes jaudas vērtības diapazonā no aptuveni 0,5 kW līdz 1 kW. Kā tika apspriests iepriekš, no līdzstrāvas kopnes patērētā jauda ir samazināta, izmantojot rekuperācijas enerģiju. Lielākā tehnoloģiskā slodze ir bijusi punktmetināšanas risinājumam, kas sasniedz aptuveni 1,8 kW vidējo slodzes jaudu, bet prasības, kas noteiktas līdzstrāvas mikrotīkla darbībai augstas maksimālās jaudas dēļ, ir

būtiskas elektroinstalācijas projektēšanā. Citām tehnoloģiju slodzēm ir zema vidējā jaudas patēriņa prasība – 0,6 kW vai mazāka.

- Kondensatora moduļa darbība un līdzstrāvas kopnes jaudas kopējā bilance.

Dinamiskās jaudas plūsmas raksturlielumu dēļ arī līdzstrāvas kopnē uzstādītā elektrolītiskā kondensatora moduļa vidējā jauda ir 0,414 kW. Šāda vērtība ir iegūta saskaņā ar dinamisko darbību, kas ir aptuveni 50 kW izlādes un 60 kW uzlādes maksimālie jaudas impulsi saistībā ar kopējām līdzstrāvas sistēmas balansēšanas vajadzībām, ko nosaka punktmetināšanas vajadzības. Tādējādi vidējā jauda 0,414 kW ir kombinētie vidējie zudumi elektrolītisko kondensatoru virknes pretestības raksturlielumu un atsevišķu elementu modulārā izkārtojuma saistīto vadītspējas zudumu dēļ.

SumDC parametra vērtība 0,18 kW ir visu *DC* puses jaudas plūsmas mērīšanas iekārtu kļūdu kombinācija, kas galvenokārt saistīta ar dinamiskās strāvas noteikšanu straujos jaudas izmaiņu laikaposmos. Otra komponente, kas veicina *SumDC* zudumu jaudas kopējo rezultātu, tiek ieviesta, faktiski fiziski savienojot atsevišķas ierīces ar *DC* kopņu sistēmu, tāpēc ir iekļauti arī fiziskie zudumi. Izvēlēto vara kopņu ļoti lielais šķērsgriezums, kas uzstādīts attiecībā uz vidējo kombinēto līdzstrāvas kopnes slodzes jaudu 6,39 kW, ļauj secināt, ka kopējie paredzamie vadītspējas zudumi arī ir *SumDC* jaudas plūsmas aprēķina aplēstajā diapazonā.

Laboratorijas mēroga robotizētas ražošanas *DC* tīkls

DC mikrotīkla darbības pārbaude maza mēroga ražošanas uzdevumiem, kuros iesaistīti tikai daži rūpnieciskie roboti, ir veikta, izmantojot *DC* mikrotīkla laboratorijas iekārtas, kas savietotas vienā telpā RTU fakultātes ēkā, kā attēlots iepriekš. Atbilstošās autora publikācijas šajā aspektā ir 6. un 7. publikācija.

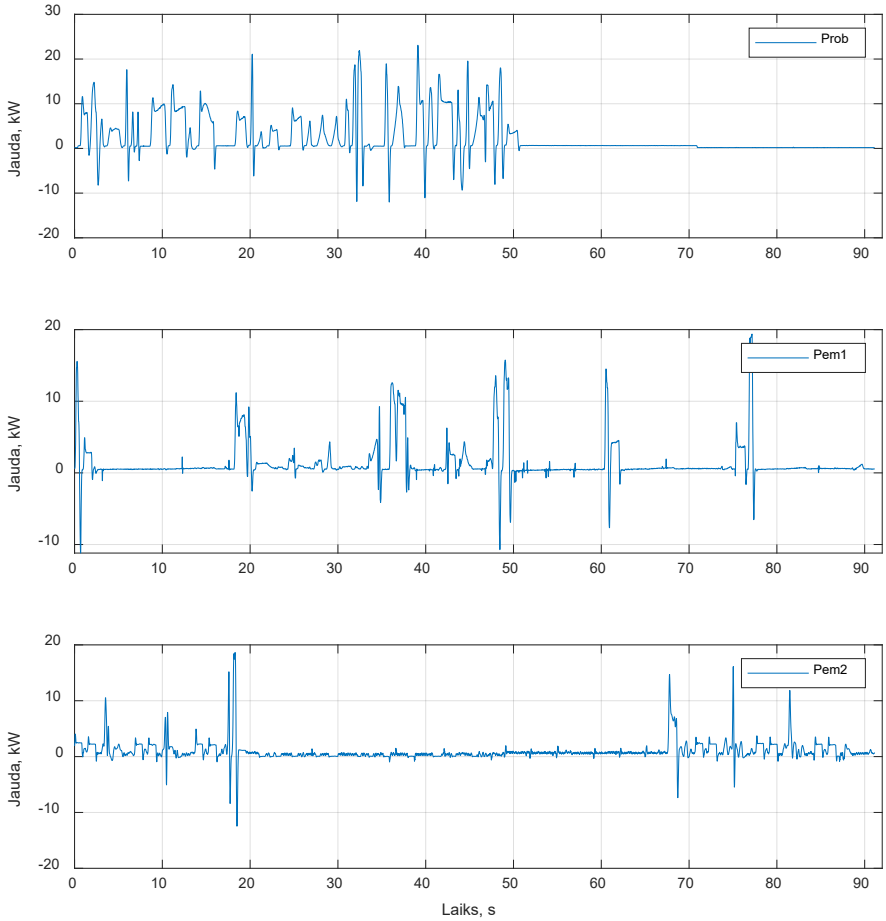
Atsevišķu robotu enerģijas atkārtotas izmantošanas potenciāla analīze ir veikta dažādos scenārijos, sākot no vienas vienības līdz trīs robotu kombinācijai. Praktiskā īstenošana ir panākta, izmantojot *DC* barošanai pielāgotu *KUKA Quantec* sērijas 210 kg celtspējas rūpniecisko robotu prototipu un divus *DC* jaudas plūsmas emulatorus, kas sastāv no savienotiem asinhonajiem dzinējiem un attiecīgiem mainīgas frekvences piedziņas pārveidotājiem ar kopēju vadības bloku. Par galveno barošanas avotu izmantots divvirzienu maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotājs (*AFE*) ar nominālo jaudu 65 kW. 4.4. tabulā apkopots *DC* mikrotīkla analīzei veikto testa konfigurāciju kopsavilkums. 1. –3. testa scenārijs sniedz analīzi par vienu robotu un emulatoriem, kas veic uzdevumus, pamatojoties uz ražošanas iekārtu jaudas patēriņu, kas iegūts rūpnīcā. 4. un 5. testā – darbību vienā ražošanas šūnā vienlaikus veic vairāki rūpnieciskie roboti.

4.4. tabula

Testu konfigurācijas līdzstrāvas mikrotīklam ar industriālu robotu lietojumu

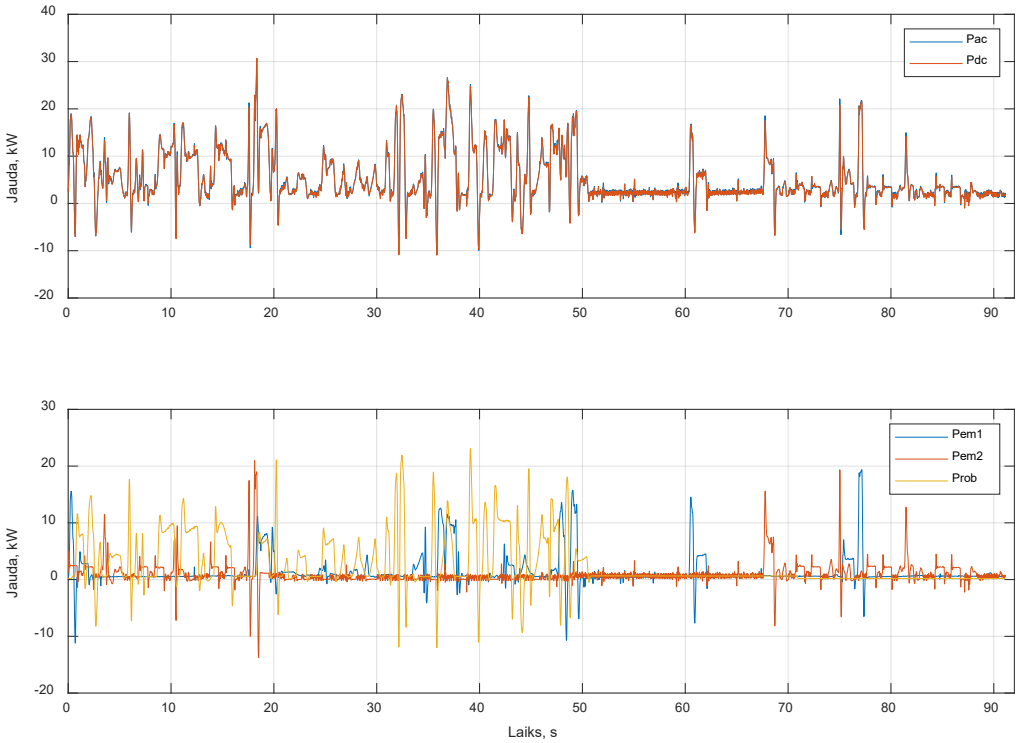
Konfigurācija	*DC KUKA* robots (*Prob*)	Piedziņas emulators *EM1*	Piedziņas emulators *EM1*
1. tests	**Metināšana**		
2. tests		**Detaļu padeve**	
3. tests			**Kniedēšana**
4. tests		**Detaļu padeve**	**Kniedēšana**
5. tests	**Metināšana**	**Detaļu padeve**	**Kniedēšana**

4.11. attēlā redzami sākotnējie elektroenerģijas pieprasījuma profili, ko izmanto savstarpēji savienota *DC* mikrotīkla analīzei maza uzņēmuma lietojumam, ko veic RTU *DC* laboratorijas mikrotīkla sistēmā.



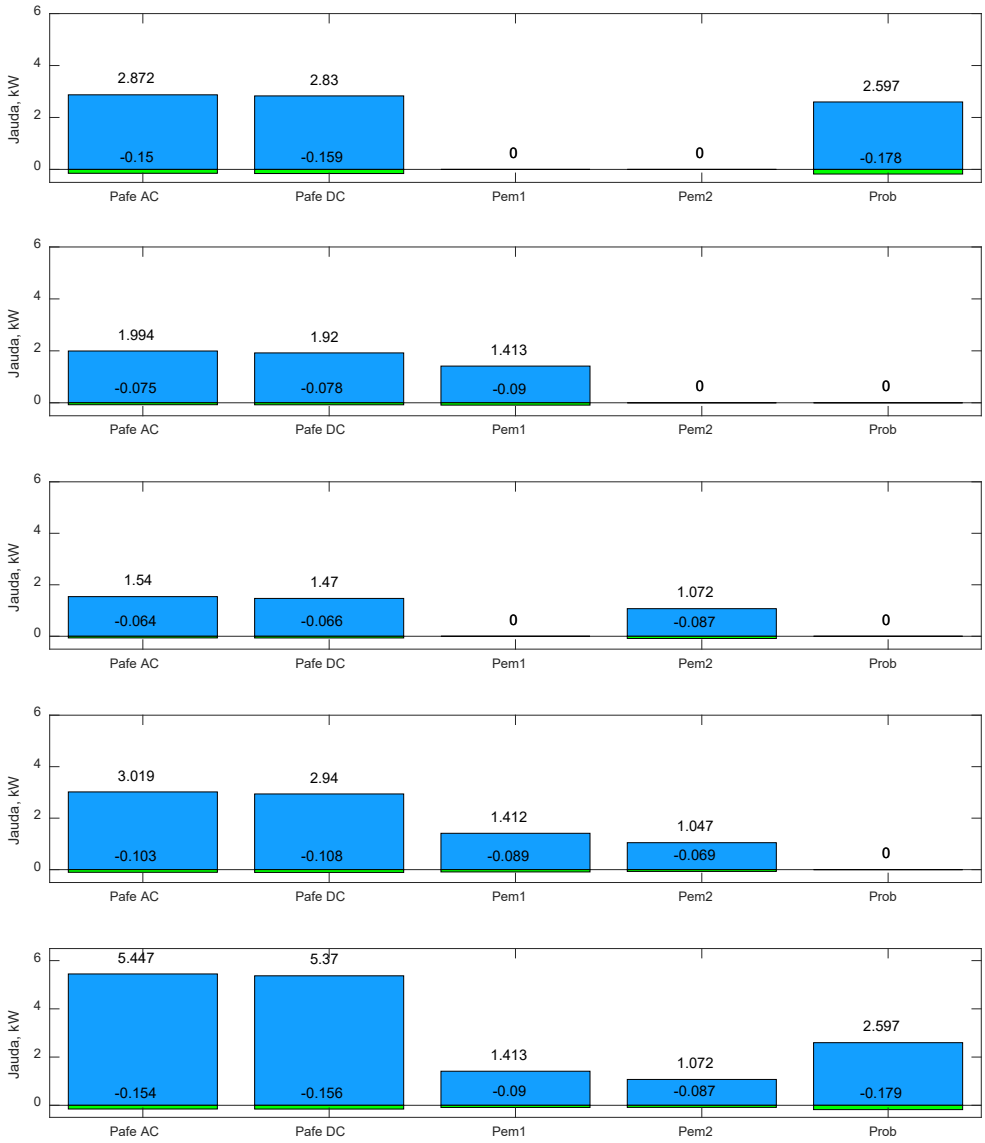
4.11. att. Atsevišķu rūpniecisko robotu patēriņa jaudas profilu kopums: *KUKA DC* robots *Prob* un divi piedziņas emulatori *Pem1* un *Pem2*.

Sistēmas sarežģītība tiek pakāpeniski palielināta, tādējādi panākot trīs *DC* mikrotīkla slodzes vienību, kas atveido rūpnieciskos robotus, kopējo kombināciju. Pilns centrālā maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja jaudas plūsmas un līdzstrāvas mikrotīkla slodzes profilu apvienojums redzams 4.12. attēlā.



4.12. att. Konfigurācijas: 5. tests, dinamiskā jaudas plūsma ar attiecīgajām maiņstrāvas tīkla (*Pac*) un līdzstrāvas mikrotīkla ievada jaudas (*Pdc*) plūsmām (augšējā ass) un visu trīs rūpniecisko robotu slodzes (*Prob, Pem1, Pem2*) kombināciju (apakšējā ass).

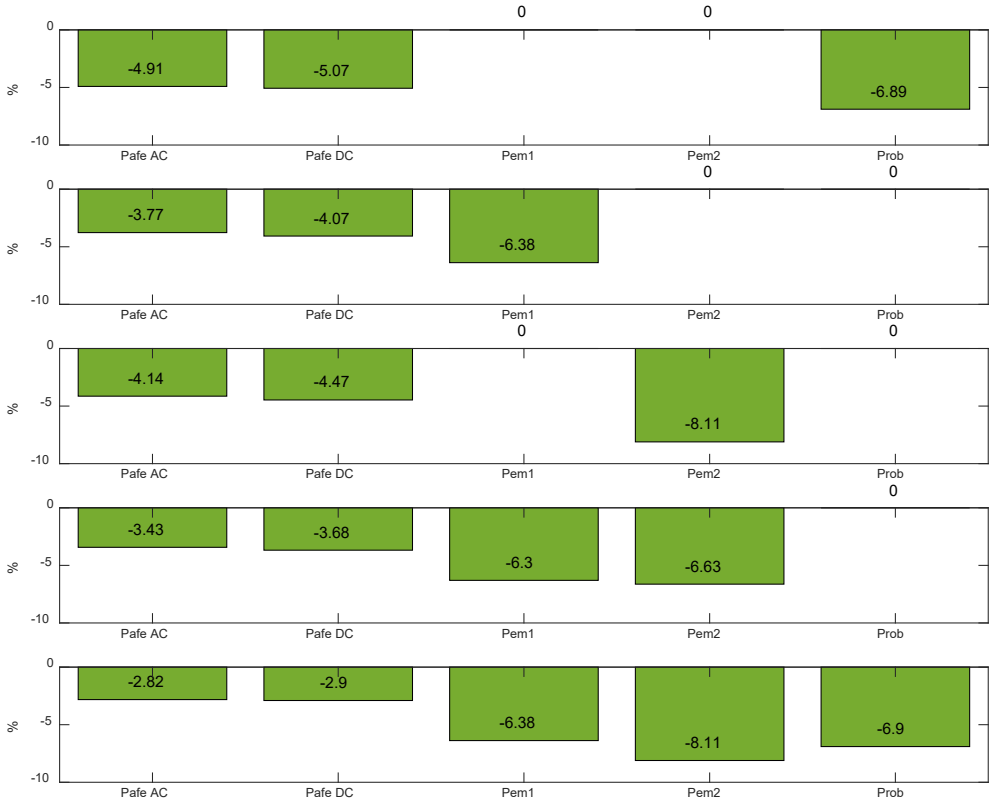
Iegūtās jaudas plūsmas analizē, aprēķinot vidējās slodzes un rekuperētās jaudas plūsmas vērtības. 4.13. attēlā redzams elektroenerģijas plūsmas virziena analīzes pārskats ar vidējo jaudas plūsmas aprēķinu ražošanas uzdevuma laika periodā. *Pafe.AC* un *Pafe.DC* ir maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja mērījumi attiecīgi maiņstrāvas un līdzstrāvas pusē. *Prob, Pem1, Pem2* ir atsevišķas līdzstrāvas slodzes iekārtu jaudas plūsmas. Kopējais enerģijas patēriņš tiek palielināts, paplašinot *DC* mikrotīkla slodzes grupu, tāpēc tiek palielinātas arī ievada pārveidotāja jaudas plūsmas gan slodzes, gan rekuperācijas darbībai visā ražošanas ciklā.



4.13. att. Piecu *DC* mikrotīkla konfigurāciju kopsavilkuma rezultāti: 1. tests (augšējā ass) līdz 5. tests (apakšējā ass). Vidējās slodzes jaudas (pozitīvās vērtības) un atgūtās jaudas (negatīvās vērtības) plūsmas novērtējums, pamatojoties uz eksperimentālo mērījumu rezultātiem 91,14 s ražošanas uzdevuma laikā.

4.14. attēla struktūra ir līdzīga iepriekšējam analīzes atspoguļojumam. Tomēr ir vizualizēta proporcionālā attiecība, kas izteikta procentos no atgrieztās jaudas plūsmas attiecībā pret tiešās slodzes jaudas plūsmām. Saskaņā ar 4.14. attēlu novērots, ka, paplašinoties līdzstrāvas puses slodzes vienību skaitam ar divvirzienu jaudas plūsmu, kopējā atkārtoti izmantotās enerģijas komponente samazinās. Iegūtā enerģija, ko līdzstrāvas kopnē rada robota bremzēšana, rada

ievada pārveidotāja līdzstrāvas puses negatīvu jaudas plūsmu *Pafe.DC.* Vairāku robotu iekārtu savstarpēji savienotās konfigurācijas kopējās rekuperētās jaudas samazinājums līdz 2,9 % no 5,07 % vienas iekārtas darbības gadījumā Var novērot, ka enerģijas potenciāls atkārtotai izmantošanai robotā (*Prob*) vai emulatoros (*Pem1* and *Pem2*) ir augstāks, nekā iegūts maiņstrāvas elektrotīkla pusē vai līdzstrāvas starpsavienojumā. Tas skaidrojams ar to, ka iekšējais patēriņš tiek iegūts no *DC* posma 24 V vadības ķēžu vajadzībām, kā arī ar divvirzienu maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja zudumiem, kad enerģiju ievada atpakaļ maiņstrāvas tīklā.



4.14. att. Piecu *DC* mikrotīkla konfigurāciju kopsavilkuma rezultāti: 1. tests (augšējā ass) līdz 5. tests (apakšējā ass). Iegūtā attiecība % ataino rekuperēto jaudas plūsmu, salīdzinot ar patērēto slodzes jaudas plūsmu 91,14 s darbības ciklā.

4.5. tabulā sniegts pārskats par iegūtajām vidējām jaudas plūsmas vērtībām iepriekš minētajās eksperimentālajās testa konfigurācijās no 1. līdz 5. testam. Kopējā jaudas sadales analīze mikrotīkla iekārtā ļauj novērtēt vidējos jaudas zudumus maiņstrāvas/līdzstrāvas enerģijas pārveides un līdzstrāvas puses pārvades procesos. Jaudas zudumus, kas saistīti ar maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveides zudumiem un pārveidotāja palīgslodzēm, aprēķina saskaņā ar 4.4. vienādojumu, kur *Pafe.AC* un *Pafe.DC* ir pārveidotāja maiņstrāvas un līdzstrāvas puses jaudas plūsmas vērtības.

$$Ploss.afe = Pafe.AC - Pafe.DC \tag{4.4}$$

Jaudas zudumus *Ploss.DCbus*, kas saistīti ar līdzstrāvas elektriskajiem savienojumiem, ko veido 16 mm^2 kabeļi un papildu 24 V barošanas bloki, var aprēķināt pēc 4.5. vienādojuma, kur *Pafe.DC* – jauda, kas tiek piegādāta maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja līdzstrāvas pusei, un *Prob*, *Pem1*, *Pem2* – robotu un piedziņas emulatoru iekārtu savienojumi.

$$Ploss.DCbus = Pafe.DC - Prob - Pem1 - Pem2 \quad (4.5)$$

Kopējos zudumus *Ploss.total*, kas ir un nav tieši saistīti ar atsevišķu *DC* mikrotīklam pieslēgtu ražošanas rīku darbību, var aprēķināt, izmantojot 4.6. vienādojumu.

$$Ploss.total = Ploss.DCbus + Ploss.afe \quad (4.6)$$

4.5. tabula

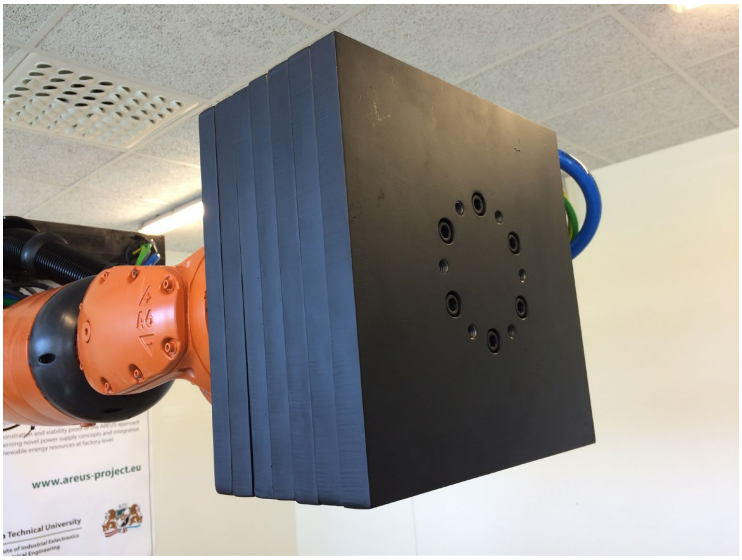
Vidējās un zudumu jaudas rezultātu kopsavilkums piecu testu konfigurācijām

		Eksperimenta konfigurācija				
Mērvienības	**Parametrs**	**1. tests**	**2. tests**	**3. tests**	**4. tests**	**5. tests**
kW	*Pafe.AC*	2,98	1,919	1,476	2,915	5,293
	Pafe.DC	2,90	1,837	1,402	2,83	5,213
	Prob	2,418				2,417
	Pem1		1,323		1,323	1,323
	Pem2			0,985	0,977	0,981
	Ploss.afe	0,080	0,082	0,074	0,085	0,080
	Ploss.DCbus	0,486	0,514	0,417	0,530	0,492
	Ploss.total	0,566	0,596	0,491	0,615	0,572
Relatīvie zudumi pret *Pafe AC*						
%	*Ploss.afe*	2,68	4,27	5,01	2,92	1,51
	Ploss.DCbus	16,28	26,78	28,25	18,18	9,29
	Ploss.total	18,96	31,06	33,27	21,10	10,81

Kopsavilkuma rezultātu novērošana apstiprina hipotēzi par energoefektivitātes paaugstināšanu, ieviešot savstarpēji savienotu *DC* mikrotīkla sistēmu industriālo robotu tipa slodzēm. Maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja zudumu ir stabili ar 80 W vidējo jaudu. Kopējā līdzstrāvas mikrotīkla zudumu jaudas komponente tiek samazināta, ja sistēma tiek paplašināta pēc pievienoto slodzes iekārtu skaita. Divu savstarpēji savienotu slodzes iekārtu gadījumā ir 21,1 % zudumu jauda, un, palielinot savstarpēji savienotu slodzes vienību skaitu, vērtība ir samazinājusies līdz 10,81 %.

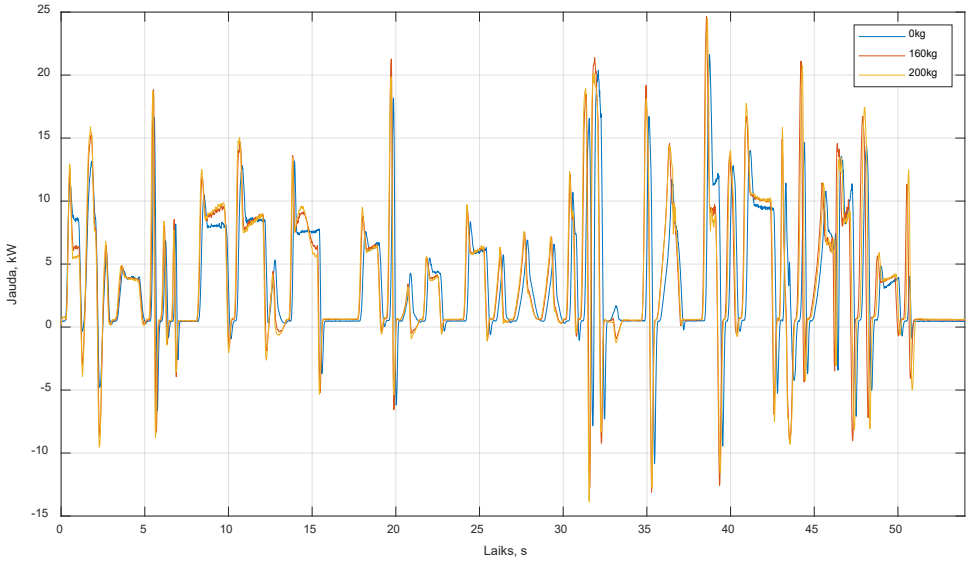
Industriālo robotu instrumentu masas ietekme uz bremzēšanas enerģijas potenciālu

Lai novērotu ražošanas rīku masas ietekmi uz elektroenerģijas potenciālu, kas pieejams atkārtotai izmantošanai, eksperimenti ar atšķirīgu slodzi ir veikti, balstoties viena robota kustības trajektorijas programmas izpildē. Specifisks rūpniecisko instrumentu atdarinājums (4.15. att.) ir veidots no tērauda plāksnēm, kas robota instrumenta vietā ļauj pakāpeniski mainīt kopējo masu.



4.15. att. Ražošanas rīku makets dažādiem rīku masas eksperimentiem.

Divvirzienu jaudas plūsmas mērījumi ir iegūti vienai kustības trajektorijas izpildei ar dažādiem instrumentu masas gadījumiem, kā redzams 4.16. attēlā.



4.16. att. Jaudas plūsmas profili pie dažādas instrumentu masas (0 kg, 160 kg, 200 kg).

Skaitliskie novērtējuma rezultāti, kas apkopoti 4.6. tabulā, apstiprina pieņēmumu, ka bremzēšanas enerģijas atkārtotas izmantošanas piemērotība ir izteiktāka lieliem ražošanas rīkiem ar ievērojamu kopējo masu.

4.6. tabula

Vidējā, patērētā un rekuperētā jaudas plūsma atkarībā no instrumenta masas.

Instr. masa, kg	**Vid. kopējā jauda, kW**	**Vid. patērēts, kW**	**Vid. rekuperēta, kW**	**Rekuperēta *vs* patērēta, %**
0	3,612	3,821	0,208	5,45
159,3	3,688	4,031	0,343	8,52
201,3	3,676	4,055	0,378	9,34

Saskaņā ar novēroto sakarību starp instrumentu masu un enerģijas atkārtotu izmantošanu var izvēlēties arī atbilstošākos lietojumus ar līdzstrāvu saistītās elektrosistēmas modifikācijai vai nomaiņai. Šis darbs ir sniedzis ieskatu rūpniecisko robotu lietojumam, kas saistīts ar automobiļu ražošanas procesiem, taču to var izmantot arī citās rūpniecības nozarēs, nodrošinot līdzīgus industriālo robotu instrumentu masas un kustības īpašību parametrus.

SECINĀJUMI

Sākotnēji definēto hipotēžu izpēte par līdzstrāvas tipa elektriskās enerģijas apmaiņas un apgādes sistēmu piemērotību rūpniecības apstākļos, kuros iesaistīti vairāki industriālie roboti un saistītās ražošanas iekārtas, ir devusi rezultātus, pakāpeniski ieviešot līdzstrāvas tehnoloģijas, sākot ar atsevišķiem maiņstrāvas robotiem līdz līdzstrāvas mikrotīklam.

Tipisku maiņstrāvas elektroapgādei paredzētu rūpniecisko robotu modificēšana, izmantojot līdzstrāvas starpsavienojuma kopnes konfigurāciju, samazina vidējo jaudu vienai un tai pašai kustības darbībai un uzdevumam par vairāk nekā 20 % atkarībā no lietotās instrumentu lietderīgās slodzes un kustības programmas dinamikas.

Ir veiksmīgi izstrādāta un patentēta jauna spēka elektronikas moduļu shēma jaudas plūsmas vadībai. Ir izstrādāts ekvivalentais elektriskās sistēmas modelis tālākai optimizācijai un modulāru līdzstrāvas starpsavienojuma elektroierīču projektēšanai, un tā rezultātā izstrādāts kopīgota *DC* posma industriālo robotu sistēmas prototips.

Vienota līdzstrāvas barošanas mikrotīkla demonstrēšanas sistēma ir praktiski īstenota laboratorijas mērogā, un ir iegūti attiecīgie eksperimentāli mērījumi un izveidots maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāja modelis.

Neliela mēroga līdzstrāvas mikrotīkla darbība, kurā iesaistīti līdz trīs industriālie roboti, demonstrē atkārtoti izmantotas enerģijas potenciālu līdz 15 %, ko apliecina praktiskie eksperimenti universitātes laboratorijā ar tirgū pieejamu maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāju. Eksperimentālās laboratorijas izveide ļauj veikt jaunas konfigurācijas turpmākajiem slodzes emulācijas eksperimentiem un dinamiskai līdzstrāvas rūpniecisko iekārtu testēšanai.

Eksperimentālie testi maiņstrāvas un līdzstrāvas rūpniecisko robotu kontrolleru arhitektūras aizstāšanai attiecībā uz četru iekārtu grupu un to pašu ražošanas uzdevumu ļauj iegūt vidējās jaudas samazinājumu par 9,5 %.

Reālā laikā sinhronizētā datu kopa ir eksperimentāli iegūta liela mēroga rūpnīcas līmeņa *DC* mikrotīklā. Ir veikta detalizēta dinamiskās jaudas plūsmas analīze starp atsevišķām elektroiekārtām un atkārtoti izmantotās enerģijas aplēse, atklājot līdz 6,5 % enerģijas atkārtotas izmantošanas potenciālu, ko rada četru līdzstrāvas tipa industriālo robotu kopa.

Analizēts kopējais zudumu aprēķins un sadalījums sistēmā, pamatojoties uz 13 pieslēgumu sinhronizētiem jaudas plūsmas mērījumiem, un definēti attiecīgie nākotnes optimizācijas virzieni.

Rezultāti un eksperimenti apstiprina darba hipotēzi par līdzstrāvas elektriskās sistēmas piemērotību, lai uzlabotu rūpniecisko robotu rūpnieciskās ražošanas lietojumu energoefektivitāti.

Iegūtās zināšanas darba izstrādes laikā apstiprina nepieciešamību turpināt pētījumus par līdzstrāvas tipa rūpniecisko elektrosistēmu izstrādes metodoloģijām un jauniem projektēšanas rīkiem, ko atbalsta eksperimentāli pārbaudīti modeļi optimāla izmēra noteikšanai un komponentu izvēlei reālās iekārtās, tādējādi rodot iespēju jaunām elastīgām līdzstrāvas mikrotīkla iekārtām, ko iespējams labāk izmantot nākotnes dinamiskajās energosistēmās, un to paredzamās priekšrocības.

LITERATŪRAS SARAKSTS

[1] IFR – international Federation of Robotics, "World robotics – Industrial Robotics 2023".

[2] IFR International federation of Robotics, "European Union: Industries Invest Heavily in Robotics – International Federation of Robotics." [Online]. Available: https://ifr.org/ifr-press-releases/news/eu-industries-invest-heavily-in-robotics.

[3] "A European Green Deal." [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.

[4] "The Green Deal Industrial Plan." [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan_en.

[5] R. W. De Doncker, "Power electronic technologies for flexible DC distribution grids," *2014 Int. Power Electron. Conf. IPEC-Hiroshima – ECCE Asia 2014*, pp. 736–743, 2014.

[6] "REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe." [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en.

[7] "Automation and Robotics for EUropean Sustainabile manufacturing | AREUS | Project | Fact sheet | FP7 | CORDIS | European Commission." [Online]. Available: https://cordis.europa.eu/project/id/609391.

[8] "dc-industrie.zvei.org/en - dc-industrie.zvei.org - Microsite." [Online]. Available: https://dc-industrie.zvei.org/en/.

[9] "USB-type C to become EU's common charger by end of 2024 | News | European Parliament." [Online]. Available: https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20220413STO27211/usb-type-c-to-become-eu-s-common-charger-by-end-of-2024.

[10] "CurrentOS Foundation." [Online]. Available: https://currentos.foundation/.

[11] "The Second Grid – DC Systems." [Online]. Available: https://www.dc.systems/vision/the-second-grid.

[12] "Flexible Electrical Networks | Research Campus FEN Aachen." [Online]. Available: https://www.fenaachen.net/.

[13] "NExT Factory- Efficient Smart Green / Schaltbau." [Online]. Available: https://www.schaltbau.com/en/about-us/portrait/next-factory-efficient-smart-green/.

[14] "'Factory 56': Mercedes-Benz Cars significantly increases flexibility and efficiency with 'Factory 56' | Mercedes-Benz Group > Innovation > Digitalisation > Industry 4.0." [Online]. Available: https://group.mercedes-benz.com/innovation/production/factory-56.html.

[15] "National energy and climate plans." [Online]. Available: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/implementation-eu-countries/energy-and-climate-governance-and-reporting/national-energy-and-climate-plans_en.

[16] IFR – international Federation of Robotics, "WR 2021 Industrial Robots – Sources & Methods," 2021.

[17] R. Murray, Z. Li, and S. Sastry, *A mathematical introduction to robotic manipulation*, vol. 29. 1994.

[18] Paryanto, M. Brossog, J. Kohl, J. Merhof, S. Spreng, and J. Franke, "Energy Consumption and Dynamic Behavior Analysis of a Six-axis Industrial Robot in an

Assembly System," *Procedia CIRP*, vol. 23, no. C, pp. 131–136, Jan. 2014.
[19] D. Meike, "Multi-Domain Model for the Evaluation of Large Scale Robotic Applications within Production," *Riga Tech. Univ. 53rd Int. Sci. Conf. Dedic. to 150th Anniv. 1st Congr. World Eng. Riga Polytech. Inst. / RTU Alumni Dig.*, pp. 113–113, 2012.
[20] A. Rassõlkin, H. Hõimoja, and R. Teemets, "Energy saving possibilities in the industrial robot IRB 1600 control," in *2011 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics, CPE 2011 - Conference Proceedings*, 2011, pp. 226–229.
[21] D. Meike, "Increasing Energy Efficiency of Robotized Production Systems in Automobile Manufacturing", 2013.
[22] D. Meike and L. Ribickis, "Recuperated energy savings potential and approaches in industrial robotics," in *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 2011, pp. 299–303.
[23] O. Bormanis, "Increasing Reliability of Robotized Manufacturing Systems," RTU, Riga, 2022.
[24] C. M. Hackl, A. G. Hofmann, R. W. De Doncker, and R. M. Kennel, "Funnel Control for Speed & Position Control of Electrical Drives: A Survey".
[25] "Gleichstrom im Niederspannungs-bereich Deutsche Normungs-Roadmap Version 2 VDE | DKE Roadmap".
[26] ZVEI & consortium DC-INDUSTRIE2, "DC-INDUSTRY_Systemconcept-V2," DC-INDUSTRIE & ZVEI, 2022.
[27] P. Apse-Apsitis, A. Avotins, and L. Ribickis, "A different approach to electrical energy consumption monitoring," in *2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2014, pp. 1–5.
[28] R. Rodrigues, Y. Du, A. Antoniazzi, and P. Cairoli, "A Review of Solid-State Circuit Breakers," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 1, pp. 364–377, Jan. 2021.

Armands Šenfelds dzimis 1986. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis inženierzinātņu bakalaura grādu (2009), maģistra grādu (2010) elektrotehnikā un maģistra grādu (*Electrical Power Engineering*) *RWTH Aachen* universitātē, Vācijā (2012). Kopš 2013. gada ir RTU Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūta zinātniskais asistents, vēlāk – pētnieks un lektors. Kopš 2008. gada ir starptautiskās elektroniženieru asociācijas *IEEE* biedrs, darbojies tās Latvijas sekcijā dažādos amatos. Kopš 2013. gada Vācijas Akadēmiskās apmaiņas dienesta Latvijas *Alumni* kluba valdes loceklis.
Zinātniskās intereses saistītas ar energoelektronikas iekārtām elektriskajā piedziņā, robotikā un līdzstrāvas sistēmās, kā arī energoefektīviem elektroenerģijas izmantošanas risinājumiem.