

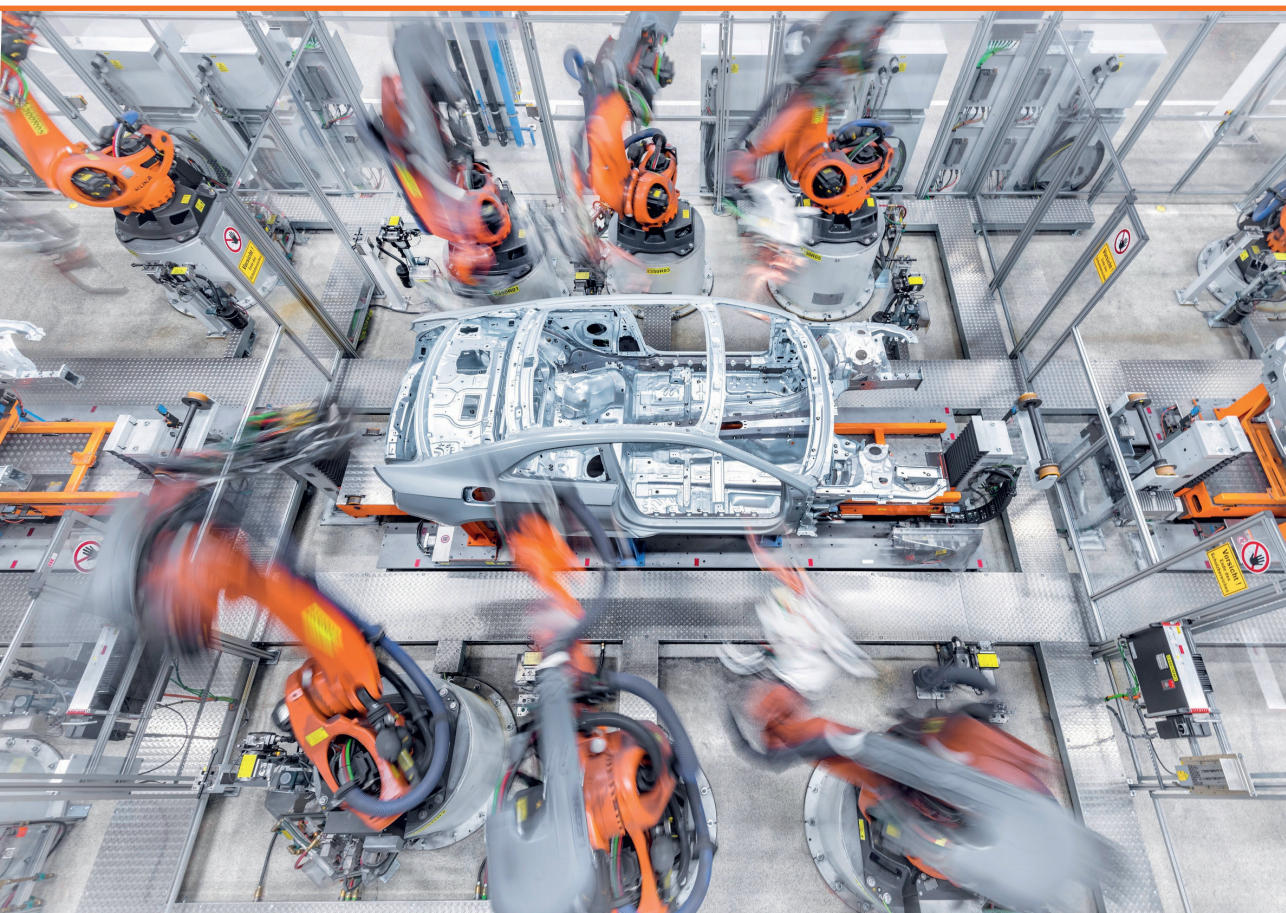


RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Oskars Bormanis

UZTICAMĪBAS PAAUGSTINĀŠANAS METOŽU IZSTRĀDE AUTOMATIZĒTĀM ROBOTU RAŽOTNĒM

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Oskars Bormanis

Doktora studiju programmas “Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

**UZTICAMĪBAS PAAUGSTINĀŠANAS METOŽU
IZSTRĀDE AUTOMATIZĒTĀM ROBOTU
RAŽOTNĒM**

Promocijas darba kopsavilkums

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

RTU Izdevniecība
Rīga 2022

Bormanis, O. Uzticamības paaugstināšanas metožu izstrāde automatizētām robotu ražotnēm. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU izdevniecība, 2022. 31 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-14” 2022. gada 6. septembra lēmumu, protokols Nr. 04030-9.12.1/10.

Vāka attēls no *KUKA*.

<https://doi.org/10.7250/9789934228391>
ISBN 978-9934-22-839-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 6. decembrī plkst. 13 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 212. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asoc. profesors *Dr. sc. ing.* Jānis Zaķis,
Rīgas Tehniskā universitāte

Ph. D. Tanel Jalakas,
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

Profesors *Ph. D. Frede Blaabjerg,*
Olborgas Universitāte, Dānija

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.

Oskars Bormanis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 157 attēli, 18 tabulu, 14 pielikumu, 186 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras un informācijas sarakstā ir 170 nosaukumu.

PROMOCIJAS DARBA APRAKSTS.....	5
1. DARBĪBAS LAIKA PATĒRIŅA MODELIS	9
1.1. Ievads	9
1.2. Darba instrumenta masas izmaiņas	12
1.3. Lietojuma veida izmaiņas.....	13
1.4. Secinājumi.....	14
2. VADĪBAS UN TOPOLOĢIJAS NOVĒRTĒJUMS	15
2.1. Ievads	15
2.2. Izplatītie līdzstrāvas posma risinājumi, viens robots ar kondensatoru.....	16
2.3. Savstarpēji savienotu robotu sistēmas, dalīta līdzsprieguma kopne	18
2.4. Secinājumi.....	20
3. ROBOTU IEKĀRTU IZSTRĀDE UN PĀRBAUDES	21
3.1. Ievads	21
3.2. Izstrādes un ražošanas programma.....	22
3.3. Izturības atbilstības izvērtēšana un atteices veidi.....	23
3.4. Iededzināšana (<i>Burn-in</i>) kā uzticamības uzlabošanas rīks	24
3.5. Secinājumi.....	26
SECINĀJUMI	27
KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTĀ LITERATŪRA	29

PROMOCIJAS DARBA APRAKSTS

Tēmas aktualitāte

Rūpnieciskie lokālie līdzstrāvas tīkli ir perspektīva tēma rūpniecības un pētniecības vidē, iekļauta Rūpniecība 4.0 ieviestajās inovācijās. Elektroenerģijas patēriņa samazinājums šajā jomā ir pēfīts vairākos projektos. “Daimler AG” un Rīgas Tehniskās universitātes iepriekšējie pētījumi liecina, ka, ieviešot lietotajās robotizētajās sistēmās ārējo enerģijas uzkrāšanu, enerģijas patēriņš ir samazinājies pat par 30 % [1]. Šis promocijas darbs turpina pētījumus, jo pieprasījums pēc lokāliem līdzstrāvas tīkliem un robotizētām ražošanas iekārtām pieaug [2].

Iepriekšējos pētījumos galvenā uzmanība tika pievērsta elektroenerģijas patēriņa samazināšanai, mainot iekārtu slēgumu, taču trūkst detalizētas analīzes par ieteikto robotizētās ražošanas sistēmas slēgumu un kontroles uzlabojumiem. Šajā pētījumā tiek pārskatītas dažādas lokāla līdzstrāvas tīkla lietojuma iespējas un kontroles metodes, novērtējot uzticamību un citus galvenos parametrus. Veicot robotizētu ražošanas sistēmu analīzi, jāņem vērā uzticamība. Veiktajam uzdevumam ir specifisks atkārtotas slodzes nolietojums, robota rīka masas un robota aparatūras slēguma veids.

Lai palīdzētu iekārtu dizaineriem, tiek veidoti robotizētas ražošanas aparatūras virtuālie modeļi. Pētniecībā tiek lietots virtuālās ekspluatācijas programmatūrā izveidotais industriālo robotu enerģijas patēriņa aprēķina modelis. Tas ir paplašināts, pievienojot temperatūras un darbības laika patēriņa simulācijas iespējas, kas izstrādātas šajā pētījumā. Pētījumā izstrādāts darbības laika uzlabošanas rīks konkrētiem uzticamības un laika uzlabojumiem, ņemot vērā robotizēto iekārtu lietojumu veidus un automobiļu rūpniecībā izplatītās robotu programmas.

Aprēķinu paplašinājums, kas ievieš enerģijas patēriņu un darbības laika patēriņu virtuālās ekspluatācijas programmatūrā, ir jaunums. Tas ir noderīgs, lai atbalstītu inženieru komandu ar datiem ilgtspējīgai robotizētās aparatūras izstrādei. Šajā pētījumā piedāvātā modelēšanas rīkkopa ar enerģijas patēriņa un darbības laika novērtēšanas iespējām inženieru komandai nodrošina nepieciešamo atgriezenisko saiti no ražošanas 3D modeļa un virtuālo robotu programmām, palielinot lēmumu pieņemšanai pieejamo datu kopu.

Būtiska motivācija pētīt šajā darbā izklāstītās tēmas ir nozares standarta prasība pēc iespējas ilgāk saglabāt robotizētās ražošanas aparatūras sākotnējo funkcionalitāti. Tas kopumā samazina atkritumu daudzumu un ir nepieciešams ilgtspējīgai ražošanai. Efektīva resursu izmantošana ir ilgtspējīgas nozares pamats. Īpaši svarīgi tas ir plaša patēriņa elektronikas tirgū, kur tiek apsvērts septiņu gadu viedtālruņa darbības laiks un prasības pēc uzlabotām apkopes iespējām, apstiprinot, ka uzticamības un saistīto darbības laika prasību izpilde ir būtiska produktu izstrādātājiem, kā to pieprasa klients un – dažos gadījumos – valdība.

Inženieru komandai ir paredzēts pielāgot robotizētās ražošanas aparatūru konkrētā lietojuma vajadzībām, izstrādes laikā ņemot vērā simulācijas parametrus un rezultātus. Paredzams, ka izstrādātās robotu programmas bez lielām izmaiņām darbosies līdz septiņiem gadiem. Tas jāņem vērā programmatūras inženieriem, veidojot šīs programmas, kas turpmākos

gadus darbosies ražošanā. Enerģijas patēriņa un darbības laika ietaupījumi vai zudumi šī ražošanas cikla laikā kļūst ievērojami.

Automatizētā rūpīcu aprīkojuma uzticamība komponentu un materiālu līmenī ir labi izpētīta. Bieži vien rūpniecisko robotu spēka elektronikas pārveidotāji tiek konstruēti ar uzticamības rezervi, paredzot pēc iespējas lielāku slodzi. Tas samazina ražošanas dīkstāves risku iekārtu defektu dēļ. Līdzīgi kā enerģijas patēriņa samazināšana, izmantojot robotizētas sistēmas līmeņa analīzi, arī iekārtu uzticamības prognozēšanas precizitātes uzlabošanu ietekmē lietojuma analīze. Spēka elektronikas aprīkojums ir viens un tas pats, tas nav atkarīgs no konkrētā robota modeļa lietojuma veida – vai nu līmes uzklāšanas, vai materiālu apstrādes, lai gan veicamā uzdevuma profils abiem robotiem ir atšķirīgs.

Promocijas darba nodaļas atbilst pētījuma modelēšanas, novērtēšanas un uzlabošanas posmiem. Rezultāti un secinājumi ir izklāstīti katrā nodaļā un kopsavilkumā darba beigās. Datu tabulas un lielu izmēru vizualizācijas ir iekļautas pielikumos.

Darba mērķi

Trūkstošā metodika spēka elektronikas iekārtu pielāgošanai faktiskajai slodzei un robotizētās ražošanas patēriņam ir galvenā problēma, kas risināta šajā darbā.

Šī promocijas darba mērķis ir automatizētu robotizētu rūpīcu iekārtu uzticamības uzlabošana, ieviešot jaunas metodes industriālo robotu sistēmu un lietojumu izstrādei.

Mērķis ir izstrādāt aprēķinu rīku pusvadītāju pārejas temperatūras un darbības laika patēriņa novērtēšanai. Plānots novērtēt pieņemto saistību starp rūpnieciskā robota darba instrumenta masu un spēka elektronikas darbības laika patēriņu.

Rūpnieciskās robotizētās sistēmas tiek lietotas dažādiem uzdevumiem, tāpēc viens no darba mērķiem ir novērtēt saikni starp robota lietojuma veidu un darbības laika patēriņu.

Darba tvērums un pētījumu objekti

Darba tvērums ir strāvas patēriņš, pusvadītāju pārejas temperatūra un aprēķinātā patērētā darbības laika daļa, koncentrējoties uz sešu brīvības pakāpju industriālā robota motora piedziņas spēka elektronikas pārveidotāja izolēta aizvara bipolārā tranzistora (*IGBT*) moduli dažādās slēguma un lietojuma opcijās. Pētījuma objekti ietver invertora *IGBT* moduļus, zināmos rūpniecisko robotu iekārtu slēgumus, vadības metodes un darbības principus.

Darba zinātniskā novitāte

Mainstrāvas (*AC*) un līdzstrāvas (*DC*) piegādāto rūpniecisko robotu sistēmu galveno uzticamības atšķirību novērtējums, lietojot gan teorētisku, gan simulāciju rezultātos balstītu izmaksu, efektivitātes, atteices iespējamības, atteices seku un citu kritēriju salīdzinājumu.

Izstrādāts modelis sešu asu industriālā robota motoru piedziņas invertora *IGBT* un pretparalēlās diodes pusvadītāju pārejas temperatūras un patērētā darbības laika novērtējumam. Izpētīta robotu programmas un lietojuma, kā arī robota iekārtu parametru, piemēram, darba instrumenta masas, ietekme uz pārejas temperatūru un spēka elektronikas slēdžu darbības laiku.

Izveidota jauna analīzes metode, paplašinot iepriekšējo *KUKA* industriālo robotu energoefektivitātes pētījumu ar spēka elektronikas moduļu temperatūras un darbības laika novērtējumu. Izveidotais modelis piemērots iekļaušanai virtuālās ekspluatācijas programmatūrā.

Prezentēti un pārskatīti praktiskie lietojuma scenāriji – robotizētā ražošanas aprīkojuma slēgumu analīze vai paredzamais testēšanas ilgums, atklājot darbības laika patēriņa datu pieejamības iespējas.

Darba praktiskā nozīme

Pētījuma rezultātu lietojums ietver plašāka inverteru klāsta izveidi, samazinot izmaksas un palielinot apgūstamo tirgus daļu. Nolietojuma novērtējuma modeļa integrācijai virtuālās ekspluatācijas programmatūrā ir praktisks lietojums, un tas ļauj sasniegt jaunus tehniskus efektus. Prognozējamās apkopes grafiks, kas balstīts uzdevuma profila analīzē, ļauj samazināt bojājumus un atpazīt aparāturu ar īpaši lielu paredzamo nolietojumu.

Šī promocijas darba pētījuma praktiskais lietojums ir plašs – paredzēts, ka pētījums uzlabos industriālo robotu ražošanas sistēmu uzticamības prognozēšanu un precizitāti gan izstrādes, gan ražošanas laikā.

Metodes un izmantotie rīki

Galvenā pētījuma metode ir balstīta elektrisko un termisko procesu skaitļošanas analīzē, izmantojot bāzes vienādojumus un nolietojuma novērtēšanas metodes. Rezultātus un simulācijas galvenokārt kontrolē ar datormodelēšanas metodēm *MATLAB* vidē. Matemātiskie aprēķini ir vērsti uz pusvadītāju pārejas temperatūras vērtības izmaiņām un to radīto ietekmi uz aprēķināto patērētā darbības laika daļu. Pētījumu pamato literatūras analīze.

Aizstāvējamās tēzes

Darba aizstāvēšanai piedāvātās hipotēzes – automatizēto robotu ražošanas sistēmu uzticamības aprēķinu precizitāti var uzlabot, ņemot vērā lietojumam raksturīgos parametrus. Robotizēta ražošanas aprīkojuma izmaksas var samazināt, ņemot vērā sistēmas aparatūras slēgumu un veicamā uzdevuma profilu.

Hipotēzi pamato 2., 3. un 4. nodaļā sniegtie pētījumi. Otrā nodaļa ir pētījuma modelēšanas posms, kurā tiek prezentēts izstrādātais rīks robotu valodas koda ietekmei uz darbības laika novērtējumu. 3. nodaļā ir novērtētas un salīdzinātas rūpniecisko robotu aparatūras slēguma iespējas. 4. nodaļā tiek pētītas dažādas pieejamās metodes robotizētās ražošanas aparatūras uzticamības novērtēšanai un uzlabošanai.

Darba aprobācija

Saisītie autora pētījumi publicēti un prezentēti astoņās starptautiskās konferencēs vai zinātniskos žurnālos.

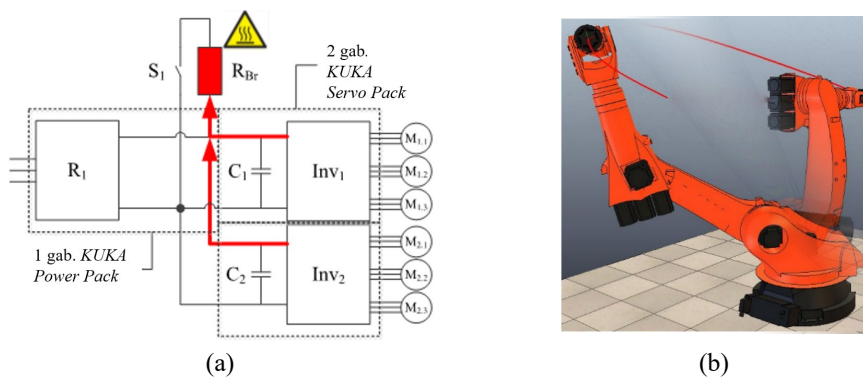
1. Šenfelds, A., **Bormanis, O.**, Paugurs, A. Modelling of AC/DC Power Supply Unit for DC Microgrid. No: *2015 IEEE 3rd Workshop Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE 2015), Latvija, Rīga, 2015*. Izdošanas vieta: IEEE, 2016, 1.–4. lpp. ISBN 978-1-5090-1202-2. e-ISBN 978-1-5090-1201-5. Pieejams: doi: 10.1109/AIEEE.2015.7367294.
2. **Bormanis, O.** Development of energy consumption model for virtual commissioning software. No: *2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Latvija, Rīga, 2015*. Izdošanas vieta: IEEE, 2015, 1.–4. lpp. ISBN 978-1-5090-0334-1. e-ISBN 978-1-4673-9752-0. Pieejams: doi:10.1109/RTUCON.2015.7343139.
3. Senfelds, A., Vorobjovs, M., Meike, D., **Bormanis, O.** Power smoothing approach within industrial DC microgrid with supercapacitor storage for robotic manufacturing application. No: *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Zviedrija, Gēteborga, 2015*. Izdošanas vieta: IEEE, 2015, 1333.–1338. lpp. e-ISBN 978-1-4673-8183-3. ISSN 2161-8070. e-ISSN 2161-8089. Pieejams: doi: 10.1109/CoASE.2015.7294283.
4. Šenfelds, A., **Bormanis, O.**, Paugurs, A. Analytical Approach for Industrial Microgrid Infeed Peak Power Dimensioning. No: *2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2016), Latvija, Rīga, 2016*. Izdošanas vieta: IEEE, 2016, 1-4. lpp. ISBN 978-1-5090-3732-2. e-ISBN 978-1-5090-3731-5. Pieejams: doi: 10.1109/RTUCON.2016.7763140.
5. **Bormanis, O.**, Ribickis, L. Accelerated Life Testing in Reliability Evaluation of Power Electronics Assemblies. No: *2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2018), Latvija, Rīga, 2018*. Izdošanas vieta: IEEE, 2019, 1.–5. lpp. ISBN 978-1-5386-6904-4. e-ISBN 978-1-5386-6903-7. Pieejams: doi: 10.1109/RTUCON.2018.8659911.
6. **Bormanis, O.**, Ribickis, L. Review of Burn-In for Production of Reliable Power Electronic Applications. No: *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2019), Latvija, Rīga, 2019*. Izdošanas vieta: IEEE, 2020, 1.–7. lpp. ISBN 978-1-7281-3943-2. e-ISBN 978-1-7281-3942-5. Pieejams: doi: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982357.
7. **Bormanis, O.**, Ribickis, L. Power Module Temperature in Simulation of Robotic Manufacturing Application. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2021, 5. sēj., nr. 4, 3.–14. lpp. ISSN 0868-8257. e-ISSN 2255-8896. Pieejams: doi: 10.2478/lpts-2021-0029.
8. **Bormanis, O.**, Ribickis, L. Mission Profile based Electro-Thermal Model of Robotic Manufacturing Application. No: *2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe), Beļģija, Gēte, 2021*. Izdošanas vieta: IEEE, 2021, 1.–6. lpp. ISBN 978-1-6654-3384-6. e-ISBN 978-9-0758-1537-5. Pieejams: doi: 10.23919/EPE21ECCEEurope50061.2021.9570547.

1. DARBĪBAS LAIKA PATĒRIŅA MODELIS

1.1. Ievads

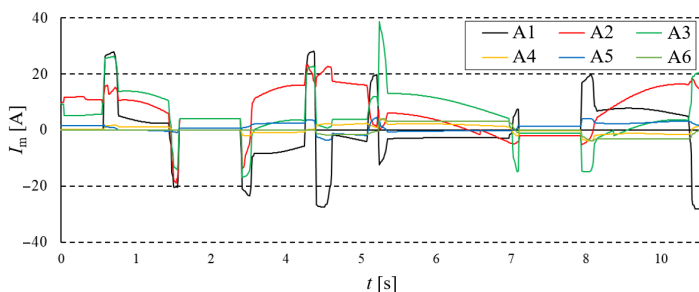
Dažādu nozares līderu [3, 4, 5] virtuālās ekspluatācijas programmatūras (*VCS*) rīki ļauj simulēt procesa plūsmu un robotu trajektorijas robota šūnas izstrādes fāzē. Ja konkrētās *VCS* datorsistēmas emulācijas spraudnī [6] ir iekļauts ražotāja robotu vadības simulācijas (*RCS*) modulis, tad ir paredzams, ka izvades trajektorija sakrītīs ar faktisko kustības trajektoriju uzstādītam robotam. *Robotics Toolbox for MATLAB* [7, 8] ir programmatūras rīks, kurā balstīts robota mehatronikas virtuālais modelis un turpmākās transformācijas uz elektroenerģijas zudumiem (1.1. b att.), ievērojot piegādātāja specifiskā *RCS* moduļa trajektoriju.

Šīs nodaļas pētījums balstīts uz elektriskajiem procesiem robota spēka elektronikas ķēdē un visbiežāk sastopamo slēguma veidu (1.1. a att.).

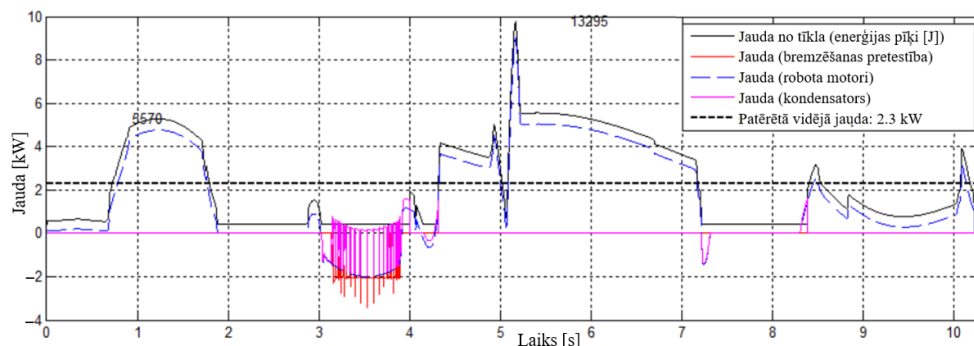


1.1. att. Vienkāršots rūpnieciskā robota elektriskais slēgums (a), robota vizualizācija (b).

Ar *RCS* moduli tika simulēts metināšanas programmas paraugs, aprēķinot ass griezes momentu. Izejas griezes momenta vērtības robota programmas darbības laikā ir ieejas dati turpmākiem aprēķiniem, piemēram, strāvai. Robota paātrināšanās un palēnināšanās rezultātā mainās Strāvas vērtība (1.2. att.). Vērtības uz 1.–3. ass ir augstākas atbalstītā svara dēļ.



Elektroenerģijas patēriņš svārstās (1.3. att.), robotam paātrinoties un samazinot ātrumu. Līdzstrāvas kopnes sprieguma pieaugumu ierobežo sliekšņa spriegums, un, to pārsniedzot, tiek pieslēgta bremzēšanas pretestība, samazinot spriegumu.



1.3. att. Jauda metināšanas programmas laikā ar diviem ātkstāves punktiem (2 s un 7 s).

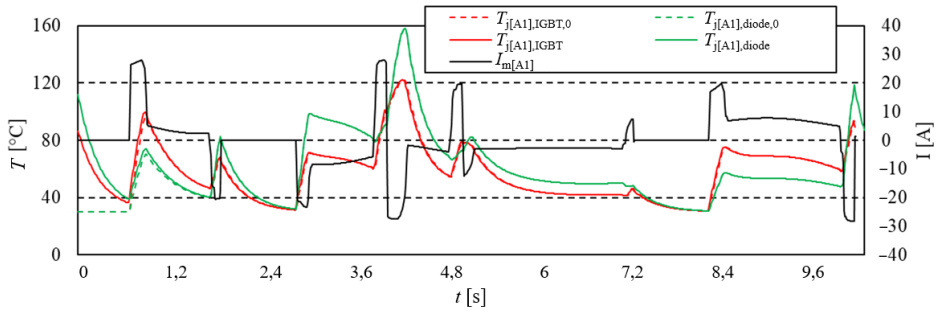
Ieejas strāva tiek uzskatīta par uzdevuma profilu *IGBT* pusvadītāju pārejas temperatūras aprēķināšanai (1.4. att.) gan pretparalēlajai diodei, gan *IGBT* slēdzim. Katrs no diviem vadāmā pusvadītāju slēdža moduļa komponentiem seko atšķirīgai slodzes strāvas un pusvadītāju pārejas temperatūras attiecībai dažādos pastāvīgo magnētu sinhronā motora (PMSM) darbības stāvokļos.

Ar pozitīvām sprieguma un pozitīvām strāvas vērtībām (PMSM patēriņš) *IGBT* moduļa pusvadītāju slēdzis vada strāvu. Tā pārslēgšanas un vadīšanas jaudas zudumi silda moduli. PMSM darbības laikā ģenerators režīmā strāva ir negatīva, tāpēc strāvas ceļš caur pretparalēlajām diodēm tiek slēgts un pusvadītāju slēdžu jaudas zudumi kļūst nenozīmīgi.

Izstrādātajā elektrotermiskajā modelī apkārtējās vides un radiatora temperatūras stabilizē piespiedu gaisa plūsmā. Termiskās pārejas process šajā aprēķinā tiek ignorēts. Šajā sākotnējā pētījumā radiatora temperatūra tiek uzskatīta par nemainīgu aktīvās dzesēšanas dēļ. *IGBT* jaudas zudumi ir jauda, kas tiek izkliedēta modulī un tādējādi tieši ietekmē pusvadītāju pārejas temperatūras izmaiņu laikā, kā parādīts 1.1. vienādojumā:

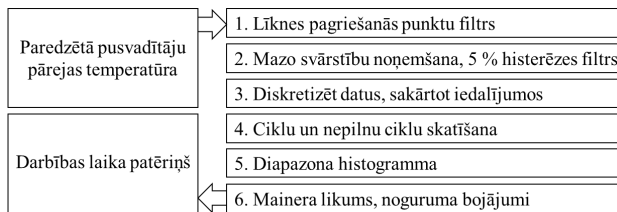
$$T_j(t) = P_{invIGBT}(t) \cdot (Z_{thj-c} + Z_{thc-h} + Z_{thh-a}) + T_a(t), \quad (1.1)$$

kur: T_j – invertora spēka elektronikas pusvadītāju slēdža pārejas temperatūra [K]; $P_{invIGBT}$ – *IGBT* jaudas zudumi [W]; Z_{thj-c} – termiskā pretestība no pārejas uz korpusu [K/W]; Z_{thc-h} – termiskā pretestība no korpusa uz radiatoru [K/W]; Z_{thh-a} – termiskā pretestība no radiatora uz apkārtējo vidi [K/W]; T_a – apkārtējās vides temperatūra, [K].



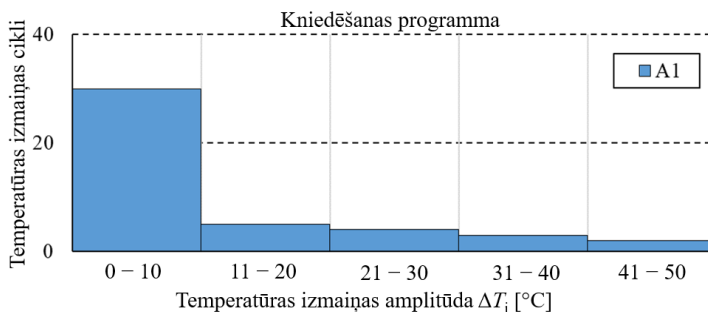
1.4. att. A1 robota ass invertora *IGBT* temperatūras un motora strāvas attiecība.

Ieejas datu formatēšanu noguruma analīzei veic tādā secībā, kā parādīts 1.5. attēlā [9]. Pozitīvās un negatīvās maksimālās vērtības tiek sašķirotas. Netālu esošie maksimumi tiek filtrēti ar 5 % histerēzes filtru. Atlikušās vērtības tiek sakārtotas diskrētās datu kopās, apstrādājot tās ar izvēlēto ciklu skaitīšanas algoritmu. Izejas dati tiek analizēti, izmantojot histogrammas, kas tiek formatētas, lai atklātu darbības laika patēriņu atrastajiem cikliem un puscikliem.



1.5. att. Temperatūras vērtību pārveide uz darbības laika patēriņu.

Pēc veiktās temperatūras datu pārveidošanas un apstrādes katram analizētajam temperatūras profilam var izveidot svārstību ciklu histogrammu (1.6. att.).



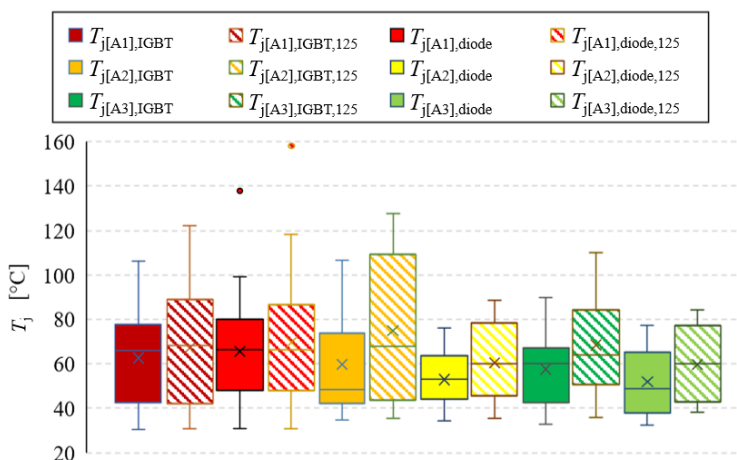
1.6. att. A1 robota ass invertora *IGBT* temperatūras svārstību diapazona un ciklu skaita histogramma kniedēšanas programmas laikā.

Kopējo noguruma bojājumu aprēķina, izmantojot Palmgrēna–Mainera bojājumu lineārās saskaitīšanas hipotēzi, Mainera likumu. Bojājums ir attiecība starp ekspluatācijas slodzes cikliem un pieļaujamo vērtību, kas aprēķināta, pieņemot, ka katrs cikls ar tādu pašu amplitūdas diapazonu patērē daļu no kopējā darbības laika, ir proporcionāls slodzes cikla skaitam un, sasniedzot vērtību 1,0, ierīcei ir sagaidāms noguruma bojājums. Tiek aprēķināts ciklu skaits līdz atteicei, kur parametru vērtības iegūtas, izmantojot noguruma bojājumu modeli [10, 11] un Palmgrēna–Mainera lineārās saskaitīšanas hipotēzi [12]. Daži no trūkumiem – netiek ņemta vērā zema un augsta stresa secības ietekme un nespēja atpazīt noguruma varbūtības raksturu.

1.2. Darba instrumenta masas izmaiņas

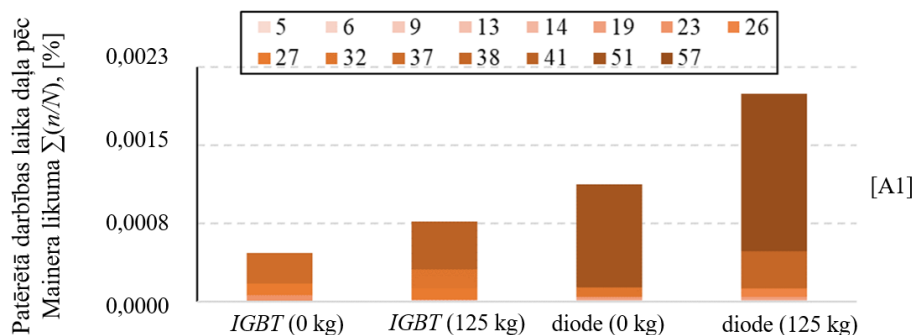
Pētījumā izvērtēts pieņēmums, ka industriālā robota instrumenta masa tieši ietekmē aparatūras pusvadītāju komponentu darbības laika patēriņu. *KUKA KR220* sešu brīvības pakāpju metināšanas robota programma tika simulēta bez slodzes (0 kg) un ar 56 % (125 kg) no maksimālās slodzes (220 kg). Simulācijas ar palielinātu slodzes svaru rezultāti apstiprina maksimālās temperatūras izmaiņu par 15 % līdz 23 % 1.–3. ass *IGBT* slēdžiem un par 9 % līdz 17 % invertora 1.–3. ass pretparalēlās diodes temperatūrai. Minimālais temperatūras pieaugums ir no 0 % līdz 9 % 1.–3. ass *IGBT* slēdžiem un no 0 % līdz 18 % 1.–3. ass moduļu diodēm.

Pirmās ass diodes temperatūras maksimums ir palielinājies par 20°C (1.7. att.), izmainot darba instrumenta masu no 0 kg uz 125 kg. Temperatūras maiņas ātrums nav vienāds un svārstās no 10 °C līdz 20 °C. Instrumenta masas maiņa nerada jaunus pagrieziena punktus, izņemot to, ka pie lielākas slodzes iepriekš filtrētie, mazie temperatūras maksimumi kļūst nozīmīgāki un netiek noņemti ar iepriekš minēto sliekšņa filtru.



1.7. att. Temperatūras svārstību amplitūda un vidējā vērtība simulētās apstrādes programmas laikā, mainot 0 kg un 125 kg darba instrumenta masu.

Proporcionālais darbības laika patēriņa (1.8. att.) pieaugums starp simulēto 0 kg un 125 kg masu ir acīmredzams robota 1. ass IGBT un pretparalēlās diodes gadījumā. Absolūtās vērtības atklāj būtiskas atšķirības dažādām asīm. Vislielāko darbības laika samazinājumu rada augstākas amplitūdas temperatūras svārstības, ko izraisa palielināta robota instrumenta masa.

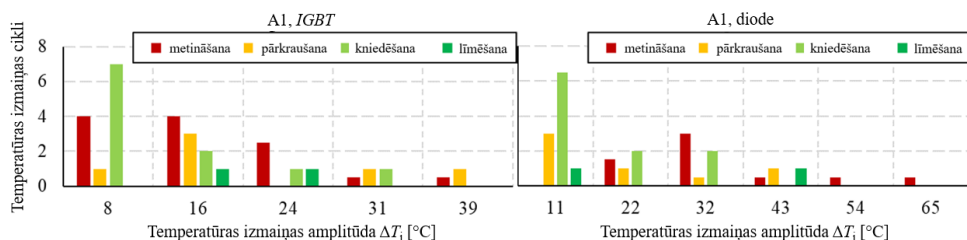


1.8. att. Darbības laika patēriņš ass A1 invertora IGBT modulim un pretparalēlai diodei simulētās apstrādes programmas laikā, mainot 0 kg un 125 kg darba instrumenta masu.

Darbības laika patēriņa atšķirība starp IGBT, kas tiek darbināts paātrinājuma laikā, un pretparalēlo diodi, kas augstāko temperatūru sasniedz palēninājuma laikā, ir paredzama atšķirīgo darbības režīmu dēļ.

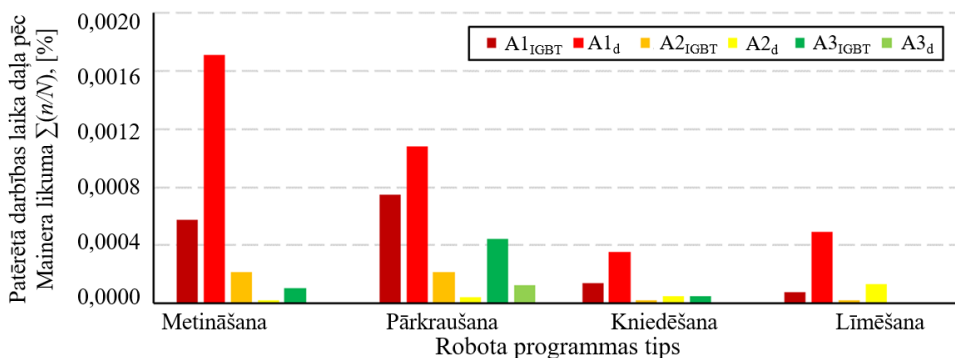
1.3. Lietojuma veida izmaiņas

Šajā promocijas darbā tiek novērtēta robota ass piedziņas invertora spēka elektronikas pusvadītāju slēdža moduļa darbības laika patēriņa atkarība no robota lietojuma veida (apstrāde, līmēšana, kniedēšana, punktmetināšana), kā arī pieejamās iespējas uzlabot uzticamību, izmantojot iespējamu programmas pielāgošanu vai paredzamo apkopi. Četrus simulēto robota lietojuma veidu termisko svārstību (1.9. att.) dati liecina, ka programmās novērotās vērtības atšķiras.



1.9. att. Temperatūras ciklu un pusciklu daudzums katram simulētā robotprogrammas tipam asij A1 – punktmetināšanas, apstrādes, kniedēšanas un līmēšanas.

Darbības laika patēriņa dati, pētot robota 1.–3. ass *IGBT* moduli (1.10. att.), atklāj atšķirības, kas radušās atkarībā no robota programmas. Dati atbilst tendencēm, kas novērotas temperatūras profilā un termisko svārstību analizē. Paredzams, ka vienā kniedēšanas vai līmēšanas programmas darbības ciklā tiks patērēta mazāka kopējā darbības laika daļa.



1.10. att. Kopējais darbības laika patēriņš 1.–3. asij četrām pētītajām robota programmām.

Ir apstiprināts sākotnējais pieņēmums, ka katram robotu programmas tipam ir unikāls invertora strāvas uzdevuma profils, kas rada plašu temperatūras vērtību izkliedi spēka elektronikas slēdžos. Strāvas un temperatūras atšķirības tiek novērotas temperatūras ciklu un termisko svārstību amplitūdās. Aprēķinu galarezultāts ir būtiskās katra programmas veida darbības laika patēriņa atšķirības.

1.4. Secinājumi

Izpēģīts un analizēts darbā lietotais modelis, ņemot vērā robotizēto ražošanas iekārtu autobūves lietojuma specifiku. Ir izstrādāti un prezentēti modulim pievienotie termisko procesu un darbības laika patēriņa novērtējuma funkcionalitātes paplašinājumi.

Darbā izklāstīti secinājumi par plaši lietoto robotu iekārtu darbību un uzticamību dažādos robotizētas ražošanas scenārijos. Pētījumā izdevies novērtēt *IGBT* moduļu temperatūru un novērot sakarību starp robota iekārtu, robota darbību un piedziņas invertora spēka elektronikas slēdžu bojājumiem.

2. VADĪBAS UN TOPOLOĢIJAS NOVĒRTĒJUMS

2.1. Ievads

Mainstrāvas/līdzstrāvas sprieguma pārveidotāju efektivitāte laika gaitā ir palielinājusies [13, 14] un pašlaik tiek uzskatīta par pietiekamu lielākajai daļai lietojuma veidu, savukārt iekārtu lietojuma veidu pārskatīšana ir iespēja turpināt ieviest uzlabojumus. Šobrīd robotizētās ražošanas iekārtās uzstādītās spēka elektronikas sistēmas pārsvarā atbalsta vienvirziena jaudas plūsmu, sastāv no liela skaita pārveidotāju, izmanto bremsēšanas enerģijas izkliedes pretestību bez enerģijas uzglabāšanas vai apmaiņas iespējām. Viens no izmaiņu pozitīvajiem piemēriem ir jaunākie rūpnieciskie lietojumi, kas atgūst rekuperēto enerģiju [15] un nodrošina atbalstu enerģijas apmaiņai sistēmas patērētāju un ģeneratoru starpā.

Kopīgo līdzstrāvas posmu sistēmu (lokālu līdzstrāvas tīklu) trūkumi un izaicinājumi ietver uzticamības novērtējumu, tehnoloģiskos šķēršļus (ierobežota aparatūras risinājumu pieejamība un augsta specializācija), kā arī ekonomiskus un juridiskus šķēršļus, tai skaitā līdzstrāvas sprieguma standartu noteikšanu dažāda veida lokālajiem tīkliem.

Darbā salīdzināti viena un vairāku robotu iekārtu slēgumi, novērtējot dažādas īpašības un parametrus, tai skaitā saistītus ar uzticamību un darbības laiku, piemēram, dublēšanu, atteices varbūtību, atteices sekas (2.1. att.).

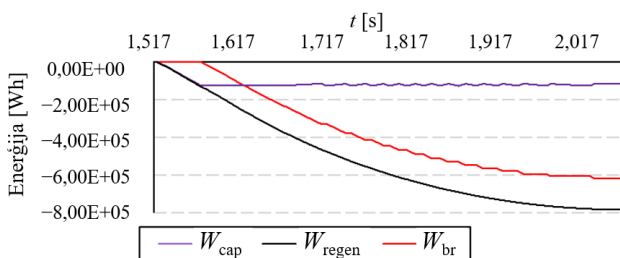
	Viens robots			Vairāki roboti	
	Bremzēšanas pretestība	Ārējais kondensators	Divvirzienu taisngriezis	Līdzstrāvas kopne ar 1 taisngriezi	Līdzstrāvas kopne ar vairākiem taisngriežiem
Enerģijas atgūšana	●	●	●	●	●
Slēguma izmaksas	●	●	●	●	●
Sprieguma kvalitāte	●	●	●	●	●
Slēguma pieejamība	●	●	●	●	●
Dublēšana	●	●	●	●	●
Komponentu skaits	●	●	●	●	●
Iepriekšējā pieredze	●	●	●	●	●
Pielāgojamība uzdevumam	●	●	●	●	●
Atteices iespējamība	●	●	●	●	●
Atteices sekas	●	●	●	●	●
Ieviešanas varbūtība	●	●	●	● (AREUS)	● (EnergyTeam)

2.1. att. Robotizētu ražošanas iekārtu salīdzinājums pēc to slēguma veida.

Vispārīga secinājuma veidā ir novērtēta ieviešanas varbūtība aplūkotajiem viena vai vairāku robotu slēguma veidiem. Veiktā analīze atklāj, ka robota sistēma ar visplašāk lietoto aparatūras slēgumu, kas papildināts ar kondensatoru izvēlētu konkrētajai robotu programmai, ir ieteicamākā uzlabojumu iespēja.

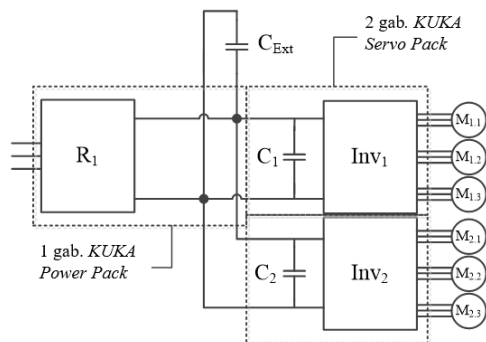
2.2. Izplatītie līdzstrāvas posma risinājumi, viens robots ar kondensatoru

Enerģijas plūsma, ieskaitot bremsēšanas pretestību, kapacitāti un kopējo reģenerēto daudzumu simulētās parauga robota programmas palēninājuma maksimuma laikā, ir vizualizēta 2.2. attēlā. Kā novērojams 2,01 sekundē, aptuveni 25 % no reģenerētās enerģijas (W_{regen}) tiek glabāti kapacitātē (W_{cap}), savukārt 75 % enerģijas ir izkliedēti bremsēšanas pretestībā (W_{br}).



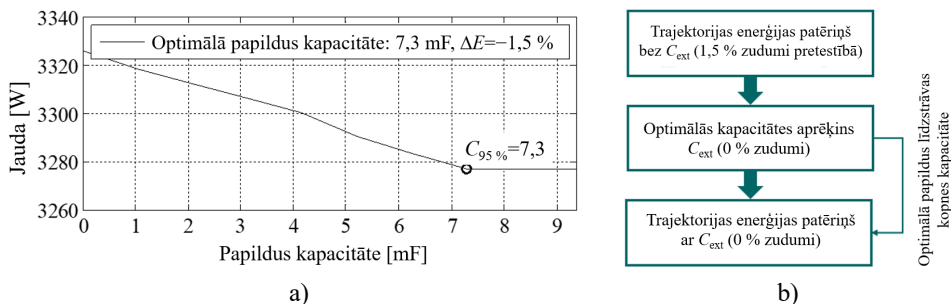
2.2. att. Robota bremsēšana šobrīd visplašāk lietotajā slēgumā ar bremsēšanas pretestību.

Šobrīd visplašāk lietotais slēgums (2.3. att.) tiek uzskatīts par references slēgumu, kurā lielākā daļa bremsēšanas enerģijas tiek izkliedēta. Ārējais kondensators ir labi dokumentēts un ieteicams risinājums rekuperētās enerģijas uzglabāšanai [16, 17, 18], tomēr nav izplatīts industriālajās robotu sistēmās, tāpēc promocijas darbā ir pētīts arī šis papildinājums. Uzdevuma profilu atšķirību dēļ viena ārējā kondensatora kapacitāte nav piemērota visām programmām [19].



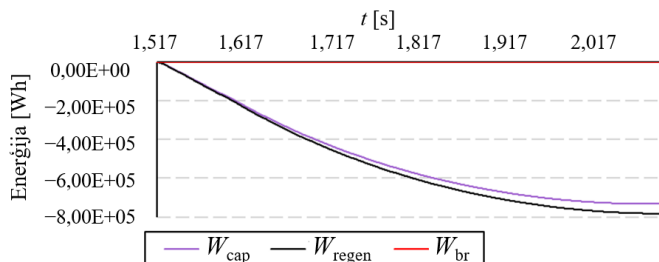
2.3. att. KUKA rūpnieciskā robota shēma ar ārējo kondensatoru [20].

Kondensatora kapacitāti izvēlas, izmantojot robota uzdevuma profila elektroenerģijas patēriņa analīzi. No elektroenerģijas patēriņa bremsēšanas pretestībā izkliedētā enerģija tiek izmantota kā references vērtība, lai veiktu nepieciešamās papildu kapacitātes aprēķinu (2.4. b att.). Parauga robota programmas datiem aprēķināta nepieciešamā papildu kapacitāte 7,3 mF (2.4. a att.), nodrošinot 1,5 % no kopējās patērētās enerģijas atgūšanu.



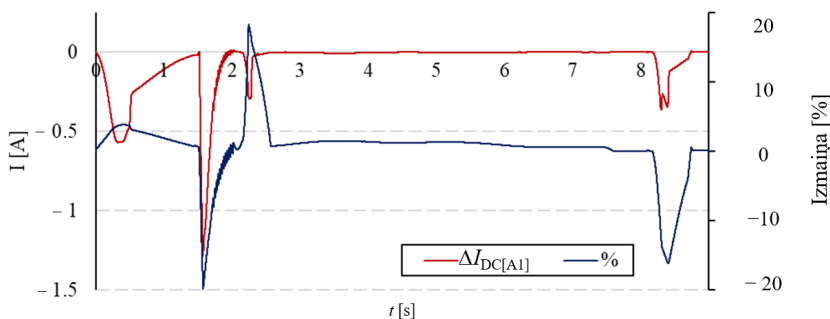
2.4. att. a) Elektroenerģijas patēriņa izmaiņa, mainot līdzstrāvas kopnes kondensatora kapacitāti; b) optimālās kapacitātes ieviešana.

Pievienotā ārējā līdzstrāvas kopnes kondensatora kapacitāte spēj uzglabāt (W_{cap}) lielāko daļu reģenerētās enerģijas (W_{regen}) (2.5. att.). Kapacitātes vērtība izvēlēta, lai saglabātu vismaz 95 % no lielākās bremsēšanas pretestībā izkliedētās enerģijas (W_{br}) maksimuma.



2.5. att. Robota bremsēšana ar bremsēšanas pretestību un pieslēgtu optimālo kapacitāti.

Simulētās robota programmas motora piedziņas invertora absolūtās un relatīvās strāvas vērtības starpība slēgumam ar un bez ārējā kondensatora redzama 2.6. attēlā. Ar bremsēšanas enerģiju, kas veidojas, robotam palēninoties, būtiskākā strāvas vērtību profilu atšķirība arī ir palēnināšanās brīdī.



2.6. att. Relatīvās un absolūtās vērtības atšķirību salīdzinājums asij A1.

Strāvas starpība ir pietiekama, lai mainītu temperatūras pīķa vērtību amplitūdu, kā rezultātā tiek iegūtas atšķirīgas darbības laika patēriņa vērtības (2.1. tab.). Pieņēmums, ka ārējā kondensatora pievienošana varētu uzlabot apskatīto robotu motora piedziņas invertora pusvadītāju slēdža komponentu darbības laiku, ir apstiprināts. Rezultāti atklāj vairāk nekā 10 % (12,73 % *IGBT* un 14,67 % pretparalēlā diode) atšķirību pirms un pēc izmaiņām.

2.1. tabula

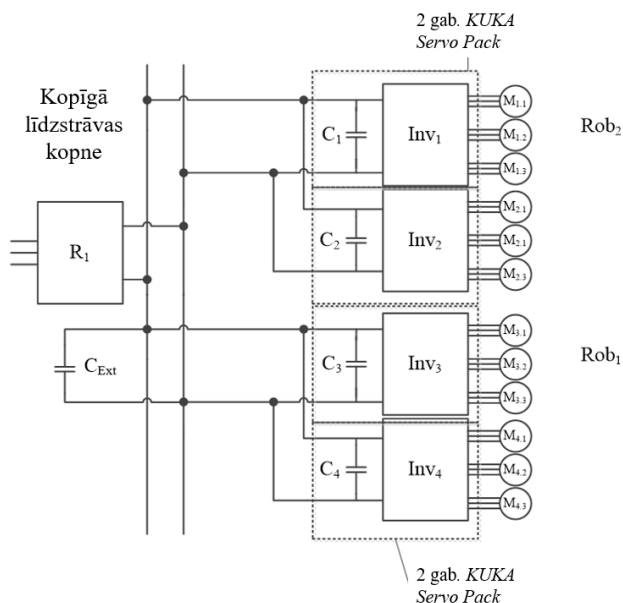
Darbības laika patēriņa izmaiņa pirms un pēc pievienotas papildu kondensatora kapacitātes

	A1, $C_{ext} = 7,3 \text{ mF}$	A1, $C_{ext} = 0 \text{ mF}$	Izmaiņa
Darbības laika patēriņš, <i>IGBT</i>	7,12 E-06 %	8,03 E-06 %	12,73 %
Darbības laika patēriņš, pretparalēlā diode	7,41 E-06 %	8,49 E-06 %	14,67 %

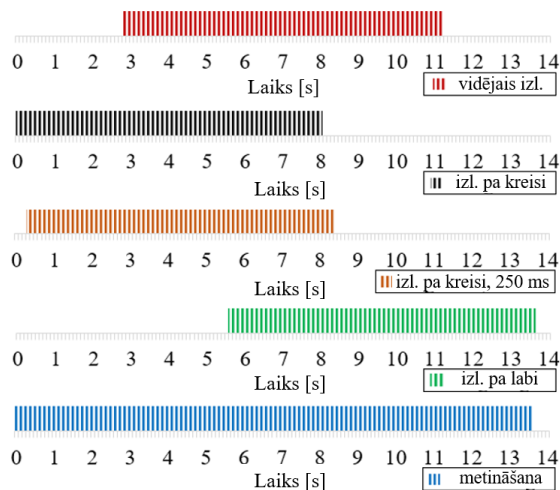
Šobrīd lietotā slēguma ar papildu kondensatora kapacitāti ieviešanas varbūtība ir augsta. Pieprasījumu rada solītais enerģijas patēriņa samazinājums. Trūkumu starpā ir ierobežotā iespēja novērtēt nepieciešamo kapacitātes vērtību pirms uzstādīšanas.

2.3. Savstarpēji savienotu robotu sistēmas, dalīta līdzsprieguma kopne

Lieljaudas taisngrieža un industriālo robotu slēguma paraugs, kas izmanto dalītu līdzstrāvas kopni, redzams 2.7. attēlā. Būtiska priekšrocība, salīdzinot ar iepriekšējām sistēmām, ir tāda, ka, ja robots paātrinās cita robota palēnināšanās laikā, tad enerģiju var izlietot pirms izkļiedēšanas vai uzkrāšanas [21]. Slēguma galvenais izaicinājums ir lieljaudas taisngriezis.



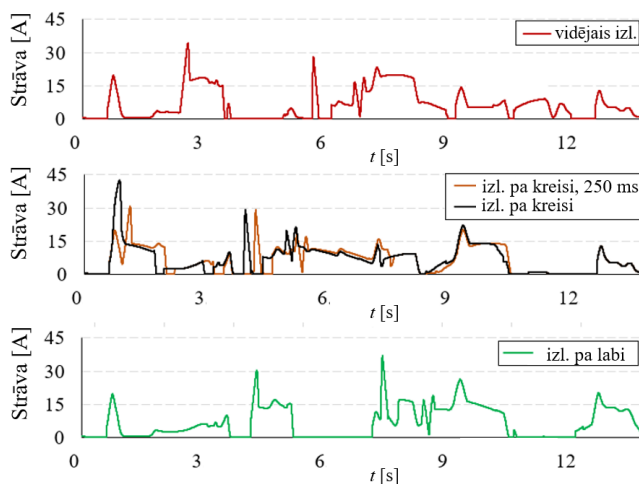
2.7. att. Vairāku industriālo robotu pievienošana kopējai līdzstrāvas kopnei ar centralizētu barošanu un ārējo kondensatoru papildu enerģijas uzkrāšanai [22].



2.8. att. Pārkraušanas un metināšanas robotu programmu savstarpējā saskaņošana.

Pieņēmums par maksimālu enerģijas atgūšanu paredz, ka roboti paātrinās un palēninās vienlaikus, tāpēc programmu savstarpējai saskaņošanai ir svarīga nozīme. Punktmetināšanas programma tika izvēlēta kā bāzes programma. Pārkraušanas programma izvēlēta kā pārklājuma programma, mainot izlīdzinājumu (2.8. att.), novērtējot ietekmi uz darbības laika patēriņu.

Runājot par strāvas profiliem (2.9. att.), viens no lielākajiem izaicinājumiem ir maksimālā vērtība programmas sākumā robota sākotnējās paātrināšanas laikā. Vienam robotam tie ir 20 A, savukārt kombinētās maksimālās vērtības izkārtojumam ar vienu barošanas avotu var sasniegt 43 A. Izlīdzinājums pa kreisi ar 250 ms nobīdi (2.8. att.) atklāj, ka sākotnējais strāvas pieprasījums no 43 A samazinājies līdz diviem atsevišķiem 20 A un 30 A maksimumiem.



2.9. att. Strāvas patēriņš no maiņstrāvas tīkla caur centrālo taisngriezi.

Darbības laika patēriņa analīze simulētajām temperatūras vērtībām apstiprina, ka izlīdzināšanas scenāriji nav vienādi, kā redzams 2.2. tabulā. Pārkraušanas robota programmu izlīdzinot pa labi, darbība radīs par 10,21 % vairāk bojājumu *IGBT* un par 45,58 % vairāk bojājumu pētītās ass piedziņas invertora spēka elektronikas slēdža pretparalēlajai diodei.

2.2. tabula

Darbības laika patēriņa maiņa metināšanas un pārkraušanas robotu programmu labās malas un vidējās izlīdzināšanas gadījumā (2.8. att.)

	Līdzin. pa kreisi	Līdzin. pa labi	Samazinājums
Darbības laika patēriņš, <i>IGBT</i>	7,89 E-06 %	8,78 E-06 %	10,21 %
Darbības laika patēriņš, pretparalēlā diode	8,68 E-06 %	15,9 E-06 %	45,58 %

Īstenošanas iespējamība ir vidēja, negaidot, ka tā kļūs par galveno izvēli. Pieprasījumu nodrošina prasība pēc līdzstrāvas tīkla ar kapacitātes, invertoru, saules enerģijas, līdzstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāju lielākai enerģijas uzkrāšanai. Izaicinājums ir uzturēt efektivitāti un samazināt enerģijas izkliedi bremsēšanas pretestībā, savstarpēji saskaņojot programmas. Trūkumi ietver lielus resursus sistēmas iestatīšanai, apgrūtinātu elektroenerģijas patēriņa datu pieejamību izstrādes laikā, dārgu centrālā taisngrieža bloka dublēšanu.

2.4. Secinājumi

Pārskatītas robotizētas ražošanas enerģijas nodrošināšanas topoloģijas, salīdzinot rekuperēto enerģiju, atteices varbūtību un atteices sekas (2.3. tab.). Detalizēti komentāri un apspriesto slēgumu analīze ir iekļauti attiecīgajās darba nodaļās. Īstenošanas iespējamība tiek novērtēta kā vispārīgs secinājums par izpētīto slēgumu.

2.3. tabula

Rūpniecisko manipulatoru aparatūras slēguma veidu salīdzinājums

Rūpn. manipulatora iekārtu slēgums	Rangs	Vidējais rezultāts – ieviešanas varbūtība
Ar bremsēšanas pretestību	3	3,33 – pieejams, rentabls, bet neefektīvs
Ar ārējo kondensatoru	1	1,66 – pieejams, dārgāks, efektīvāks
Divvirzienu taisngriezis	2	2,33 – apšaubāma izmaksu efektivitāte un praktiskums
Līdzstrāvas kopne ar 1 taisngriezi	4/5	3,83 – taisngriezis – mērogošanas un uzticamības probl.
Līdzstrāvas kopne, vairāki taisngr.	4/5	3,83 – joprojām izstrādes stadijā, tāpēc dārgs

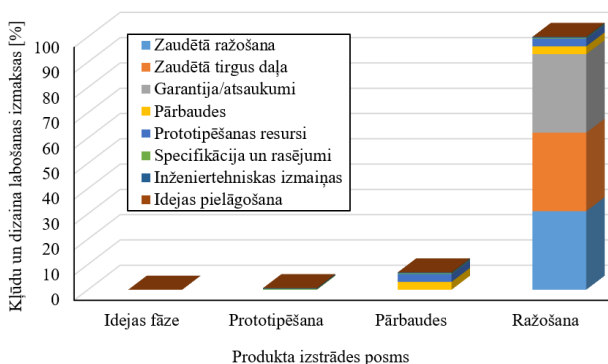
Viena robota sistēma ar bremsēšanas pretestību ir visbiežāk uzstādītais slēgums. Ja ir nepieciešami energoefektivitātes uzlabojumi, vislielākā ieviešanas iespējamība ir slēguma papildinājumam ar kondensatoru, kas pielāgots konkrētai robota programmai, taču ir jāņem vērā ieviestā kondensatora darbības laiks. Vairāku robotu sistēmām, kas savienotas ar līdzstrāvas kopni, ir augstākas sākotnējās izstrādes izmaksas, ieguvumi ir atkarīgi no robota programmas, daļa no nepieciešamās aparatūras nav pārcelta no pētniecības uz ražošanas vidi.

3. ROBOTU IEKĀRTU IZSTRĀDE UN PĀRBAUDES

3.1. Ievads

Elektronikas nozarē sistēmas vai ierīces uzticamība parasti tiek definēta kā “iespēja, ka noteiktos apstākļos iekārta apmierinoši darbojas noteiktā laika periodā”. Viens no uzticamības inženierijas mērķiem, kas ir šī promocijas darba uzmanības centrā, ir izmantot dažādas metodes, lai novērtētu projektu uzticamību un analizētu datus.

Lai palielinātu uzticamību, jāpalielina izstrādei nepieciešamie resursi, taču šādā veidā samazinās nepieciešamo rezerves daļu, apkopes personāla un rezerves aprīkojuma izmaksas, (3.1. att.). Metodes un paņēmieni uzticamu sistēmu projektēšanai no esošajiem komponentiem ir pieprasītas [23].



3.1. att. Izmaksas uzticamības un citu izstrādes kļūdu novēršanai atklāšanas posmos [24].

Neuzticamu produktu rezultātā tiek zaudēta tirgus daļa, rodas resursu ietilpīgi atsaukumi un garantijas remonts, tiek pazaudēti vai nodoti metāllūžņos defektīvie ražošanas materiāli, tiek zaudēts verifikācijas un testēšanas laiks, kā arī prototipa veidošanas materiāli, izstrādē ieguldītais darbs. Klientu atbalsta serviss ir nepieciešams, lai uzraudzītu produktu darbības laikā – klientu sūdzības, remonta apjomus, kas ir īpaši svarīgi pirmajās ražošanas partijās, palīdzot atklāt novirzes un kļūdas pirms nākamās ražošanas. Dažas no paredzamajām atteices kategorijām redzamas 3.2. attēlā.

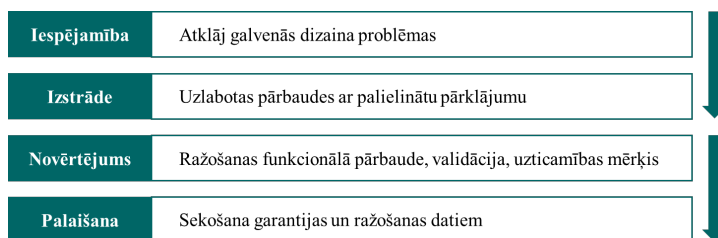


3.2. att. Vispārīgā struktūrā iekārtu atteicēm dažādos elektronikas ierīču lietojumos.

3.2. Izstrādes un ražošanas programma

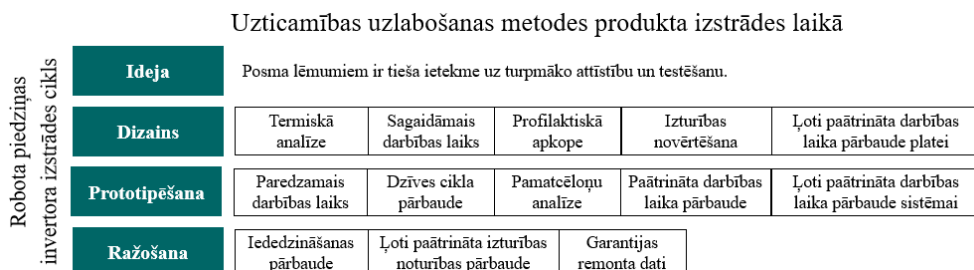
Izstrādes komandai ir jābalansē starp produktu ieviešanas perioda ilgumu, jo aizkavēta palaišana ietekmē peļņu un tirgus apguvi [25], un produkta uzticamību, jo problēmas, kas tiek konstatētas vēlīnā stadijā, prasa arvien pieaugošus resursus risinājumam [26].

Automobiļu rūpniecība, aviācija, militārā nozare – dažām nozarēm ir nepieciešama informācija par ierīces uzticamību. Izstrādes un ražošanas cikla programma ietver testu sērijas visos produkta cikla posmos [27]. Iespējamība, izstrāde, novērtējums un palaišana ir nozīmīgi uzticamības programmas posmi, kas redzami 3.3. attēlā.



3.3. att. Uzticamības pārbaudes posmi produktu izstrādē.

Robota piedziņas invertora uzticamības uzlabošanas metodes, iedalītas koncepcijas dizaina, prototipa un ražošanas fāzēs, kas redzamas 3.4. attēlā.

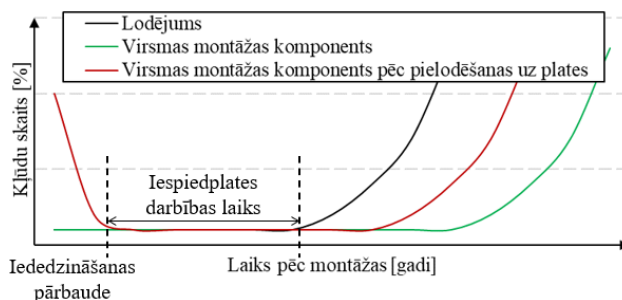


3.4. att. Uzticamības uzlabošana robotu piedziņas invertora produktu izstrādes laikā.

Izejošās kvalitātes kontroles programmas uzdevums ir nodrošināt, lai izgatavotais produkts atbilst specifikācijas prasībām un darbojas pareizi un lai kvalitāte laika gaitā nepasliktinās. Izturības atbilstības izvērtēšana ir viens no rīkiem, ko lieto agrīnas atteices līmeņa samazināšanai. Šajā pārbaudē tiek saīsināts katra saražotā produkta atlikušais darbības laiks, taču tiek uzlabota visas partijas uzticamība, atklājot marginālus produktus ar defektiem.

3.3. Izturības atbilstības izvērtēšana un atteices veidi

Viens no pamatcēloņiem produkta agrīnai atteicei ekspluatācijas laikā ir materiāla ražošanas un detaļu montāžas procesa mainīgie lielumi, kas parasti nav vienmērīgi sadalīti visā dzīves ciklā (3.5. att.)



3.5. att. Samontētas iespīestās plates darbības cikla posmi.

Darbā izpētītas divas novērtēšanas pārbaūžu kategorijas – kvalitatīvās un kvantitatīvās pārbaudes, koncentrējoties vai nu uz kļūmes mehānismu, lai noteiktu konstrukcijas izturību (kvalitatīvi), vai arī uz datu analīzi un atbilstības novērtēšanu (kvantitatīvi), nosakot vecuma un uzticamības atkarības funkciju. Kopsavilkums par abām metodēm apkopots 3.1. tabulā.

3.1. tabula

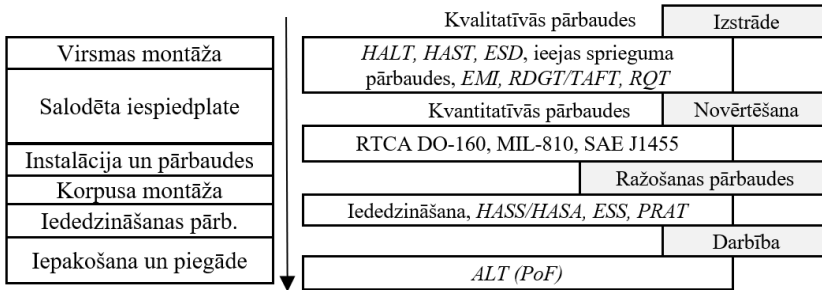
Kvalitatīvās un kvantitatīvās pārbaudes metožu kopsavilkums

Kvalitatīvās pārbaudes	Kvantitatīvās pārbaudes
Izpratne par iemesliem un cēloņiem	Skaitliskie dati, statistika, atteikumu rādītāji
Ideju attīstīšana, atteikumu veidi	Formulē faktus, atklāj modeļus
Koncentrējas uz atteikumu veidiem	Paredz darbības laiku normālos liet. apstākļos
Rezultāti var būt maldinoši	Iegūst paredzamos datus īsakā laikā
Mazāk noder darbības laika prognozēšanai	Paātrina nolietošanos
Destruktīvā robeža (mulķīgais atteikums)	Nesasniedz iznīcināšanas robežu
Dizaina izturības novērtēšana	Veido vecuma un uzticamības funkciju
Ļoti paātrinātā darbības pārbaude	Novērtē izturību rūpīgi, palielinot slodzi
Pāris dienas	Pāris nedēļas
Inženiertehniskā pieredze	Anālītiskie modeļi, Veibulla, Arrēnusa
Detalizētas zināšanas par produktu	

Samontētas iespīestās plates izturības atbilstības novērtēšanā atklātās kļūmes var būt: 1) bojājumi ražošanas procesā; 2) pārkaršana ražošanas kļūdu dēļ [28]; 3) komponentu iepakojuma defekti (piemēram, induktora ferīta plaisāšana); 4) oksidācijas defekti, ar tiem saistīta slikta lodējumu kvalitāte, piesārņojums [29]; 5) citi lodēšanas defekti – gaisa kabatas, pārāk maz lodalvas, neatbilstošas lodēšanas pastas uzklāšanas trafareta atveres; 6) korpusa vai vadu montāžas kļūdas – neatbilstoši uzstādīti vai bojāti [30].

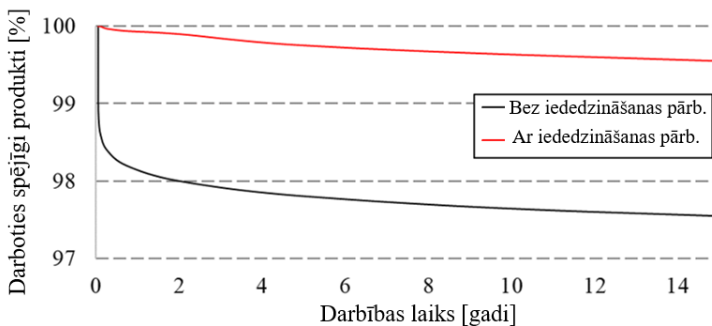
3.4. Iededzināšana (*Burn-in*) kā uzticamības uzlabošanas rīks

Lodēšanas, montāžas defektu vai bojātu komponentu defekti tiek atklāti ieslēgšanas, funkcionālās un iededzināšanas pārbaudžu vai arī atbilstības novērtēšanas, ļoti paātrinātās slodzes pārbaudes, audita laikā. Viena no pārbaudes metodēm, lai pārliecinātos, ka samontēto ierīču darbība iekļaujas specifikācijas robežās, tiek saukta par iededzināšanu (3.6. att.).



3.6. att. Iededzināšanas pārbaude elektronisko ierīču masveida ražošanā.

Dažādu montāžas vai ražošanas defektu dēļ uzticamība pirmajos darbības gados ir samazināta [29]. Izturības atbilstības novērtēšanas koncepcija paredz simulēt divu gadu darbību, samazinot atlikušo darbības laiku un agrīni atklājot gaidāmos bojājumus (3.7. att.).

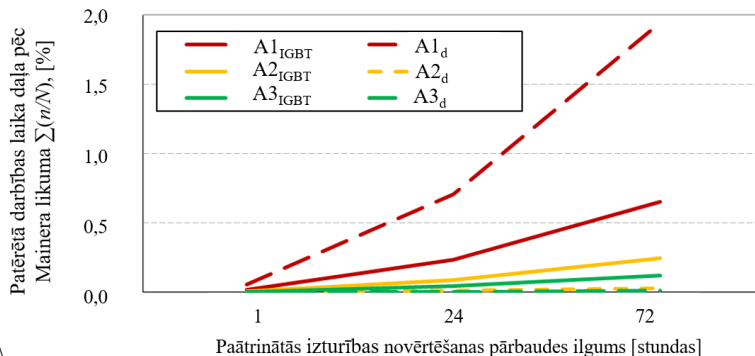


3.7. att. Produktu darbība, veicot izturības atbilstības novērtēšanu (iededzināšanu).

Iededzināšanas pārbaude pēc montāžas un pēc piegādes klientiem ir viena no izturības atbilstības novērtēšanas iespējām, piemēram, robota motora piedziņas invertora iededzināšanas pārbaude, rūpnīcā izpildot konkrēto robota programmu. Pētījuma laikā izstrādātais modelis ļauj novērtēt iekārtas darbības laika patēriņu viena darbības cikla laikā. Simulējot atbilstības novērtēšanas pārbaudi, tiek imitēti vairāki atkārtoti konkrētās robota programmas cikli.

Lietojot iepriekš prezentētās metodes darbības laika patēriņa aprēķinam, tika simulēts industriālā robota ass piedziņas invertora *IGBT* modulis metināšanas programmas laikā.

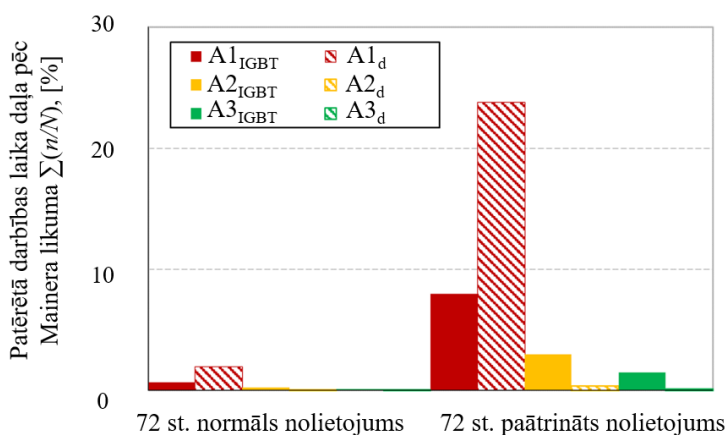
Plānojot programmas atkārtošānu no 1 stundas līdz 72 stundām, tiek novērtēts nolietošānā paātrinājums. Darbības laika patēriņš 1.–3. robota ass invertora IGBT un pretparalēlās diodes paātrinātās pārbaudes laikā redzams 3.8. attēlā. Pārbaudes profils ietver piecu sekunžu aizturi pēc katra cikla, bet neietver reālu darba grafiku, piemēram, tehnisko pārtraukumu, darbnīcas maiņu maiņu, pusdienu pārtraukumu vai citus biežāk sastopamos darba pārtraukumu veidus.



3.8. att. Darbības laika patēriņš cikliski izpildot metināšanas programmu.

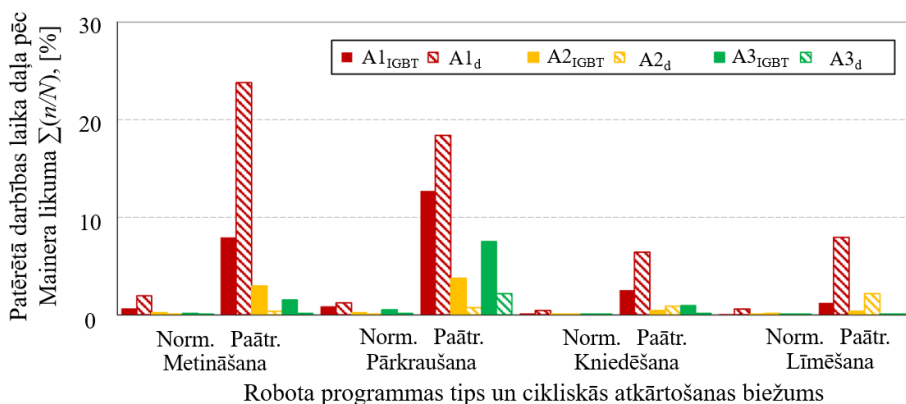
Simulācijas rezultāti atklāj, ka, ja par sliekšni ir izvēlēta parauga darbības laika patēriņa vērtība 0,002, pārbaudes izpildes laiki šī sliekšņa sasniegšanai katrai robota asij būtiski atšķiras. Lai gan 1. asij pietiek ar 24 stundu testēšanu, 2. ass nodilums ir zem mērķa vērtības, kas nav pieņemami, jo mērķis ir panākt vienādu mūža patēriņu visai iekārtai.

Ciklu skaits normāla nodiluma laikā ir samazināts, salīdzinot ar paātrinātu nodilumu (3.9. att.), jo tas ietver aptuvenu koeficientu, lai ņemtu vērā ilgākus kavējumus, reālus darbības grafikus, piemēram, tehniskos pārtraukumus, darbnīcu maiņas, pusdienu pārtraukumus un citus.



3.9. att. Normāla un paātrināta robotu metināšanas programmas atkārtošāna.

Elektroenerģijas patēriņš un uzdevuma profils katrai robotu programmai atšķiras, atšķirībām saglabājoties arī darbības laika patēriņā. Tika simulēta citu robotu programmu izturības atbilstības novērtēšanas pārbaude, piemēram, līmēšanas, apstrādes vai kniedēšanas programmām (3.10. att.), uzrādot zemākas darbības laika patēriņa vērtības, turklāt iepriekš novērotais nevienmērīgais asu nolietojums ir arī citām robotu programmām.



3.10. att. Parasta un paātrināta metināšanas, pārkrāšanas, kniedēšanas un līmēšanas robota programmu 72 h cikliska atkārtošana.

Efektīvāka alternatīva iededzināšanas pārbaudei ar robota programmas profilu ir šīs pārbaudes veikšana piedziņas pārveidotāja iespiedplates montāžas vietā. Kontrolētā vidē ir iespējams panākt vienādu asu aparatūras degradāciju, izmantojot stabilu procesu ar elektrisko slodzi.

3.5. Secinājumi

Iededzināšana ir viena no industriālo robotu izturības novērtēšanas pārbaudēm. Tiek ņemts vērā mērķa uzticības līmenis, mērķa izmaksas, tostarp pārbaudes ilgums, garantijas atgriešanas. Galvenās problēmas ir uzstādīšanas izmaksas, ražošanas caurlaides apjoma samazināšana un kopējo ražošanas izmaksu palielināšanās, savukārt ieguvumi ietver samazinātu agrīnu kļūmju risku un augstāku klientu apmierinātību.

Četrām sešu brīvības pakāpju industriālā robota programmām tika simulēts piedziņas invertora *IGBT* moduļu darbības laika patēriņš, lai novērtētu nolietojumu parastā un paātrinātā cikla laikā. Rezultāti atklāj, ka darbības laika patēriņš ir atkarīgs no programmas veida un ka robota ass aparatūra nolietojas nevienmērīgi piemērotā sprieguma profila atšķirību dēļ. Iespēja veikt robota aparatūras izturības atbilstības novērtēšanas pārbaudi jau pēc montāžas galējā atrašanās vietā ir zema, jo iekārtām netiek sasniegts vienāds darbības laika patēriņš. Iededzināšana invertora iespīstās plates montāžas vietā ir ieteicama, jo speciāla pārbaude un aprīkojums, kas paredzēts invertora izturības novērtēšanas pārbaudei, efektīvāk sasniegs mērķi.

SECINĀJUMI

1. Pieaugot industriālo robotu un līdzstrāvas sistēmu lietojumu skaitam, ir nepieciešama rūpnieciskās aparatūras sākotnējās funkcionalitātes uzturēšana, lai nodrošinātu ražošanas procesu ilgtspēju un nepārtrauktību, kas rada pieprasījumu pēc lokālu līdzstrāvas tīklu risinājumu uzticamības datiem.

2. Robota darba instrumenta masai ir tieša ietekme uz motora piedziņas invertora *IGBT* darbības laika patēriņu, palielinot strāvu un termiskās svārstības. Pētītā robotu programma tika atkārtota ar 0 kg un 125 kg darba rīkiem, smagākajam instrumentam atklājot no 29 % līdz 249 % pieaugumu spēka elektronikas komponentu darbības laika patēriņā

3. Robota motora piedziņas invertora *IGBT* moduļa pusvadītāju pārejas temperatūras analīzes metode darbības laika patēriņa aprēķins ļauj identificēt un novērtēt robota slodzes masas, robota lietojuma veida, programmu savstarpējās saskaņošanas ietekmi uz temperatūras izmaiņām robotu iekārtās. Maksimālā temperatūra mazāk dinamiskām (līmēšana) programmām ir par 25 % zemāka nekā punktmetināšanas vai pārkraušanas programmām.

4. Salīdzinot dinamiskās (metināšana, pārkraušana) un mazāk dinamiskās robotu programmas, tām ir līdz pat 10 reizi atšķirības asu kumulatīvajā darbības laika patēriņa vērtībā viena cikla laikā, kur lielākais darbības laika patēriņš ir 1. ass pretparalēlajai diodei.

5. Elektroenerģijas patēriņa modelis ar robota programmas koda ievadi ir iepriekš salīdzināts ar rūpniecisko robotu, tāpēc tiek paredzēts, ka ieviestie siltuma un darbības laika aprēķini saskanēs ar faktiskajiem datiem ar paredzamu novirzi, kas rodas precizitātes dēļ. Modelis sniedz iespēju ātri pārbaudīt dažādas darbības laika uzlabošanas koncepcijas un izcelt ietekmes faktorus – instrumenta masu, paātrināšanās un apstāšanās ciklus, programmas ātrumu.

6. Iepriekšējos pētījumos galvenā uzmanība tika pievērsta lokāla līdzstrāvas tīkla slēgumu energoefektivitātes uzlabojumiem, tāpēc ieteikto un vēl nepārskatīto robotizētās ražošanas sistēmas slēgumu un vadības uzlabojumu analīze un salīdzināšana, ņemot vērā uzticamību, ir vērtīgs papildinājums iepriekšējam darbam.

7. Optimālās kapacitātes kondensatora (7,3 mF) pievienošana visplašāk lietotajam viena robota aparatūras slēgumam ir ar vislielāko ieviešanas iespējamību. Saskaņā ar Palmgrēna–Mainera bojājumu lineārās saskaitīšanas hipotēzi, Mainera likumu, kondensatora pieslēgšana samazināja robota motora piedziņas invertora spēka elektronikas ķēdes *IGBT* aprēķināto darbības laika patēriņu par 12,73 % *IGBT* slēdzim un par 14,67 % pretparalēlajai diodei.

8. Vienai un tai pašai divu robotu programmu kombinācijai, mainot katras programmas sākuma laiku, ieejas strāvas maksimālo vērtību no maiņstrāvas tīkla vairāku robotu viena taisngrieža slēgumā var samazināt no 43 A līdz 30 A (samazinājums par 30,2 %).

9. Maz ticams, ka tiks ieviests vairāku robotu viena barošanas avota slēgums. Tam ir augstas sākotnējās izstrādes izmaksas, tai skaitā dažas tehnoloģijas nav pārnestas uz ražošanas vidi. Divu pētīto robota programmu savstarpējās saskaņošanas varianti atklāja aprēķinātā ass piedziņas invertora spēka elektronikas slēdža komponentu darbības laika patēriņa samazināšanos par 10,21 % *IGBT* un par 45,58 % pretparalēlajai diodei.

10. Tika pārskatītas un prezentētas izstrādes metodes uzticamas robotizētas ražošanas iekārtu piegādei, kas spēj darboties pēc iespējas ilgāk. Tostarp aplūkota uzticamības programmas ieviešana, lai uzlabotu uzticamību, novēršot agrīnās atteices un to režīmus.

11. Izturības noturības pārbaude samazina atsevišķas vienības uzticamību, jo tiek samazināts tās atlikušais darbības laiks, un pēc marginālo produktu likvidēšanas, partijas uzticamība palielinās. Iededzināšanas pārbaudes ilgums ņem vērā garantijas atgriešanas, ražošanas u. c. izmaksas. Ieguvumi ietver samazinātu agrīnu kļūmju risku.

12. Lai sasniegtu vismaz 0,2 % no darbības laika patēriņa (robota ass piedziņas invertora *IGBT*) parauga metināšanas programmas iededzināšanas pārbaudes laikā, nepieciešamais pārbaudes ilgums svārstās no 24 stundām (1. ass) līdz 100 stundām (3. ass).

13. Dažādu asu piedziņas invertora *IGBT* moduļi nolieņojas nevienmērīgi atkarībā no robota programmas sprieguma profila, svara u. c., tāpēc invertora iededzināšana ir ieteicama iespīstās plātes montāžas vietā ar vienādu un kontrolētu darbības laika patēriņu.

14. Uzdevuma profila analīze nodrošina datus paredzamās apkopes grafika pielāgošanai ražotnē atkarībā no robota programmas veida, instrumenta svara un citiem ietekmes faktoriem.

Turpmākie darbi

Turpmākās izstrādes iespējas ietver iespējamu pieejamā invertoru klāsta palielināšanu. To veic iekārtu ražotājs, samazinot izmaksas un palielinot tirgus daļu, piedāvājot iekārtas ar zemākām izmaksām un bez liekās darbības laika rezerves. Iekārtām zems darbības laika patēriņš ir nepraktiskas resursu izmantošanas rādītājs, atklājot potenciālu samazināt aprīkojuma izmaksas, samazinot komponentu pārvērtēšanu.

Turpinot attīstību un integrējot izstrādāto modeli digitālā ražošanas virtuālajā ekspluatācijas programmatūrā ar izstrādāto inovatīvo enerģijas patēriņa, pusvadītāju temperatūras un ilgi gaidītā darbības laika patēriņa moduli nodrošina lietojumam specifiskus datus prognozējošai apkopei un citiem pētniecības mērķiem. Izstrādātais modelis atbalsta turpmāku integrāciju virtuālajā ekspluatācijas programmatūrā.

KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTĀ LITERATŪRA

Pilns izmantotās literatūras saraksts ar 170 avotiem – promocijas darba pilnajā versijā.

1. Project AREUS. *Automation and Robotics for EUropean Sustainable manufacturing* [tiešsaiste]. [Skatīts 2022. g. februārī]. Pieejams: <https://cordis.europa.eu/project/id/609391>.
2. European Commission. *World Robotics Report 2020 by International Federation of Robots* [tiešsaiste]. [Skatīts 2021. g. decembrī]. Pieejams: <https://ec.europa.eu/newsroom/rtd/items/700621/en>.
3. Dassault Systemes. *Assembly Robot Programmer* [tiešsaiste]. [Skatīts 2020. g. novembrī]. Pieejams: <https://www.3ds.com/products-services/delmia/disciplines/industrial-engineering/>.
4. ABB. *RobotStudio®* [tiešsaiste]. [Skatīts 2020. g. novembrī]. Pieejams: <https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio>.
5. KUKA AG. *KUKA.Sim* [tiešsaiste]. [Skatīts 2020. g. novembrī]. Pieejams: https://www.kuka.com/en-gb/products/robotics-systems/software/simulation-planning-optimization/kuka_sim.
6. Bormanis, O. Development of energy consumption model for virtual commissioning software. No: *2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Latvija, Rīga, 2015*. Izdošanas vieta: IEEE, 2015, 1.–4. lpp. ISBN 978-1-5090-0334-1. e-ISBN 978-1-4673-9752-0. Pieejams: doi:10.1109/RTUCON.2015.7343139.
7. Corke, P. *Robotics Toolbox for MATLAB®* [tiešsaiste]. Izdošanas vieta: PeterCorke.com, 2020 [skatīts 2020. g. novembrī]. Pieejams: <https://petercorke.com/toolboxes/robotics-toolbox/>.
8. Corke, P. *Robotics Toolbox 10 for MATLAB®* [tiešsaiste]. Izdošanas vieta: Robotics Toolbox, 2020 [skatīts 2020. g. novembrī]. Pieejams: <https://petercorke.com/download/27/rtb/1050/rtb-manual.pdf>.
9. Bormanis, O., Ribickis, L. Mission Profile based Electro-Thermal Model of Robotic Manufacturing Application. No: *2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe), Beļģija, Gante, 2021*. Izdošanas vieta: IEEE, 2021, 1.–6. lpp. ISBN 978-1-6654-3384-6. e-ISBN 978-9-0758-1537-5. Pieejams: doi:10.23919/EPE21ECCEurope50061.2021.9570547.
10. Musallam, M., Johnson, M., Yin, C., Lu, H. and Bailey, C. Real-time life expectancy estimation in power modules. No: *2008 2nd Electronics System-Integration Technology Conference, Lielbritānija, Griniča, 2008*. Izdošanas vieta: IEEE, 2008, 231.–236.lpp. ISBN 978-1-4244-2813-7. e-ISBN 978-1-4244-2814-4. Pieejams: doi:10.1109/ESTC.2008.4684355.

11. Chamund, D., Rout, C. *Reliability of High Power Bipolar Devices* [tiešsaiste]. Izdošanas vieta: Dynex Semiconductor Limited, 2009 [skatīts 2021. g. februārī]. Pieejams: https://www.dynexsemi.com/Portals/0/assets/downloads/DNX_AN5948.pdf.
12. Musallam, M., Johnson, C. M. An Efficient Implementation of the Rainflow Counting Algorithm for Life Consumption Estimation. *IEEE Transactions on Reliability*. 2012, sēj. 61, nr. 4, 978.–986. lpp. ISSN 0018-9529. e-ISSN 1558-1721. Pieejams: doi: 10.1109/TR.2012.2221040.
13. Barbara, S. *No Moore?* [tiešsaiste]. Izdošanas vieta: The Economist. Science and Technology, 2013 [skatīts 2022. g. februārī]. Pieejams: <http://www.economist.com/news/21589080-golden-rule-microchips-appears-be-coming-end-no-moore>.
14. Briere, M., ACOO Enterprises LLC. *GaN-based power devices offer game-changing potential in power-conversion electronics* [tiešsaiste]. EE Times, 2008 [skatīts 2022. g. februārī]. Pieejams: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1272514.
15. Ruthardt, J., Blank, F., Wölfle, J., Tröster, N., Roth-Stielow, J. Power supply with active energy storage to reuse the braking energy for servo drives. No: *2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), Varšava, Polija, 2017*. Izdošanas vieta: IEEE, 2017, 1.–9. lpp. ISBN 978-1-5386-0530-1. e-ISSN 978-90-75815-27-6. Pieejams: doi: 10.23919/EPE17ECCEurope.2017.8099002.
16. Meike, D., Ribickis, L. Recuperated Energy Savings Potential and Approaches in Industrial Robotics. No: *2011 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Itālija, Trieste, 2011*. Izdošanas vieta: IEEE, 2011, 299.–303. lpp. ISBN 978-1-4577-1730-7. e-ISSN 978-1-4577-1732-1. ISSN 2161-8070. e-ISSN 2161-8070. Pieejams: doi: 10.1109/CASE.2011.6042435.
17. Hoffmann, A. *Micro Power System with LVDC Link* [tiešsaiste]. [Skatīts 2022. g. februārī]. Pieejams: <http://www.studentaward-germany.com/idea.php?id=75>.
18. Meike, Dāvis. *Increasing Energy Efficiency of Robotized Production Systems in Automobile Manufacturing*. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga, RTU Izdevniecība, 2013. ISBN 978-9934-10-501-2.
19. Meike, D., Ribickis, L. Energy Efficient Use of Robotics in the Automobile Industry. No: *2011 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Igaunija, Tallina, 2011*. Izdošanas vieta: IEEE, 2011, 507.–511. lpp. ISBN 978-1-4577-1158-9. e-ISSN 978-1-4577-1159-6. Pieejams: doi: 10.1109/ICAR.2011.6088567.
20. Bormanis, Oskars. *Improvement of Industrial Robots Energy Efficiency by Energy Storage Applications*. Bakalaura darbs. Rīga, Rīgas Tehniskā universitāte, 2014.
21. Raņķis, I., Meike, D., Šenfēlds, A. Utilization of Regeneration Energy in Industrial Robots System. *Power and Electrical Engineering*. 2013, sēj. 31, 95.–100. lpp. ISSN 1407-7345.
22. DAIMLER AG. *Robotersystem*. Michael Lebrecht, Thomas Schneider. Int. Cl.: B25J 9/10 (2006.01). Iesniegšanas datējums 2010-08-06. Patenti un preču zīmes. DE102010033596A1. 2011-03-31.

23. Constantinides, K., Mutlu, O., Austin, T. M., Bertacco, V. A Flexible Software-Based Framework for Online Detection of Hardware Defects. *IEEE Transactions on Computers*. 2009, sēj. 58, nr. 8, 1063.–1079. lpp. ISSN 0018-9340. e-ISSN 1557-9956. Pieejams: doi: 10.1109/TC.2009.52.
24. Blattau, N. *HALT and Sherlock Automated Design Analysis Software* [PowerPoint prezentācija]. Izdošanas vieta: DfR Solutions, Beltsvilla, 2014.
25. Initial State Technologies, Inc. *Late-to-Market Calculator* [tiešsaiste]. [Skatīts 2022. g. janvārī]. Pieejams: <https://www.initialstate.com/latecalc/>.
26. Song, Y., Wang, B. Survey on reliability of power electronic systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2012, sēj. 28, nr. 1, 591.–604. lpp. ISSN 0885-8993. e-ISSN 1941-0107. Pieejams: doi:10.1109/TPEL.2012.2192503.
27. Silverman, M. *Design for Reliability (DFR) Seminar* [PowerPoint prezentācija]. Izdošanas vieta: Ops A La Carte LLC, 2011. Pieejams: <https://www.slideshare.net/fms95032/design-for-reliability-dfr-seminar-13813404>.
28. ReliaSoft Corporation. *How Long Should You Burn In a System?* [tiešsaiste]. Izdošanas vieta: Reliability HotWire, 2006 [skatīts 2020. g. novembrī]. Pieejams: <https://www.weibull.com/hotwire/issue69/relbasics69.htm>.
29. Kuo, W., Chien, W.-T. K., Kim, T. *Reliability, Yield, and Stress Burn-No: A Unified Approach for Microelectronics Systems Manufacturing & Software development*. No: Berlīne, Springer Science+Business Media, 1998, 420 lpp. ISBN: 978-0792381075.
30. Kaknevicus, A., Hoover, A. *Application Report SLVA670A Managing Inrush Current* [tiešsaiste]. Izdošanas vieta: Texas Instruments, 2015 [skatīts 2020. g. novembrī]. Pieejams: <https://www.ti.com/lit/an/slva670a/slva670a.pdf?ts=1666686750380>.



Oskars Bormanis dzimis 1991. gadā Valkā. Rīgas Tehniskajā universitātē ieguvis bakalaura (2013) un maģistra (2015) grādu elektroinženiera specialitātē. Kopš 2022. gada strādā SIA "Adopt", ieņemot sistēmu funkcionālās drošības inženiera amatu. 2013. gadā strādājis praksē "Daimler AG". 2015. gadā saņēmis Venera fon Sīmensa Izcilības balvu.