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

Kaspars Kroičs
Doktora studiju programmas "Elektrotehnoloģiju datorvadība" doktorants

IEKĀRTU AR SUPERKONDENSATORIEM IZSTRĀDE ELEKTRISKĀS PIEDZIŅAS MODERNIZĒŠANAI

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji
Dr. sc. ing. LEONARDS LATKOVSKIS
Dr. sc. ing. VIESTURS BRAŽIS

RTU Izdevniecība
Rīga 2018

Kroičs, K. Iekārtu ar superkondensatoriem izstrāde elektriskās piedziņas modernizēšanai. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2018. 58 lpp.

Iespiests saskaņā ar IEE institūta padomes sēdes 2018. gada 27. augusta lēmumu. Protokols Nr. 127.

ISBN 978-9934-22-188-0 (print)
978-9934-22-189-7 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2018. gada 7. decembrī, pulksten 10. Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 212. telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr. sc. ing. Oskars Krievs
Rīgas Tehniskā universitāte

Dr. sc. ing. Mariusz Zdanowski
Varšavas Tehniskā universitāte, Polija

Dr. sc. ing. Dimitar Arnaudov
Sofijas Tehniskā universitāte, Bulgārija

APSTIPRINĀJUMS

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

Kaspars Kroičs ……. (paraksts)
Datums: ……

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā. Darbā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 137 zīmējumi un ilustrācijas, trīs tabulas, kopā 143 lappuses. Literatūras sarakstā ir 184 nosaukumi.

Saturs

Promocijas darba vispārējais raksturojums ... 5
Tēmas aktualitāte ... 5
Darba mērķis un uzdevumi ... 5
Pētījumu metodes un līdzekļi ... 6
Zinātniskās novitātes ... 6
Darba praktiskā nozīme ... 6
Aizstāvamās tēzes ... 6
Darba aprobācija ... 7
Autora publikācijas ... 8
Ievads ... 10
1. Enerģijas uzkrājēja izmantošana elektriskajā piedziņā ... 11
2. Enerģijas rekuperatīvās bremzēšanas stenda izveide un modernizācijas iekārtu pētīšana transportā ... 13
2.1. Reģeneratīvās bremzēšanas laboratorijas stenda izstrāde ... 13
2.2. Superkondensatoru uzkrājēja pārbūves komplekta izpēte un izstrāde lēngaitas elektriskajam transportam ... 16
3. Magnētiski saistītu droseļu izmantošana pārveidotāja strāvas pulsāciju samazināšanai un jaudas blīvuma palielināšanai ... 22
3.1. Divfāžu inversi magnētiski saistītas droseles izveide un lietošana līdzstrāvas pārveidotājos ... 22
3.2. Četrfāžu pārveidotājs ar magnētiski saistītām droselēm un enerģijas pārvadi starp fāzēm ... 25
3.3. Četrfāžu pārveidotājs ar tieši un inversi magnētiski saistītām droselēm ... 28
4. Uz superkondensatoriem balstīta modernizācijas iekārta iekšdedzes dzinēja starta baterijas snieguma uzlabošanai ... 31
4.1. Klasiskās startēšanas procesa analīze ... 31
4.2. Uz superkondensatoriem balstīta modernizācijas iekārta tradicionālās iekšdedzes dzinēja startēšanas sistēmas uzlabošanai ... 32
4.3. Uz superkondensatoriem balstīta modernizācijas iekārta ar aktīvu vadību tradicionālās iekšdedzes dzinēja startēšanas sistēmas uzlabošanai ... 34
5. Modernizācijas iekārtas un energoelektronikas pārveidotāja izstrāde ar frekvenču pārveidotāju vadāmas elektriskās piedziņas energoefektivitātes uzlabošanai ... 36
5.1. Augstas veiktspējas neizolētā pārveidotāja izstrāde rekuperatīvās enerģijas uzkrāšanas lietojumam 36
5.1.1. Līdzstrāvas pārveidotāja topoloģijas un galveno elementu izvēle enerģijas uzkrājēja lietojumam ... 36
5.1.2. Pārveidotāja vadības algoritms ... 39
5.1.3. Pārveidotāja eksperimentālais prototips ... 42
5.1.4. Pārveidotāja testēšanas stenda izveide un eksperimentālie rezultāti ... 42
5.2. Izolēts vairāklīmeņu pārveidotājs ... 47
5.2.1. Topoloģijas izvēle ... 47
5.2.2. Vairāklīmeņu pārveidotāja spriegumu balansēšanas metode ... 48
5.2.3. Pārveidotāja eksperimentālais prototips ... 50
Secinājumi ... 52
Literatūra ... 54

Promocijas darba vispārējais raksturojums

Tēmas aktualitāte

Elektriskās piedziņas būtiski svarīgo lomu ikdienas dzīvē apliecina tas, ka mūsdienās vairāk nekā 70 % [1] no pasaulē patērētās elektroenerģijas tiek izmantoti kādā no elektriskās piedziņas veidiem ne tikai transportā vai industrijā, bet arī mājsaimniecībā un citās jomās. Joprojām daudzos piedziņas veidos tiek izmantoti neefektīvi risinājumi, piemēram, tikai aptuveni 5 % [2] no visām liftu piedziņām tiek lietotas tehnoloģijas, kas bremzēšanas enerģiju izmanto lietderīgi.

Transporta sektors ir atbildīgs par 30 % no visa enerģijas patēriņa Eiropas Savienībā [3], radot ne tikai CO_2, bet arī citu kaitīgu izmešu nokļūšanu apkārtējā vidē. Šo situāciju var mainīt elektroenerģijas plašāka izmantošana transportā, ņemot vērā arī to, ka arvien vairāk elektroenerģijas tiek saražots, izmantojot atjaunojamos energoresursus, galvenokārt – saules un vēja enerģiju. Pašreiz ar dažādu subsīdiju palīdzību, kā arī, ieguldot publiskos līdzekļus ar elektrisko auto saistītu tehnoloģiju izstrādē, tiek sekmēta ar iekšdedzes dzinējiem aprīkotu transportlīdzekļu aizstāšana ar tādiem, kas daļēji vai pilnībā izmanto elektrisko piedziņu. Tiek prognozēts, ka jau pirms 2020. gada elektrisko automobiļu izlaide sasniegs 100 000 vienību gadā [4].

Jau ilgāku laiku transportā plaši tiek izmantoti trolejbusi, tramvaji, elektriskie vilcieni, speciāla lietojuma lēngaitas elektriskie transportlīdzekļi. To barošana tiek nodrošināta, izmantojot kontakttīklu, litija-jonu vai svina-skābes baterijas. Elektrisko transportlīdzekļu veiktspēja un efektivitāte var tikt palielināta, ja kā papildu uzkrājējs tiek izmantots superkondensators, kura lietošana ļautu paildzināt baterijas kalpošanas laiku, efektīvāk izmantojot bremzēšanas enerģijas uzkrāšanu un palielinot efektivitāti pie pīķa jaudas. Superkondensatoru cenai ir tendence samazināties, tāpēc ir būtiski turpināt šādu uzkrājēju izmantošanu pētīt arī mazākas jaudas transportlīdzekļos un citos lietojumos.

Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir izstrādāt perspektīvas elektriskās piedziņas modernizācijas iekārtas ar superkondensatoru elektroenerģijas uzkrājējiem, pētot, uzlabojot un ieviešot tām paredzētos energoelektriskos pārveidotājus.

Mērķa sasniegšanai izvirzīti šādi uzdevumi:

- izstrādāt stendu reģeneratīvās bremzēšanas enerģijas uzkrāšanas iespēju pētīšanai elektriskajā piedziņā;
- izpētīt magnētiski saistīto magnētisko elementu lietošanas iespējas pārveidotājos;
- izstrādāt algoritmu vairākfāžu topoloģijas vadībai robežrežīmā;
- veikt iekšdedzes dzinēja startēšanas sistēmas uzlabošanas iespēju izpēti, izmantojot superkondensatorus;
- izpētīt uz superkondensatoriem bāzēta pārbūves komplekta izmantošanas iespējas lēngaitas elektriskajos transportlīdzekļos;
- izstrādāt energoelektronikas divvirziena līdzstrāvas pazeminoši–paaugstinošo pārveidotāju prototipus pārbūves komplekta ar superkondensatoriem izmantošanai elektriskās piedziņas sistēmās ar trīšfāžu frekvenču pārveidotāju.

Pētījumu metodes un līdzekļi

- Lai izstrādātu detalizētus modeļus elektriskā transporta un modernizācijas iekārtu vadības sistēmu pētīšanai, tika izmantots *Matlab*/*Simulink*.
- Pārveidotāju topoloģiju, vadības metožu pētīšanai tika izmantota datorprogramma *PSIM*.
- Lai iegūtu grafikus, izmantojot iegūtās analītiskās izteiksmes, lietota datorprogrammā *MS Excel*.
- Lai iegūtu pārveidotāju eksperimentālos rezultātus, tika izmantoti dažāda veida multimetri, osciloskopi,
- Mikrokontrollera programmas izveidei tika izmantots *IAR Embedded Workbench*, spiesto plašu dizaina izstrādei – *Altium Designer*, magnētiskā lauka modelēšanai – *FEMM*.
- eksperimentos tika izmantoti Rīgas Tehniskajā universitātes tehniskā bāze un iekārtas – barošanas avoti, jaudas analizātori, signālu ģeneratori u. c.

Zinātniskās novitātes

- Izstrādāta jauna vairāklīmeņu pārveidotāja spriegumu balansēšanas metode.
- Izveidota jauna vadības metode pārveidotāja darbam robežrežīmā, ļaujot samazināt droseļu izmērus.
- Izstrādāts algoritms nolašu veikšanai, kas ļauj mazināt elektromagnētisko traucējumu ietekmi uz mērījumiem.
- Rasts risinājums iekšdedzes dzinēja startēšanas procesu uzlabošanai, izmantojot superkondensatorus un vadāmu slēdzi.
- Izstrādāts uz superkondensatoriem bāzēts pārbūves komplekts ar neatkarīgu vadības sistēmu un jauni vadības algoritmi ar bateriju aprīkota lēngaitas transportlīdzekļa veiktspējas un energoefektivitātes uzlabošanai.
- Izpētīta magnētiski saistītu droseļu izmantošana strāvas pulsāciju mazināšanai un iegūtas analītiskas izteiksmes to aprēķinam.

Darba praktiskā nozīme

- Superkondensatoru pārbūves komplekts var tikt izmantots praktiskos lietojumos, palielinot transportlīdzekļa jaudu un efektivitāti.
- Iegūtās matemātiskās izteiksmes, kas apraksta strāvas pulsācijas magnētiski saistītās droselēs, var tikt izmantotas praktiskajos inženieraprēķinos.
- Modernizācijas komplekts ar superkondensatoriem, kas pieslēdzams pie trīsfāžu frekvenču pārveidotāja līdzstrāvas kopnes, var tikt izmantots elektriskās piedziņas energoefektivitātes palielināšanai un nepārtrauktas elektroapgādes nodrošināšanai.
- Piedāvātā balansēšanas metode var tikt izmantota gadījumos, ja nav iespējas realizēt sarežģītu algoritmu, kas kontrolē spriegumu, izmantojot digitālu vadību.
- Vadības metode pārveidotājam, kas darbojas pārtrauktās strāvas režīmā, var tikt izmantota praktiskos lietojumos, palielinot pārveidotāja jaudas blīvumu.

Aizstāvamās tēzes

1. Modernizācijas iekārta ar superkondensatoriem, kas ir uzstādāma vienkāršā veidā jau ekspluatācijā esošam elektriskajam transportlīdzeklim, kas aprīkots ar svina-skābes bateriju,

ļauj pagarināt akumulatora kalpošanas laiku un palielina vilces piedziņas sistēmas kopējo energoefektivitāti. Transportlīdzeklim paredzēto spēka elektronikas pārveidotāju izmēram jābūt pēc iespējas mazākam. Ar vienkāršas konstrukcijas magnētiski saistītām droselēm ir iespējams samazināt četru fāžu līdzsprieguma pārveidotāja pulsācijas vidēji par 20 %, palielinot pārveidotāja efektivitāti un samazinot tā izmērus.

2. Superkondensatoru izmantošana iekšdedzes dzinēja startēšanai, lietojot spēka elektronikas risinājumus, ļauj paildzināt svina-skābes baterijas kalpošanas laiku, samazināt nepieciešamo superkondensatora enerģijas ietilpību, samazināt sprieguma iekritumu startēšanas brīdī un startera motora strāvas pīķi, kā arī ļauj sekmīgi piestartēt dzinēju izlādēta akumulatora gadījumā.
3. Superkondensatora izmantošanai ir perspektīva liftu rekuperatīvās bremzēšanas enerģijas uzkrāšanai, speciāli pielāgotu pārveidotāju izmantošana ļauj optimāli izmantot uzkrājēja ietilpību un panākt papildu energoefektivitātes uzlabošanu un lifta piedziņas patērējamās pīķa jaudas samazinājumu. Šādā lietojumā svarīga ir pārveidotāja dinamiska reakcija uz pārejas procesiem. Daudzfāžu pārveidotāja topoloģija un darbība kritiskās strāvas vai pārtrauktās strāvas režīmā ļauj izveidot pārveidotāju ar īsu reakcijas laiku un maziem izmēriem. Lietojot speciālu vadības algoritmu, ir iespējams izveidot vairākfāžu pārveidotāju ar mazām ieejas un izejas strāvas pulsācijām bez strāvas sensora un vadības cilpas katrā no fāzēm.
4. Superkondensatoru spriegums ir zems, tāpēc daudzos lietojumos ir nepieciešam izolēta līdzsprieguma pārveidotāja izmantošana. Daudzlīmeņu topoloģijas izmantošana ļauj lietot lētākus tranzistorus ar labākiem parametriem un palielināt pārveidotāja efektivitāti, taču ir jārisina sprieguma balansēšana starp pārveidotāja pleciem. Spriegumu balansēšanu ir iespējams nodrošināt bez speciālas sarežģītas vadības sistēmas, ieviešot jaunus shematiskos risinājumus, kas spēj darboties neatkarīgi no pārveidotāja vadības sistēmas.

Darba aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti tika prezentēti šādās zinātniskās konferencēs:

- “14th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development”, Jelgava, Latvija, 20.–22. maijs, 2015.
- “15th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development”, Jelgava, Latvija, 23.–24. maijs, 2016.
- “57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)”, 13.–14. oktorbis, 2016.
- “IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)”, 25.–28. septembris, 2016.
- “18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE’16 ECCE Europe)”, 5.–9. septembris, 2016.
- “International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Europe 2016)”, 10.–12. maijs, 2016.
- “56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)”, 14. oktobris, 2015.

- “9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)”, 24.–26. jūnijs, 2015.
- “International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management”, 19.–20. maijs, 2015.

Autora publikācijas

- Kroičs, K., Zaķis, J. “Multiphase Interleaved DC-DC Converter with Directly and Inversely Coupled Inductors,” in Proceedings of 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2016), Latvia, Riga, 13–14 Oct., 2016. (SCOPUS).
- Kroičs, K., Zaķis, J., Suzdaļenko, A., Gaigals, G. A. “Simplified Approach to Input Voltage Balancing for Series Connected Isolated DC-DC Converters,” in Proceedings of 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE’16 ECCE Europe), Germany, Karlsruhe, 5–9 Sept., 2016. (SCOPUS).
- Kroičs, K., Sokolovs, A. “Interleaved DC-DC Converter with Discrete Duty Cycle and Open Loop Control,” Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2016, vol. 53, no. 4, pp. 14–21. (SCOPUS).
- Kroics, K., Sokolovs, A., Grigans, L., Sirmelis, U. “ISOP converter with simplified voltage balance control,” in Proceedings of International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Europe 2016), Germany, Nuremberg, 2016, pp. 1–8. (SCOPUS).
- Kroičs, K., Bražis, V. “Supercapacitor Based Storage System for Efficiency Improvement of Lead-Acid Powered Light Electric Vehicle,” in Proceedings of 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Bulgaria, Varna, 25–30 Sept., 2016. (SCOPUS).
- Kroičs, K., Bražis, V. “Ultracapacitor based storage system for lead-acid powered light electric vehicle retrofit,” in Proceedings of 15th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development, Latvia, Jelgava, 2016, pp. 1386–1394. (SCOPUS).
- Kroics, K. “Bi-directional two level 6-phase DC-DC converter for energy storage application,” in Proceedings of International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Europe 2015), Germany, Nuremberg, 2015, pp. 1–8. (SCOPUS).
- Kroics, K. “Simulation Based Analysis of Digitally Controlled 4-phase DC-DC Converter with Coupled Inductors,” in Proceedings of 9th International Conference Environment. Technology. Resources, Latvia, Rezekne, 2015, pp. 89–95. (SCOPUS).
- Kroičs, K., Bražis, V., Sirmelis, U. “Voltage Balance Control of Two-Level DC-DC Converter,” in Proceedings of 14th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, Latvia, Jelgava, 2015, pp. 402–407. (SCOPUS).
- Kroičs, K., Sirmelis, U., Grigāns, L., Bražis, V. “Digitally Controlled 4-Phase Interleaved DC-DC Converter with Coupled Inductors for Storage Application in Microgrid,” in Proceedings of 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE 2015), Portugal, Costa da Caparica, 2015, pp. 504–509. (SCOPUS).

- Kroičs, K. “System for Start of Internal Combustion Engine with Hybrid Battery-Supercapacitor Source,” in Proceedings of 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON2015), Latvia, Riga, 2015, pp. 259–263. (SCOPUS).
- Kroics, K., Sirmelis, U., Grigans, L. “Digitally Controlled 4-Phase Bi-Directional Interleaved DC-DC Converter with Coupled Inductors,” in Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, vol. 52, no. 4, 2015, pp. 18–31. (SCOPUS).
- Kroičs, K., Bražis, V. “Digitally Controlled Synchronous Buck-Boost Converter for Ultracapacitor Based Energy Storage Application,” in Proceedings of 13th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, vol. 13, Latvia, Jelgava, 2014, pp. 385–390. (SCOPUS).
- Kroics, K. “Ostas konteineru krānu efektivitātes uzlabošana ar superkondensatoru enerģijas uzkrājējiem,” in Proceedings of International Student Conference Human. Environment. Technology, 2014, pp. 88–96.
- Bražis, V., Kroičs, K., Grigāns, L. “Scientific Laboratory Platform for Testing the Electric Vehicle Equipped with DC Drive,” Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2014, vol. 51, no. 5, pp. 56–64. (SCOPUS).
- Kroičs, K., Sirmelis, U., Bražis, V. “Design of Coupled Inductor for Interleaved Boost Converter,” Przegląd Elektrotechniczny, 2014, no. 12, pp. 91–94. (SCOPUS).
- Kroičs, K., Sirmelis, U., Černovs, J. “DSP Based Bi-Directional Interleaved DC-DC Converter for Energy Storage Application,” in Proceedings of 12th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, vol. 12, Latvia, Jelgava, 2013, pp. 441–445. (SCOPUS).
- Kroičs, K. “Standby Power Reduction of Auxiliary Power Supply for Digitally Controlled SMPS,” in Proceedings of the 2nd Electronic International Interdisciplinary Conference (EIIC 2013), Slovakia, Zilina, 2013, pp. 396–401.
- Kroičs, K. “Digital Control of Variable Frequency Interleaved DC-DC Converter,” in Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference Environment. Technology. Resources., Latvia, Rezekne, 2013, pp. 124–129. (SCOPUS).
- Kroičs, K., Bražis, V. “A Digitally Controlled Test Bench for DC Electrical Drives”, in Proceedings in Multidisciplinary Conference QUAESTI, Slovakia, Zilina, 2013, pp. 166–170.

Ievads

Uz superkondensatoriem balstīta papildu enerģijas uzkrājēja integrēšana elektriskās piedziņas sistēmā palīdz ne tikai uzkrāt bremzēšanas enerģiju piedziņas sistēmās, kur tas ir iespējams, bet arī risināt tādus svarīgus jautājumus kā īslaicīgu piedziņas sistēmas nodrošināšanu ar enerģiju primārā barošanas avota atslēguma gadījumā, kā arī sprieguma iekrituma gadījumā – šāds neparedzēts primārā enerģijas avota atteikums jaudīgās atbildīgās piedziņas sistēmās var radīt zudumus, kas pārsniedz pat miljonu dolāru [5], tāpat ir iespējama strāvas harmoniku mazināšana, līdzstrāvas kopnes sprieguma stabilizēšanu un strāvas pīķa vērtības mazināšana.

Elektriskās piedziņas kalpošanas laiks var sasniegt vairākus desmitus gadus [6], tāpēc ekspluatācijā joprojām ir liels skaits piedziņas sistēmu, kas apmierinoši veic tām paredzēto uzdevumu, bet ir vai nu energoneefektīvas, vai nu to barošanai izmantotais enerģijas uzkrājējs ar laiku nolietojas un nenodrošina nepieciešamos parametrus. Šādu piedziņas sistēmu nomaiņa uz jaunām reizēm prasa lielus kapitālieguldījumus, kas atmaksājas ilgstošā periodā, un šis periods var būt ilgāks par piedzenamā mehānisma kalpošanas laiku. Cita pieeja ir ekspluatācijā esošas elektriskās piedziņas daļēja modernizācija, nomainot kādu mezglu uz jaunu vai papildinot sistēmu ar modernizācijas iekārtu. Šajā darbā pētītas un izstrādātas elektriskās piedziņas modernizācijas iekārtas ar superkondensatoriem, kas ļauj uzlabot ne tikai piedziņas sistēmas energoefektivitāti, bet arī paildzināt akumulatoru baterijas kalpošanas laiku, palielināt piedziņas sistēmas pīķa jaudu un nodrošināt enerģijas nepārtrauktu apgādi tīkla atslēguma gadījumā.

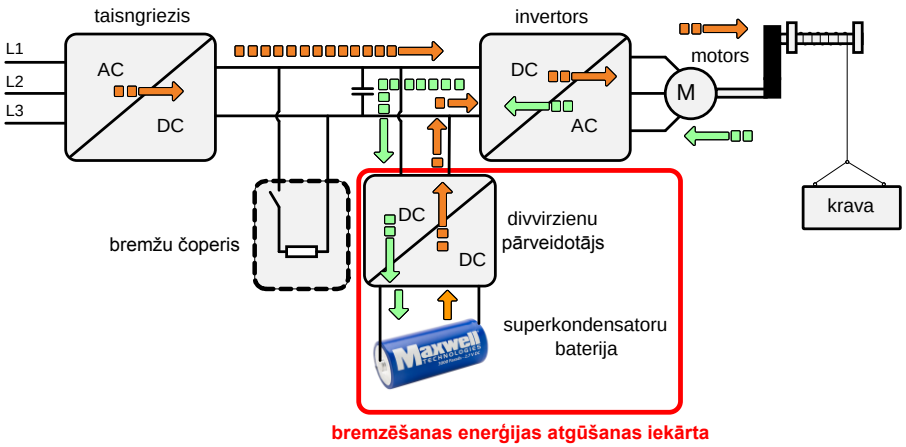
Lai nodrošinātu elektriskās piedziņas, kas aprīkota ar modernizācijas iekārtu, lielāku izmantošanas elastīgumu un efektivitāti, enerģijas uzkrājējs nevar tikt pieslēgts tieši pie līdzstrāvas kopnes, bet ir nepieciešams spēka elektronikas pārveidotājs. Ar pārveidotāja palīdzību ir iespējams nodrošināt dažādus vadības algoritmus atkarībā no konkrētā lietojuma – var tikt regulēts līdzstrāvas kopnes spriegums, enerģijas uzkrājēja izlādes/uzlādes līmenis, mazināta pīķa jauda, kā arī daudzi citi parametri. Pēdējo 30 gadu laikā par energoelektronikas pārveidotāju optimizāciju un uzlabošanu ir veikti daudzi tūkstoši pētījumu, taču joprojām tiek publicēti aizvien jaunas pārveidotāja topoloģijas un uzlabojumi. Lai uzbūvētu pārveidotāju ar vislielāko jaudas blīvumu, efektivitāti un pietiekami lēti, ir nepieciešama sadarbība starp industriju un pētniecības iestādēm, kā arī lieli cilvēku un finanšu resursu ieguldījumi. Tomēr bieži ir nepieciešams pārveidotājs, kas labi pilda kādu specifisku funkciju, bet tas, ka kāds no parametriem nedaudz atpaliek no labākajiem piemēriem, daudz nemazina tā lietošanas lietderību.

Šajā darbā pētītas pārveidotāja uzlabošanas iespējas, izmantojot jaunākos zinātniskos risinājumus – integrētus magnētiskos elementus, vairākfāžu topoloģiju, vairāklīmeņu topoloģiju, pārtrauktās strāvas režīmu, izmantojot tos prototipos, kuru izstrādē un iespējamā tālākā mazsēriju ražošanā nav nepieciešami specifiski pasīvie komponenti, augsta integrācijas pakāpe, specifiska lietojuma integrētās shēmas (*ASIC*) un cita veida lielas investīcijas. Izstrādāti arī pārveidotāju vadības algoritmi, kas speciāli pielāgoti modernizācijas iekārtai ar superkondensatoriem.

1. Enerģijas uzkrājēja izmantošana elektriskajā piedziņā

Asinhronie vai sinhronie motori ar pastāvīgajiem magnētiem, kas aprīkoti ar frekvenču pārveidotāju, ir visplašāk izmantotā elektriskā piedziņa risinājumos, kuros ir iespējama reģeneratīvā bremzēšana. Ja motors tiek griezts ātrāk par sinhrono ātrumu, tas var tikt izmantots kā elektriskā bremze, lai bremzētu dažādus mehānismus, kur tas ir nepieciešams. Elektriskā piedziņa plaši tiek izmantota kravas celšanas mehānismos – kravu un pasažieru liftos, rūpnīcās smagsvara kravu pārvietošanai un arī kravu loģistikā, visos šajos lietojumos joprojām tikai nelielai daļai no piedziņas ir uzstādīts reģeneratīvais taisngriezis vai kāds cits risinājums bremzēšanas enerģijas lietderīgai izmantošanai.

Šajā promocijas darbā tiks attīstīts risinājums, kas redzams 1.1. attēlā, tas balstās uz superkondensatoru uzkrājēju un divvirzienu līdzstrāvas pārveidotāju, kas regulē enerģijas plūsmu. Enerģijas plūsmas vadību nodrošina pārveidotājs, tāpēc galvenie pētījumi saistīsies ar pārveidotāja uzlabošanu un vadības algoritmu izstrādi, lai uz superkondensatoriem balstīta modernizācijas iekārta būtu vienkārši pieslēdzama ar diviem vadiem un lietotājam ērtā veidā. Būtiska šādas iekārtas priekšrocība ir tā, ka tā var nodrošināt barošanu primārā barošanas avota atslēguma gadījumā. Lai izvēlētos šādas iekārtas uzstādīšanu, ir svarīgi, cik ilgā laikā tā sevi atpelnīs. Aprakstot konkrētu piemēru, tiks atspoguļots tas, cik daudz enerģijas tiek zaudēts bremžu rezistoros ostas konteineru celtnim.



1.1. att. Elektriskā krāna enerģijas uzkrājējsistēmas struktūrshēma.

Kā piemērs tiks apskatīti celtņi konteineru pārkraušanai, jo konteinerkravas sastāda lielāko daļu no pārkrautajām ģenerālkravām. Rīgas brīvostas kravu apgrozījuma 2012. gada statistikā [7] ir redzams, ka pārkrauto konteinerkravu skaits ir 362 297, bet pārkrauto konteinerkravu masa – 3632 tūkstoši tonnu. Aprēķinos tiks ņemti vērā arī standarta konteinera izmēri. Lielākā daļa no konteineru kravām Latvijā tiek pārkrauta SIA "Baltijas konteineru termināls", tāpēc šis termināls tiks apskatīts aprēķinos. Tā rīcībā ir trīs krāni, kas izkrauj konteinerus no kravas kuģa krastā un otrādi (turpmāk – STS krāns). STS krāni konteineru var pacelt 32 m augstumā no zemes, horizontālās kustības garums ir 36 m.

Summējot katra konteinera pacelšanai patērēto enerģiju, tika noteikts, ka abi krāni 2000 konteineru pārkraušanai kopā patērē E_{tot} = 797 kWh. Pieņemot, ka gada laikā tiek apstrādāti 290 000 konteineru, var aprēķināt, ka nepieciešamais enerģijas daudzums ir 115 MWh. Lai novērtētu enerģijas uzkrājēju uzstādīšanas potenciālu, celtņa K1 1000 konteineru jaudas diagramma

tika izmantota kā ieejas dati ar modernizācijas iekārtu aprīkota celtņa simulēšanai *Matlab* vidē. Uzstādot EAS ar 300 superkondesatoriem, ir iespējams enerģijas patēriņu samazināt par vairāk nekā 40. Arī citos pētījumos [8]–[10] ir analizēta iespēja uzlabot krānu efektivitāti, uzkrājot bremzēšanas enerģiju. Iegūtie rezultāti ir līdzīgi, tāpēc var secināt, ka ir iespējams samērā vienkārši novērtēt iespējamo ieguvumu no enerģijas uzkrāšanas sistēmas uzstādīšanas, ja ir pieejama informācija par ceļamo kravu masu, augstumu, celšanas biežumu, un citiem rādītājiem. Rezultāti parāda, ka iekārtas atpelnīšanās periods ir aptuveni pieci gadi.

2. Enerģijas rekuperatīvās bremzēšanas stenda izveide un modernizācijas iekārtu pētīšana transportā

Aizvien aktīvāk tiek meklēti risinājumi, kas spētu mazināt CO_2 izmešu daudzumu un mazinātu piesārņojumu pilsētās. Šīs problēmas būtisks risinājums ir plašāka elektriskā transporta izmantošana, tādā veidā panākot arī enerģijas ietaupījumu, īpaši satiksmes sastrēgumstundās. Enerģijas ietaupījumu var palielināt, ja tiek izmantoti elektriskie transportlīdzekļi, kas efektīvāk izmanto reģeneratīvās bremzēšanas enerģiju. Izvēlētajam jaudas plūsmas vadības algoritmam ir liela ietekme uz enerģijas uzkrāšanas sistēmas efektivitāti [11], [12]. Pirms vadības metožu pētīšanas reālos apstākļos ir nepieciešama to teorētiska izstrāde, pārbaude simulācijas programmās, kā arī vēlama pārbaude uz eksperimentālā stenda. Zinātniskajiem pētījumiem testi reālos apstākļos izmaksā dārgi, tāpēc tika izstrādāts laboratorijas stends, kas emulē transportlīdzekļa enerģētiskos procesus ne tikai vilces režīmā, bet arī reģeneratīvās bremzēšanas režīmā.

2.1. Reģeneratīvās bremzēšanas laboratorijas stenda izstrāde

Transportlīdzeklim kustoties, uz to iedarbojas šādi spēki (2.1. att.):

- gravitācijas spēks, kas izsauc virsmas reakcijas spēku R, šis spēks, nosaka transportlīdzekļa rites pretestību F_R;
- aerodinamiskā pretestība F_A;
- dzinējspēks F_D.

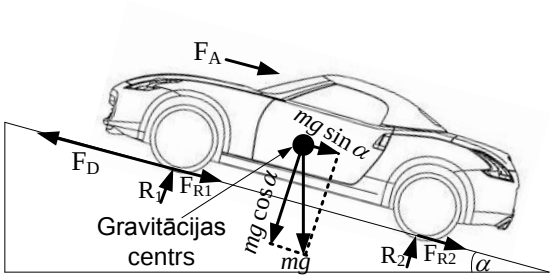
Lai iegūtu izteiksmes, kas apraksta transportlīdzekļa kustību, tika izmantots vienkāršots dinamiskais modelis, kas sīkāk aprakstīts [13]. Modelis ir balstīts pieņēmumā, ka transportlīdzekļa masa m un ekvivalentais inerces moments J_{eq}, kas apraksta piedzenošos riteņus un visas rotējošās daļas, kas ir kinemātiski pievienotas pie riteņiem. Ir iespējams iegūt sekojošu izteiksmi [14]:

$$a = \frac{F_D - (F_R + F_A) - F_G}{m}. \tag{2.1.}$$

Nezināmās konstantes C_0, C_1, C_2 var tikt noteiktas, izmantojot eksperimentālās metodes vai datorprogrammas. Viena no vienkāršākajām metodēm šo koeficientu noteikšanai ir izripināšanas tests, kas sastāv no transportlīdzekļa paātrināšanas līdz noteiktam ātrumam, un tad, ieslēdzot neitrālo pārnesumu, tas tiek izripināts, līdz apstājas. Vienlaikus ir jāveic ātruma un nobrauktās distances reģistrēšana. Sīkāk testa būtība ir aprakstīta [15], lai iegūtu precīzākus kinemātiskos datus testa laikā, var izmantot akselometru, laika un distances reģistratoru, vai arī GPS sistēmu.

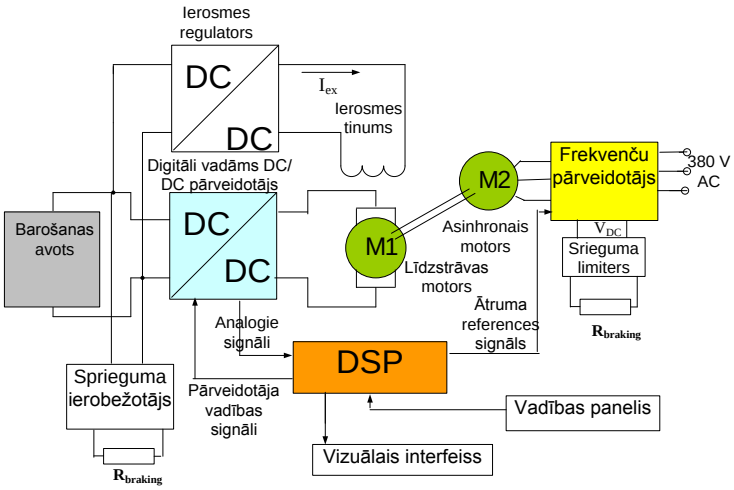
Pēc koeficientu iegūšanas var tikt aprēķināts pretestības moments:

$$M_R = F_R r_w = -mar_w = mr_w(C_0 + C_1 v + C_2 v^2). \tag{2.2.}$$



2.1. att. Spēki, kas darbojas uz transportlīdzekli tā kustības laikā.

2.2. att. ir redzama stenda struktūrshēma. Stends ir aprīkots ar līdzstrāvas dzinēju, kas emulē elektriska transporta vilces dzinēju, kas tiek mehāniski savienots ar maiņstrāvas asinhrono dzinēju, kas emulē vilces piedziņas slodzi. Asinhronais dzinējs tiek vadīts, izmantojot frekvences pārveidotāju ar vektoru vadības sistēmu. Invertors tiek pieslēgts trīsfāžu maiņsprieguma tīklam 380 V / 50 Hz. Maiņstrāvas piedziņa darbojas bremzēšanas režīmā un slogo transportlīdzekļa piedziņas līdzstrāvas dzinēju, kas tai režīmā darbojas dzinēja režīmā.



2.2. att. Stenda reģeneratīvās bremzēšanas enerģijas pētīšanai struktūrshēma.

Tālāk tiks apskatīta teorija, kas apraksta stenda reģeneratīvās bremzēšanas pētīšanai darbības principus, kas apskatīti [16]. Līdzstrāvas motora momentu pie nominālās ierosmes strāvas var aprēķināt šādi [17]:

$$M_{\mathrm{DC}} = C_{\mathrm{M}} \Phi I_{\mathrm{DC}}, \tag{2.3.}$$

kur C_{M} ir konstante, ko nosaka motora konstruktīvie parametri.

Slodzes simulatora vadības sistēmas uzdevums ir regulēt frekvenču pārveidotāju tādā veidā, ka maiņstrāvas motors uzvedas kā rotējošs objekts ar lielu inerces momentu J_{eq} un ekvivalentu mehāniskās slodzes momentu M_{eq}. Vēlamo mehāniskās sistēmas uzvedību var aprakstīt ar izteiksmi:

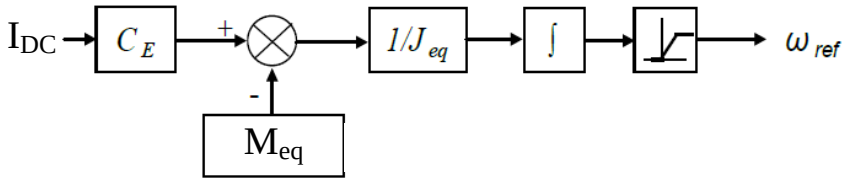
$$J_{\mathrm{eq}} \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = C_{\mathrm{M}} \Phi I_{\mathrm{DC}} - M_{\mathrm{eq}}, \tag{2.4.}$$

kur I_{DC} ir *DC* motora strāva.

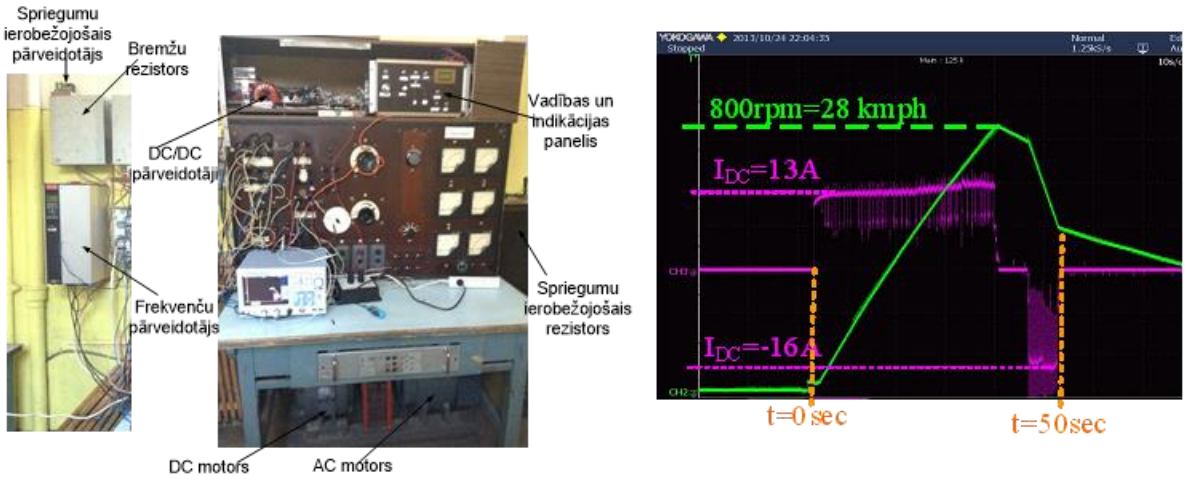
Integrējot 2.4. izteiksmi, var iegūt references ātruma signālu, kas jāuztur frekvences pārveidotājam, kas nosaka asinhronā dzinēja rotācijas ātrumu:

$$\omega = \frac{1}{J_{\mathrm{eq}}} \int (C_{\mathrm{E}} I_{\mathrm{DC}} - M_{\mathrm{eq}}) \mathrm{d}t. \qquad (2.5.)$$

Pēc 2.5. izteiksmes var tikt uzbūvēta slodzes emulatora vadība, kas parādīta 2.3. attēlā Ja *DC* piedziņas strāva ir lielāka par nulli, tad mehāniskā sistēma paātrinās, ja $I_{\mathrm{DC}} < 0$ A, tad ω_{ref} vērtība samazinās, un sistēma samazina ātrumu tādā veidā, ka tā imitē inerciālu slodzi, kas no enerģētisko procesu viedokļa ir tāda pat kā reālā reģeneratīvās bremzēšanas procesā. Integratoru papildina ierobežotāja bloks, kas ierobežo rotācijas ātrumu līdz $\omega_{\mathrm{ref.max}}$ un neļauj signālam kļūt negatīvam, lai nepieļautu rotāciju pretējā virzienā. Savukārt, līdzstrāvas mašīnai darbojoties kā ģeneratoram bremzēšanas režīmā, asinhronais motors tiek griezts tā, lai tas imitētu transporta līdzekļa inerci. Sīkāks stenda apraksts ir pieejams [18], [19].



2.3. att. Slodzes emulatora vadības princips.



2.4. att. Testa laboratorijas stends un eksperimentālās līknes.

2.4. attēlā ir redzama laboratorijas stenda praktiskā realizācija. Frekvenču pārveidotājs ir pieslēgts 380 V / 50 Hz tīklam. Laikā, kad līdzstrāvas motors darbojas motora režīmā, asinhronais motors darbojas kā slodze, kas imitē reālās vides pretestību, kas iedarbojas uz transportlīdzekli, enerģija tiek izkliedēta frekvenču pārveidotāja bremžu rezistorā. Līdzstrāvas motora jauda ir $P_{\mathrm{nom}} = 3{,}7$ kW, $R_{\mathrm{a}} = 0{,}46\ \Omega$ ir tinuma aktīvā pretestība, $n_{\mathrm{nom}} = 1370$ rpm ir nominālie motora apgriezieni.

Asinhronā motora nominālie apgriezieni ir vienādi ar 1450 apgr./min, nominālā jauda ir 4 kW. Maiņstrāvas motora vadīšanai tiek izmantots *Danfoss FC300* frekvenču pārveidotājs. Ierosmes regulators ir izveidots, izmantojot tipveida impulsu platuma modulācijas shēmu, kas regulē ierosmes strāvu un uztur to vienādu ar nominālo strāvu (1 A). Līdzstrāvas motora divvirzienu *DC-DC* pārveidotāja vadībai, kā arī slodzes emulatora vadībai tika izmantots *STM32F407VGT6*

mikrokontrollers. Signālu mērīšanai tika izmantots *YOKOGAWA* digitālais osciloskops. Pogas, potenciometri, diodes un *LCD* displejs nodrošina lietotāja saskarni.

Izveidoto stendu var izmantot elektrisko transportlīdzekļu, kā arī cita veida inerciālu slodžu pētīšanai. Stends ir aprīkots ar līdzstrāvas motoru, šāda tipa motori tiek izmantoti aizvien mazāk, tomēr no enerģētisko procesu viedokļa nav lielas atšķirības, kādu elektrisko mašīnu izmanto, tāpēc iespējams pētīt enerģijas uzkrājēju, kas piemērots dažāda tipa un lietojuma elektriskajai piedziņai, bet līdzstrāvas piedziņas procesu pētīšanai stends ir piemērotāks. Sakarā ar zemgrīdas tramvaju un tiem atbilstošas infrastruktūras dārdzību joprojām ekspluatācijā ir samērā daudz tramvaju, kuru piedziņai tiek izmantoti līdzstrāvas dzinēji, tāpēc kā piemērs tika apskatīts šāda tramvaja mērogots ekvivalents. 2.4. attēlā ir parādīti tramvaja mērogota modeļa emulēšanas uz stenda rezultāti.

2.2. Superkondensatoru uzkrājēja pārbūves komplekta izpēte un izstrāde lēngaitas elektriskajam transportam

Lēngaitas elektriskie transportlīdzekļi (LETL) ir laba alternatīva ar iekšdedzes dzinēju darbināmiem transportlīdzekļiem [20], jo tie nepiesārņo gaisu, ir klusi, viegli vadāmi, ilgmūžīgi un pietiekami jaudīgi. Šādi elektriskie transportlīdzekļi mūsdienās tiek izmantoti aizvien plašāk: lauksaimniecības jomā, tūrisma industrijā, noliktavās, atkritumu apsaimniekošanā, preču piegādē un daudzās citās. Līdzstrāvas motori joprojām tiek izmantoti LETL piedziņas sistēmā, īpaši mazākas jaudas diapazonā. Šāda veida motori nodrošina vienkāršu un lētu elektrisko piedziņu zemu izmaksu LETL. Cita līdzstrāvas motora priekšrocība ir vienkārša ātruma un momenta kontrole, ko var nodrošināt ar vienkāršu līdzstrāvas impulspārveidotāju [21]. Protams, līdzstrāvas pārveidotājiem ir vairāki trūkumi, no kuriem būtiskākie ir zemāka efektivitāte un augstākas apkalpošanas izmaksas, tāpēc līdzstrāvas motoru izmantošana arī šai lietojumā aizvien samazinās, taču no enerģētisko procesu viedokļa cita veida motori īpaši neatšķirsies, tāpēc šo procesu pētīšanai piemērots ir jau iepriekš aprakstītais inerciālas slodzes emulators.

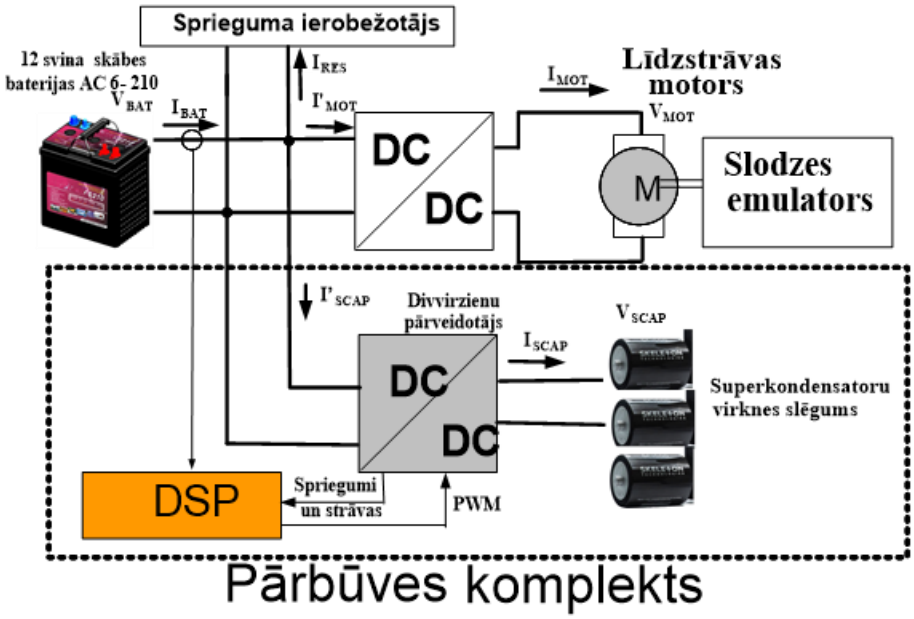
LETL veiktspējas/cenas attiecību galvenokārt nosaka akumulatoru baterija [22], jo tai ir augsta cena, nepieciešama apkope, kā arī ierobežots kalpošanas laiks. Lai panāktu LETL zemu cenu, mazjaudas transportlīdzekļiem svina-skābes baterija ir faktiski vienīgā izvēle, taču šādas baterijas kalpošanas laiks ir ievērojami īsāks nekā litija-jonu baterijai, to ietekmē bieži patērējamās strāvas pīķi. Tipisks nepieciešamās jaudas profils mazas jaudas LETL ir tuvs pilsētas braukšanas ciklam, tam raksturīga bieža paātrināšanās un bremzēšana, kas samazina svina-skābes baterijas kalpošanas laiku, it īpaši, ja baterija ir gandrīz izlādēta [23].

Vairākums ar svina-skābes baterijām darbināmu LETL kā enerģijas avotu izmanto svina-skābes bateriju ar tipisko nominālo spriegumu 6 V vai 12 V virknes slēgumu, iegūstot kopējo vilces baterijas spriegumu vienādu ar 36 V, 48 V vai 72 V. Kā piemērs tālāk tiks apskatīts LETL pasažieru pārvadāšanai, tā akumulatoru bateriju virknes slēguma spriegums ir vienāds ar 72 V, transportlīdzekļa masa ir 1300 kg, pārnesuma skaitlis k_{red} = 8 un riteņa diametrs ir D_{wheel} = 0,63 m, maksimālais paātrinājums ir 2 m/s^2. Tā piedziņai tiek izmantots līdzstrāvas motors ar pastāvīgo magnētu ierosmi. Motora sprieguma konstante ir 0,1 V/apgr., momenta konstante ir vienāda ar 0,2, nominālie apgriezieni – 3000 apgr./min.

Transportlīdzeklim bremzējot, tiek ģenerēti īslaicīgi lielas jaudas pīķi, ko nav iespējams uzkrāt svina-skābes baterijā, jo to ir iespējams lādēt tikai ar ierobežotu strāvu, kas ir daudz mazāka par pieļaujamo izlādes strāvu. Šādas īslaicīgas, bet lielas jaudas uzkrāšanai ideāli piemērots ir

superkondensatoru uzkrājējs, kam ir maza virknes pretestība un liels uzlāžu/izlāžu ciklu skaits un liela jaudas spēja.

Pētījums, kas tiks aprakstīts tālāk, balstās uz pārbūves komplekta pieeju [24], tas ir, superkondensatoru uzkrājēju sistēma var tikt pievienota jau ekspluatācijā esošam LETL (ņemot vērā spriegumus un nepieciešamo jaudu), pieslēdzot to, izmantojot divus spēka vadus pie līdzstrāvas kopnes un uzmontējot līdzstrāvas strāvas sensoru uz baterijas vada tādā veidā, lai nebūtu nepieciešama esošās piedziņas sistēmas modificēšana vai pārprogrammēšana. Šāda papildu aprīkojuma uzstādīšana paildzinātu svina-skābes baterijas kalpošanas laiku, paaugstinātu efektivitāti un tiktu uzkrāta un lietderīgi izmantota reģeneratīvā bremzēšanas enerģija.

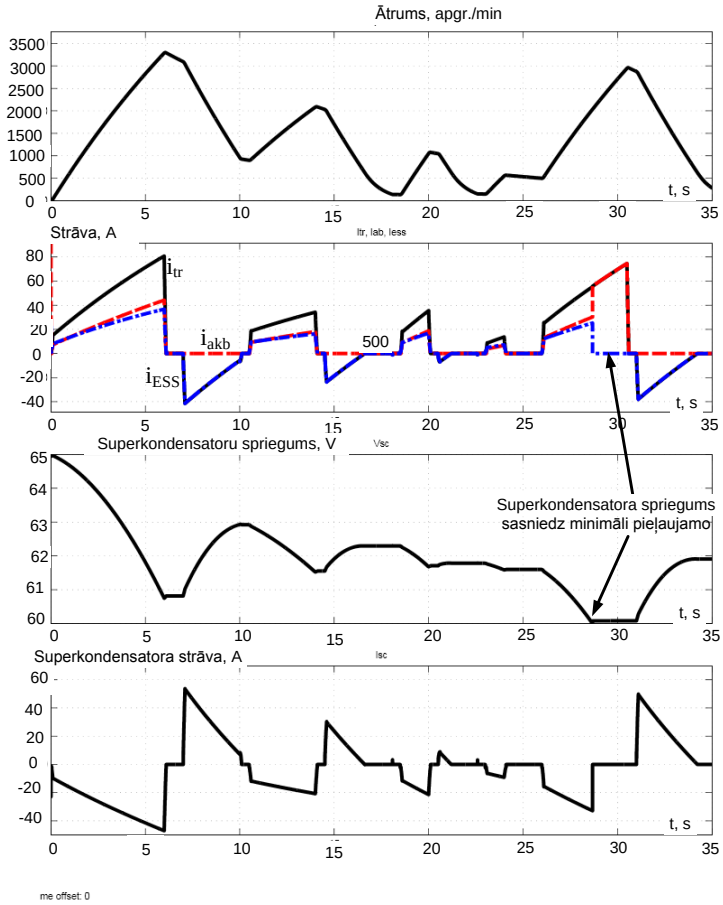


2.5. att. Ar pārbūves komplektu aprīkota LETL struktūrshēma [25].

LETL, kas aprīkots ar uz superkondensatoriem bāzētu enerģijas uzkrājēja pārbūves komplektu, struktūrshēma ir redzama 2.5. attēlā. Transportlīdzekļa primārais barošanas avots ir 12 svina-skābes akumulatori, kas saslēgti virknes slēgumā, kopā veidojot ietilpību 210 Ah, reģeneratīvās bremzēšanas jaudas uzkrāšanai tiks izmantots 33 *Skelcap* superkondensatori *SC1500* ar kapacitāti 1500 F, iekšējo virknes pretestību 0,079 mΩ un divvirzienu līdzsprieguma pārveidotājs, kas savieno enerģijas uzkrājēju ar līdzstrāvas kopni.

Iepriekš aprakstītā sistēma vispirms tiks pētīta, izmantojot datorsimulācijas *Matlab* vidē. Līdzīga stenda datorsimulācijas tramvaja sistēmai ir pētītas jau iepriekš un sīkāk aprakstītas [26], [27], iepriekšējais modelis tika piemērots LETL ar barošanu no svina-skābes baterijas. Veikt datorsimulācijas ir nepieciešams, lai varētu pārbaudīt vadības algoritmus un veiktu sistēmas ar uzkrājēju optimizēšanu atbilstoši pētāmajam transportlīdzeklim.

Kā izvēlētais ātruma profils tika izmantots pilsētas dinamometriskais braukšanas cikls (*Urban Dynamometer Driving Cycle – UDDS*). Tālāk grafikos uzskatāmības dēļ redzama tikai tā daļa, kurā ir biežāki paātrinājumu un bremzēšanas cikli. *UDDS* ļauj testēt transportlīdzekli sarežģītos pilsētas braukšanas apstākļos, kas ļauj analizēt transportlīdzekļa enerģētiskos parametrus un salīdzināt tos, mainot vadības sistēmas parametrus.



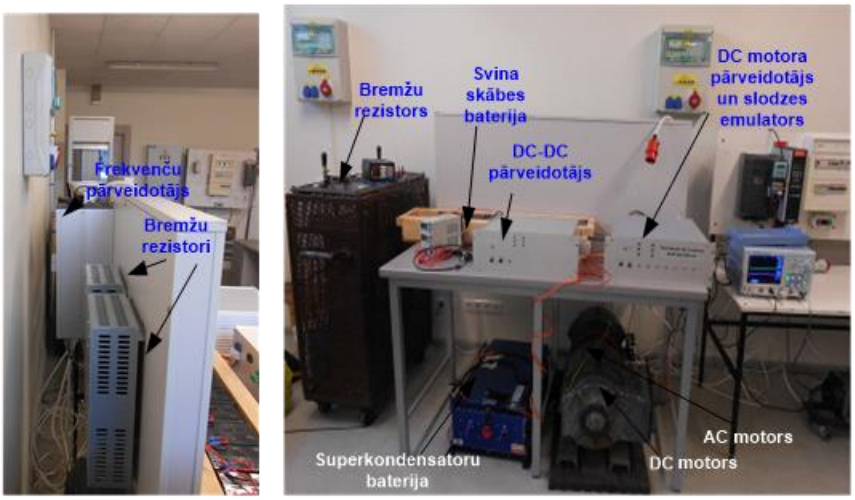
2.6. att. Strāvas un spriegumi, izmantojot proporcionālo vadības metodi.

Transportlīdzeklim paātrinoties, vilces dzinējam nepieciešamā jauda tiek ņemta no superkondensatora baterijas un svina-skābes baterijas. Bremzēšanas ciklā enerģija no vilces motora, kas darbojas ģeneratora režīmā, tiek primāri uzkrāta superkondensatoros un nedaudz arī akumulatoru baterijā. Ja superkondensatoru uzkrājējs ir pilnībā uzlādēts, enerģija bremžu rezistorā tiek izkliedēta nelietderīgi. Lai tiktu uzkrāta pēc iespējas lielāka daļa no šīs reģeneratīvās bremzēšanas enerģijas un būtu mazāki zudumi baterijas iekšējā pretestībā, ir nepieciešams realizēt tādu uzkrājēja vadības stratēģiju, kas nodrošina minētās prasības.

Apskatīto svina-skābes akumulatoru virknes slēguma iekšējā pretestība ir 20 mΩ, savukārt superkondensatoru uzkrājējam tikai 2,6 mΩ. Tas nozīmē, ka efektivitāte var tikt uzlabota, ja maksimāli liela jauda tiek ņemta no superkondensatoriem visu paātrināšanās laiku. Viena no vienkāršākajām metodēm ir proporcionālā vadības stratēģija, kurā jauda (tuvināti var pieņemt arī, ka strāva), kas tiek ņemta no superkondensatoriem, ir proporcionāla jaudai, kas tiek ņemta no svina-skābes baterijas. Šīs vadības metodes priekšrocība ir tāda, ka tiek samazināti zudumi. Liels proporcionalitātes koeficients izraisa ātru superkondensatora uzkrājēja izlādi, tāpēc ir iespējams, tāpat kā iepriekš, izmantojot superkondensatora spriegumu, piekoriģēt proporcionalitātes koeficientu, lai nodrošinātu pēc iespējas lielāku jaudas plūsmu no superkondensatoriem, bet tajā pašā laikā nepieļautu to pilnīgu izlādi, jo tad pīķa strāva tiks ņemta no baterijas, palielinot zudumus un saīsinot kalpošanas laiku.

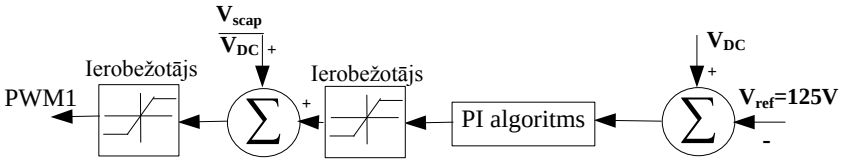
2.6. attēlā ir redzami LETL ar uzkrājēja pārbūves komplektu simulācijas rezultāti, izmantojot proporcionālo vadības metodi. Šeit parādīts fragments, kurā vienā brīdī superkondensatoru uzkrājējs

tiek izlādēts un pīķa strāva ir jāuzņem baterijai. Protams, gadījumā, ja paātrinājums ir ļoti ilgs, piemēram, braucot kalnā, nebūs iespējams nodrošināt enerģiju no superkondensatoriem. Tāpēc labāk izvēlēties proporcionalitātes koeficientu ar nelielu rezervi, lai nodrošinātu to, ka vienmēr tiek izmantoti abi enerģijas avoti. Lai varētu realizēt šo algoritmu, ir nepieciešams izmērīt divus spriegumus un divas strāvas: līdzsprieguma kopnes spriegumu V_{DC}, superkondensatora uzkrājēja spriegumu V_{SCAP}, superkondensatora strāvu un baterijas strāvu I_{BAT}. Trīs no signāliem ir pieejami pārbūves komplekta iekšienē, tikai baterijas strāvas mērīšanai ir nepieciešams uzstādīt papildu strāvas sensoru, taču to ir viegli izdarīt, ja mērīšanai tiek izmantots Holla efekta strāvas sensors, ko var uzlikt uz vada. Šajā gadījumā baterijas strāvas *RMS* vērtība ir vienāda ar 13 A, bet no superkondensatora uzkrājēja – 22,3 A. Līdzīga procentuālā attiecība saglabājas, arī simulējot garākus kustības grafikus. No tā var secināt, ka proporcionālā vadības stratēģija ļauj samazināt zudumus, jo superkondensatoru virknes slēgumam ir ievērojami mazāka virknes pretestība.



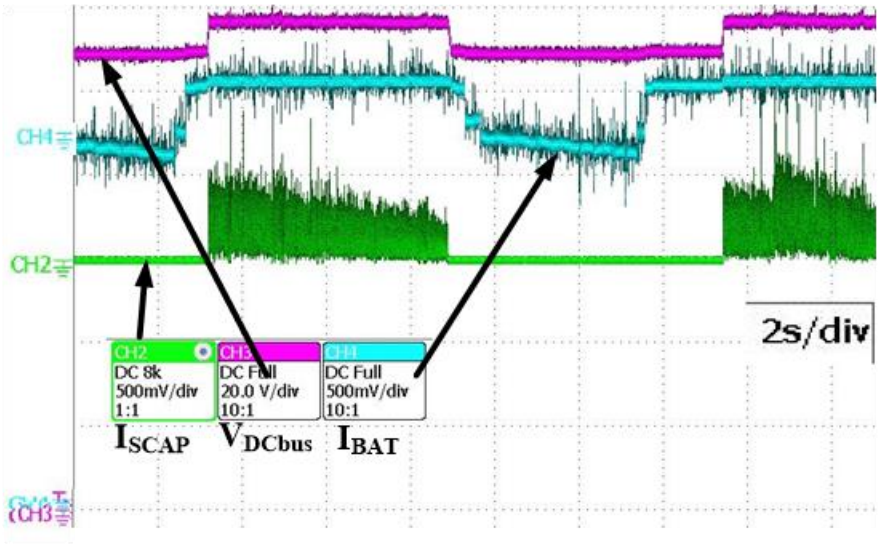
2.7. att. Laboratorijas stends uzkrājēja sistēmas pārbūves komplekta testēšanai.

Lai pārbaudītu superkondensatora uzkrājēja pārbūves komplekta realizācijas iespēju, iespējamās problēmas un uzlabojumus, tas tika pētīts izveidotajā laboratorijas stendā. 2.7. attēlā ir redzama stenda praktiskā realizācija. Frekvenču pārveidotājs tiek barots no 400 V, 50 Hz tīkla. Ja līdzstrāvas motors darbojas vilces režīmā, tad maiņstrāvas motors darbojas ģeneratora režīmā un izkliedē bremzēšanas enerģiju bremžu rezistoros. Bremzēšanas režīmā *AC* motors darbojas motora režīmā, un tikai enerģijas uzkrājējā neuzkrātā enerģija tiek izkliedēta caur sprieguma ierobežotāju pieslēgtajā rezistorā. Oscilogrammu iegūšanai tika izmantots *YOKOGAWA DLM6054* digitālais osciloskops. 2.7. attēlā ir redzama līdzsprieguma pārveidotāja praktiskā realizācija, *STM32F407VGT6* mikrokontrollers tika lietots, lai vadītu līdzsprieguma pārveidotāju. Uzkrājēja pārveidotāja uzbūve un shēma ir ļoti līdzīga motora pārveidotājam, kas aprakstīts iepriekš.

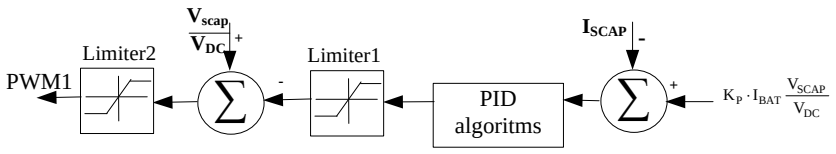


2.8. att. Pārveidotāja vadības blokshēma pazeminošajā režīmā (superkondensatoru uzlāde).

Bremzēšanas režīmā līdzsprieguma pārveidotāja vadības algoritmam ir jānodrošina, lai visa bremzēšanas enerģija tiek uzkrāta superkondensatoru uzkrājējā, jo citādi tā tiks nelietderīgi iztērēta bremžu rezistorā. Šim nolūkam tiek izmantots vadības princips, kas paskaidrots 2.8. attēlā. Šai režīmā pārveidotājs regulē līdzstrāvas kopnes spriegumu tā, lai tas nepārsniegtu iestatīto vērtību, šai gadījumā tie ir 120 V, kas ir zemāki par bremžu impulsregulatora darbības slieksni – 130 V. Enerģiju gan ir iespējams uzkrāt tikai tādā gadījumā, ja superkondensatori nav uzlādēti pilnībā. Ja pazeminoši–paaugstinošā pārveidotāja aizpildījums ir vienāds ar dalījumu V_{scap}/V_{DC}, tad jauda neplūst ne vienā, ne otrā virzienā. Lai pārveidotājs darbotos pazeminošajā režīmā un uzlādētu kondensatoru, aizpildījumam jābūt lielākam par šo attiecību, tāpēc vērtība, kas aprēķināta pēc proporcionāli integrālā algoritma, tiek pieskaitīta pie šī dalījuma. 2.9. attēlā ir redzama superkondensatora uzkrājēja strāva, baterijas strāva un līdzstrāvas kopnes spriegums bremzēšanas režīmā. Līdzsprieguma pārveidotājs nav optimizēts, ņemot vērā elektromagnētisko traucējumu izstarojumus, tāpēc strāvas mērtaustā inducējas traucējumi, taču pārveidotāja darbību tie neietekmē, jo tiek izmantots gan analogais, gan digitālais signālu filtrs. Kā redzams 2.9. attēlā, pārveidotājs veiksmīgi stabilizē spriegumu, un tādā veidā visa reģeneratīvās bremzēšanas enerģija var tikt uzkrāta superkondensatora enerģijas uzkrājējā.



2.9. att. Superkondensatoru enerģijas uzkrājēja darbība bremzēšanas režīmā.



2.10. att. Pārveidotāja vadības blokshēma paaugstinošajā režīmā (superkondensatoru izlāde).

LETL paātrinoties, daļa no enerģijas tiek ņemta no svina-skābes baterijas, bet daļa – no superkondensatora uzkrājēja. Šajā gadījumā tiks izmantota proporcionālā vadības stratēģija, kur strāvas sadalīsies proporcionāli koeficientam K_P, kas tiks regulēts tā, lai superkondensatora sprieguma vidējā vērtība tuvotos vērtībai, kas vienāda ar pusi no regulēšanas diapazona vērtības. Šajā gadījumā references signāls mainās proporcionāli baterijas strāvai, ko zināmā mērā ietekmē arī

superkondensatora uzkrājēja strāva, tāpēc šajā gadījumā stabila regulatora izveidošana ir sarežģītāka.

Veiktais eksperimentālais pētījums ļauj secināt, ka superkondensatora uzkrājēju pārbūves komplekts var veiksmīgi funkcionēt, ir vērts veikt tālākus pētījumus, uzstādot to uz reāla LETL. Šāda tipa uzkrājēja komercializēšanu bremzē joprojām augstā superkondensatoru cena, tomēr atsevišķos gadījumos šāda uzkrājēja izmantošana varētu būt visai lietderīga. Svarīga priekšrocība šāda veida uzkrājējam ir tas, ka tā uzstādīšanai ir nepieciešama minimāla iejaukšanās jau esošajā vadības sistēmā. Turpmākie pētījumi ir nepieciešami, lai realizētu sistēmu bez svina-skābes baterijas strāvas sensora, tomēr, ņemot vērā, ka sensors nav dārgs un tā uzstādīšana ir vienkārša, tas nedos ļoti ievērojamu uzlabojumu. Piedāvātais proporcionālais vadības algoritms ir vienkāršs, bet tas darbojas labi, uzlabotie algoritmi ļauj uzlabot efektivitāti tikai par pāris procentiem, to realizācija uz stenda neļautu pat precīzi novērtēt enerģijas ietaupījumu. Tālāk tiks apskatītas iespējas izmantot pārveidotāja vairākfāžu topoloģiju, lai uzlabotu pārveidotāja parametrus.

3. Magnētiski saistītu droseļu izmantošana pārveidotāja strāvas pulsāciju samazināšanai un jaudas blīvuma palielināšanai

Pārveidotājam, kas tiek uzstādīts transportlīdzeklī, ir jābūt pēc iespējas mazam un vieglam, tāpēc ir svarīgi izpētīt pārveidotāja jaudas blīvuma palielināšanas iespējas. Pēdējā laikā aizvien plašāk līdzsprieguma pārveidotājos tiek lietota vairākfāžu topoloģija lielu strāvu un vairāklīmeņu topoloģija augstu spriegumu gadījumā. Galvenā vairākfāžu pārveidotāju priekšrocība ir tā, ka tā izejas strāvas pulsācijas ir ievērojami mazākas nekā vienas fāzes gadījumā. Divfāžu pārveidotāja strāvas pulsāciju attiecību pret vienfāžu pārveidotāja strāvas pulsācijām saista izteiksme [28]:

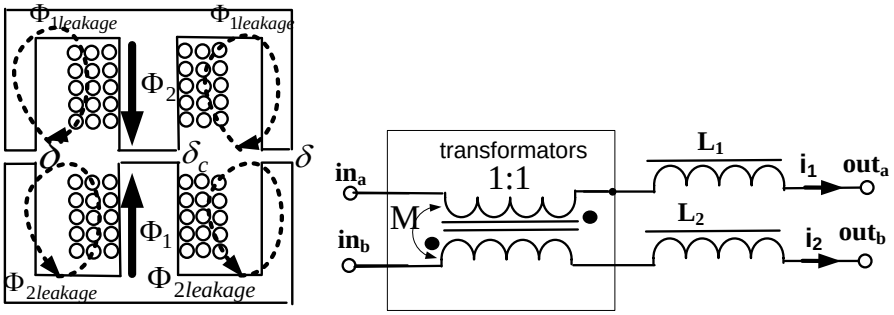
$$\frac{\Delta i_{2\text{fāžu}}}{\Delta i_{\text{vienfāžu}}} = \begin{cases} \dfrac{2D-1}{1-D}, \text{ja } D > 0,5, \\ \dfrac{1-2D}{1-D}, \text{ja } D < 0,5. \end{cases} \tag{3.1.}$$

Magnētiski saistīta drosele ir speciāla daudzvijumu drosele, kas izveidota, izmantojot speciālu magnētisko struktūru. Galvenais ieguvums no tā ir tāds, ka tiek ieekonomēts magnētvads. [83]. Pētījumi, kas saistīti ar magnētiski saistītu droseļu izmantošanu līdzsprieguma pārveidotājos, ir veikti [29]–[36]. Magnētiski saistītās droseles izveido, apvienojot divus atsevišķus magnētvadus vienā, kas ļauj samazināt magnētvadu par vienu zaru.

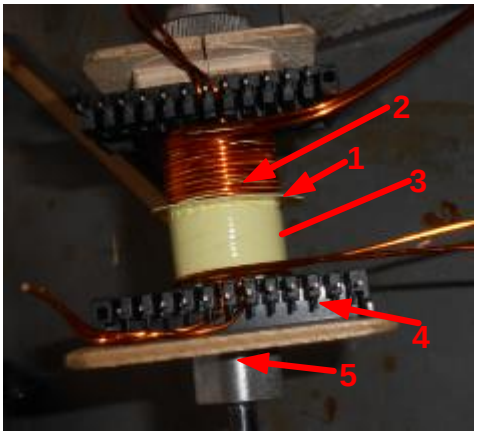
Integrēto magnētvadu izveidē pārsvarā [37]–[41] tiek izmantotas speciālas formas ferīta serdes. Visos rakstos ir uzsvērts, ka šādā veidā var tikt ietaupīts magnētvada tilpums, kas lielā mērā samazina arī cenu, jo ferīts ir samērā dārgs materiāls. Tāpēc tālāk tiks apskatīts, kā var izmantot priekšrocības, ko sniedz magnētiski saistītu elementu izmantošana, lietojot tradicionāli pieejamās serdes, šai gadījumā tās ir E tipa serdes.

3.1. Divfāžu inversi magnētiski saistītas droseles izveide un lietošana līdzstrāvas pārveidotājos

Šajā apakšnodaļā tiks sniegta informācija par līdzsprieguma pārveidotājiem, kas balstīti uz magnētiski saistītu droseli, kuras izveide apskatīta [42]. Droseles aizvietošanas shēmas un magnētiskā struktūra ir parādītas 3.1. attēlā. Šāda droseles praktiskā realizācija ir parādīta 3.2. attēlā. Droseli veido divi vijumi (2) un (3), kas uztīti uz plastmasas spoles formētāja (4), kas tiek novietots uz E-E ferīta serdes centrālā pleca, abi vijumi ir novietoti katrs savā serdes pusē un atdalīti ar ieliktni (1). Droseles izveidošana tika veikta ar manuālo tīšanas mehānismu (5), taču šādu induktoru tīšanu ir iespējams viegli automatizēt.

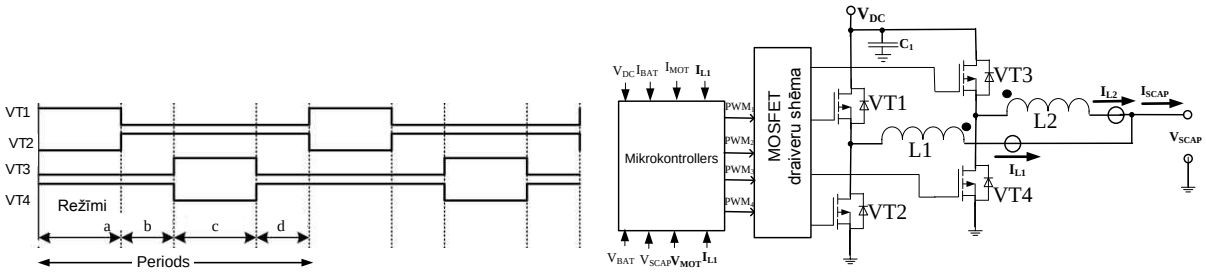


3.1. att. Magnētiski saistīta induktora magnētiskā struktūra un ekvivalentā aizvietošanas shēma.



3.2. att. Magnētiski saistītas droseles praktiskā realizācija.

3.3. attēlā ir redzama divfāžu divvirzienu līdzstrāvas pārveidotāja shēma, kas paredzēta superkondensatoru uzkrājēja enerģijas plūsmas vadīšanai iepriekšējā nodaļā apskatītajā lietojumā. Vienfāzes pārveidotājā tika izmantoti divi paralēli saslēgti tranzistori, tāpēc tranzistoru kopējais skaits nemainās. Paralēlie zari tiek vadīti ar par 180 grādiem nobīdītu impulsu platuma modulāciju. Katrā no fāzēm ir savs strāvas sensors un atsevišķa vadības cilpa, kas novērš nevienmērīgu strāvas sadalījumu zaros.



3.3. att. Spriegumi uz tranzistoru bāzes un attiecīgie režīmi; divfāžu divvirzienu līdzsprieguma pārveidotāja shēma [19].

Lai varētu objektīvi novērtēt priekšrocības, ko dod magnētiski saistīta induktora izmantošana, elektriskos procesus ir nepieciešams aprakstīt ar matemātiskajām formulām. Spriegumus uz induktivitātēm ($V_1 = V_{\text{ina_outa}}$, $V_2 = V_{\text{inb_outb}}$, 3.3. att.) var izteikt ar šādām formulām, kur i_1 un i_2 ir strāvas, kas plūst caur attiecīgajām induktivitātēm:

$$V_1 = L_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} - M \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}, \tag{3.2.}$$

$$V_2 = -M \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + L_2 \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}. \tag{3.3.}$$

Kā jau tika apskatīts iepriekš, divfāžu pārveidotājs sastāv no diviem vienas fāzes pārveidotājiem, kas ir savienoti paralēli. Katrs paralēlais slēdzis ir ieslēgtā stāvoklī ar 180° nobīdi. 3.3. attēlā ir parādīti signāli uz tranzistoru bāzēm. Katrs periods var tikt iedalīts četros dažādos režīmos "a"–"d" atkarībā no slēdžu stāvokļa. Ekvivalentā induktivitāti laika režīma "a" laikā [43]:

$$L_{\text{eq1,a}} = \frac{L - \dfrac{M^2}{L}}{1 - \dfrac{M}{L} \cdot \dfrac{D}{1-D}} = \frac{1-k^2}{1 - \left(k \dfrac{D}{(1-D)} \right)} L. \tag{3.4.}$$

Ekvivalentā induktivitāte režīmā “b” ir vienāda ar:

$$L_{\mathrm{eq1,b}} = \frac{L - \frac{M^2}{L}}{1 + \frac{M}{L}} = \left(\frac{1-k^2}{1+k}\right) L = (1-k)L. \tag{3.5.}$$

Ekvivalentā induktivitāte režīmā “c” ir:

$$L_{eq1,c} = \frac{L - \frac{M^2}{L}}{(1+\frac{M}{L})\frac{1-D}{D}} = \frac{1-k^2}{1-(k\cdot\frac{1-D}{D})} L\,. \tag{3.6.}$$

Strāvas pulsācijas katrā no fāzēm var tikt izteiktas, izmantojot izteiksmi no paaugstinošā energoelektroniskā pārveidotāja teorijas:

$$\Delta I_{1,\mathrm{a}} = \frac{V_{\mathrm{in}} D}{f_{\mathrm{sw}} L_{\mathrm{eq1,a}}} = \frac{V_{\mathrm{in}} D}{f_{\mathrm{sw}} L} \cdot \frac{(1-k)\frac{D}{1-D}}{1-k^2}, \tag{3.7.}$$

$$\Delta I_{2,\mathrm{a}} = \frac{(V_{\mathrm{in}} - V_{\mathrm{out}})D}{f_{\mathrm{sw}} L_{\mathrm{eq2,a}}} = \frac{V_{\mathrm{in}} D\left(1 - \frac{1}{1-D}\right)}{f_{\mathrm{sw}} L_{\mathrm{eq2,a}}} = \frac{V_{\mathrm{in}} D\left(k - \frac{D}{1-D}\right)}{f_{\mathrm{sw}} L(1-k^2)}. \tag{3.8.}$$

Izejas strāvas pulsācijas ir atsevišķu fāzes strāvu pulsāciju summa, to var aprēķināt šādi:

$$\Delta I_{\mathrm{a}} = \Delta I_{1,\mathrm{a}} + \Delta I_{2,\mathrm{a}} = \frac{V_{\mathrm{in}} D}{f_{\mathrm{sw}} L(1-k)} \cdot \frac{1-2D}{1-D}. \tag{3.9.}$$

Kā rāda 3.9. izteiksme, izejas strāvas pulsācijas inversi saistītas droseles gadījumā būs lielākas nekā, izmantojot nesaistītās droseles, taču, tā kā tā ir divfāžu struktūra, tad strāvas pulsācijas būs mazākas nekā vienas fāzes gadījumā, īpaši pie aizpildījuma, kas tuvs 0,5. Uzskatāmības dēļ izteiksmes var vienkāršot šādā formā:

$$\frac{L_{\mathrm{eq}}}{L} = \frac{1-k^2}{1+Ck}, \tag{3.10.}$$

kur $C = -\frac{1-D}{D}$, ja $D > 0{,}5$ un $C = -\frac{D}{1-D}$, ja $D < 0{,}5$.

Atvasinot izteiksmi pēc saites koeficienta *k*, var iegūt optimālo *k* vērtību konkrētam aizpildījumam:

$$\frac{\mathrm{d}\left(\frac{L_{\mathrm{eq}}}{L}\right)}{\mathrm{d}k} = \frac{-C\left(k^2 + \frac{2}{C}k + 1\right)}{1 - Ck^2}. \tag{3.11.}$$

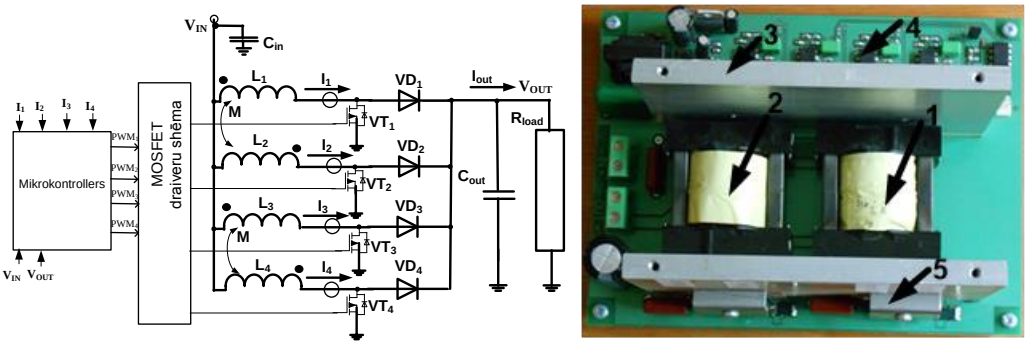
Optimums būs punktā, kurā atvasinājums ir vienāds ar nulli, to var iegūt, atrisinot vienādojumu:

$$k^2 + \frac{2}{C}k + 1 = 0. \tag{3.12.}$$

Vienādojuma atrisinājums ir šāds:

$$k_{1,2} = \frac{-\frac{2}{C} \pm \sqrt{\frac{4}{C^2} - 4}}{2} = -\frac{1}{C} \pm \sqrt{\frac{1}{C^2} - 1}. \tag{3.13.}$$

Iespējamo efektu no magnētiski integrēto spoļu izmantošanas var palielināt, ja tiek palielināts pārveidotāja fāžu skaits. 3.10. izteiksme rāda, ka īpaši lietderīgi ir izmantot saistīto droseli gadījumā, ja aizpildījums ir tuvs 0,5. Daudzos gadījumos nav nepieciešams plašs diapazons izejas spriegumam pret ieejas spriegumu, un tāpēc šajā gadījumā magnētiski saistītu droseļu izmantošana ir īpaši lietderīga.



3.4. att. Četrfāžu līdzsprieguma paaugstinošais pārveidotājs.

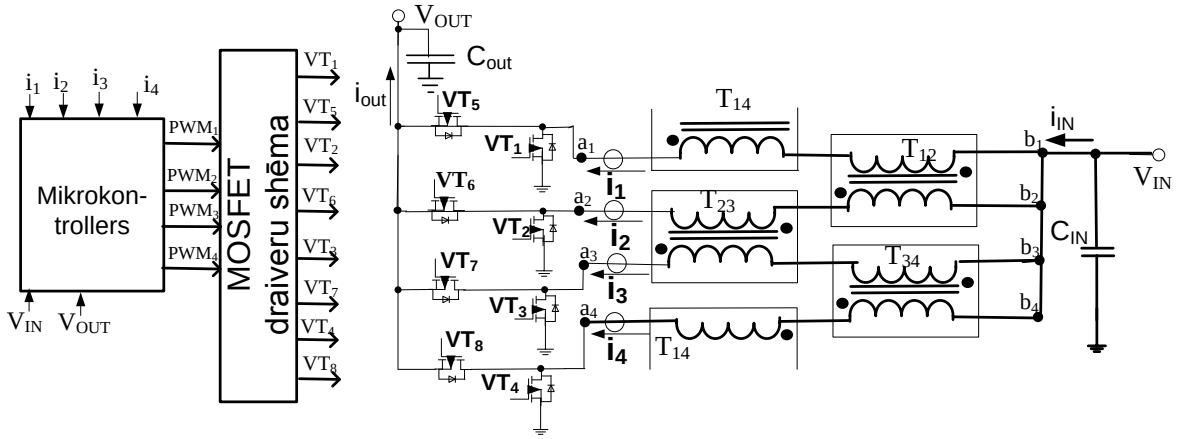
3.4. attēlā ir redzama paaugstinošā četrfāžu līdzsprieguma pārveidotāja shēma. Induktors tika izveidots, izmantojot ETD39 spoles formētāju, tā struktūra ir līdzīga kā iepriekš apskatītajā gadījumā. Centrālā pleca gaisa sprauga ir izvēlēta vienāda ar 1,4 mm, bet ārējo plecu gaisa spraugas ir vienādas ar 0,25 mm, vijumu skaits – 80, nomērītā induktivitāte – 830 μH, mijinduktivitātes saites koeficients – 0,7.

3.4. attēlā ir redzama pārveidotāja praktiskā realizācija. Tranzistori un diodes (5) tiek dzesētas, izmantojot alumīnija radiatoru (3). Ar mikrokontrollera izejas signāliem tiek vadīti *MOSFET* tranzistoru draiveri (4), droseles (1) un (2) ir izveidotas, izmantojot E veida ferīta serdeņus. Pārveidotājs lielākoties strādā ar aizpildījumu, kas tuvs 0,5, tāpēc pat ar ļoti nelielām ieejas un izejas kapacitātēm ir iespējams iegūt mazas sprieguma pulsācijas.

3.2. Četrfāžu pārveidotājs ar magnētiski saistītām droselēm un enerģijas pārvadi starp fāzēm

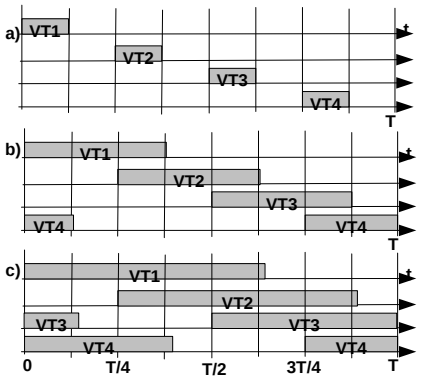
Lai vēl vairāk samazinātu strāvas pulsācijas katrā no fāzēm un tādā veidā uzlabotu pārveidotāja efektivitāti, ir iespējams pārvadīt enerģiju ne tikai starp divām fāzēm, bet arī starp visām fāzēm. Šim nolūkam ir nepieciešams ieviest vēl papildu induktorus, kas veido "noslēgtās ķēdes" struktūru, tas ir, padara par iespējamu enerģijas pārvadi no vienas fāzes uz jebkuru citu no fāzēm. 3.5. attēlā ir redzama četrfāžu divvirzienu līdzsprieguma pārveidotāja struktūrshēma. Katrs paralēlais tranzistoru pāris tiek vadīts ar par 90 elektriskajiem grādiem nobīdītu signālu. Pārveidotāja vadībai tiks izmantota digitālā vadība. Lai noteiktu strāvas pulsācijas, tālāk tiks analizēts pārveidotāja paaugstinošais režīms.

Magnētisko saiti starp fāzēm var nodrošināt ar transformatoriem, kā tas ir parādīts 3.5. attēlā. Šādā gadījumā vēl nepieciešama arī papildu induktivitāte *L*, kas ir jāizveido, rēķinoties, ka caur to plūdīs summārā strāva, taču šīs spoles induktivitāte vairs nav nepieciešama tik liela, kā vienfāzes risinājuma gadījumā, tāpēc to var izveidot ar mazāku vijumu skaitu un mazāku magnētiskās serdes tilpumu un svaru.



3.5. att. Līdzsprieguma pārveidotāja shēma ar enerģijas pārvadi starp fāzēm.

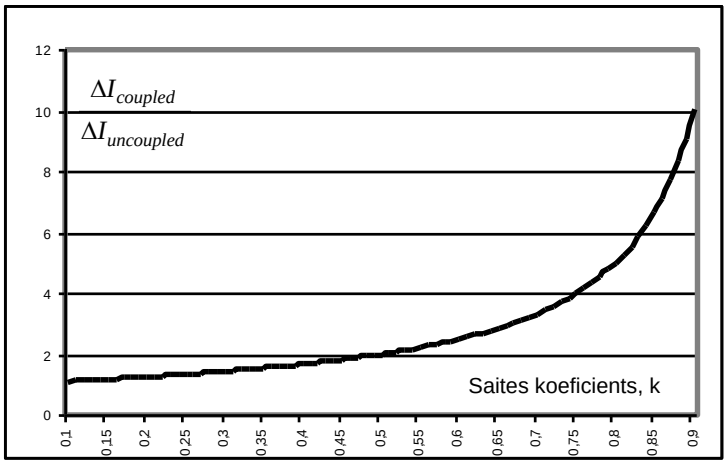
Pārveidotājs atkarībā no aizpildījuma var darboties vienā no četriem režīmiem, kas ir redzami 3.6. attēlā. Pirmajā režīmā aizpildījuma koeficients *D* ir mazāks par 1/4 no perioda. Otrajā režīmā *D* ir starp 1/4 un 1/2 no perioda. Trešajā režīmā *D* ir robežās no 1/2 līdz 3/4 no perioda, un ceturtajā *D* ir lielāks nekā 3/4 no perioda.



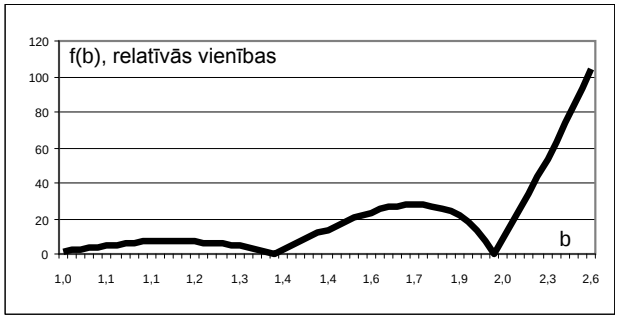
3.6. att. Pārveidotāja darba režīmi atkarībā no aizpildījuma koeficienta.

Tika iegūta izteiksme, pēc kuras var tikt aprēķināta strāvas izmaiņa pirmajā periodā:

$$\Delta I_{\mathrm{in}(D\le 0{,}25)} = -\int_{\frac{b-1}{b}T}^{T/4} \frac{4V_{\mathrm{IN}}(1-b)}{2L-2M}\,\mathrm{d}t = \frac{-\left(\frac{-3b+4}{4b}\right)(1-b)4V_{\mathrm{IN}}T}{2L-2M} = \frac{(4-3b)(b-1)V_{\mathrm{IN}}T}{b(2L-2M)}. \qquad (3.14.)$$



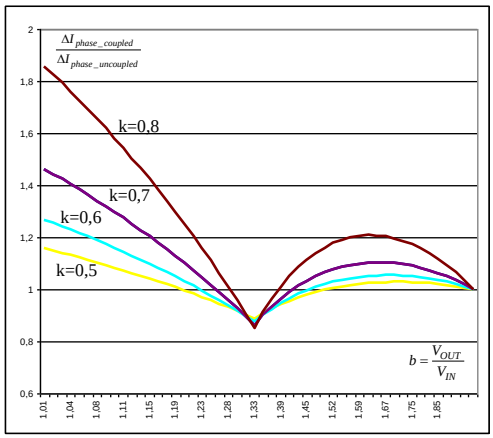
3.7. att. Ieejas strāvas pulsācijas atkarībā no saites koeficienta.



3.8. att. Ieejas strāvas pulsācijas atkarībā no paaugstinājuma koeficienta.

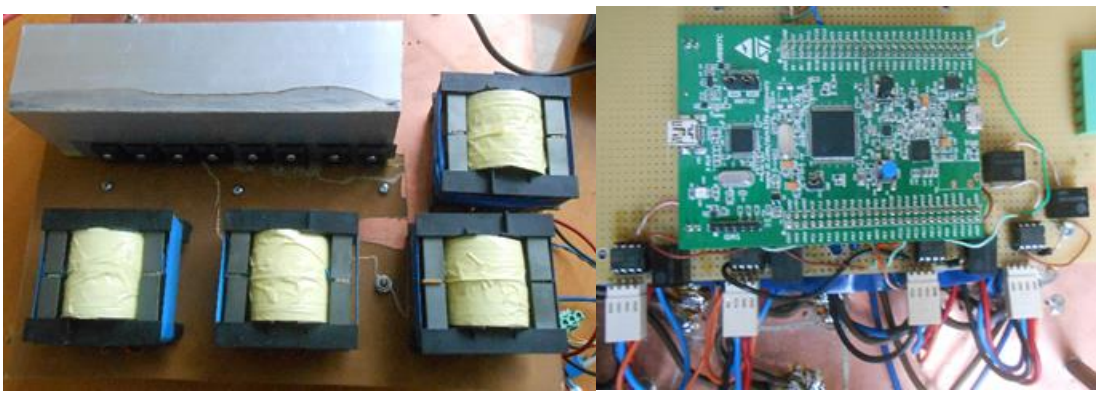
Līdzīgas izteiksmes tika iegūtas arī citiem periodiem, sīkāka analīze ir atrodama [43]. No šīm izteiksmēm ir iespējams iegūt grafiku, kas parāda ieejas strāvas pulsācijas atkarībā no saites koeficienta (3.7. att.) un paaugstinājuma koeficienta (3.8. att.). Grafikos ir redzams, ka saites koeficients, kas ir lielāks par 0,9, izsauc ievērojamas ieejas strāvas pulsācijas.

No izteiksmēm ir iespējams iegūt arī grafikus, kas apraksta fāzes strāvas pulsācijas atkarībā no paaugstinājuma koeficienta (3.9. att.). Grafikā ir redzams, ka, palielinot saites koeficientu, ir iespējams iegūt fāzes strāvas pulsāciju samazinājumu tikai pie dažām paaugstinājuma koeficienta vērtībām. Tas var radīt maldīgu priekšstatu par to, ka magnētiski saistītu droseļu izmantošana nesamazina fāzes strāvas pulsācijas, taču jāņem vērā vēl arī tas, ka magnētiski saistītajā droselē magnētiskās plūsmas līdzstrāvas komponente daļēji kompensējas, tāpēc ir iespējams izveidot spoli ar lielāku induktivitāti uz tā paša serdeņa.

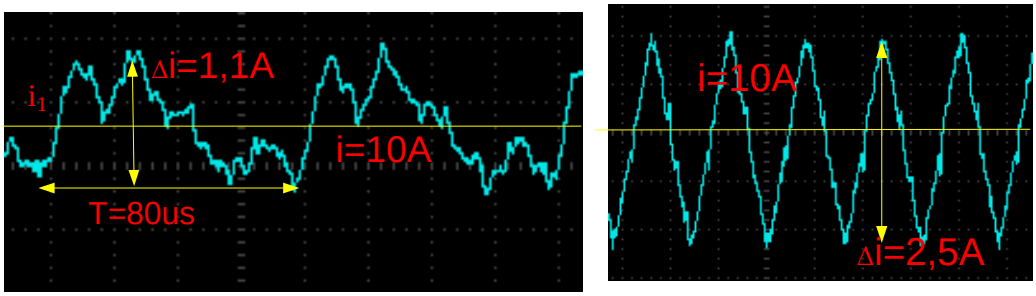


3.9. att. Fāzes strāvas pulsācijas atkarībā no paaugstinājuma koeficienta.

3.10. attēlā ir redzams eksperimentālais pārveidotāja prototips, kura vadībai tika izmantots *STM32F407VGT6* mikrokontrollers. Strāva katrā fāzē tiek mērīta un regulēta, izmantojot PI algoritmu, lai novērstu strāvu disbalansu. Impulsu platuma modulētie signāli ir nobīdīti fāzē par 90°. Magnētiski saistītās droseles ir izveidotas, izmantojot ETD59 spoles formētājus un E tipa ferīta serdes. Centrālā pleca un ārējo plecu gaisa sprauga ir vienāda ar $\delta = \delta_c = 0{,}5$ mm, vijumu skaits ir vienāds ar 30, nomērītā induktivitāte ir $L = 400$ µH un saites koeficients ir 0,85. Katrā fāzē ir divi virknē slēgti induktori, tas nozīmē, ka induktivitāte ir vismaz divas reizes lielāka nekā magnētiski nesaistīta induktora gadījumā un fāzes strāvas pulsācijas ir mazākas pie jebkura aizpildījuma.



3.10. att. Četrfāžu divvirzienu līdzsprieguma pārveidotājs ar magnētiski saistītām droselēm.

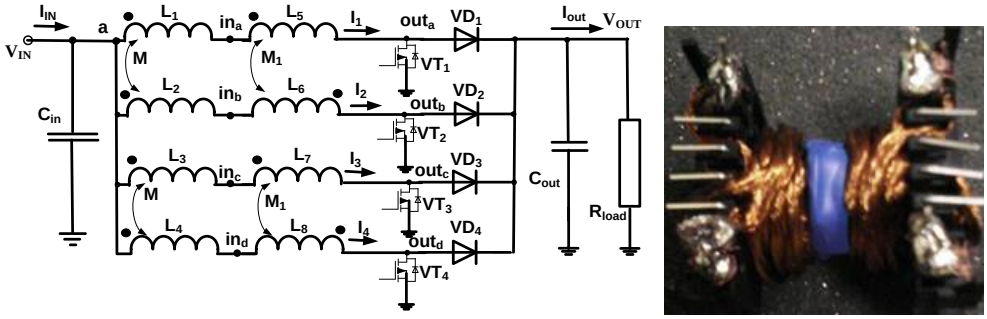


3.11. att. Fāzes strāvas pulsācijas pie D = 0,1 un D = 0,5.

3.11. attēlā ir redzamas fāzes strāvas pulsācijas pie dažādiem aizpildījumiem. Strāvas pulsācijas aptuveni sakrīt ar teorētiskajiem rezultātiem, tās ir mazākas par 25 % un pie normālās darba frekvences 50 kHz būs mazākas par 10 %, salīdzinot ar tradicionālu līdzsprieguma pārveidotāju. Galvenie šāda pārveidotāja trūkumi ir augstākas izmaksas un tas, ka ir nepieciešams regulēt strāvu katrā no zariem.

3.3. Četrfāžu pārveidotājs ar tieši un inversi magnētiski saistītām droselēm

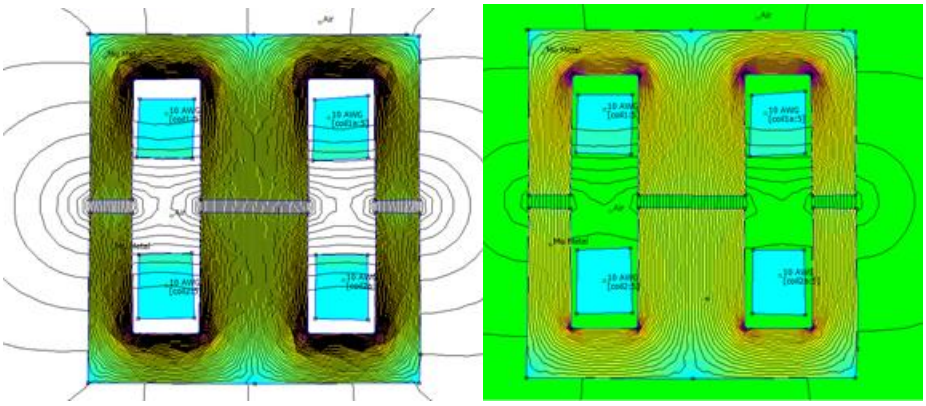
Literatūrā ir mazāk apskatīta tieši magnētiski saistītu droseļu izmantošana pārveidotājos. Tas izskaidrojams ar to, ka caur šādas droseles magnētisko serdi plūst liela magnētiskā plūsma, ko nepieciešams ierobežot ar gaisa spraugu, rezultātā iegūstot mazu induktivitāti. Taču daudzfāžu pārveidotāja gadījumā reizēm ir nepieciešams izmantot papildu induktivitāti kombinācijā ar inversi magnētiski saistītām droselēm, un šai gadījumā tieši magnētiski saistīta drosele varētu būt labs risinājums. Tāpēc šajā apakšnodaļā tiks analizēta tieši un inversi magnētiski saistītu droseļu kombinācijas izmantošana līdzstrāvas daudzfāžu lietojumā.



3.12. att. Četrfāžu paaugstinošais pārveidotājs ar tieši un inversi magnētiski saistītu droseļu izmantošanu un droseles praktiskā realizācija.

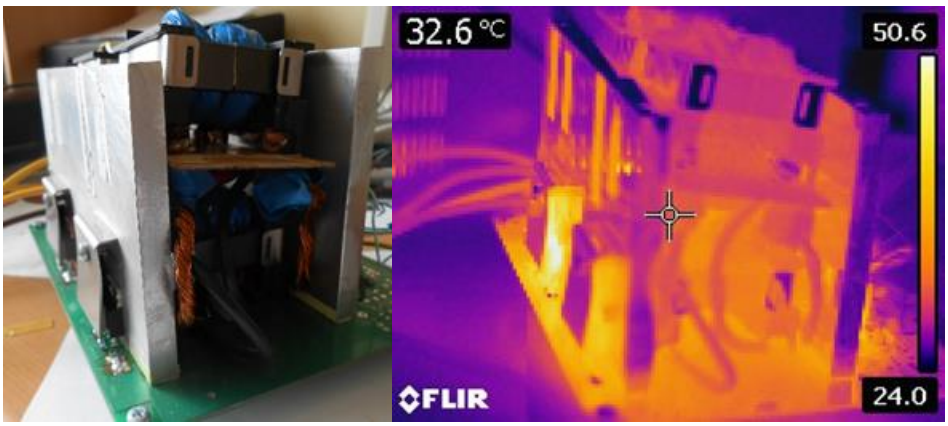
Četrfāžu līdzsprieguma pārveidotājs ar magnētiski saistītu droseļu izmantošanu ir redzams 3.12. attēlā, kur ir attēlota arī inversi saistītas droseles praktiskā realizācija, kas ir līdzīga, kā tika apskatīts iepriekš. Tinumi ir izveidoti no daudzdzīslu vada ar izolētām dzīslām (*litz wire*) un izvietoti tālāk no gaisa spraugas, lai samazinātu zudumus. Droseles, kurai ir pieci vijumi katrā plecā un magnētserdes gaisa sprauga ir vienāda ar 0,1 mm, nomērītā induktivitāte ir 16 μH un mijinduktivitātes koeficients ir vienāds ar 0,72.

Otrs bieži sastopams variants kopējo strāvas pulsāciju mazināšanai ir papildu droseles izmantošana. Serdē ir nepieciešams ieviest lielu gaisa spraugu, lai izvairītos no piesātinājuma, tāpēc tinumi ir izvietoti pēc iespējas tālāk no gaisa spraugas, lai mazinātu zudumus. Kā redzams 3.13. attēlā, izveidojot tinumus šādā veidā, caur tiem noslēdzas tikai neliela daļa no magnētiskās plūsmas līnijām, tāpēc zudumi var tikt samazināti, jo tiek novērsts tā sauktais izplūšanas efekts ap gaisa spraugu (*fringing effect*), kas sīkāk ir apskatīts [44]. Magnētiskā lauka modelēšana tika veikta programmā *FEMM 4.2*. Šādos gadījumos var tikt izmantotas arī metāla pulvera serdes ar augstu piesātinājuma slieksni, uz kurām ir ērti izveidot droseli, taču palielināsies magnētiski zudumi, īpaši, mazas slodzes gadījumā.



3.13. att. Parastas droseles un tieši magnētiski saistītas droseles magnētiskais lauks.

Lai praktiski pārbaudītu iepriekš aprakstīto pārveidotāja darbību, tika izveidots prototips, kas ir redzams 3.14. att. Prototipa vadībai tika izmantots *STM32F407VGT6* mikrokontrollers, *PWM* signāli ir nobīdīti par 90 elektriskajiem grādiem. Magnētiski tieši un apgriezti saistītās droseles ir izveidotas uz ETD 39 serdes formētāja. Abām droselēm ir pieci vijumi, katrā fāzē summārais mijinduktivitātes koeficients ir vienāds ar 0,3. Kā alternatīvs variants varēja tikt izmantota arī mazāka inversi saistīta drosele ar mijinduktivitātes koeficientu, kas tuvs 1 un lielāka izmēra tieši saistīta drosele summārās strāvas pulsāciju mazināšanai.



3.14. att. Četrfāžu pārveidotāja prototips un termālā bilde.

Praktiski eksperimentos iegūtie strāvas pulsāciju lielumi sakrīt ar teorētisko aprēķinu rezultātiem. 3.14. attēlā ir redzama prototipa termālā bilde. Ir redzams, ka magnētiski saistītu droseļu temperatūra ir normas robežās, kaut gan caur vijumiem plūst magnētiskā plūsma, kas apliecas ap gaisa spraugu. Kā redzams, karstākais punkts ir diodes, tāpēc ieteicams tās aizvietot ar tranzistoriem, kas darbojas sinhronā taisngrieža režīmā. Var secināt, ka piedāvātais risinājums ļauj samazināt pārveidotāja magnētisko elementu izmērus.

4. Uz superkondensatoriem balstīta modernizācijas iekārta iekšdedzes dzinēja starta baterijas snieguma uzlabošanai

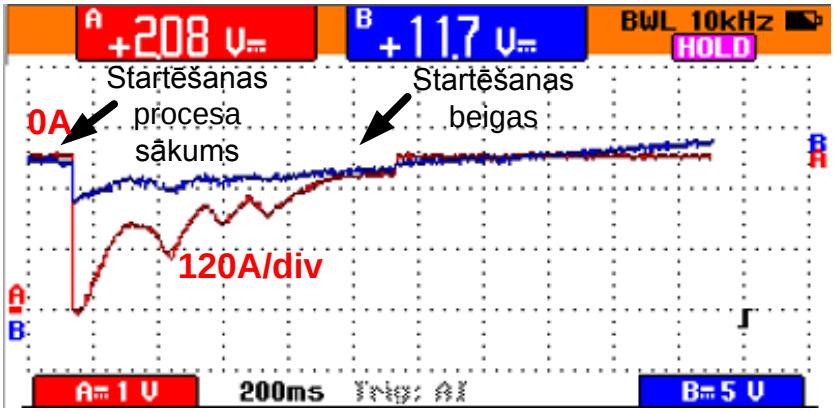
Lai iedarbinātu iekšdedzes dzinēju, tas ir jāiegriež līdz noteiktam ātrumam, pie kura cilindrā tiek iesūkts degmaisījums un saspiests līdz noteiktam spiedienam. Parasti iekšdedzes dzinēja iegriešanai tiek izmantots elektriskais motors, un kā enerģijas avots tiek izmantots svina-skābes akumulators. Akumulators izpilda arī citas funkcijas: ierosina maiņstrāvas ģeneratoru, izlīdzina ģeneratora sprieguma pulsācijas un nodrošina patērētājus ar elektrību izslēgta dzinēja gadījumā. Papildinot tradicionālo startēšanas sistēmu ar superkondensatoru uzkrājēju, ir iespējams paildzināt svina-skābes bateriju kalpošanas laiku, uzlabot startēšanu zemas apkārtējās vides apstākļos. Izmantojot superkondensatoru bateriju, pīķa strāvas nodrošināšanai ir iespējams paildzināt svina-skābes baterijas kalpošanas laiku 2–3 reizes [45].

Dažas prognozes saka, ka automašīnas, kas aprīkotas ar *start-stop* sistēmu un ļauj izslēgt iekšdedzes dzinēju īslaicīgas apstāšanās gadījumos, būs vismaz puse no visām saražotajām iekšdedzes automašīnām. Šādas startēšanas sistēmā akumulatoram ir jāiztur liela slodze, tāpēc ir paredzams īslaicīgāks akumulatoru kalpošanas laiks. Pieprasījums pēc tehnoloģijas, kas spētu uzlabot starta baterijas īpašības, ir liels. Lietojot superkondensatora un svina-skābes akumulatora hibrīdo uzkrājēju, tā apjoms, salīdzinot ar klasisko sistēmu, var tikt samazināts par 30 % un svars samazināts par 25–40 % [46]–[48].

Svina-skābes baterijas un superkondensatora hibrīdais uzkrājējs var būt ar pasīvu struktūru [49], daļēji aktīvu [50] un pilnībā aktīvu struktūru [51], [52]. Pasīvās struktūras gadījumā svina-skābes baterija un superkondensators ir saslēgti paralēli bez jebkāda pārveidotāja izmantošanas. Šāds risinājums ir visvienkāršākais un vislētākais, taču nevar tikt izmantota visa superkondensatorā uzkrātā enerģija. Pilnībā aktīvas topoloģijas gadījumā var tikt izmantota daudz lielāka daļa no superkondensatorā uzkrātās enerģijas, kā arī elektriskā motora palaišana ar nelielām strāvas pulsācijām. Šajā gadījumā tiks aplūkots uz superkondensatoriem balstīts modernizācijas risinājums, kas ļauj uzlabot startēšanas procesu ar mazākas ietilpības superkondensatoriem.

4.1. Klasiskās startēšanas procesa analīze

Vispirms tika izmērīta strāva iekšdedzes dzinēja startēšanas procesā. Šim nolūkam tika izmantots uz Holla efektu bāzēts strāvas sensors *HTFS 200-P* ar maksimālo strāvu 300 A un *Fluke 199C* osciloskops. Mērīšana tika veikta divām vieglajām pasažieru automašīnām – *Skoda Octavia* ar 1.8 benzīna dzinēju un *Toyota Corolla* ar 2.0 dīzeļdzinēju.



4.1. att. Tipisks strāvas un sprieguma profils startēšanas laikā.

4.1. attēlā ir redzama akumulatora strāva un spriegums, startējot automašīnu. Strāva ir lielāka dīzeļauto gadījumā, ja apkārtējās vides temperatūra ir zemāka. Startēšanai nepieciešamo enerģiju ietekmē arī startera motora tips un jauda, auto tehniskais stāvoklis, eļļas viskozitāte, aizdedzes kvalitāte un citi faktori, bet strāvas profils ir līdzīgs tam, kas parādīts 4.1. attēlā. Startēšanas procesu nosacīti var iedalīt: īsslēguma režīmā, kurā startera motora rotācijas frekvence ir tuva nullei, strāva un moments ir maksimāls un slodzes režīmā, kurā motors griežas, strāva mazinās. Īsslēguma režīma ilgums ir aptuveni 50 ms. Strāvas pulsācijas var izskaidrot ar to, ka cilindrs, ejot uz augšu pie aizvērtiem vārstiem, saspiež gaisu, kas rada lielāku mehānisko slodzi.

Lai iekšdedzes dzinējs tiktu piestartēts, tas ir jāpaātrina līdz noteiktam ātrumam ω_0. Var tikt iegūta izteiksme, kas apraksta startera motora strāvu, kurai proporcionāls arī ir moments [53]:

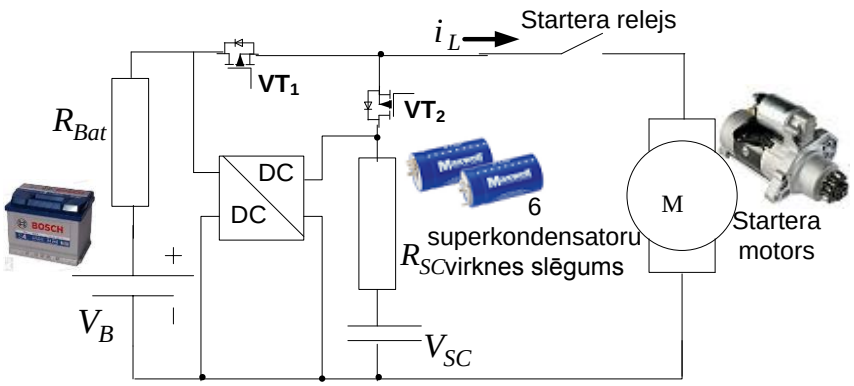
$$i_{L0} = \frac{V_B - E_0}{R_{Bat} + R_S}, \qquad (4.1.)$$

kur V_B – akumulatora baterijas tukšgaitas spriegums; E – motora elektrodzinējspēks, R_S – enkura tinuma pretestība, R_{Bat} – akumulatoru baterijas iekšējā pretestība; i_L – startēšanas strāva. No 4.1. izteiksmes var secināt, ka gadījumā, ja akumulatora baterijas tehniskais stāvoklis ir slikts vai arī tā ir izlādēta, tas nozīmē – V_B ir samazināts, bet R_{Bat} ir lielāks nekā nominālais lielums, tad startēšanas strāva i_{L0} var būt pārāk maza, lai attīstītu nepieciešamo momentu. Šāda akumulatora baterija vairs nav derīga iekšdedzes dzinēja startēšanai un ir jāuzlādē vai arī ir jānomaina.

Īsslēguma režīma laikā, pārslodzes strāvai plūstot caur akumulatora iekšējo pretestību, uz tās veidojas ievērojams sprieguma kritums, kas var sasniegt nepieļaujami zemu līmeni (4.1. att.). Sprieguma kritums var izraisīt ierīču, kas pievienotas akumulatoram (radio, elektronisko vadības bloku utt.) darbības traucējumus. 4.1. attēlā parādīts startēšanas process siltā laikā ar uzlādētu akumulatoru, bet akumulatora spriegums vienalga pazeminās zem 9 V (normālā robeža). Sprieguma iekrituma problēma startēšanas laikā ir īpaši svarīga transportlīdzekļiem, aprīkotiem ar *start-stop* funkciju, jo dzinēja palaišanas biežums ir daudz lielāks nekā parastām automašīnām, tas arī var apdraudēt lietotājus, jo sprieguma iekritums var izsaukt tādu iekārtu atteici, kas rūpējas par satiksmes drošību. Viens no risinājumiem, ar kuru var tikt novērsts sprieguma iekritums startēšanas sākumā, ir izmantot divus akumulatorus [54]: vienu iekšdedzes dzinēja startēšanai, otru – pārējo patērētāju elektroapgādei. Tālāk tiks apskatīts risinājums, kas ļauj atrisināt arī šo problēmu.

4.2. Uz superkondensatoriem balstīta modernizācijas iekārta tradicionālās iekšdedzes dzinēja startēšanas sistēmas uzlabošanai

Darbā piedāvāta iekšdedzes dzinēja startēšanas sistēma, kas papildināta ar mazas ietilpības sešu superkondensatoru virknes slēgumu un nelielas jaudas līdzsprieguma pārveidotāja (4.2. att.).

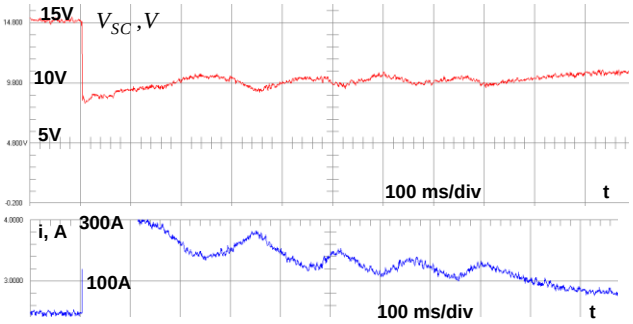


4.2. att. Superkondensatoru pieslēgums startēšanas sistēmas uzlabošanai.

Superkondensatoru uzkrājējs tiek uzlādēts ar nelielu strāvu, ko ir spējīgs nodrošināt pat sliktā stāvoklī esošs vai izlādēts akumulators. Iekšdedzes dzinēja startēšanas procesa laikā enerģija tiek ņemta no superkondensatora uzkrājēja, tā rezultātā īsslēguma strāva neplūst no svina-skābes baterijas, paildzinot tās kalpošanas laiku, startēšanas laikā spriegums nemainās, neveidojas sprieguma iekritums.

Lai notestētu startēšanas sistēmu ar superkondensatora bateriju iekšdedzes dzinēja startēšanai, tika uzbūvēts prototips. 4.3. attēlā redzams iekārtas prototips, tā izmērs ir 50 mm × 110 mm × 8 mm. Prototips tika uzstādīts vieglajā pasažieru automašīnā un testēts vairāku nedēļu garumā. Tas darbojās bez jebkādām problēmām. Ar vienu superkondensatoru baterijas uzlādi pietika 2–4 startēšanas reizēm, taču testi tika veikti siltā laikā un automašīnai, kas aprīkota ar benzīna motoru. Superkondensatoru baterijas enerģija ir pārāk maza, lai piestartētu jebkuru iekšdedzes dzinēju jebkādos apstākļos. Šāda moduļa ietilpības pietiek, lai piestartētu mazlitrāžas benzīna dzinējus. 4.4. attēlā ir redzams spriegums uz superkondensatoru baterijas un strāva startēšanas procesa laikā. Elektrisko iekārtu barošanas spriegums saglabājas konstants un vienāds ar svina-skābes akumulatora spriegumu.

4.3. att. Iekšdedzes dzinēja startēšanas sistēmas prototips; ierīce instalēta vieglajā automobilī; sprieguma un strāvas mērīšana startēšanas procesa laikā.

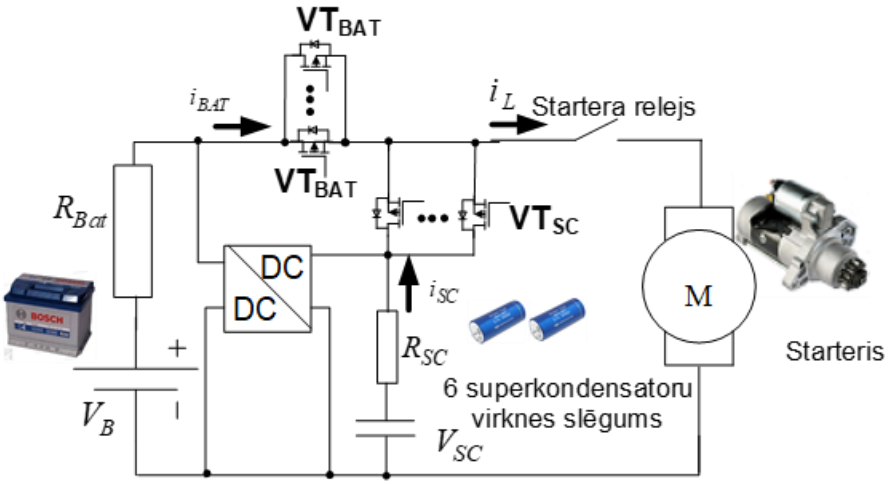


4.4. att. Spriegums uz superkondensatoru baterijas un strāva startēšanas laikā.

4.4. attēlā ir redzamā oscilogramma rāda, ka spriegums uz superkondensatora baterijas krīt diezgan strauji, kas parāda, ka tā enerģija strauji izlādējas, tāpēc sliktākos apstākļos – zema apkārtējās vides temperatūra, slikts mašīnas tehniskais stāvoklis u. c. – spriegums nokritīs vēl straujāk, un mašīnas piestartēšana nebūs iespējama. Uzstādot superkondensatorus ar lielāku enerģijas ietilpību, ievērojami palielinās iekārtas izmaksas un tilpums, tāpēc tālāk tiks piedāvāts risinājums, kas pieslēdz superkondensatoru tikai vajadzīgajā momentā.

4.3. Uz superkondensatoriem balstīta modernizācijas iekārta ar aktīvu vadību tradicionālās iekšdedzes dzinēja startēšanas sistēmas uzlabošanai

MOSFET tranzistori, kas paredzēti zemiem spriegumiem, ir salīdzinoši lēti un tiem ir zema ieslēgta stāvokļa pretestība, tāpēc to paralēlu slēgumu var izmantot, lai pieslēgtu superkondensatoru iekšdedzes dzinēja startēšanas brīdī. Startēšanas process aizņem dažas sekundes, tāpēc tranzistori nepaspēj uzkarst, kaut arī caur tiem plūst liela strāva. Pusvadītāju slēdža izmantošana mehāniskā releja vietā ļauj paildzināt tā kalpošanas laiku, jo mehāniskie kontakti nodilst ātrāk. Ir nepieciešams ierobežot strāvu no ģeneratora, tāpēc ieteicams izmantot divvirzienu slēdzi, kas nozīmē, ka ir nepieciešams saslēgt divus tranzistorus virknē, lai bloķētu strāvas plūšanu caur diodi. Tas rada palielinātus zudumus un aizņem vairāk vietas, tāpēc ir piedāvāts izmantot shēmu, kas ir parādīta 4.5. att. Šāds risinājums ļauj regulēt enerģijas plūsmas no abiem enerģijas uzkrājējiem, un, izmantojot šādu risinājumu, strāvas pīķis no svina-skābes akumulatora var tikt veiksmīgi ierobežots. Taču, pieslēdzot tikai superkondensatoru, sākotnējais strāvas pīķis būs vēl lielāks, jo superkondensatora virknes pretestība ir mazāka.

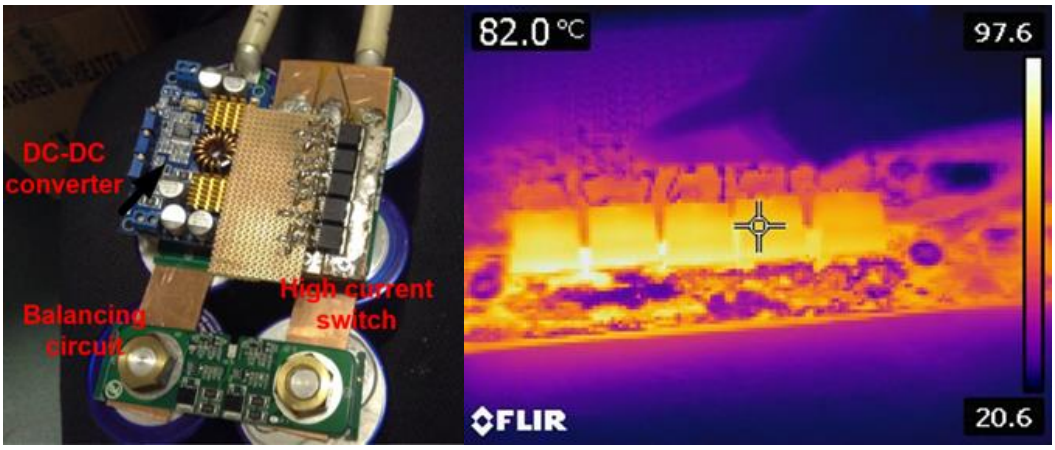


4.5. att. Iekšdedzes dzinēja startēšanas sistēma ar superkondensatoriem un diviem aktīvajiem slēdžiem.

Superkondensatori tiek uzlādēti ar nelielas jaudas paaugstinoši pazeminošo līdzsprieguma pārveidotāju, kā tas jau aprakstīts iepriekš. Startēšanas procesa laikā enerģija daļēji tiek ņemta no svina-skābes akumulatora un superkondensatoriem, rezultātā svina-skābes akumulators netiek bojāts ar augstu īsslēguma strāvu startēšanas pirmajā brīdī, palielinot tā ekspluatācijas laiku. Šādas shēmas gadījumā transportlīdzekļa barošanas sprieguma iekritums startēšanas brīdī ir ar mazāku iekritumu, jo superkondensatora iekšējā pretestība ir mazāka, un tas var tikt uzlādēts līdz 15 V. Šāda risinājuma papildu priekšrocība ir vienkāršs iekārtas pievienojums paralēli svina-skābes akumulatoram un iespēja ierobežot ģeneratora slodzi pirmajā brīdī pēc tam, kad dzinējs ir iedarbināts.

Rakstā [55] ir piedāvāts ierobežot startēšanas strāvas pīķi ar *MOSFET* tranzistoru lineārajā režīmā. Startēšanas process kļūst nedaudz garāks, bet arī akumulatora kalpošanas laiks tiek paildzināts. Šādu risinājumu var izmantot arī 4.5. att. shēmai, kurā akumulatora slēdzis VT_{BAT} var tikt pieslēgts vēlāk, bet superkondensatora slēdzis VT_{SC} var tikt ieslēgts lineārajā režīmā. Šis režīms radīs nedaudz lielāku tranzistoru uzkaršanu, tāpēc jānodrošina laba tranzistoru dzesēšana. Šāds risinājums ļauj pilnībā kontrolēt abas enerģijas plūsmas, ir iespēja atslēgt superkondensatoru atkarībā no tā izlādes līmeņa.

Eksperimentālais prototips tika izveidots no sešiem *SAMWHA DH5U128W60074THT* 1200 F superkondensatoriem, kuru iekšējā pretestība ir vienāda ar 0,5 mΩ. Neizolētais paaugstinoši–pazeminošais pārveidotājs tika izmantots, lai uzlādētu superkondensatorus. Pasīvā spriegumu balansēšanas shēma tika izmantota, lai izlīdzinātu spriegumus starp superkondensatoriem. Eksperimentālais prototips ir redzams 4.6. att.



4.6. att. Eksperimentā iekārta startēšanas procesu uzlabošanai ar superkondensatoriem un aktīvi vadāmiem slēdžiem un tranzistoru termālā bilde.

4.6. attēlā ir redzama tranzistoru temperatūra standarta startēšanas cikla laikā, šajā gadījumā neliela vara plate tiek izmantota kā radiators, tāpēc temperatūra sasniedz gandrīz 90°. Palielinot radiatora izmērus, tā termālā inerce palielināsies, un tik īsā laikā tas nepaspēs uzsilt līdz kritiskai temperatūrai. Šādu risinājumu īpaši izdevīgi ir izmantot teritorijās ar biežu zemu temperatūru, jo, pazeminoties temperatūrai, superkondensatoru parametri nekļūst sliktāki. Šādas iekārtas izmantošana ļauj palielināt svina-skābes akumulatora kalpošanas laiku un paildzināt startera motora kalpošanas laiku. No sprieguma pulsācijām startēšanas laikā var tikt noteikta aptuvenā dzinēja griešanās frekvence. Ja šo ātrumu analizē, tad ir iespējams detektēt gadījumu, kad griešanās ātrums vairs nepalielinās vai samazinās (svina-skābes baterijas iekšējā pretestība ir pārāk liela vai arī akumulatora spriegums ir pārāk zems, lai varētu piestartēt dzinēju), šādā gadījumā var tikt pieslēgts superkondensators, un enerģija plūstu no abiem avotiem, ļaujot veiksmīgi piestartēt dzinēju.

5. Modernizācijas iekārtas un energoelektronikas pārveidotāja izstrāde ar frekvenču pārveidotāju vadāmas elektriskās piedziņas energoefektivitātes uzlabošanai

Pēdējos gados enerģijas uzkrājēju integrēšana, izmantojot kopēju līdzstrāvas kopni, ar divvirzienu energoelektronisko pārveidotāju palīdzību ieņem ļoti nozīmīgu lomu atjaunojamās enerģētikas sistēmās – vēja enerģētikā [139], hidroenerģētikā [56] un elektrības ražošanā ar saules baterijām [57], kā arī reģeneratīvās bremzēšanas sistēmās [58]. Gan vēja plūsmai, gan saules gaismai ir varbūtīgs raksturs, tāpēc enerģijas uzkrājēji ir nākotnes enerģētikas, kurā tiks izmantoti daudz dažādi atjaunojamās enerģētikas ģenerācijas avoti, būtiska sastāvdaļa. Enerģijas uzkrājēja sistēmas būtiska sastāvdaļa ir līdzsprieguma pārveidotājs, kas savieno superkondensatoru vai litija-jonu bateriju ar līdzstrāvas kopni un vada enerģijas plūsmu. Šādam pārveidotājam jānodrošina divvirzienu jaudas plūsmu un elastīga vadība visos darba režīmos.

5.1. Augstas veiktspējas neizolētā pārveidotāja izstrāde rekuperatīvās enerģijas uzkrāšanas lietojumam

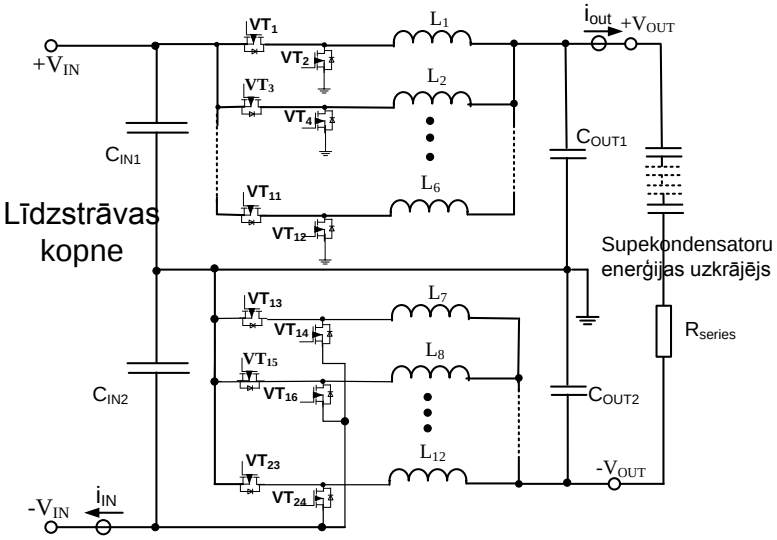
5.1.1. Līdzstrāvas pārveidotāja topoloģijas un galveno elementu izvēle enerģijas uzkrājēja lietojumam

Spēka elektronikas pusvadītāju slēdžu parametri tiek uzlaboti, un cena samazinās, aizvien plašāku lietojumu gūst silīcija-karbīda un gallija-nitrīda pusvadītāju elementi ar labākiem parametriem. Savukārt magnētisko materiālu un pasīvo elementu jomā progress ir daudz lēnāks, arī cena nesamazinās vai pat pieaug. Tāpēc tendence ir izmantot vairāk pusvadītāju, samazinot pasīvo elementu tilpumu. Viena no iespējām ir palielināt pārveidotāja darba frekvenci, taču šajā gadījumā jāizmanto speciāli magnētiskie un pasīvie elementi, kā arī jaunā tipa pusvadītāji, kas joprojām ir salīdzinoši dārgi. Cits variants ir samazināt nepieciešamo droseļu induktivitāti, izmantojot speciālu pārveidotāja topoloģiju, kā arī izmantot pārtrauktās strāvas režīmu droselē. Šāda tipa risinājums tiks apskatīts tālāk. Vairākfāžu līdzsprieguma pārveidotāju topoloģija aizvien biežāk tiek lietota pārveidotājos, kas paredzēti lielai jaudai. Šādas topoloģijas priekšrocības: var tikt samazināti zudumi; ieejas un izejas filtra cena un izmērs; uzlabota pārveidotāja dinamika un jauda.

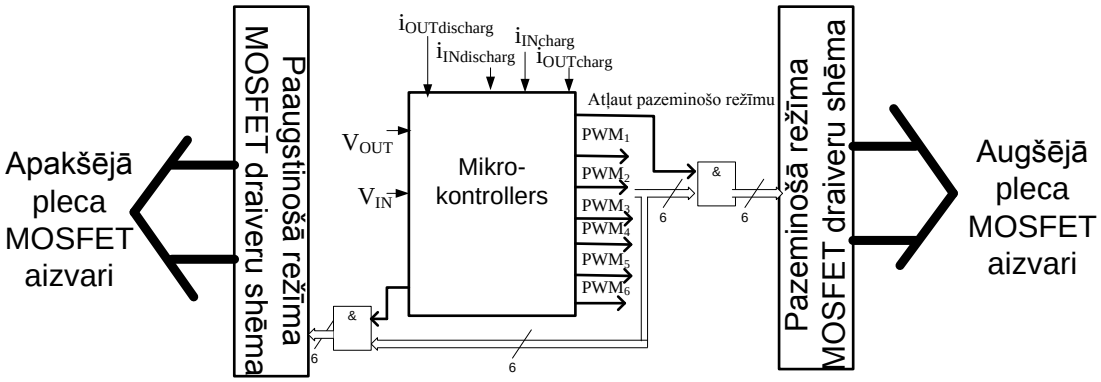
Vairākfāžu shēma ar fāzē nobīdītu impulsu vadību (*interleaving control*) pēdējā laikā dažāda lietojuma pārveidotājos tiek izmantota diezgan plaši. Šādas topoloģijas priekšrocība ir izejas un ieejas strāvas pulsāciju samazināšanas iespēja, pārveidotāja jaudas blīvuma palielināšana, iespēja nodrošināt labāku elementu dzesēšanu un citas priekšrocības, kas jau tika apskatītas iepriekšējā nodaļā. Pārtrauktās strāvas režīmā (*DCM – discontinuous conduction mode*) diodes pašatjaunošanās zudumi ir mazi, kā arī var tikt samazināti tranzistoru komutācijas zudumi. Šī iemesla dēļ diodes vietā var tikt izmantota *MOSFET* tranzistora iekšējā diode, kas parastajā lietojumā netiek izmantota, jo tā atveras lēni, radot lielus aktīvā režīma zudumus. Salīdzinot *DCM* ar nemainīgu darba frekvenci [59], [60] ar *DCM* ar mainīgu darba frekvenci, otrajā gadījumā ir mazākas strāvas augstākās harmoniskās un mazāka maksimālās strāvas vērtība droselē, kas rezultātā rada mazākus komutācijas un vadāmības zudumus [61].

5.1. att. ir redzama divvirzienu pārveidotāja shēma, kas sastāv no sešām fāzēm un nodrošina divvirzienu enerģijas plūsmu. Ja ir izvēlēts paaugstinošais režīms, tad apakšējā pleca *MOSFET*

tranzistori (ar pāra numuru: VT_2, VT_4, ..., VT_{24}) tiek vadīti ar impulsu platumu modulāciju, bet augšējā pleca tranzistori (ar nepāra numuru: VT_1, VT_3, ..., VT_{23}) paliek izslēgtā stāvoklī. Savukārt pazeminošajā režīmā apakšējā pleca *MOSFET* tranzistori (ar pāra numuru: VT_2, VT_4, ..., VT_{24}) paliek izslēgtā stāvoklī, bet augšējā pleca tranzistori (ar nepāra numuru: VT_1, VT_3, ..., VT_{23}) tiek vadīti ar impulsu platumu modulāciju (5.2. att.). *MOSFET* tranzistora iebūvētā diode tiek izmantota, ja tranzistors atrodas izslēgtā stāvoklī. Pārliecinoties, ka pārveidotājs darbojas droši visos režīmos, var vadīt *MOSFET* tranzistorus tā, ka tie imitē diodes darbību – izmantot tā saucamo sinhrono taisngriešanu. Šai gadījumā šī iespēja netika izmantota, jo galvenā uzmanība ir pievērsta pārveidotāja drošai darbībai. Izmantojot uz transformatoriem bāzētu *MOSFET* tranzistoru vadību, situācija, kad tranzistora aizpildījums ir tuvs 100 % nav iespējama, tāpēc, izmantojot šāda tipa draiverus, tiek novērsta kļūdaina pāreja no paaugstinošā režīma uz pazeminošo režīmu. Lai vadītu pārveidotāju, tiek mērītas sešas analogās vērtības un pārveidotas digitālos signālos (5.2. att.) [62].



5.1. att. Izvēlētā līdzsprieguma pārveidotāja shēma.



5.2. att. Mikrokontrollera ieejas un izejas signāli.

Elektronikas komponenšu tirgū ir pieejami *MOSFET* tranzistori ar maksimālo spriegumu 800 V, kā arī pieejami silīcija-karbīda tranzistori ar augstāku caursites spriegumu, bet to cena ir augsta. Konkrēto pārveidotāju var izmantot daudzos dažādos lietojumos, šajā darbā kā lietojuma piemērs tiks apskatīta tā izmantošana kravas liftu, celtņu vai vilces piedziņas bremzēšanas enerģijas atgūšanai maiņstrāvas piedziņā. Tipisks trīsfāžu maiņstrāvas līdzsprieguma kopnes maksimālais spriegums ir 750 V. Šādam spriegumam 800 V *MOSFET* tranzistori nav piemēroti. Šajā gadījumā

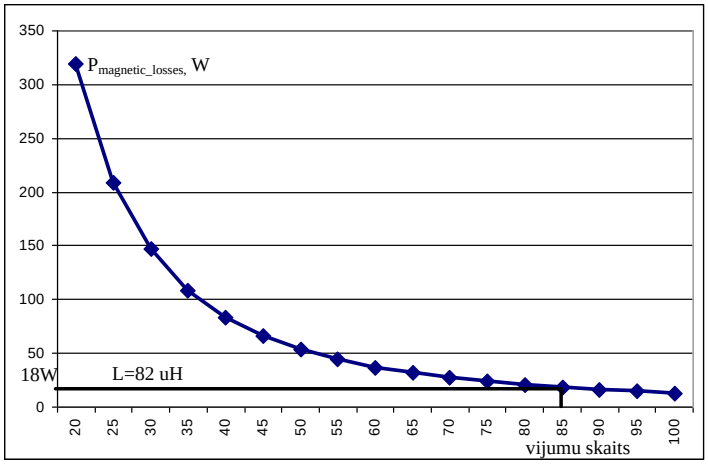
tiek izmantota pārveidotāja topoloģija, kurā tiek lietoti kapacitīvie sprieguma dalītāji, kas nodrošina spriegumu, kas ir vienāds ar pusi no kopējā sprieguma, katrā no pleciem. Tas ļauj izmantot lētākus tranzistorus ar labākiem parametriem, šajā gadījumā tika izvēlēti *MOSFET* tranzistori *SPW52N50C3* ar maksimālo spriegumu 560 V, un tiem ir ievērojami labāki parametri nekā augstāka sprieguma *MOSFET* tranzistoriem vai *IGBT* tranzistoriem. Vairāklīmeņu pārveidotāja topoloģiju efektivitātes uzlabošanai aizvien plašāk izmanto arī zema sprieguma lietojumos, piemēram, [63]–[65] ir parādīts, ka, izmantojot šādu struktūru, ir iespējams palielināt pārveidotāja efektivitāti. Shēmā tika veiktas simulācijas un praktiski eksperimenti, kas parāda, ka konkrētajā gadījumā pārveidotāja ieejas spriegumi pašbalansējas, tāpēc nav nepieciešama speciāla shēma vai vadības algoritms, tomēr drošības nolūkos ir paredzēts komparators, kas sprieguma pieaugšanas gadījumā padod signālu mikrokontrolleram, un vadības signāli uz tranzistoriem vairs netiek padoti. Tāpat tiek izmantoti uz transformatoru bāzēti draiveri ar diviem sekundārajiem tinumiem, kas ļauj padot vienādu signālu uz abiem pleciem, tāpēc tiek novērsta pārāk liela disbalansa iespēja.

Caur droselēm pārtrauktās strāvas režīmā plūst lielāka pīķa strāva, taču ir nepieciešama drosele ar daudz mazāku induktivitāti. Ja tiek izmantota ferīta serde, tad ir nepieciešama salīdzinoši liela gaisa sprauga, lai izvairītos no magnētserdes piesātinājuma. Ja gaisa sprauga ir liela, tad magnētiskā plūsma izliecas ārpus gaisa spraugas un izplūst caur vijumiem. kas izvietoti tuvāk tai – šo efektu sauc par izplūšanas efektu (*fringing effect*). Šī iemesla dēļ tika izvēlētas dzelzs pulvera serdes toroīda formā *T300-2* ar izkliedētu gaisa spraugu, kaut gan ir iespējams izmantot arī ferīta serdes ar konstrukciju, kas novērš izplūšanas efektu vai arī ar vairākām gaisa spraugām. Daži piemēri ir apskatāmi [60] un [66]. Magnētiskā indukcija (B) un magnētiskie zudumi ($P_{\text{magnetic_loss}}$) [67] var tikt aprēķināti šādi:

$$B = \frac{V_{\text{average}}}{4fSw}, \tag{5.1.}$$

$$P_{\text{magnetic_loss}} = \frac{f}{\frac{4\cdot 10^{9}}{B^{3}} + \frac{3\cdot 10^{8}}{B^{2,3}} + \frac{2,7\cdot 10^{6}}{B^{1,65}}} + 8\cdot 10^{-15} f^{2} B^{2}, \tag{5.2.}$$

kur f – pārveidotāja darba frekvence; S – magnētiskās serdes šķērsgriezuma laukums; w – droseles vijumu skaits.

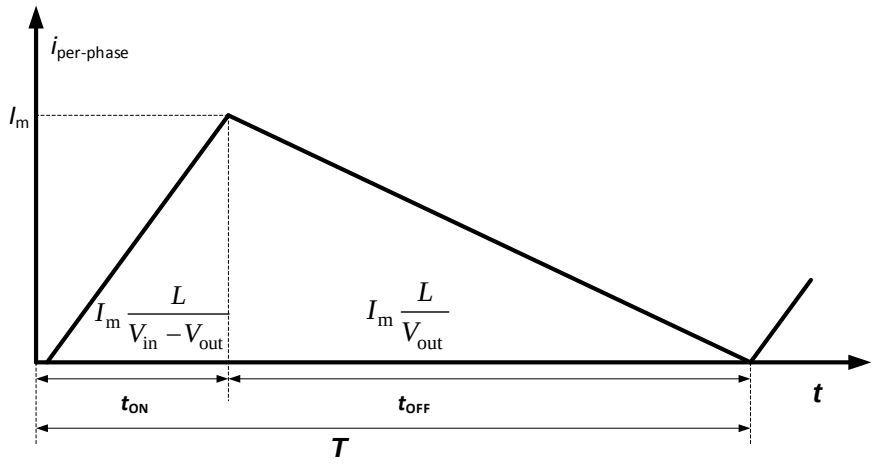


5.3. att. Vijumu skaita izvēle, izveidojot droseli.

Izmantojot 5.2. izteiksmi, ir iespējams iegūt magnētisko zudumu atkarību no vijumu skaita, šī sakarība parādīta grafikā, kas ir redzams 5.3. att. No šī grafika tika izvēlēts mazākais vijumu skaits, kas ļauj samazināt zudumus magnētiskajā serdē. Izveidotās droseles induktivitāte ir vienāda ar 82 μH.

5.1.2. Pārveidotāja vadības algoritms

Pārtrauktās strāvas režīmā katras fāzes strāva perioda beigās sasniedz nulles vērtību, tāpēc nākamā periodā sākumā strāva sākas no nulles un nav atkarīga no vērtības, kāda bija iepriekšējā periodā. Tas ievērojami uzlabo pārveidotāja dinamiku un vienkāršo vadības sistēmu, jo pārtrauktās strāvas režīmā pārveidotājs ar sprieguma ieeju un izeju pat regulēšanas sistēmā bez atgriezeniskās saites ir stabils, savukārt nepārtrauktās strāvas režīmā ir nepieciešama atgriezeniskā saite un strāvas sensors.



5.4. att. Strāva droselē pazeminošajā režīmā.

Robežrežīmā (*boundary conduction mode*) pīķa strāvas vērtība droselē ir divas reizes lielāka par strāvas vidējo vērtību, tāpēc šim režīmam ir pārtrauktā strāvas režīma priekšrocības, bet tajā pašā laikā strāvas pīķa vērtība nav ļoti liela, kas ļauj būtiski nepalielināt zudumus pusvadītājos. Tāpēc pārveidotāja vadība tiks realizēta tādā veidā, lai nodrošinātu darbību pēc iespējas tuvāk robežrežīmam.

Summārā izejas strāva I_{out} daudzfāžu pārveidotāja gadījumā ir visu fāžu strāvu summa. Robežrežīmā maksimālā strāvas vērtība droselē var tikt aprēķināta šādi:

$$I_m = \frac{2I_{out}}{n}. \tag{5.3.}$$

Lai pie mainīgas slodzes nodrošinātu darbību robežrežīmā, ir nepieciešams mainīt ne tikai aizpildījumu, bet arī darba frekvenci. Zinot droseles induktivitāti L, kā arī nomērītās ieejas sprieguma (V_{in}) un izejas sprieguma (V_{out}) vērtības, var izrēķināt nepieciešamo tranzistora ieslēgtā stāvokļa laiku (t_i) un izslēgtā stāvokļa laiku (t_p), lai nodrošinātu darbu robežrežīmā (5.4. att.). Pazeminošajam režīmam šie laiki var tikt aprēķināti šādi:

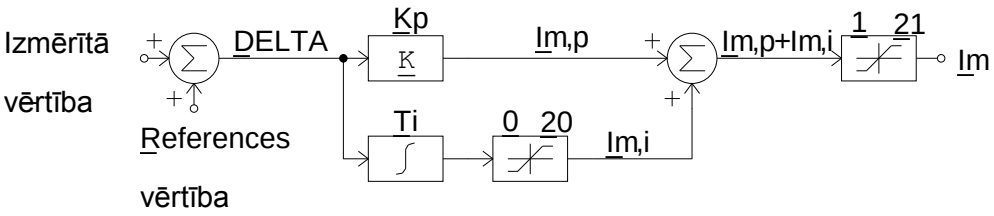
$$t_i = I_m \frac{L}{V_{in} - V_{out}}, \tag{5.4.}$$

$$t_p = I_m \frac{L}{V_{out}}. \tag{5.5.}$$

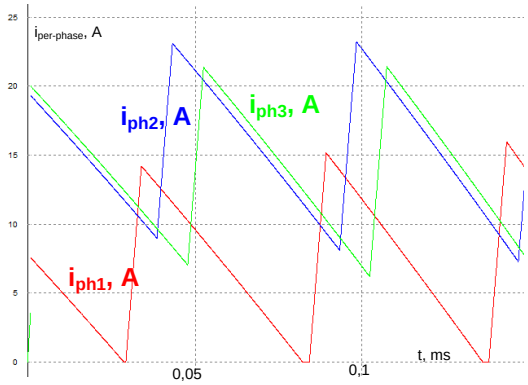
Mainīgais I_m var tikt izmantots ne tikai, lai iegūtu vēlamo izejas strāvu, bet arī – lai kontrolētu ieejas strāvu vai spriegumu. Tas var tikt izdarīts, ja parametru I_m aprēķina pēc proporcionāli integrālā algoritma, kā tas ir parādīts 5.5. att. Izmantojot digitālo vadības sistēmu ar diskrētām nolasēm, I_m var tikt aprēķināts šādi:

$$I_m(k) = DELTA(k)K_P + I_{m,i}(k-1) + DELTA(k)\frac{t_{sample}}{T_i}, \tag{5.6.}$$

kur *DELTA* – kļūda starp vēlamo un esošo nolases vērtību; t_{sample} – nolases laiks; T_i – integrēšanas koeficients; K_P – proporcionālais koeficients. Tāpat ir nepieciešams I_m ierobežot, lai tas nepārsniegtu maksimāli pieļaujamo vērtību. Katra perioda beigās strāva sasniedz nulli, tāpēc nav nepieciešams izmantot strāvas sensoru katrā fāzē.

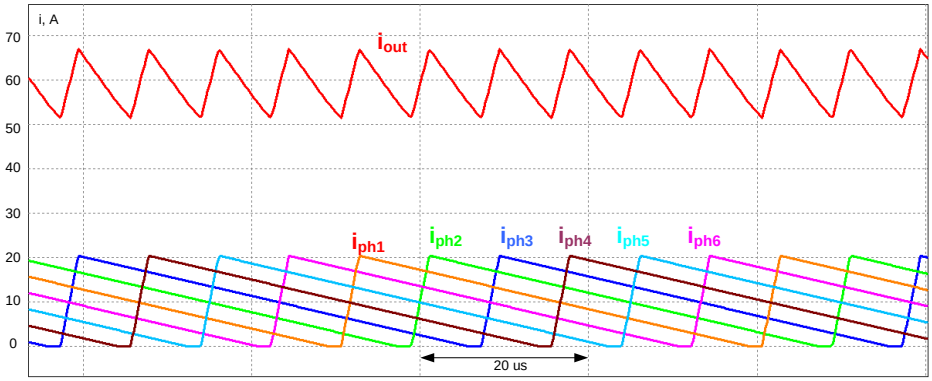


5.5. att. I_m aprēķināšana, izmantojot PI regulatoru.

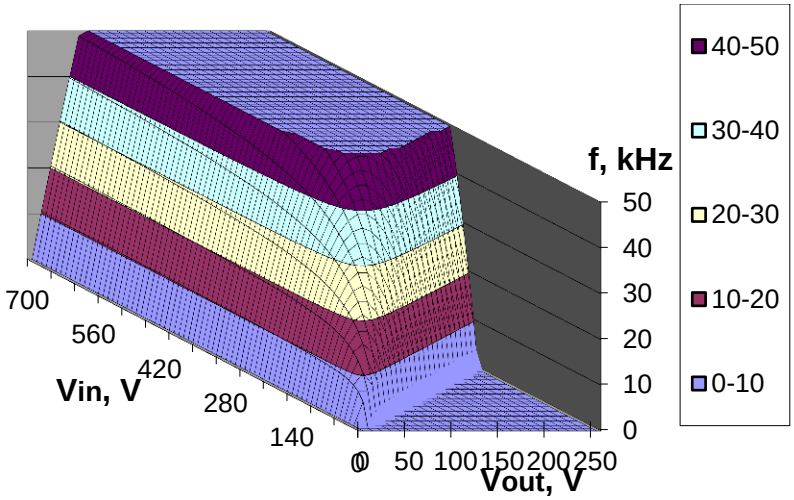


5.6. att. Strāvu disbalanss robežrežīmā nevienādu droseļu induktivitāšu dēļ.

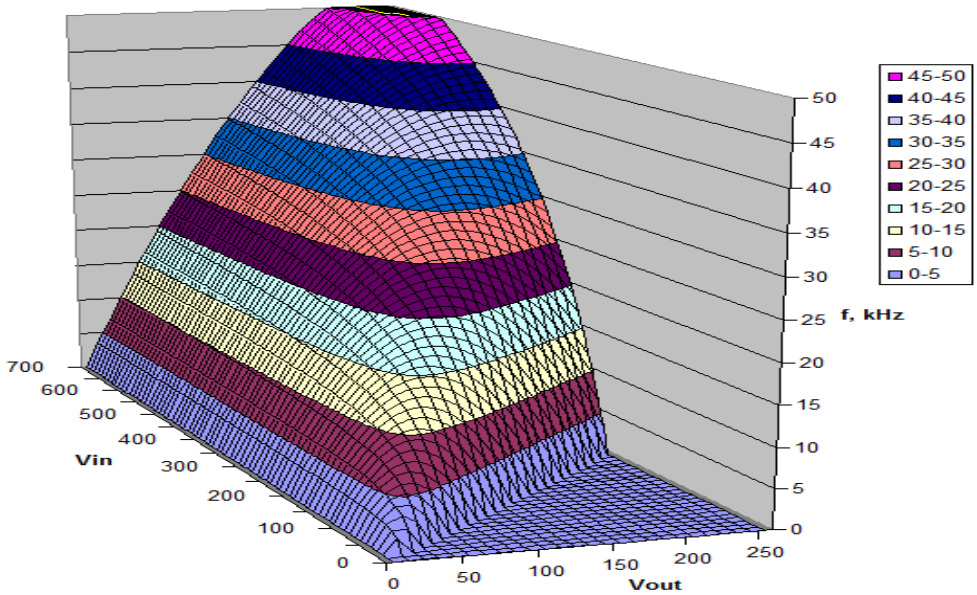
Ir ļoti grūti izveidot droseles ar ideāli vienādiem parametriem. Šī iemesla dēļ fāžu strāvas kļūs nevienādas – daļā no fāzēm var iestāties nepārtrauktās strāvas režīms (5.6. att.), kas izraisītu aizvien lielāku strāvas pieaugumu un pusvadītāju, kā arī droseles pārkaršanas. Tāpēc šāds režīms ir nevēlams, un tas ir jānovērš, un to var panākt, mākslīgi palielinot periodu. Mākslīgi palielināt periodu var tādā veidā, ka 5.4. un 5.5. izteiksmē izmanto induktivitātes vērtību, kas pareizināta ar koeficientu. Tādā veidā tiek nodrošināta nevēlama pāreja no robežrežīma nepārtrauktās strāvas režīmā. Rezultāti ir redzami 5.7. att., pārveidotājs darbojas *DCM* režīmā, taču pārtrauktās strāvas stāvokļa laiks ir īss. Kopējā strāva tiek regulēta, izmantojot atgriezenisko saiti, tāpēc tas nerada nekādu kļūdu regulējamajā parametrā.



5.7. att. Pārveidotāja fāzes strāvas un izejas strāva.



5.8. att. Darba frekvence, kad I_m = 5 A.



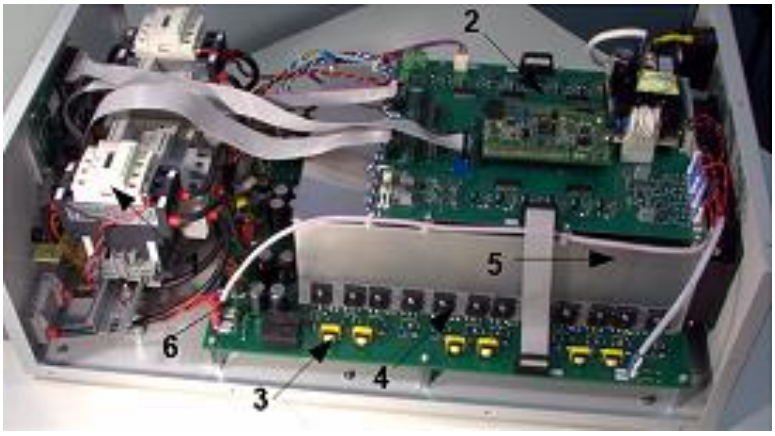
5.9. att. Darba frekvence, kad I_m = 20 A.

No 5.8. un 5.9. attēlā redzamā var secināt to, ka pārveidotāja darba frekvence ir ļoti augsta pie mazām I_m vērtībām. Tas rada lielus komutācijas zudumus pusvadītājos, kā arī aprēķiniem nepieciešamais laiks ir pārlieku mazs, jo jaunu vērtību aprēķināšana ir jāveic katrā slēgšanās

periodā. Tāpēc mazas slodzes gadījumā I_m vērtību var palielināt, samazinot darba frekvenci un strādājot pārtrauktās strāvas režīmā. To var izdarīt, ierobežojot perioda vērtību. Tas rada starpības palielināšanos starp vēlamo vērtību un regulējamo lielumu, kā rezultātā palielināsies pēc PI algoritma aprēķinātā I_m vērtība, tiks samazināts impulsa laiks, savukārt impulsa periods paliks nemainīgs. Pieaugs strāvas pīķa vērtība, bet darba frekvence paliks nemainīga un vienāda ar 50 kHz. Tas nozīmē, ka pārveidotājs darbosies dziļākā *DCM* režīmā. Pārveidotāja darba frekvence pie dažām I_m vērtībām ir redzama 5.8. att. un 5.9. att. Šādā veidā tiek samazināti zudumi pie mazām slodzes vērtībām.

5.1.3. Pārveidotāja eksperimentālais prototips

Iepriekš aprakstītā vadība tika izmantota 5.10. att. redzamā sešfāžu līdzsprieguma pārveidotāja prototipa vadībai, sīkāk vadības principi ir aprakstīti [68]. *MOSFET* tranzistori (4) novietoti pie radiatora (5), vadības plate (2) izveidota, izmantojot mikrokontrolleru *STM32F407VGT6*, tranzistori tiek vadīti, izmantojot uz impulsu transformatoriem bāzētu shēmu (3). Pulsāciju samazināšanai izmantoti divi 47 µF elektrolītiskie kondensatori (6). Pārveidotājs tiek pieslēgts gan pie līdzsprieguma kopnes, gan pie uzkrājēja pēc filtra kondensatoru uzlādes caur priekšuzlādes rezistoru, izmantojot kontaktorus (1).



5.10. att. Vairākfāžu līdzsprieguma energoelektroniskā pārveidotāja praktiskā realizācija.

Ja tiek izmantots atbilstošs vadības algoritms, tad šāda pārveidotāja lietojums var būt ļoti plašs. Konkrētam gadījumam ir paredzēts pārveidotāju izmantot superkondensatoriem un litija-jonu akumulatoriem bremzēšanas enerģijas uzkrāšanai, kad tiek kontrolēts līdzsprieguma kopnes spriegums, un pēc tam izlādei ar iestatāmu konkrētu strāvas vērtību. Tranzistoru slēgšanās process rada elektromagnētiskos traucējumus, kas var ietekmēt analogo nolašu precizitāti. [69] ir apskatīts speciāls algoritms nolašu veikšanai vietās, kur nenotiek komutācijas procesi.

5.1.4. Pārveidotāja testēšanas stenda izveide un eksperimentālie rezultāti

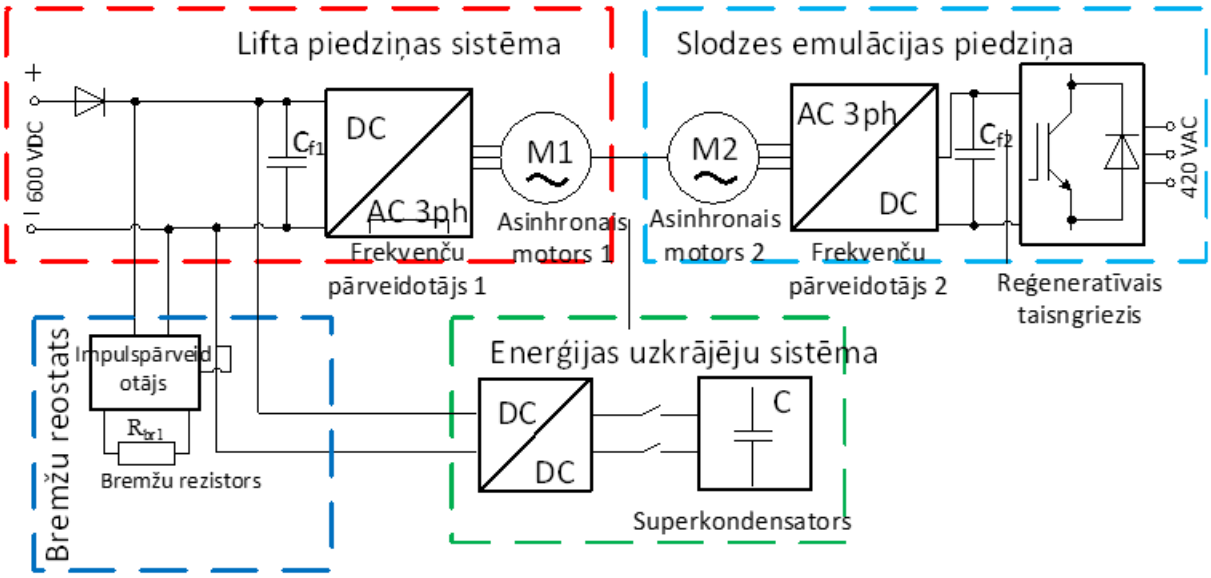
Liftiem tiek izvirzītas paaugstinātas drošības prasības, tāpēc testēšanu ir vēlams veikt laboratorijas apstākļos, un tāpēc tika izveidots laboratorijas testa stends. Testa blokshēma ir redzama 5.11. attēlā. Tas sastāv no diviem asinhronajiem motoriem, kuru vadībai tiek izmantoti frekvenču pārveidotāji ar tiešo momenta vadību (*DTC*), šī iemesla dēļ stenda vadību var izveidot bez momenta sensora, kas ir nepieciešams tikai gadījumā, ja vajadzīga daudz precīzāka vadība.

Abi motori ir mehāniski sajūgti kopā, viens no tiem imitē lifta motoru, otrs tiek vadīts tā, lai tiktu emulēta reāla lifta slodze. Motora M1 frekvenču pārveidotājam tiek uzdota ātruma reference,

slodzes emulējošajam motoram M2 tiek uzdota momenta reference. Motoru M1 un M2 nominālā jauda un nominālais ātrums ir šādi: $P_{nom,bench}$ = 7,5 kW un n = 1440 apgr^{-1}. Motors M2 ir aprīkots ar reģeneratīvo frekvenču pārveidotāju, kas spēj nodot enerģiju atpakaļ tīklā. Motoram M1 darbojoties dzinēja režīmā, visa ģenerētā motora M2 elektroenerģija tiek nodota maiņstrāvas tīklā, tāpēc stends var tikt slogots ar nominālo jaudu, drošībai ir uzstādīts papildu bremzēšanas rezistors ar impulspārveidotāju, kas ierobežo spriegumu uz līdzstrāvas kopnes.

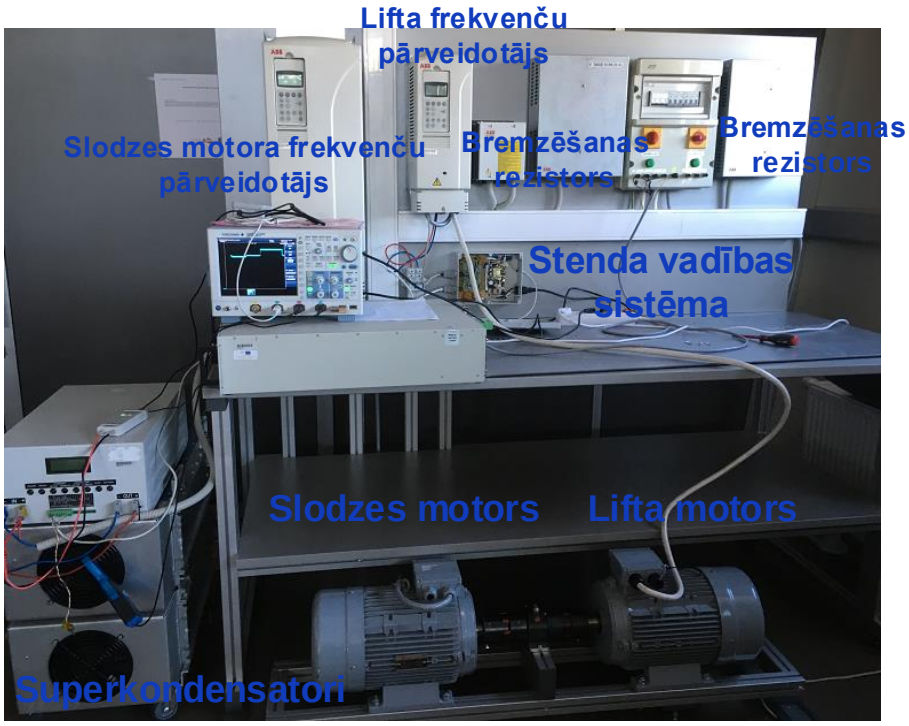
Enerģijas uzkrājējsistēma, kas ietver līdzstrāvas divvirzienu pārveidotāju un vairāku virknē slēgtu superkondensatoru moduli, tiek pieslēgta pie līdzstrāvas kopnes, kuras spriegums var būt no 500 līdz 700 V. Pārveidotājs darbojas pazeminošajā režīmā, kad enerģija tiek uzkrāta superkondensatorā, un paaugstinošajā režīmā, kad tā tiek nodota atpakaļ piedziņai. Stenda modelis tika izveidots *Matlab/Simulink* datorprogrammā, tajā tika izmantots līdzstrāvas pārveidotāja analītiskais modelis, kas aprakstīts [70]. Kā enerģijas uzkrājējs tiek izmantoti divi virknē slēgti 125 V superkondensatoru moduļi ar kopējo maksimālo spriegumu 250 V. 5.11. attēlā nav parādīts trīsfāžu taisngriezis, kas ir integrēts frekvenču pārveidotājā, bet attēlā parādīta līdzstrāvas kopne.

Režīmā, kad lifta motors bremzē, bremzēšanas enerģija tiek izkliedēta bremžu rezistorā R_{br1} gadījumā, ja enerģijas uzkrājējs ir pilnībā uzlādēts. Šajā režīmā līdzsprieguma pārveidotājs regulē līdzstrāvas kopnes spriegumu, un uzdotais sprieguma līmenis ir zemāks par sprieguma ierobežotāja slieksni. Šajā režīmā enerģija tiek uzkrāta superkondensatorā.

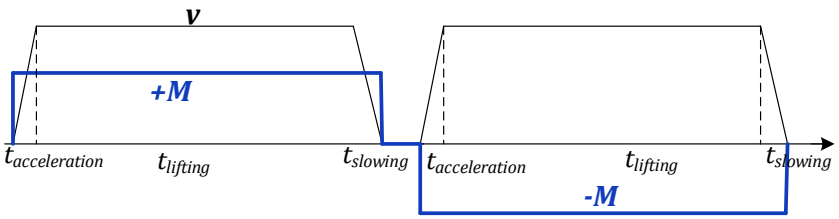


5.11. att. Stenda blokdiagramma.

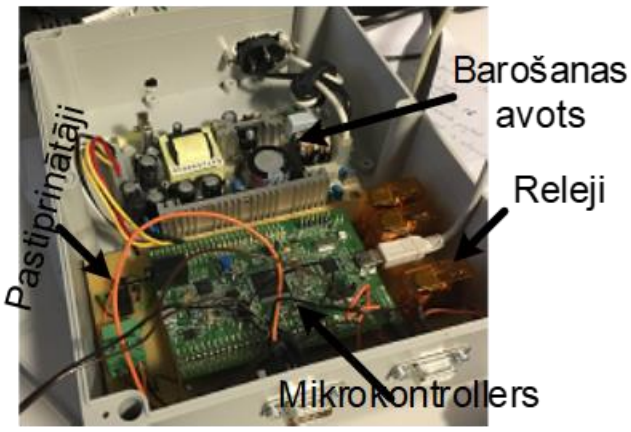
5.12. attēlā ir redzama stenda praktiskā realizācija, šajā gadījumā tika izmantoti *ABB* frekvenču pārveidotāji un sprieguma ierobežotājshēmas ar bremžu rezistoriem, tika izmantoti *CEO* firmas asinhronie motori. Kā enerģijas uzkrājējs tika izmantoti divi superkondensatoru moduļi *Maxwell BDO-0063-P125-B01* ar nominālo kapacitāti C = 63 F un nominālo spriegumu $V_{sc,nom}$ = 125 V. Lai testētu līdzsprieguma pārveidotāju bremzēšanas enerģijas atgūšanai, tika izstrādāta stenda vadības sistēma.



5.12. att. Stenda lifta darbības emulācijai praktiskā realizācija.



5.13. att. References signāli, kas tiek padoti uz frekvenču pārveidotājiem.

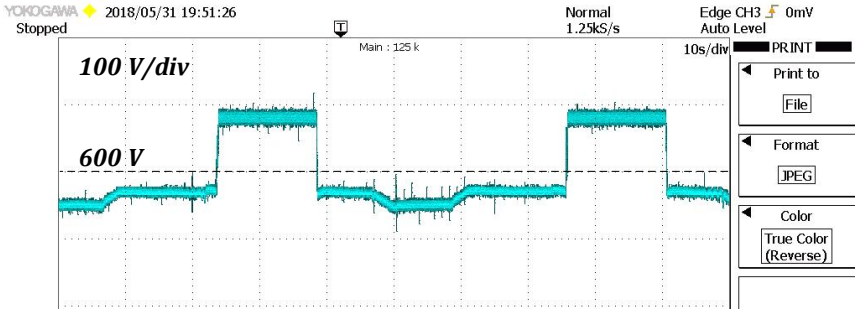


5.14. att. Stenda vadības sistēmas praktiskā realizācija.

Lai stends darbotos un atkārtotu enerģētiskos procesus, kādi notiek lifta elektriskajā piedziņā, ir nepieciešams izveidot stenda vadību. 5.13. attēlā ir parādīti signāli, kas tiek padoti uz frekvenču pārveidotāja analogajām ieejām kā references signāli. Lifta motora frekvenču pārveidotājs tiek vadīts, padodot tam ātruma references signālu (melnā līkne 5.13. att.). Lifta motors paātrinās līdz noteiktam ātrumam un tad saglabā nemainīgu ātrumu, līdz atkal samazina ātrumu līdz nullei.

Slodzes motora vadībai tiek izmantots momenta references signāls (zilā līkne 5.13. att.). Bremzēšanas režīmā vadības sistēma izveidota tā, lai nodrošinātu negatīva momenta references signālu uz slodzes motora frekvenču pārveidotāju. Cita alternatīva būtu izmantot negatīva ātruma signālu un lifta motora frekvenču pārveidotāju – tas arī vairāk atgādinātu reāla lifta procesus, taču no enerģētisko procesu viedokļa tam nav nozīmes, tāpēc izvēlēta vadība, kas nodrošina rotāciju tikai vienā virzienā.

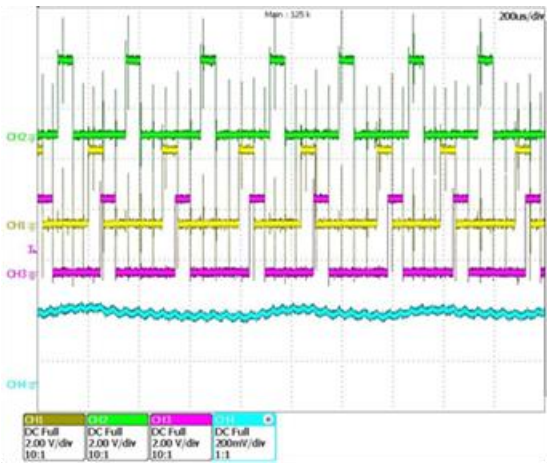
5.14. attēlā ir parādīta testēšanas stenda vadības sistēmas praktiskā realizācija. Releji ir paredzēti, lai nosūtītu *start, stop* un reversas polaritātes signālus un frekvenču pārveidotāja digitālajām ieejām. *STM32* mikrokontrollers tiek izmantots, lai ģenerētu vadības signālu, maiņstrāvas-līdzstrāvas barošanas bloks ar izejas spriegumiem +15 V, –15 V un 5 V tiek izmantots, lai nodrošinātu barošanu mikrokontrolleram, pastiprinātājiem un relejiem. Pastiprinātājs tiek izmantots, lai 0–3,3 V signālu pastiprinātu līdz 0–10 V signālam. Lai ģenerētu vadības signālus, tiek izmantotas divas mikrokontrollera digitāli analogo pārveidotāju (*DAC*) signāla izejas, un pēc tam šie signāli tiek pastiprināti.



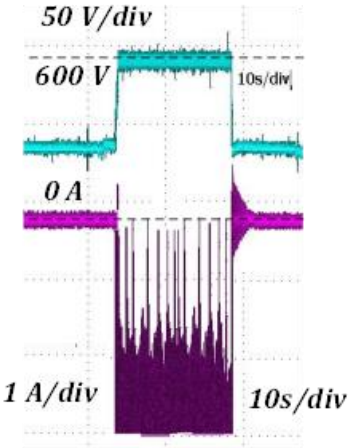
5.15. att. Līdzstrāvas kopnes spriegums stenda darbības laikā.

5.15. attēlā ir parādīts lifta motora līdzstrāvas kopnes spriegums stenda darbības cikla laikā. Motora elektriskās bremzēšanas laikā spriegums pieaug līdz sprieguma ierobežotāja nostrādes līmenim. Ja enerģijas uzkrājēja sistēma nav pieslēgta, tad šī enerģija bremzējošajā rezistorā tiek izdalīta siltuma veidā, tāpēc ilgstoši testi pie nominālās jaudas nav iespējami, jo tas var izraisīt rezistora pārkaršanu. Celšanas režīmā spriegums samazinās, bet šis sprieguma kritums var būt mazs, tāpēc ir nepieciešams sarežģītāks algoritms, lai noteiktu šo režīmu un izlādētu enerģijas uzkrājēju ar visaugstāko efektivitāti.

5.16. attēlā ir parādīti vadības signāli, kas tiek padoti uz draivera shēmu. Pārveidotāja jaunais aizpildījums, perioda vērtība un fāzes nobīde tiek aprēķināta katrā pārslēgšanās periodā, tāpēc mikrokontrollerā realizēto aprēķinu ilgums ierobežoja arī pārveidotāja augstāku pārslēgšanās frekvenci un augstākai slēgšanās frekvencei var būt nepieciešama *FPGA* izmantošana, lai samazinātu aprēķināšanas laiku. Šajā gadījumā tika izmantots 168 MHz *DSP*, un aprēķini veikti 20 μs, tāpēc vislielākā pārslēgšanās frekvence bija ierobežota līdz 50 kHz.



5.16. att. Fāzē nobīdīti vadības impulsi un strāva izlādes režīmā.



5.17. att. Līdzsprieguma kopnes spriegums un strāva uzlādes režīmā.

5.16. attēlā ir redzama strāva uzlādes režīmā, kad enerģija tiek ņemta no enerģijas uzkrājēja un nodota elektriskajai piedziņai, kā redzams, ir novērojamas nelielas svārstības, kas saistītas ar to, ka visas droseles nav identiski vienādas. To ir iespējams novērst, ja attiecīgi piekoriģē katras fāzes aizpildījuma vērtību, bet tas prasa papildu aprēķinu laiku. Šajā pētījumā tas nav darīts, jo tas neietekmē pārveidotāja stabilitāti.

5.17. attēlā ir redzama pārveidotāja darbība gadījumā, kad tiek regulēts līdzstrāvas kopnes spriegums, pārveidotājs uztur konstantu kopnes spriegumu un uzlādē superkondensatorus. Šajā gadījumā pārveidotāja darbība ir stabila, bet, palielinot jaudu, rodas elektromagnētiskie traucējumi, kas sāk nelabvēlīgi ietekmēt tā darbību, tāpēc stendā izmantotie kabeļi jānomaina uz ekranētiem kabeļiem.

Realizētais prototips ir izveidots, lai pārbaudītu galvenokārt topoloģiju un vadības algoritmu, tāpēc tā efektivitāte nav ļoti augsta – tā sasniedz aptuveni 95 %. Taču ir jāņem vērā tas, ka netika izmantota sinhronā taisngriešana, lai uzlabotu pārveidotāja drošu darbību eksperimentu laikā. Tāpat nav realizēta mīkstā tranzistoru izslēgšana, ko var realizēt ar jau esošiem risinājumiem vai lietot kādu jaunu paņēmienu. Tāpat iespējama droseļu optimizācija, izveidojot tās uz ferīta serdes, vai izmantojot citus risinājumus, lai uzlabotu pārveidotāja efektivitāti. Īstenojot visus šos pasākumus pat bez SiC vai GaN tranzistoru izmantošanas, var tikt iegūta augsta efektivitāte un jaudas blīvums. Pārveidotāja algoritms darbojas labi, veiktie testi parāda risinājuma perspektīvu. Papildus ir jāievieš

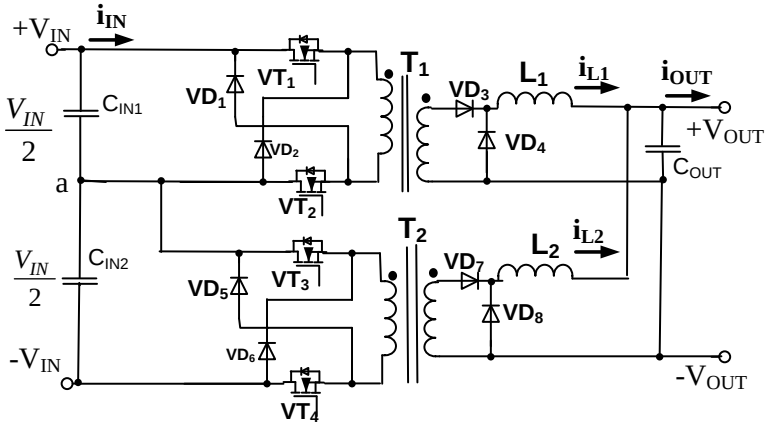
risinājums spriegumu disbalansa novēršanai starp abiem pleciem, jo eksperimentu laikā viena pleca spriegums pieauga, bet otra – samazinājās, un paaugstinātais spriegums radīja tranzistoru bojājumu.

5.2. Izolēts vairāklīmeņu pārveidotājs

Bremzēšanas rekuperatīvā enerģija var tikt ne tikai uzkrāta un pēc tam nodota atpakaļ piedziņas sistēmai, bet tā var tikt izmantota arī citu elektropatērētāju barošanai. Nelielas jaudas piedziņas sistēmu, kas darbojas no trīsfāžu maiņstrāvas tīkla, efektivitātes uzlabošanai, aprīkojot piedziņu ar litija-jonu vai superkondensatoru uzkrājēju, ir nepieciešams izmantot izolējošo pārveidotāju, jo spriegumu starpība ir liela (var sasniegt pat 10 reizes). Uzkrāto enerģiju vēlāk var izmantot zemsprieguma patērētāju elektroapgādei – liftu sistēmās šāda veida patērētāji ir pašpatēriņš un apgaismojuma sistēma, ko var izveidot no gaismu emitējošajām diodēm. Protams, šāda uzkrāšanas metode neļauj mazināt sprieguma iekritumus, palaižot motoru, kā arī nenodrošina īslaicīgu elektroapgādi avārijas gadījumā, tomēr tā ļauj izmantot bremzēšanas enerģiju lietderīgi. Izolēto pārveidotāju ar divvirzienu jaudas plūsmu ir sarežģītāk izveidot, tādu var realizēt vienvirziena izolētā pārveidotāja taisngrieža diodes, aizvietojot ar pusvadītāju slēdžiem un lietojot attiecīgas vadības metodes.

5.2.1. Topoloģijas izvēle

Vairāklīmeņu pārveidotāja topolologijas galvenā priekšrocība it tā, ka tiek samazināts spriegums uz tranzistoriem un diodēm. Šī iemesla dēļ var tikt izmantoti tranzistori ar zemāku barjerspriegumu, kuriem ir labāki parametri un mazāka cena, līdz ar to ir iespējams palielināt pārveidotāja efektivitāti. Ja izmanto laikā nobīdītu signālu vadību, ir iespējams samazināt ieejas un izejas filtru, kā arī magnētisko elementu izmēru. Pārveidotāja topoloģijas ar virknē slēgtu ieeju un paralēli slēgtu izeju (*ISOP – input-series-output-parallel*) sastāv no diviem modulāriem līdzsprieguma pārveidotājiem, kuru ieejas ir saslēgtas virknē, bet izejas ir slēgtas paralēli. Šādu slēgumu ir izdevīgi izmantot gadījumā, ja ieejas spriegums ir augsts, bet izejā nepieciešams zems spriegums un liela strāva. Šādā slēgumā spriegums uz tranzistoriem tiek samazināts uz pusi, tāpēc *IGBT* tranzistoru vietā ir iespējams izmantot *MOSFET* tranzistorus, palielinot darba frekvenci, kas ļauj samazināt magnētisko elementu izmērus. Ja tiek lietota fāzē vadītu signālu vadība (*interleaved control*), ir iespējams samazināt izejas strāvas pulsācijas vai arī samazināt izejas filtra izmēru un izmaksas.



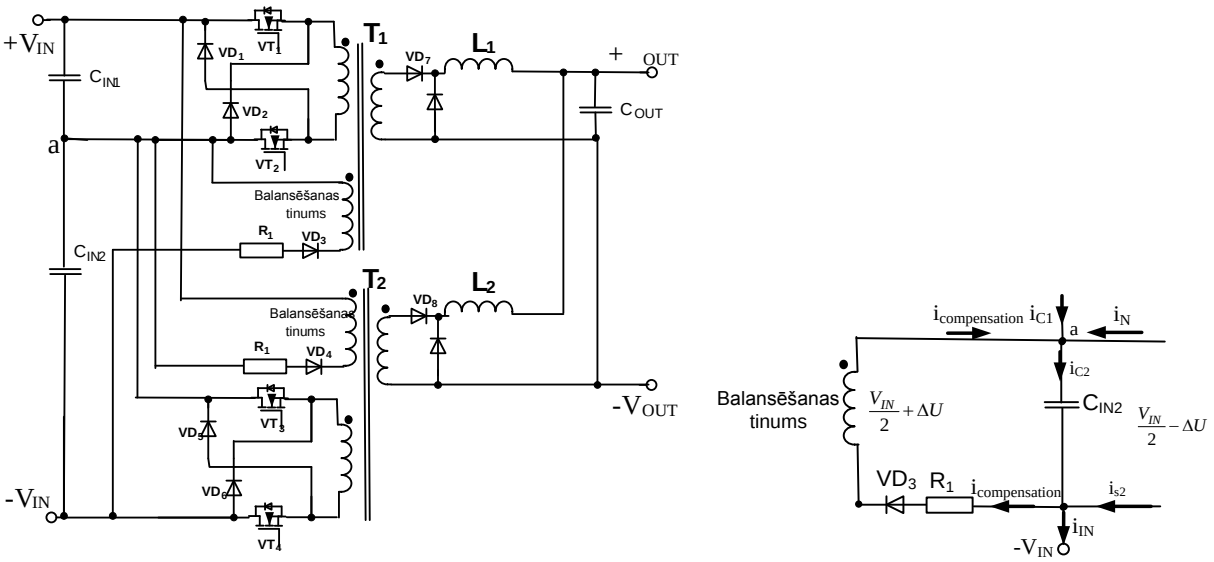
5.18. att. *ISOP* tiešās gaitas līdzsprieguma pārveidotāja shēma.

5.18. att. parādīta divu līmeņu *ISOP* tiešās pieslēguma līdzsprieguma pārveidotājs. Ja divi pārveidotāji tiek saslēgti virknē, ir iespējams ieejas kondensatoru spriegumu disbalanss, kas radītu tranzistoru caursiti. Spriegumu nevienādību izraisa dažādas strāvas abos pārveidotājos, savukārt tās var radīt nevienādi elektrisko komponenšu vai magnētisko elementu parametri. Tādēļ viena no problēmām, ar ko jāsastopas, izmantojot vairāklīmeņu topoloģiju, ir ieejas sprieguma nevienmērīga sadalīšanās starp abiem pleciem. Pat vienādas izejas strāvas abos plecos nenodrošina vienmērīgu spriegumu sadali starp pleciem [71]. Ja netiek lietots kāds risinājums spriegumu balansēšanai, spriegums uz vienu no moduļiem var pārsniegt kondensatora vai tranzistora sprieguma limitu, kas izraisīs avāriju. Lai uzturētu abu plecu ieejas spriegumu pieļaujamās robežās, ir jālieto vai nu speciāla vadības metode, vai arī speciāla elektriskā shēma.

5.2.2. Vairāklīmeņu pārveidotāja spriegumu balansēšanas metode

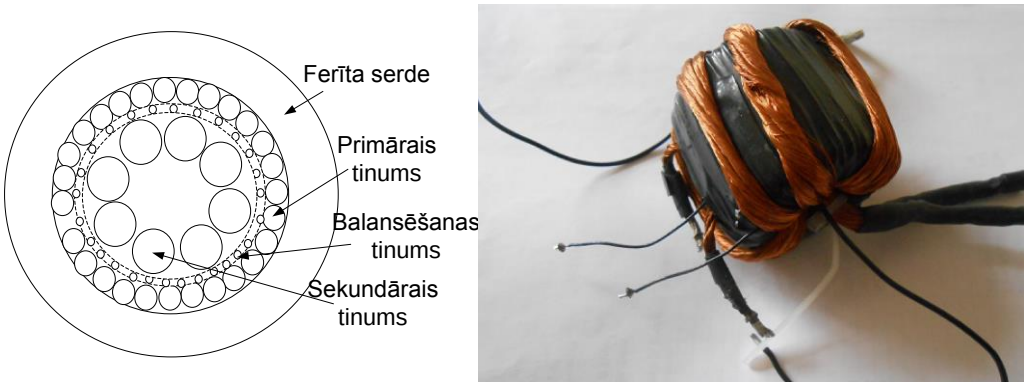
Literatūrā [72] ir piedāvāts izmantot divu transformatoru integrēšanu vienā magnētiskajā serdē, lai izlīdzinātu ieejas spriegumus: modulis ar augstāku spriegumu nodrošinās lielāku strāvu, un notiks spriegumu pašizlīdzināšanās, savukārt literatūrā [73] tiek izmantots vienāds aizpildījums, lai noturētu spriegumu pieļaujamās robežās. Šāds risinājums nav īsti piemērots gadījumā, ja tiek izmantota abu plecu vadība ar fāzē nobīdītiem signāliem, jo pārejas procesa laikā ir neiespējami nodrošināt vienādu aizpildījumu. Literatūrā [74], [75] vadības sistēma ir papildināta ar papildu vadības cilpu, kas kontrolē ieejas spriegumu, attiecīgi izmainot aizpildījumu. Šāds risinājums apgrūtina vadības sistēmas izstrādi un realizāciju, tāpat ir nepieciešama izolēta sprieguma mērīšanas sistēma. Šajā gadījumā tiks apskatīta vienkārša papildu shēma, kas ļauj balansēt ieejas spriegumus bez sarežģītas vadības sistēmas lietošanas.

Lai balansētu spriegumus uz kapacitīvā ieejas dalītāja, impulsu transformators tiek papildināts ar papildu tinumu, kas ir redzams 5.19. att. pārveidotājam ar virknē slēgtām ieejām un paralēli slēgtu izeju (*ISOP*). Šis tinums tiek pievienots pie pretējā pleca ieejas kondensatora. 5.19. attēlā sīkāk paskaidrots balansēšanas shēmas darbības princips. Spriegums uz balansēšanas tinuma izejas spailēm ir vienāds ar spriegumu uz pretējā pleca kondensatora, ja attiecīgais tranzistors atrodas ieslēgtā stāvoklī. Ja pleca spriegums ir augstāks nekā tam pieslēgtā kondensatora spriegums, tad tranzistora ieslēgtā stāvokļa laikā strāva no balansēšanas tinuma plūst uz kondensatoru un daļēji kompensē disbalansa strāvu i_N, izlīdzinot abu kondensatoru sprieguma līmeņus. Balansēšanas tinuma galvenais uzdevums ir novērst bīstamas sprieguma vērtības, bet tā nav paredzēta pilnīgai spriegumu izlīdzināšanai starp abiem pleciem.



5.19. att. *ISOP* līdzsprieguma pārveidotājs ar balansēšanas tinumiem un balansēšanas shēmas darbības princips.

5.20. att. ir redzama transformatora ar integrētu balansēšanas tinumu struktūra. Transformators ir izveidots uz toroidāla ferīta serdeņa un trijiem tinumiem. Primārā tinuma un balansēšanas tinuma vijumu skaits ir 27. Balansēšanas tinumam tiek izmantots vads ar šķērsgriezuma laukumu 0,2 mm^2. Sekundārajam tinumam tiek izmantots vads ar savstarpēji izolētām dzīslām (*litz-vads*), kura šķērsgriezums ir aptuveni vienāds ar 7 mm^2. Balansēšanas rezistors tiek slēgts virknē balansēšanas tinumam, tā šķērsgriezums jāizvēlas atkarībā no vēlamā balansēšanas shēmas darbības straujuma un pieļaujamā sprieguma novirzes līmeņa. Ir jāņem vērā, ka, izvēloties rezistoru ar mazu pretestību, tas izsauks lielāku strāvu, tāpēc reizē jāpalielina arī balansēšanas tinuma vada šķērsgriezuma laukums. Konkrētajā lietojumā tika izmantota balansēšanas rezistora vērtība, kas vienāda ar 800 Ω.



5.20. att. Transformators ar integrētu balansēšanas tinumu.

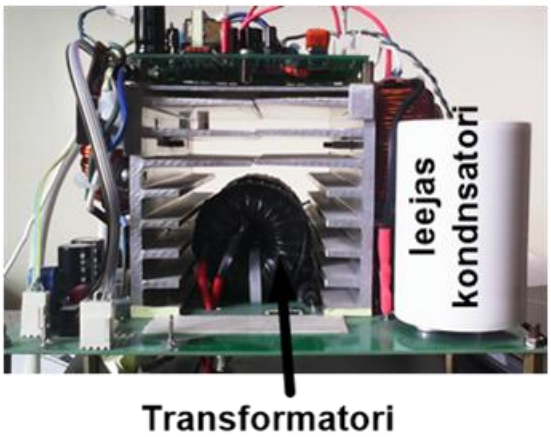
Jaudas zudumi rezistorā konkrētajā risinājumā var tikt aprēķināti šādi:

$$P_{\text{balancing}} < 2\Delta U i_{\text{N}}. \qquad (5.7.)$$

Jaudas zudumi šajā shēmā ir mazi, tāpēc ir iespējams izmantot maza izmēra rezistoru ar jaudu, kas mazāka par 1 W balansēšanas tinumu var izveidot no maza šķērsgriezuma laukuma vada.

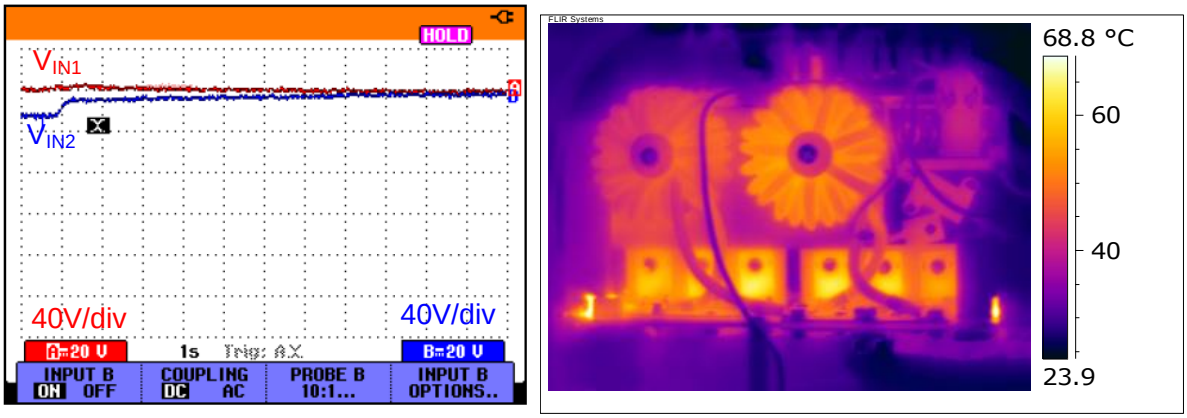
5.2.3. Pārveidotāja eksperimentālais prototips

Prototips ir paredzēts 600 V ieejas spriegumam un izejas spriegumam 40 V. Pārveidotāja vadībai ir izmantots mikrokontrollers. 5.21. att. ir redzams pārveidotāja prototips.



5.21. att. Divlīmeņu līdzsprieguma pārveidotāja prototips.

Transformators ir izveidots, kopā salīmējot divus N87 materiāla ferīta toroīdus, lai palielinātu serdes efektīvā šķērsgriezuma laukumu. Droseles ir izgatavotas, izmantojot metāla pulvera serdes. Izejas diodes ir slēgtas paralēli, lai samazinātu zudumus. Ieejas kondensatori ir ar lielu kapacitāti, jo sākotnēji pārveidotājs tika testēts no taisngrieztā 400 V maiņstrāvas tīkla. *MOSFET* tranzistoru vadīšanai tiek izmantots uz transformatoriem balstīts draiveris. Pārveidotāja efektivitāte ir virs 90 %, bet to ir iespējams uzlabot, izmantojot tranzistorus ar labākiem parametriem un papildu shēmas, kas samazina komutācijas zudumus.



5.22. att. Sprieguma balansēšanas process un siltuma izdalīšanās no pārveidotāja.

5.22. att. ir redzams spriegumu izlīdzināšanās process, pārveidotājam darbojoties režīmā ar mazu aizpildījumu, kas ir režīms, kurā balansēšanas process notiek vislēnāk, bet, kā redzams oscilogrammā, kaut arī process ir lēnāks, tomēr sprieguma izlīdzināšanās notiek. Spriegumu izlīdzināšanas shēma nav paredzēta, lai noturētu vienādus spriegumus jebkurā režīmā. Balansēšanas tinuma galvenais uzdevums ir nodrošināt to, ka spriegums nesasniedz bīstamu vērtību. Konkrētajā gadījumā šis droša sprieguma koridors ir vienāds ar 70 V, jo maksimāli pieļaujamais spriegums uz kondensatora ir 350 V. Otrs balansēšanas tinuma uzdevums ir izlīdzināt spriegumus, ja abi pleci tiek slogoti vienādi. Oscilogrammā, kas ir parādīta 5.22. att., pirmajā momentā pārveidotājs strādā ar pilnu jaudu, tāpēc sprieguma balansēšanas shēma nevar pilnīgi izlīdzināt abus spriegumus, taču tā neļauj spriegumam sasniegt bīstamu vērtību. Pēc slodzes samazināšanas balansēšanas shēma

izlīdzina abus spriegumus. Tas notiek tukšgaitā, kad aizpildījums ir ļoti mazs, tāpēc šis process aizņem vairākas sekundes, taču tā beigās spriegumi ir vienādi. Var secināt, ka shēma darbojas apmierinoši un to ir iespējams izmantot daudzlīmeņu pārveidotāja topoloģijā. 5.22. att. ir parādīti pārveidotāja karstākie punkti, kas ir drosele un sekundārās puses diodes. Siltuma novadīšanai ir paredzēts radiators un, ievietojot pārveidotāju korpusā, ir nepieciešams arī ventilators. Balansēšanas shēma darbojas neatkarīgi no vadības sistēmas, tāpēc vairs nav nepieciešama komplicēta pārveidotāja vadības sistēma. Nepieciešams realizēt tikai izejas spriegumu un strāvas regulēšanu.

Secinājumi

Elektriskā piedziņa tiek izmantota ļoti plaši, un ir paredzams elektriskās piedziņas lietojuma turpmāks pieaugums. Pat neliela energoefektivitātes palielināšana var dod lielu kopēju enerģijas ietaupījumu. Joprojām daudzos lietojumos netiek izmantota iespēja uzkrāt reģeneratīvās bremzēšanas enerģiju, uzlabojot piedziņas energoefektivitāti. Apskatot aplēses piemēru ar ostā pārkrautajiem konteineriem, var secināt, ka elektrisko krānu efektivitāte var tikt palielināta pat par 50 %, un tas ļauj spriest par joprojām neizmantotajām energoefektivitātes paaugstināšanas iespējām šajā un citās jomās.

Izstrādātais reģeneratīvās bremzēšanas enerģijas pētīšanas stends ļauj pētīt enerģētiskos procesus vilces piedziņā, tomēr precīziem pētījumiem ir nepieciešama arī pētāmās mašīnas sakritība ar stendā izmantoto. Uz stenda iespējams pētīt energoelektroniskos pārveidotājus un to vadības metodes, kā arī dažādus algoritmus enerģijas uzkrājēja vadībai. Izstrādātais stends tika izmantots uz superkondensatoriem balstīta pārbūves komplekta testēšanai. Ar šādu pārbūves komplektu ir iespējams aprīkot lēngaitas elektriskos auto, uzlabojot sistēmu, kā arī citus ar elektrisko piedziņu darbināmus transportlīdzekļus, palielinot to energoefektivitāti un pīķa jaudu.

Darbā pētītas magnētiski saistītu droseļu izmantošanas iespējas dažādās konfigurācijās. Rezultātā ir iegūtas analītiskas formulas, kas var tikt izmantotas strāvas pulsāciju aprēķinam praktiskos lietojumos. Iegūtās sakarības ļauj secināt, ka šādu droseļu izmantošana ļauj mazināt strāvas pulsācijas, līdz ar to tiek palielināta arī pārveidotāja efektivitāte. Darbā izmantota salīdzinoši vienkāršas uzbūves magnētiski saistītas droseles, kas ļauj šāda tipa pārveidotāju izmantot praktiskiem lietojumiem.

Superkondensatora lietošana iekšdedzes dzinēju startēšanā ir perspektīvs risinājums, kas pagaidām ir salīdzinoši dārgs. Tāpēc tiek piedāvāts izmantot superkondensatorus ar mazāku kapacitāti, lai novērstu sprieguma iekritumu līdzsprieguma motora īsslēguma režīmā startēšanas procesa sākuma momentā, paildzinot svina-skābes akumulatora kalpošanas laiku un darbojoties kā rezerves barošanas avots akumulatora izlādēšanās gadījumā.

Piedāvātā neizolēta divvirzienu līdzsprieguma pārveidotāja topoloģija ļauj samazināt pārveidotāja izmērus, jo tiek izmantots pārtrauktās strāvas režīms. Izstrādātā vadības metode ļauj vadīt pārveidotāju bez strāvas vadības atsevišķās pārveidotāja fāzēs. Analogo nolašu vietas izvēles algoritms ļauj mazināt elektromagnētisko traucējumu ietekmi uz mērījumu rezultātiem. Digitālā filtra izmantošana ļauj veikt precīzāku perioda un impulsa platuma aprēķinu. Piedāvātā spriegumu pulsācijas mazināšanas metode, lietojot aktīvo fāžu skaita maiņu, ļauj vēl vairāk samazināt strāvas pulsācijas.

Piedāvātā spriegumu balansēšanas metode vairāklīmeņu izolētajiem pārveidotājiem ļauj veikt spriegumu balansēšanu bez papildu vadības cilpas ieviešanas un bez ieejas spriegumu mērīšanas. Vairāklīmeņu struktūras lietošana ļauj izmantot *MOSFET* tranzistorus ar labākiem parametriem, potenciāli ļaujot uzlabot pārveidotāja efektivitāti.

Superkondensatoru cenai samazinoties, tie kļūs plaši izmantojami daudzās sfērās, jo tiem ir augsta jaudas spēja un liels izlāžu-uzlāžu ciklu skaits. Lielākajā lietojumu daļā būs nepieciešama spēka elektronika, kas nodrošinās atbilstošu jaudas plūsmas vadību un būs speciāli pielāgoti konkrētajam risinājumam. Šajā promocijas darbā piedāvāti jauni risinājumi superkondensatoru izmantošanai jau ekspluatācijā esošas elektriskās piedziņas modernizēšanai, kurā kā viena no

galvenajām sastāvdaļām ir spēka elektronikas pārveidotājs. Piedāvātie risinājumi var tikt attīstīti tālāk gan kā zinātniskie pētījumi, gan kā komerciāli produkti.

Katrā lietojumā spēka elektronikas pārveidotājam ir citas prasības – transportā svarīgākais ir izmērs, industriālās piedziņas lietojumā – drošums un cena. Promocijas darbā ir veikti pētījumi, lai samazinātu pārveidotāja izmērus transporta lietojumam, lai samazinātu pārveidotāja cenu un saīsinātu reakcijas laiku – industriālajai elektriskajai piedziņai. Iesāktie pētījumi līdzsprieguma pārveidotāju jomā būtu jāturpina, tiecoties sasniegt vēl labākus rezultātus, tāpat svarīgi ir turpināt pētīt enerģijas uzkrājēja optimālas enerģijas plūsmas vadības metodes. Izstrādātajam pārveidotājam liftu reģeneratīvās bremzēšanas uzkrāšanas lietojumam ir jānovērš sprieguma disbalansa problēma un jāsamazina komutācijas zudumi, plašas efektivitātes uzlabošanas iespējas paver arī SiC un GaN tranzistoru izmantošana. Šis promocijas darbs veicinās jaunus superkondensatora uzkrājēja lietojumus, kā arī dos pienesumu nākamajiem energoelektronikas pārveidotāju pētījumiem enerģijas uzkrājēju jomā.

Literatūra

[1] "Microsoft Word – Climate-Foundation-IIP-Motor-Systems Report -5-Sept-2011.docx - IIPmotorsystems_report11.pdf." [Online]. Available: http://www.iipnetwork.org/sites/iipnetwork.org/themes/iipnetwork/downloads/IIPmotorsystems_report11.pdf. [Accessed: 04-Feb-2016].

[2] N. Jabbour and C. Mademlis, "Supercapacitor-Based Energy Recovery System With Improved Power Control and Energy Management for Elevator Applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 12, pp. 9389–9399, Dec. 2017.

[3] "European Commision. Final energy consumption per sector." [Online]. Available: http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/graph.do?tab=graph&plugin=1&pcode=tsdpc320&language=en&toolbox=data. [Accessed: 26-Mar-2017].

[4] "Market outlook to 2022 for battery electric vehicles and plug-in hybrid electric vehicles." [Online]. Available: https://www.theccc.org.uk/archive/aws2/docs/CH6%20-%20AEA%20-%20Market%20outlook%20to%202022%20for%20battery%20electric%20vehicles%20and%20plug-in%20hybrid%20electric%20vehicles.pdf. [Accessed: 26-Mar-2017].

[5] A. von Jouanne, P. N. Enjeti, and B. Banerjee, "Assessment of ride-through alternatives for adjustable-speed drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 35, no. 4, pp. 908–916, Jūlijs 1999.

[6] S. Yang, A. Bryant, P. Mawby, D. Xiang, L. Ran, and P. Tavner, "An Industry-Based Survey of Reliability in Power Electronic Converters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 3, pp. 1441–1451, May 2011.

[7] "Kravu apgrozījums rīgas brīvostā 2012. gadā." [Online]. Available: http://rop.lv/lv/par-ostu/statistika.html. [Accessed: 16-Jun-2018].

[8] T. S. Kwon *et al.*, "Power Control Algorithm for Hybrid Excavator with Super Capacitor," in *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2008, pp. 1–8.

[9] N. Zhao, N. Schofield, and W. Niu, "Energy Storage System for a Port Crane Hybrid Power-Train," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 2, no. 4, pp. 480–492, Dec. 2016.

[10] S. M. Kim and S. K. Sul, "Control of Rubber Tyred Gantry Crane With Energy Storage Based on Supercapacitor Bank," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 5, pp. 1420–1427, Sep. 2006.

[11] H. Yoo, S. K. Sul, Y. Park, and J. Jeong, "System Integration and Power-Flow Management for a Series Hybrid Electric Vehicle Using Supercapacitors and Batteries," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 1, pp. 108–114, Jan. 2008.

[12] T. Knoke, C. Romaus, J. Bocker, A. Dell'Aere, and K. Witting, "Energy Management for an Onboard Storage System Based on Multi-Objective Optimization," in *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, 2006, pp. 4677–4682.

[13] P. Fajri, R. Ahmadi, and M. Ferdowsi, "Equivalent vehicle rotational inertia used for electric vehicle test bench dynamic studies," in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 4115–4120.

[14] H. Takagi, "Real-Life Coefficient of Drag — a Simple Extraction Method," *AutoTechnology*, vol. 5, no. 4, pp. 52–56, Jul. 2005.

[15] C. C. Chan and K. T. Chau, *Modern Electric Vehicle Technology*. Oxford University Press, 2001.

[16] V. Brazis, K. Kroics, and L. Grigans, "Scientific Laboratory Platform for Testing the Electric Vehicle Equipped with DC Drive," *Latv. J. Phys. Tech. Sci.*, vol. 51, no. 5, pp. 56–64, 2014.

[17] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*. Springer Science & Business Media, 2012.

[18] K. Kroichs and V. Brazis, "A Digitally Controlled Test Bench for DC Electrical Drives," in *Proceedings in Multidisciplinary Conference QUAESTI, Slovakia, Zilina*, 2013, pp. 166–170.

[19] K. Kroics, V. Brazis, and others, "Digitally controlled synchronous buck-boost converter for ultracapacitor based energy storage application," *Eng. Rural Dev. Latv.*, 2014.

[20] W. LEE, E. Schubert, Y. Li, S. Li, D. Bobba, and B. Sarlioglu, "Electrification of Turbocharger and Supercharger for Downsized Internal Combustion Engines and Hybrid Electric Vehicles #x2013; Benefits and Challenges," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2016.

[21] J. Larminie and J. Lowry, "Front Matter," in *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley & Sons, Ltd, 2012, pp. i–xxv.

[22] S. Hosseinpour, H. Chen, and H. Tang, "Barriers to the wide adoption of electric vehicles: A literature review based discussion," in *2015 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*, 2015, pp. 2329–2336.

[23] G. Papazov and D. Pavlov, "Influence of cycling current and power profiles on the cycle life of lead/acid batteries," *J. Power Sources*, vol. 62, no. 2, pp. 193–199, 1996.

[24] K. Kroics and V. Brazis, "Ultracapacitor based storage system for lead-acid powered light electric vehicle retrofit," presented at the Engineering for Rural Development, 2016, vol. 2016-January, pp. 1386–1394.

[25] K. Kroics and V. Brazis, "Supercapacitor based storage system for efficiency improvement of lead-acid powered light electric vehicle," in *2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, 2016, pp. 1216–1221.

[26] U. Sirmelis, L. Grigans, and L. Latkovskis, "An analytic simulation model for a supercapacitor-based energy storage system," in *Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011)*, 2011, pp. 1–10.

[27] G. V. Brazis, P. G. Zaleskis, V. L. Latkovskis, and L. Grigans, "Traction drive load simulator," in *The 52nd Annual International Scientific Conference of Riga Technical University*, 2011, pp. 68–69.

[28] Pit-Leong Wong, Q. Wu, Peng Xu, Bo Yang, and F. C. Lee, "Investigating coupling inductors in the interleaving QSW VRM," 2000, vol. 2, pp. 973–978.

[29] R. S. Balog and P. T. Krein, "Coupled-Inductor Filter: A Basic Filter Building Block," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 1, pp. 537–546, Jan. 2013.

[30] M. L. Bolloch, M. Cousineau, and T. Meynard, "Current-sharing control technique for interleaving VRMs using intercell transformers," in *13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009. EPE'09*, 2009, pp. 1–10.

[31] E. Duran, J. M. Enrique, M. A. Bohorquez, M. Sidrach-de-Cardona, J. E. Carretero, and J. M. Andujar, "A new application of the coupled-inductors SEPIC converter to obtain I-V and P-V curves of photovoltaic modules," in *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, 2005, pp. 10 pp. P. 10.

[32] D. C. Hamill and P. T. Krein, "A `zero' ripple technique applicable to any DC converter," in *30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99*, 1999, vol. 2, pp. 1165–1171 vol. 2.

[33] J. W. Kolar, H. Sree, N. Mohan, and F. C. Zach, “Novel aspects of an application of `zero’-ripple techniques to basic converter topologies,” in , *28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1997. PESC’97 Record*, 1997, vol. 1, pp. 796–803 vol. 1.

[34] J. W. Kolar, H. Sree, N. Mohan, and F. C. Zach, “Novel aspects of an application of `zero’-ripple techniques to basic converter topologies,” in , *28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1997. PESC’97 Record*, 1997, vol. 1, pp. 796–803 vol. 1.

[35] D. Maksimovic, R. W. Erickson, and C. Griesbach, “Modeling of cross-regulation in converters containing coupled inductors,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, no. 4, pp. 607–615, Jūlijs 2000.

[36] H. N. Nagaraja, D. Kastha, and A. Petra, “Design Principles of a Symmetrically Coupled Inductor Structure for Multiphase Synchronous Buck Converters,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 3, pp. 988–997, Mar. 2011.

[37] P.-L. Wong, Q. Wu, P. Xu, B. Yang, and F. C. Lee, “Investigating coupling inductors in the interleaving QSW VRM,” in *Fifteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000. APEC 2000*, 2000, vol. 2, pp. 973–978 vol. 2.

[38] S. A. Wibowo, Z. Ting, M. Kono, T. Taura, Y. Kobori, and H. Kobayashi, “Analysis of coupled inductors for low-ripple fast-response buck converter,” in *IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, 2008. APCCAS 2008*, 2008, pp. 1860–1863.

[39] P.-W. Lee, Y.-S. Lee, D. K. W. Cheng, and X.-C. Liu, “Steady-state analysis of an interleaved boost converter with coupled inductors,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 4, pp. 787–795, Aug. 2000.

[40] E. Laboure, A. Cuniere, T. A. Meynard, F. Forest, and E. Sarraute, “A Theoretical Approach to InterCell Transformers, Application to Interleaved Converters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 1, pp. 464–474, Jan. 2008.

[41] K. J. Hartnett, J. G. Hayes, M. G. Egan, and M. S. Rylko, “Novel CCTT-core split-winding integrated magnetic for High-Power DC-DC converters,” in *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2011, pp. 598–605.

[42] K. Kroics, U. Sirmelis, and V. Brazis, “Design of coupled inductor for interleaved boost converter,” *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 2014, no. 12, pp. 91–94, 2014.

[43] K. Kroics, U. Sirmelis, L. Grigans, and V. Brazis, “Digitally controlled 4-phase interleaved DC-DC converter with coupled inductors for storage application in microgrid,” presented at the Proceedings - 2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics, CPE 2015, 2015, pp. 504–509.

[44] W. Chen, X. Huang, and J. Zheng, “Improved winding loss theoratical calculation of magnetic component with air-gap,” in *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2012 7th International*, 2012, vol. 1, pp. 471–475.

[45] A. W. Stienecker, T. Stuart, and C. Ashtiani, “A combined ultracapacitor-lead acid battery storage system for mild hybrid electric vehicles,” in *2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2005, pp. 6 pp.-.

[46] C. Lerman, A. Horosov, and A. Kuperman, “Capacitor semi-active battery-ultracapacitor hybrid energy source,” in *2012 IEEE 27th Convention of Electrical Electronics Engineers in Israel (IEEEI)*, 2012, pp. 1–4.

[47] W. Henson, “Optimal battery/ultracapacitor storage combination,” *J. Power Sources*, vol. 179, no. 1, pp. 417–423, Apr. 2008.

[48] R. A. Dougal, S. Liu, and R. E. White, “Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids,” *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp. 120–131, Mar. 2002.

[49] J. P. Zheng, T. R. Jow, and M. S. Ding, “Hybrid power sources for pulsed current applications,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 37, no. 1, pp. 288–292, Jan. 2001.

[50] L. Solero, A. Lidozzi, and J. A. Pomilio, “Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 5, pp. 1007–1016, Sep. 2005.

[51] A. F. Burke, “Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles,” *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 806–820, Apr. 2007.

[52] J. M. Blanes, R. Gutiérrez, A. Garrigós, J. L. Lizán, and J. M. Cuadrado, “Electric Vehicle Battery Life Extension Using Ultracapacitors and an FPGA Controlled Interleaved Buck #x2013;Boost Converter,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 12, pp. 5940–5948, Dec. 2013.

[53] K. Kroics, “System for start of internal combustion engine with hybrid battery-supercapacitor source,” in *2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2015, pp. 1–6.

[54] J. B. Olson and E. D. Sexton, “Operation of lead-acid batteries for HEV applications,” in *Battery Conference on Applications and Advances, 2000. The Fifteenth Annual*, 2000, pp. 205–210.

[55] G. Chiappori, P. L. Moigne, P. Delarue, and M. Chemin, “Voltage Stabilization System for Stop – Start Vehicles: Systemic Approach,” in *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2014, pp. 1–6.

[56] S. Breban, M. Nasser, A. Vergnol, B. Robyns, and M. M. Radulescu, “Hybrid wind/microhydro power system associated with a supercapacitor energy storage device – experimental results,” in *18th International Conference on Electrical Machines, 2008. ICEM 2008*, 2008, pp. 1–6.

[57] “Converter for energy storage integration in photovoltaic plants,” in *Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2002. ISIE 2002*, 2002, vol. 3, pp. 959–963 vol.3.

[58] D. Montesinos-Miracle, M. Massot-Campos, J. Bergas-Jane, S. Galceran-Arellano, and A. Rufer, “Design and Control of a Modular Multilevel DC/DC Converter for Regenerative Applications,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 8, pp. 3970–3979, Aug. 2013.

[59] O. Garcia, P. Zumel, A. de Castro, J. A. Cobos, and J. Uceda, “An automotive 16 phases DC-DC converter,” in *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, 2004, vol. 1, pp. 350–355 Vol. 1.

[60] P. Nandankar and M. V. Aware, “High efficiency discontinuous mode interleaved multiphase bidirectional dc-dc converter,” in *2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2012, pp. 1–6.

[61] L. Huber, B. T. Irving, and M. M. Jovanovic, “Open-Loop Control Methods for Interleaved DCM/CCM Boundary Boost PFC Converters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 4, pp. 1649–1657, Jul. 2008.

[62] K. Kroics, U. Sirmelis, J. Cernovs, and others, “DSP Based Bi-Directional Interleaved DC-DC Converter for Energy Storage Application,” *Eng. Rural Dev. Latv.*, 2013.

[63] K. Jin, M. Yang, X. Ruan, and M. Xu, “Three-Level Bidirectional Converter for Fuel-Cell/Battery Hybrid Power System,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 6, pp. 1976–1986, Jun. 2010.

[64] P. J. Grbovic, P. Delarue, P. L. Moigne, and P. Bartholomeus, “The Ultracapacitor-Based Controlled Electric Drives With Braking and Ride-Through Capability: Overview and Analysis,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 3, pp. 925–936, Mar. 2011.

[65] D. Gerber and J. Biela, “Interleaving of a Soft-Switching Boost Converter Operated in Boundary Conduction Mode,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 43, no. 10, pp. 3374–3380, Oct. 2015.

[66] A. Vazquez, A. Rodriguez, K. Martin, M. Arias, and M. M. Hernando, “Inductor optimization for multiphase interleaved synchronous bidirectional Boost converter working in discontinuous conduction mode with zero voltage switching,” in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2013, pp. 4977–4984.

[67] Christopher Oliver, “A new core loss model for iron powder material.” [Online]. Available: http://www.micrometalsarnoldpowdercores.com/upload/Core%20Loss%20Update.pdf. [Accessed: 08-May-2016].

[68] K. Kroics, “Bi-directional two level 6-phase DC-DC converter for energy storage application,” in *Proceedings of PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2015, pp. 1–8.

[69] K. Kroics, “Digital Control of Variable Frequency Interleaved DC-DC Converter,” in *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, 2015, vol. 2, pp. 124–129.

[70] U. Sirmelis, L. Grigans, and L. Latkovskis, “An analytic simulation model for a supercapacitor-based energy storage system,” in *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2011, pp. 1–10.

[71] X. Ruan, L. Cheng, and T. Zhang, “Control Strategy for Input-Series Output-Paralleled Converter,” in *37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC’06*, 2006, pp. 1–8.

[72] S. Yang, Y. Fang, X. Qiu, and C. Gong, “Voltage Sharing Control for Interleaving Series-Parallel Dual Two-Transistor Forward Converter,” in *33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007*, 2007, pp. 1896–1900.

[73] R. Giri, V. Choudhary, R. Ayyanar, and N. Mohan, “Common-duty-ratio control of input-series connected modular DC-DC converters with active input voltage and load-current sharing,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 4, pp. 1101–1111, Jul. 2006.

[74] R. Giri, R. Ayyanar, and E. Ledezma, “Input-series and output-series connected modular DC-DC converters with active input voltage and output voltage sharing,” in *Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC’04*, 2004, vol. 3, pp. 1751–1756 Vol. 3.

[75] A. Bhinge, N. Mohan, R. Giri, and R. Ayyanar, “Series-parallel connection of DC-DC converter modules with active sharing of input voltage and load current,” in *Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002*, 2002, vol. 2, pp. 648–653 vol. 2.