

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Rodions Saltanovs

Doktora studiju programmas “Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

ENERĢIJAS BEZVADU PĀRRAIDES UZ TRANSPORTA LĪDZEKĻIEM SISTĒMAS EFEKTIVITĀTES PAAUGSTINĀŠANA

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. habil. sc. ing.*
ILJA GALKINS

RTU Izdevniecība
Rīga 2020

Saltanovs, R. Enerģijas bezvadu pārraides uz transporta līdzekļiem sistēmas efektivitātes paaugstināšana. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2020. 35 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-15” 2020. gada 30. septembra lēmumu, protokols Nr. 04030-9.12.2.

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Ekonomikas zonas un Norvēģijas 2014.–2021. gada finanšu instrumenta finansētas Baltijas pētniecības programmas atbalstu tās pirmā (Igaunijas) konkursa projektā EMP474 “Optimizētas dzīvojamo māju akumulatoru enerģijas uzkrāšanas sistēmas (*ORBES*)”.

Promocijas darbs izstrādāts ar projekta “Pētījums par elektroauto bezvadu uzlādes raidošā moduļa (*TX*) pirmsražošanas modeļa izstrādi” atbalstu. Projektu līdzfinansē Eiropas Reģionālās attīstības fonds, projekta identifikācijas numurs 1.2.1.1/16/A/008, aktivitātes tiek veiktas sadarbībā ar “Enerģētikas un transporta kompetences centru”.

<https://doi.org/10.7250/9789934225635>

ISBN 978-9934-22-565-9 (print)

ISBN 978-9934-22-563-5 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2020. gada 29. decembrī plkst. 11.00 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1, 212. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing. Oleksandr Husev*,
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

Profesors *Dr. sc. ing. Pēteris Apse-Apsītis*,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing. Aigars Laizāns*,
Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

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

Rodions Saltanovs

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 108 attēli, deviņas tabulas, trīs pielikumi, kopā 165 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 43 nosaukumi.

SATURS

1. IEVADS	5
1.1. Motivācija.....	5
1.2. Galvenās hipotēzes un mērķi.....	6
1.3. Darba aprobācija.....	8
2. UZBŪVES PRINCIPI ENERĢIJAS PĀRRAIDES SISTĒMAI UZ TRANSPORTLĪDZEKLI.....	10
2.1. Ievads.....	10
2.2. Enerģijas bezvadu pārraides rezonanses sistēmas pamatelementi	10
2.3. Matemātiskā modeļa analīze enerģijas bezvadu pārraidei ar induktīvās rezonanses metodi	12
3. ENERĢIJAS BEZVADU PĀRRAIDES INDUKTĪVĀS REZONANSES SISTĒMAS PARAMETRU PĒTĪJUMI	14
4. OPTIMĀLO PARAMETRU PIESKAŅOŠANAS SISTĒMAS IZSTRĀDE DINAMISKAJ ENERĢIJAS BEZVADU PĀRRAIDES SISTĒMAI KUSTĪBĀ	21
4.1. Ievads.....	21
4.2. Svārstību kontūru savstarpējās izskaņošanās kompensācija	22
4.3. Maza mēroga prototips	24
4.4. Dinamiskās enerģijas pārraides sistēmas prototips transportlīdzeklī kustībā.....	27
SECINĀJUMI	32
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS UN AVOTU SARAKSTS	34

1. IEVADS

1.1. Motivācija

Laika gaitā, palielinoties esošo enerģijas avotu cenām, tiek meklēti jauni, alternatīvi enerģijas avoti, kā arī enerģijas pārveidošanas un uzglabāšanas metodes un mehānismi.

Viens no izplatītākajiem un efektīvākajiem enerģijas veidiem ir elektroenerģija [1]. Tās priekšrocības – relatīvi lēta, vienkārši pārraidāma, uzglabājama un pārveidojama citos enerģijas veidos.

Tāpēc arvien lielāku popularitāti iegūst transportlīdzekļi ar elektriskajām piedziņas iekārtām, kas ir uzstādītas kopā ar iekšdedzes dzinēju [2]. Tiek realizētas arī dažādas sistēmas, kas ļauj ietaupīt degvielu un samazināt izplūdes gāzu emisiju – izslēgt iekšdedzes dzinēju, stāvēt pie luksofora, vai nodrošināt komunikāciju ar apkārtējo infrastruktūru (luksoforiem, apkārtējiem automobiļiem), lai aprēķinātu optimālo braukšanas ātruma režīmu [3].

Tiek izstrādāti arī transportlīdzekļi, kam elektrodzinējs ir vienīgā piedziņas iekārta [4].

Elektrotransporta priekšrocības – energoiesēju un dzinēja remonta izmaksu samazināšanās, kopējā piesārņojuma līmeņa samazināšanās, kā arī piesārņojuma izvade enerģijas ģenerēšanas vietās, iespēja izmantot alternatīvos elektriskās enerģijas avotus.

Mūsdienų globālās politikas apstākļos, kad tiek reglamentēts kaitīgo gāzu emisijas apjoms atmosfērā, viena no valsts subsidējamajām jomām ir tādu sabiedriskā transportlīdzekļu izstrāde, kuros tiek izmantotas hibrīda vai pilnībā elektriskās enerģētiskās iekārtas [5].

Šādu transportlīdzekļu galvenā problēma ir enerģijas avotu īsais kalpošanas laiks. Litija jonu akumulatora resurss ir no 500 līdz 2500 uzlādes–izlādes cikliem.

Kā liecina Vācijas Jaudas elektronikas un elektriskās piedziņas institūta (*ISEA*) pētījumi [6], pilsētas autobuss diennaktī nobrauc 300 km, un darba laiks ir vairāk nekā 5000 stundu gadā, 15 gadu laikā tiks veikti aptuveni 16 000 pilni akumulatora uzlādes cikli.

Salīdzinot ar privāto vieglo automobili, diennakts nobraukums ir no 20 km līdz 80 km, un darba laiks 400 stundas gadā, 15 gadu laikā notiks tikai 2250 pilni akumulatoru uzlādes cikli. Pamatojoties uz šiem datiem, privātajam vieglajam automobilim litija jonu akumulatora resurss būs pietiekams aprēķinātajam virsbūves resursam – 15 gadiem, savukārt autobusam 15 gadu laikā būs jānomaina septiņi dārgo bateriju komplekti.

Savukārt biežāka bateriju nomaiņa izraisa nepieciešamību palielināt akumulatoru bateriju ražošanas apjomus, dārgo materiālu, piemēram, vara un litija patēriņu, kā arī to utilizāciju. Rezultātā elektriskā transporta pamatpriekšrocības – ekoloģiskums un ekonomiskums – zaudē savas pozīcijas un ar laiku kļūst līdzvērtīgas parastajam transportam ar iekšdedzes dzinēju, varbūt pat sliktāks.

Viena no šobrīd visspilgtāk izteiktajām problēmām transportlīdzekļiem, kuros kā barošanas avoti tiek izmantoti akumulatori, ir nelielais nobraukums ar vienu uzlādi – maksimālais attālums vidēji ir 130 km. Absolūtais līderis šādā situācijā ir automobilis *Tesla Model S* ar maksimālo nobraukuma attālumu 360 km, tomēr arī tas nav liels attālums starppilsētu braucieniem [7]. Tieši tāpēc liels skaits Eiropas ģimeņu, kas jau ir iegādājušās elektromobili, nesteidzas šķirties no rezerves mašīnas ar oglekļa degvielu. Iespējamais

nelielā nobraukuma problēmas risinājums – akumulatoru tilpuma palielināšana, taču tas ietekmēs gan enerģijas patēriņu uz katru nobraukto kilometru, gan arī transportlīdzekļa cenu un tā apkalpošanas izmaksas. Pamatoti loģisks risinājums – izveidot “degvielas uzpildes stacijas”, kurās par noteiktu samaksu tiks veikta ātra akumulatoru bloka nomaiņa, šobrīd ir grūti realizējams – ir daudz ražotāju, kas piedāvā daudzus un dažādus patentētus akumulatoru bloku standartus.

Iespējams, lietotājam visērtākais risinājums varētu būt “elektrisko ceļu” infrastruktūras izveide, kas nodrošinātu uzlādes iespējas visiem transportlīdzekļiem, kas pārvietojas pa šo ceļu. Šāds risinājums ļautu samazināt nepieciešamo barošanas elementu apjomu, palielinātu maksimālo attālumu, ko spēj veikt elektriskais transportlīdzeklis [1], [2].

Šī darba mērķis ir atrast risinājumus, kas ļauj radīt darbspējīgu elektrificētās maģistrāles prototipu.

Pēc autora domām, visperspektīvākais enerģijas bezvadu pārraides veids kustībā ir induktīvās rezonanses metode [1], [2]. Visbiežāk sastopamajās induktīvās rezonanses enerģijas pārraides sistēmās pārraides un uztvērēja moduļa konstrukcijas veido ferīta serdes, uz kurām ir uztītas spoles. Šajā darbā autors izvirza uzdevumu – veikt pētījumu par enerģijas pārraides īpatnībām, izmantojot minētās spoles, un rast atbildi uz jautājumu par enerģijas pārraides rezonanses induktīvā paņēmiena izmantošanas iespējamību un īpatnībām elektrisko ceļu infrastruktūras veidošanai.

Enerģijas bezvadu pārraides sistēmas rezonanses induktīvās spoles ir induktīvi saistītu svārstību kontūru pāris, tāpēc autors izvirza pieņēmumu, ka svārstību kontūru parametru pieskaņošana, izmantojot aparāturu, ļaus uzturēt optimālā darba režīma punktu.

Autora izvirzītais uzdevums – pārbaudīt praksē bezvadu uzlādei piedāvātos risinājumus, izveidojot elektrificētā ceļa prototipu.

1.2. Galvenās hipotēzes un mērķi

Hipotēzes

Darba aizstāvēšanai tiek piedāvātas vairākas hipotēzes.

1. Visoptimālākais veids, kā organizēt elektrificēto ceļu sistēmu, ir rezonanses induktīvā enerģijas pārraide.
2. Rezonanses induktīvās enerģijas pārraides spoļu raksturlielumiem ir ekstrēmi, kuru atsekošana ļauj uzlabot enerģijas pārraides parametrus.
3. Lai rezonanses induktīvā enerģijas pārraides sistēma funkcionētu, nepieciešams pieskaņot tās parametrus.

Mērķi

1. Pamatot enerģijas bezvadu pārraides induktīvās rezonanses tehnoloģijas izvēli, lai izveidotu elektrificēto ceļu infrastruktūru.
2. Veikt praktisku pētījumu par rezonanses indukcijas enerģijas bezvadu pārraidi, izmantojot DD spoles.

3. Pierādīt rezonanses indukcijas enerģijas bezvadu pārraides sistēmas parametru regulēšanas iespējas un lietderīgumu.
4. Izstrādāt praktiskus veidus, kā regulēt rezonanses indukcijas bezvadu enerģijas pārraides sistēmas darbības parametrus.
5. Izstrādāt ceļa prototipu ar enerģijas bezvadu pārraidi transportlīdzeklim kustībā un sistēmām, kas nodrošina tā funkcionalitāti.

Pētniecības līdzekļi un metodes

Lai sasniegtu definētos mērķus, tika veikta detalizēta esošo enerģijas bezvadu pārraides risinājumu analīze.

Lai detalizēti izpētītu DD spoļu raksturlielumus, tika izveidota iekārta, kas pēc parametriem ir tuva bezvadu uzlādes ierīcēm, kas tiek izmantotas vieglajos automobiļos. Iekārtā iespējams izmantot dažādus rezonanses spoļu veidus, kā arī statiskā režīmā regulēt spoļu elektriskos parametrus un telpisko novietojumu. Iekārtā tika veikts pētījums par frekvenču raksturlielumu atkarību no DD spoļu savstarpējā novietojuma, enerģijas pārraides efektivitāti un blīvumu, dažādiem ierosmes veidiem, kā arī veikta virkne testu par enerģijas pārraides parametru stabilizācijas iespējamību.

Pamatojoties uz iegūtajiem datiem, tika izstrādāts un pārbaudīts oriģināls rezonanses frekvences pieskaņošanas veids, izmantojot kapacitāšu komutāciju, kā arī tika izstrādāts veids, kā pieskaņot parametrus, mainot slodzi sekundārajā kontūrā. Abu sistēmu kopīgais darbs tika izmēģināts neliela mēroga prototipā.

Darba gaitā tika izveidots sakaru tīkls, izmantojot raiduztvērēja mikroshēmu CC2650. Tīkls tika pārbaudīts attiecībā uz datu pārraides ātrumu un traucējumu noturību.

Darba noslēguma posmā tika apkopoti visi iegūtie dati un izveidots 4,5 m garš elektrificētā ceļa segments, kas ļauj veikt elektrotransporta uzlādi kustībā. Prototipa darbs tika pārbaudīts, darbojoties parametru pieskaņošanas sistēmai, un bez tās.

Zinātniskās novitātes

1. Tika veikta pilnīga DD spoļu izpēte bezvadu enerģijas pārraides rezonanses induktīvās sistēmas darbības laikā. Noteikti raksturlielumu ekstrēmi, kas ļauj iegūt optimālus darbības parametrus.
2. Ir piedāvāts jauns veids, kā pieskaņot rezonanses kontūru bezvadu enerģijas pārraides sistēmā, izmantojot pārslēdzamas kapacitātes magazīnas. Par šo risinājumu autors saņēmis patentu Nr. WO2016181186A1.
3. Ir piedāvāts jauns veids, kā salāgot svārstību kontūrus bezvadu enerģijas pārraides rezonanses indukcijas sistēmā, izmantojot regulējamu slodzi sekundārajā kontūrā.
4. Veikti pētījumi par enerģijas bezvadu pārraides rezonanses induktīvās metodes parametru saskaņošanas sistēmas darbību neliela mēroga prototipā.
5. Veikta izpēte bezvadu enerģijas pārraides prototipam uz rezonanses induktīvās sistēmas bāzes, kas sastāv no 4,5 m gara ceļa ar 12 moduļiem.

Praktiskās novitātes

1. Enerģijas bezvadu pārraides induktīvās rezonanses sistēmas piesaņošanas metode, pārslēdzot kapacitātes magazīnu, izmantojot pusvadītāju atslēgas, praksē iepriekš nav izmantota.
2. Slodzes regulēšana enerģijas bezvadu pārraides rezonanses induktīvās sistēmas sekundārajā kontūrā, nosakot maksimālās jaudas punktu, praksē iepriekš nav izmantota.
3. Komunikācijas tīkls ar pakešu nodošanu vispārējā informācijas vidē atgriezeniskās saites ķēžu organizēšanai enerģijas pārveidotājos nav iepriekš izmantots.
4. Enerģijas bezvadu pārraides induktīvās rezonanses sistēmas kompleksās piesaņošanas metode praksē iepriekš nav izmantota.

Darba praktiskā nozīme

Pamatojoties uz iegūtajiem pētījumu datiem, var izveidot enerģijas bezvadu pārraides adaptīvās sistēmas uz rezonanses induktīvās tehnoloģijas bāzes. Enerģijas bezvadu pārraides rezonanses induktīvās sistēmas parametru piesaņošanas sistēmu var izmantot elektromobiļu uzlādes sistēmās, kā arī tai ir citas izmantošanas iespējas, piemēram, mobilo ierīču uzlāde. Pētījuma rezultāts ir arī funkcionējošs automobiļu bezvadu uzlādes tīkla sistēmas prototips. Praksē tika pamatoti tās funkcionēšanai nepieciešamie pamatparametri un galvenie mezgli. Tas ļaus nākotnē projektēt un būvēt elektrificētās maģistrāles.

1.3. Darba aprobācija

Autoram ir 10 publikācijas par darba tēmu, kā arī saņemts viens patents.

1. Saltanovs, R., Krainyukov, A. Employment of SIC MOSFETS and GaN-transistors for wireless power transmission systems (2019) Lecture Notes in Networks and Systems, 68, pp. 293–301.
2. Saltanovs, R., Rubenis, A., Krainyukov, A. Influence of constructive materials of road cover on magnetic field dispersion of wireless power transmission systems (2019) Lecture Notes in Networks and Systems, 68, pp. 214–223.
3. Saltanovs, R. The system of dynamic wireless charging for transport using transmitter and receiver parameters adjustment (2018) 31st International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, EVS 2018 and International Electric Vehicle Technology Conference 2018, EVTeC 2018, art. no. 20189343.
4. Krivchenkov, A., Krainyukov, A., Saltanovs, R. Effective wireless communications for V2G applications and objects in motion (2018) Lecture Notes in Networks and Systems, 36, pp. 360–370.
5. Saltanovs, R., Krivchenkov, A., Krainyukov, A. Analysis of effective wireless communications for V2G applications and mobile objects (2017) 58th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2017 – Proceedings, 2017 November, pp. 1–5.

6. Saltanovs, R., Galkin, I. Method of adjustment and stabilization of parameters for wireless energy transfer system (2017) 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2017 ECCE Europe, 2017 January, art. no. 8099254.
7. Krainyukov, A., Krivchenkov, A., Saltanovs, R. Performance Analysis of Wireless Communications for V2G Applications Using WPT Technology in Energy Transfer (2017) Procedia Engineering, 178, pp. 172–181.
8. Krivchenkov, A., Saltanovs, R. Analysis of wireless communications for V2G applications using WPT technology in energy transfer to mobile objects (2015) 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2015, art. no. 7343134.
9. Krainyukov, A., Lyaksa, I., Saltanovs, R. Research of the efficiency of the wireless power transfer with the employment of DD inductance coils (2015) Transport and Telecommunication, 16 (4), pp. 341–352.
10. Saltanovs, R. Multi-capacitor circuit application for the wireless energy transmission system coils resonant frequency adjustment (2015) 2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference, WPTC 2015, art. no. 7140142.
11. WO2016181186A1 A resonator for a wireless transfer system. 2015.

2. UZBŪVES PRINCIPI ENERĢIJAS PĀRRAIDES SISTĒMAI UZ TRANSPORTLĪDZEKLI

2.1. Ievads

Rezonanses indukcijas paņēmiena pamatā ir divu kontūru izmantošana, kas tiek noskaņoti uz vienu rezonanses frekvenci. Klasiski bija pieņemts uzskatīt divus tuvu esošus kontūrus kā vienu rezonanses transformatoru [8]. Tomēr kontūru spoles var izskatīt arī kā rāmja antenas, savukārt visu enerģijas pārraides sistēmu – kā divu antenu mijiedarbību, kas atrodas tuvējā starojuma zonā [9], [10]. Šajā gadījumā antenu kombināciju pārraides un uztvērēja pusē var mēģināt apskatīt kā fāzētu antenu režģi (FAR). Pašlaik divu antenu savstarpējā mijiedarbība tuvējā starojuma zonā ir maz pētīta, tomēr eksperimenti un teorētiskie darbi pieļauj varbūtību, ka ir iespējams koncentrēt tuvējā lauka enerģiju ar FAR palīdzību [11], [12]. FAR izmantošana, iespējams, samazinās vai pilnībā novērsīs gan enerģijas izkliedi uz apkārtējiem priekšmetiem, gan blakusstarojumu apkārtējā vidē, kas ir raksturīgi enerģijas pārraides indukcijas paņēmienam.

Minētā paņēmiena priekšrocības ir:

- elektriskā kontakta neesamība starp elektriskās enerģijas raidītāju un uztvērēju;
- tūlītēja gatavība darbam;
- darbspēja īslaicīgas apstāšanās laikā;
- darbspēja transportlīdzekļa kustības laikā.

Sistēmas trūkumi ir:

- neliela darbības attālums;
- zems lietderības koeficients, salīdzinot ar kontakta sistēmām, izstarotāju vājās virziendarbības dēļ;
- augsts ģenerējamo traucējumu līmenis;
- konstrukcijas sarežģītība.

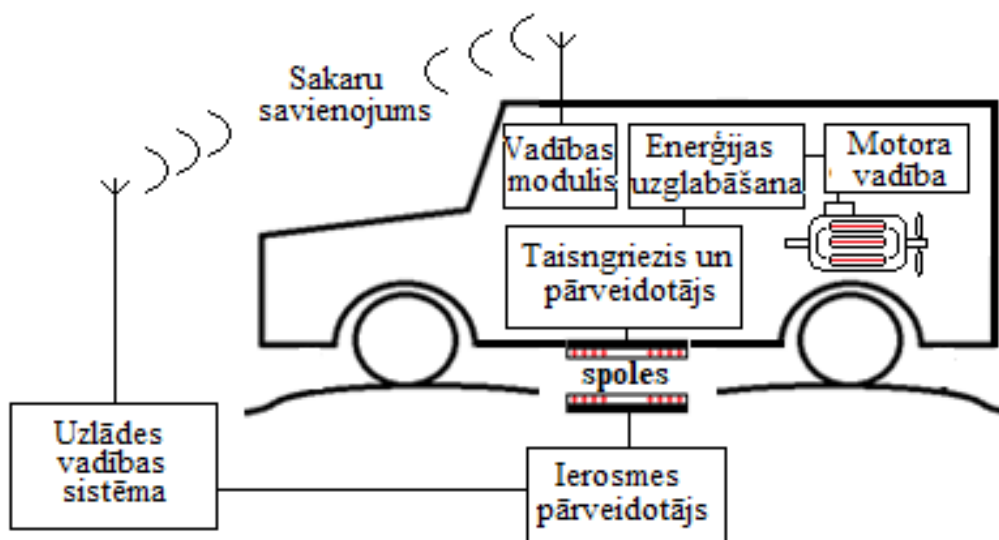
2.2. Enerģijas bezvadu pārraides rezonanses sistēmas pamatelementi

Enerģijas bezvadu pārraides rezonanses sistēmas komponenti ir redzami 2.1. attēlā. Tā ietver:

- konfigurācijas un kontroles interfeisu;
- spēka invertoru un kontrolieri;
- spoles (*coupling coils*);
- taisngriezi, filtrus un regulatoru (*rectifier, filters un regulator*);
- sakaru sistēmu starp transportlīdzekli un ceļa kontrolieri (*communications link*).

Rezonanses sistēmas uzlādes algoritms darbojas šādi: transportlīdzekli novieto virs uzlādes laukuma, pēc identifikācijas procesa jaudas invertors pārveido ienākošo strāvu rezonanses spoles ierosmes augstfrekvences strāvā. Enerģija, kas saņemta uztvērēja pusē, pēc iztaisnošanas un filtrēšanas nonāk akumulatorā vai spēka iekārtā. Lai realizētu atgriezenisko

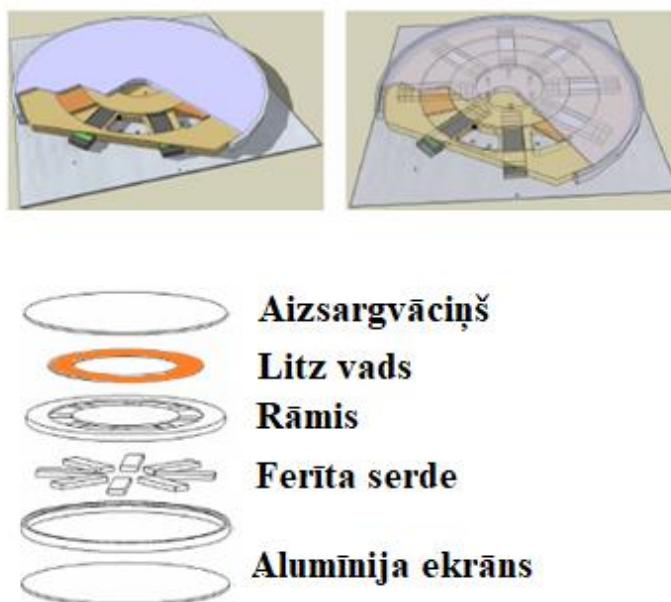
saiti, informācija par uzlādes parametriem tiek nodota spēka invertora kontrollerim, izmantojot bezvadu sakarus, un pretēji.



2.1. att. Energijas bezvadu pārraides sistēmas pamatelementu shēma.

Energijas pārraidei un uztveršanai izmantotās gredzenveida rezonanses spoles uzbūve

Energijas pārraides un uztveršanas gredzenveida rezonanses spoles uzbūve ir redzama 2.2. attēlā [13].

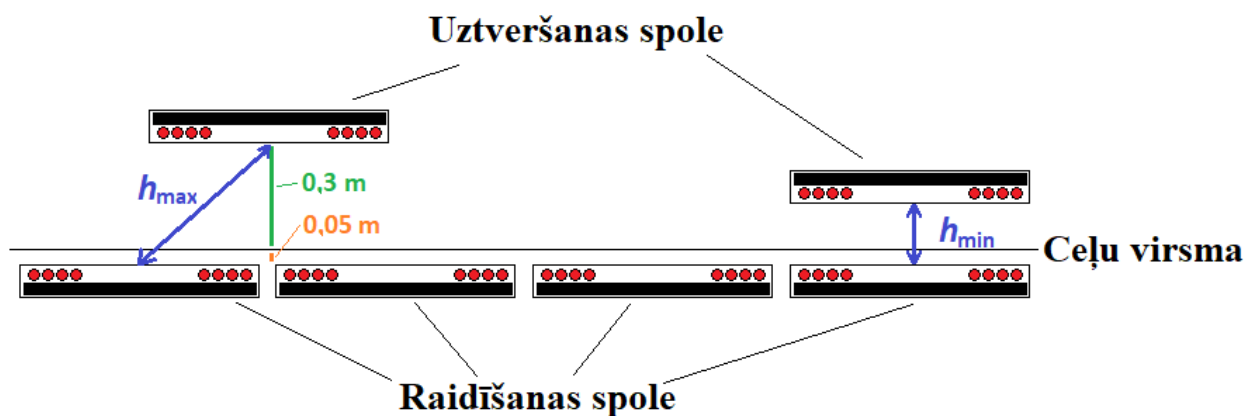


2.2. att. Gredzenveida rezonanses spoles uzbūve.

Šādas konstrukcijas pluss ir tas, ka, strādājot noteiktā noskaņotā rezonanses frekvencē, sistēma nenozīmīgi ietekmē apkārtējos priekšmetus. Trūkums – novirzot uztvērējspoli attiecībā pret pārraides spoli, notiek strauja lietderības koeficienta samazināšanās.

2.3. Matemātiskā modeļa analīze enerģijas bezvadu pārraidei ar induktīvās rezonanses metodi

Enerģijas bezvadu pārraides sistēmas gredzenveida spoļu efektīvā darba attālums ir no $0,25D$ līdz $0,75D$, kur D ir izmantojamās spoles diametrs. Lielākajai daļai vieglo automobiļu klīrenss ir diapazonā no 0,1 m līdz 0,3 m. Turklāt spoļu izvietojuma dziļums zem ceļa seguma slāņa var būt līdz 0,05 m, ko, ņemot vērā minimālo attālumu $h_{\min}$ starp spolēm, var pielīdzināt 0,15 m.



2.3. att. Maksimālais un minimālais attālums starp spolēm.

Transportam pārvietojoties, uztvērējspole pārvietojas virs secīgi uzstādītajām pārraides spolēm (2.3. att.), tāpēc maksimālo attālumu starp spolēm var noteikt kā attālumu starp uztvērējspoles centriem punktā, kas atrodas vienādā attālumā no divām blakus esošajām pārraides spolēm maksimālā automašīnas klīrensa augstumā, izmantojot šādu formulu:

$$h_{\max} = \sqrt{\left(\frac{h_{\max}}{2D_e}\right)^2 + (h_{\text{car}} + h_{\text{RS}})^2}, \quad (2.1.)$$

kur $h_{\max}$ – maksimālais attālums starp spoles centriem, meklējamais lielums;

h_{car} – mašīnas klīrensa maksimālais augstums, promocijas darba piemērā – 0,3 m;

h_{RS} – ceļa klājuma (*road surface*) biezums, promocijas darba piemērā – 0,05 m;

D_e – efektīvas maksimālās enerģijas pārraides tāluma attiecība pret spoles diametru, promocijas darba piemērā – 0,75.

Atrisinot šo vienādojumu, var noteikt, ka maksimālais attālums starp spoles centriem ir 0,47 m, pēc tā nav grūti noteikt, ka spoles efektīvais diametrs šādā gadījumā ir 0,63 m.

Lai novērtētu enerģijas pārraides dinamiskās sistēmas parametru pieskaņošanai nepieciešamo ātrumu, tika pieņemts, ka, automobilim braucot ar ātrumu 90 km/h, sistēmai

jāveic vismaz 10 parametru pieskaņošanas cikli katrai spolei. Viena cikla ilgumu var aprēķināt šādi:

$$t_{\text{round}} = 0,1 \frac{D}{0,278V}, \quad (2.2.)$$

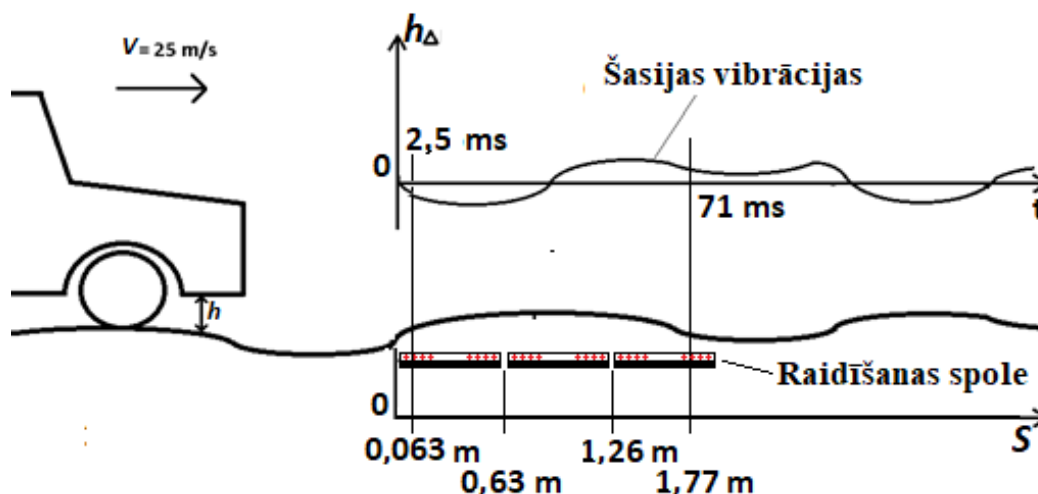
kur D – spoles diametrs, promocijas darba piemērā – 0,63 m;

V – transportlīdzekļa ātrums, promocijas darba piemērā – 90 km/h;

t_{round} – viena sistēmas pieskaņošanas cikla ilgums.

Pēc 2.2. izteiksmes var noteikt, ka sistēmas pieskaņošanas laiks nedrīkst pārsniegt 2,5 ms.

Veidojot prasības pieskaņošanas sistēmai, jāņem vērā arī transporta virsbūves dabiskās svārstības kustības laikā. Braucot ar ātrumu 50–90 km/h, automobiļa virsbūves svārstības nepārsniedz 14 Hz frekvenci, kas atbilst periodam – 71 ms. Tā kā iepriekš veidotās prasības sistēmas pieskaņošanas laiks ir 2,5 ms, tad vienā svārstību periodā notiks 28 pieskaņošanas cikli, un transportlīdzeklis ar ātrumu 90 km/h paspēs pārvietoties virs trim raidītāja spolēm (2.4. att.).



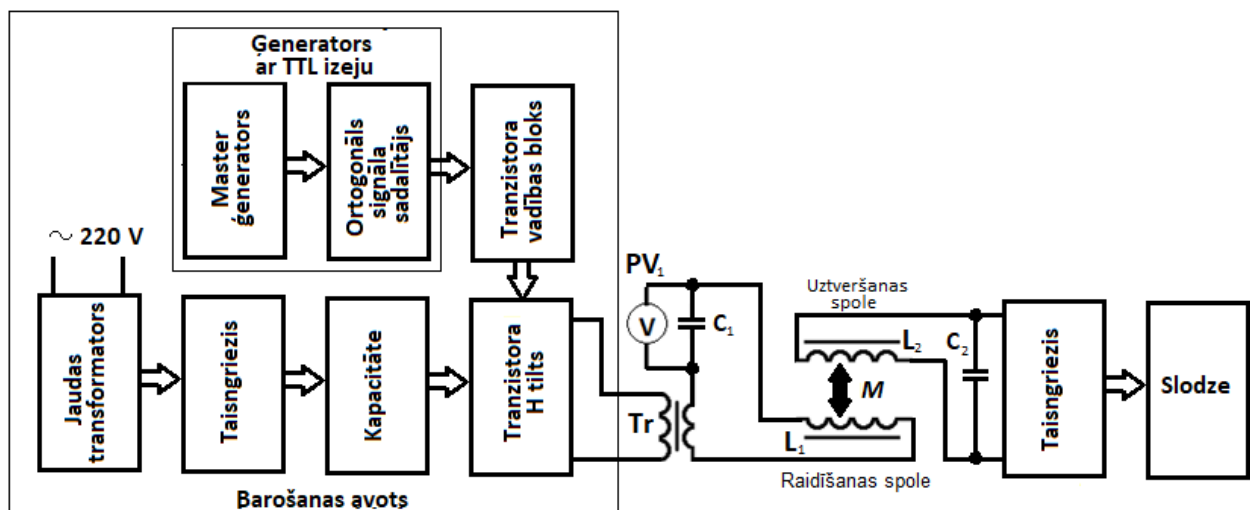
2.4. att. Virsbūves svārstību ietekmes novērtējums.

No minētā var secināt, ka enerģijas pārraides sistēmai ir vismaz divkārtīga rezerve pēc parametru pieskaņošanas ātruma, darbojoties 85 kHz frekvencē.

3. ENERĢIJAS BEZVADU PĀRRAIDES INDUKTĪVĀS REZONANSES SISTĒMAS PARAMETRU PĒTĪJUMI

Šajā nodaļā tiek veikts daudzpusīgs pētījums par indukcijas rezonanses enerģijas pārraides metodes galveno komponenti, proti, diviem savstarpēji saistītiem svārstību kontūriem, kas veido rezonanses transformatoru. Eksperimentāli iegūti raksturlielumi, strādājot dažādos režīmos. Noteiktas frekvenču raksturlīkņu, nododamās jaudas un lietderības koeficienta atkarības no attāluma, savstarpējā stāvokļa un ierosināšanas metodes.

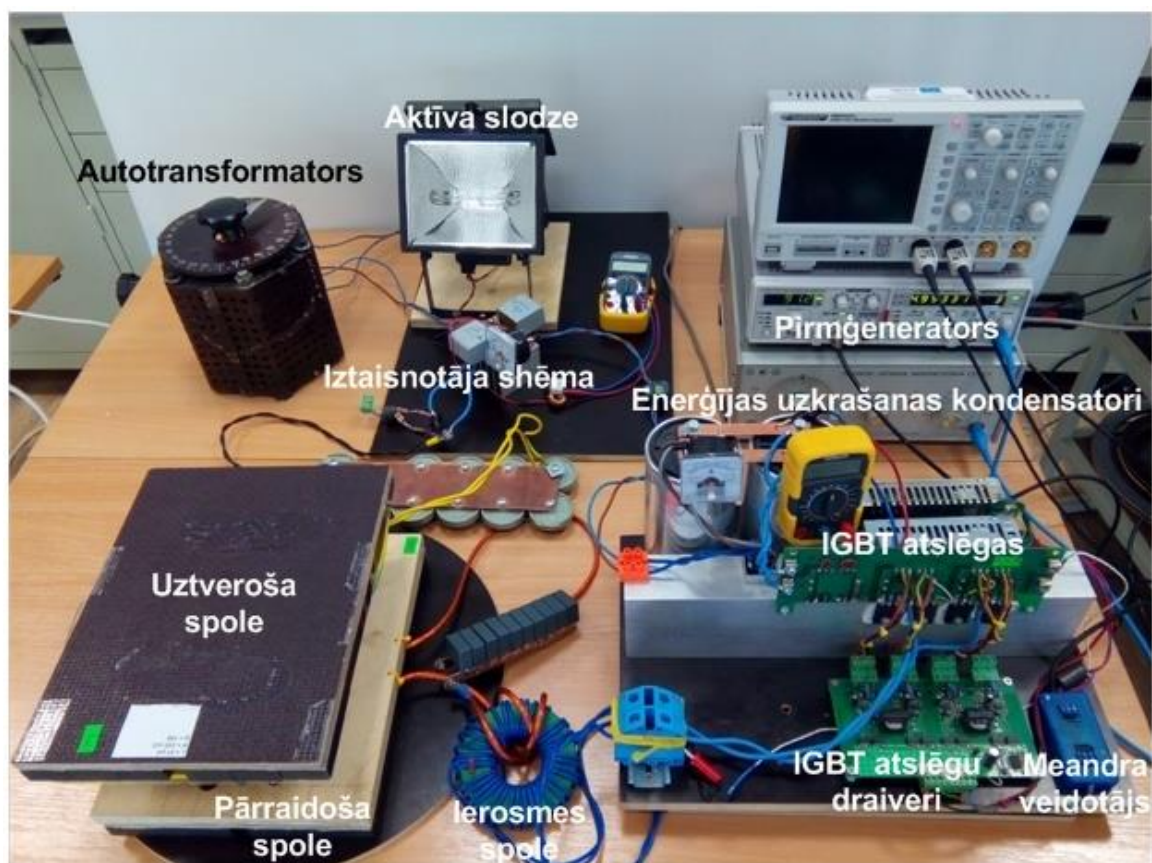
Eksperimentālā ierīce ietver pārraides kontūru, kas sastāv no kondensatora C_1 , induktivitātes spoles L_1 un uztveršanas kontūra, kas sastāv no induktivitātes spoles L_2 un kondensatora C_2 . Pārraidošā kontūra ierosme tiek veikta ar virknes metodi, izmantojot ierosmes transformatoru, ko veido primārais tinums L_3 un sekundārais tinums L_4 . Eksperimentālās ierīces struktūrshēma redzama 3.1. attēlā.



3.1. att. Bezvadu enerģijas pārraides eksperimentālās iekārtas struktūrshēma.

Eksperimentālās ierīces (3.2. att.) uzbūve:

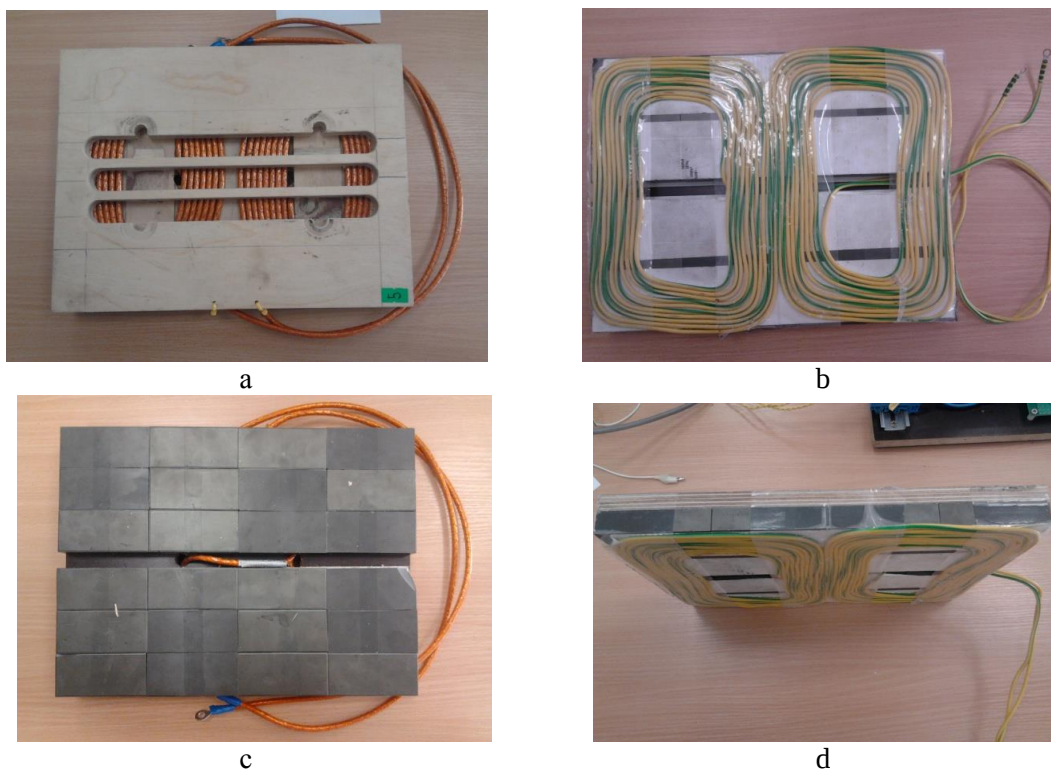
- tīkla autotransformators;
- tīkla sprieguma taisngrieža shēma un divi uzkrājēja kondensatori;
- ortogonālā meandra signāla formētājs;
- IGBT tranzistoru draiveru plate;
- IGBT tranzistoru H tilts (IGBT atslēgas), samontēts uz radiatora metāla plāksnes;
- pārraides un uztveršanas kontūrs, ko veido induktivitātes spoles un kondensatoru bloki;
- uztvērējspoles slodze: tilta taisngriezis ar aktīvu slodzi.



3.2. att. Enerģijas bezvadu pārraides eksperimentālā iekārta.

Plakano taisnstūrveida DD induktivitātes spoļu ārējais izskats redzams 3.3. attēlā. 3.3. a attēlā parādīta pārraides spole, 3.3. b attēlā – uztvērējsspole no vijumu puses, 3.3. c attēlā – pārraides spole no pretējās puses – no ferīta ekrāna puses, 3.3. d attēlā – uztvērējsspoles sānu skats.

Katrs DD pārraides spoles spirālveida tinums satur astoņus 4,5 mm diametra licendrāta vijumus. Katram DD uztvērējsspoles spirālveida tinumam ir 10 vijumi W–520 × 0,2–2L vada. Ferīta ekrāns izgatavots no ferīta magnētiskajiem klucīšiem ar caurlaidību $\mu = 2000$, ģeometriskie izmēri 74 mm × 35 mm × 15 mm. DD pārraides spoles un uztvērējsspoles laukumi bija vienādi: 290 mm × 230 mm.



3.3. att. Induktivitātes kvadrātveida DD spoles (a un c – pārraides spole, b un d – uztvērējsspole).

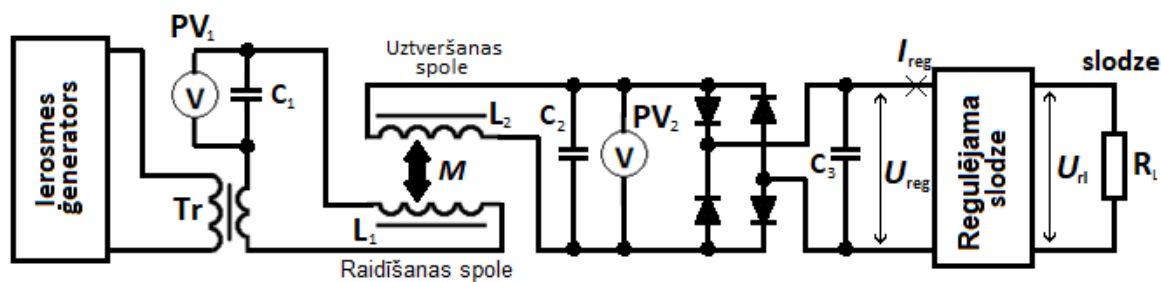
Lai izpētītu enerģijas pārraides rezonanses indukcijas metodes iespējas, regulējot slodzi uz sekundāro kontūru dažādos rezonanses transformatoru sistēmas režīmos, tika izmantota mērījumu shēma, kas redzama 3.4. attēlā. Šajā shēmā tika izmantota virknes paralēlā rezonanses transformatora topoloģija. Pārraides kontūrs – virknes kontūrs, ko veido induktivitāte L_1 un kapacitāte C_1 . Uztvērējkontūrs – paralēlais kontūrs, ko veido induktivitāte L_2 un kapacitāte C_2 .

Vadāmā slodze – tas ir bloks, kas nodrošina iespēju uzstādīt sprieguma (U_{reg}) vai strāvas (I_{reg}) ierobežojumu regulētās slodzes ieejā. Ja tiek stabilizēts spriegums, tad, sasniedzot iestādīto sprieguma vērtību, tiks palielināta strāva slodzē. Strāvas stabilizēšanas gadījumā – tieši pretēji, ja strāva sasniegs iestādīto vērtību, slodzes pretestība tiks samazināta un augs spriegums.

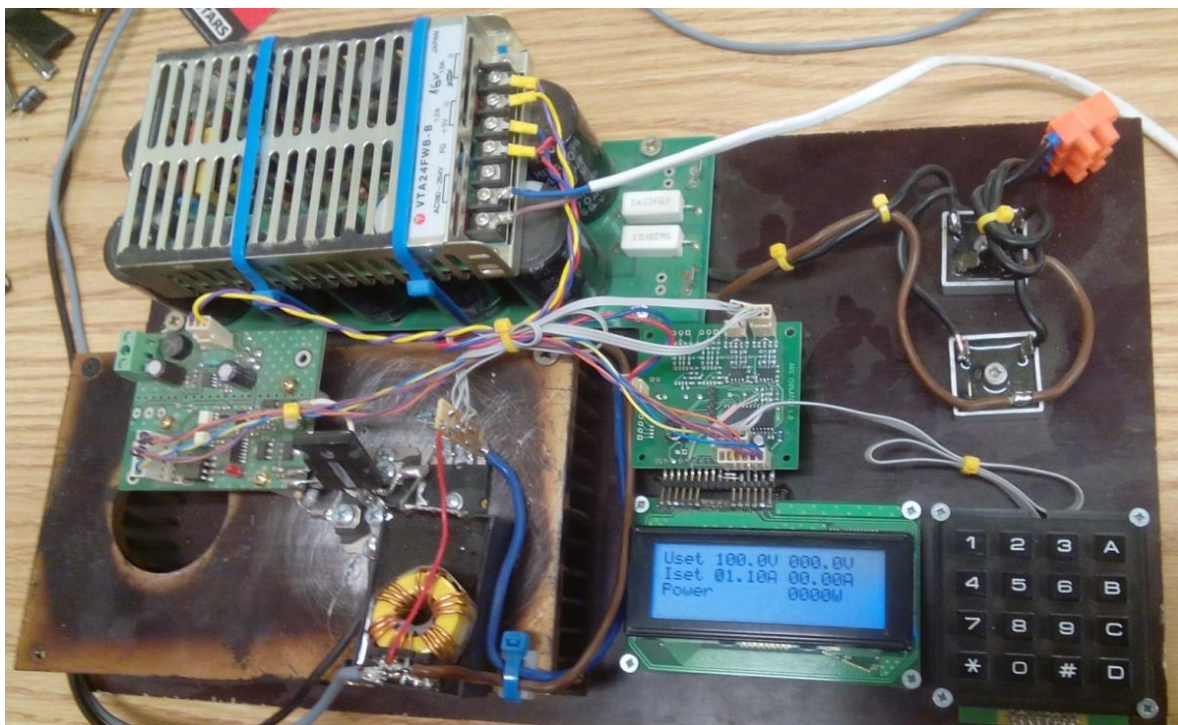
Bloks “Vadāmā slodze” nodrošina šādu uzdevumu izpildi:

- sprieguma U_{reg} un strāvas I_{reg} izmaiņu, lai nodrošinātu ieejas jaudas salāgošanu slodzes rezistoru R_L ;
- sprieguma $U_{\text{reg max}}$ vai strāvas I_{reg} robežvērtību ievade;
- sprieguma $U_{\text{reg max}}$ un strāvas $I_{\text{reg max}}$ maksimālo robežvērtību attēlošanu, sprieguma U_{reg} un strāvas I_{reg} pašreizējo vērtību un regulējamās slodzes izkliedētās jaudas mērīšanu un attēlošanu.

Bloks “Vadāmā slodze” ļauj iestatīt $U_{\text{reg max}}$ vērtību intervālā no 40 V līdz 400 V, un $I_{\text{reg max}}$ intervālā no 1 A līdz 10 A.



a



b

3.4. att. Bezvadu enerģijas pārraides maksimālās efektivitātes stabilizācijas metodes izpētes shēma (a) un bloka “Vadāmā slodze” ārējais skats (b).

Bezvadu enerģijas pārraides, izmantojot rezonanses indukcijas paņēmieni, maksimālās efektivitātes stabilizācijas metodes izpēte

Šī pētījuma veikšanai pārraides kontūrā tika izmantota DD induktivitātes spole $L_1 = 33,3 \mu\text{H}$ un $L_2 = 91,3 \mu\text{H}$. Kondensatoru kapacitāte svārstību kontūros: $C_1 = 99,95 \text{ nF}$ un $C_2 = 37,3 \text{ nF}$. Rezonanses frekvenču aprēķinātās vērtības: pārraides kontūram – $87,633 \text{ kHz}$, uztvērējkontūram – $86,244 \text{ kHz}$.

Veicot enerģijas bezvadu pārraides maksimālās efektivitātes stabilizācijas metodes izpēti, tika variēti šādi parametri:

- attālums starp DD induktivitātes spolēm d ;
- U_c uzkrāšanas kondensatoru spriegums;
- $U_{\text{reg max}}$ sprieguma robežvērtība.

Vadāmā sprieguma $U_{\text{reg max}}$ robežvērtība tika mainīta intervālā no 40 V līdz 250 V. Vadāmās slodzes strāvas $I_{\text{reg max}}$ maksimālā vērtība vienmēr bija 10 A. Spriegums U_c uzkrāšanas kondensatoros – 50 V, 75 V vai 100 V.

Lai noteiktu enerģijas bezvadu pārraides maksimālās efektivitātes stabilizācijas metodes iespējas, tika mērīti un aprēķināti šādi rezonanses transformatora enerģētiskie parametri:

- regulējamās slodzes strāva;
- regulējamās slodzes pretestība;
- izejas jauda – jauda, kas nonāk slodzē;
- ieejas strāva;
- ieejas jauda – jauda, kas nonāk pārraides kontūrā;
- lietderības koeficients raksturo vadāmās slodzes rezonanses transformatora efektivitāti.

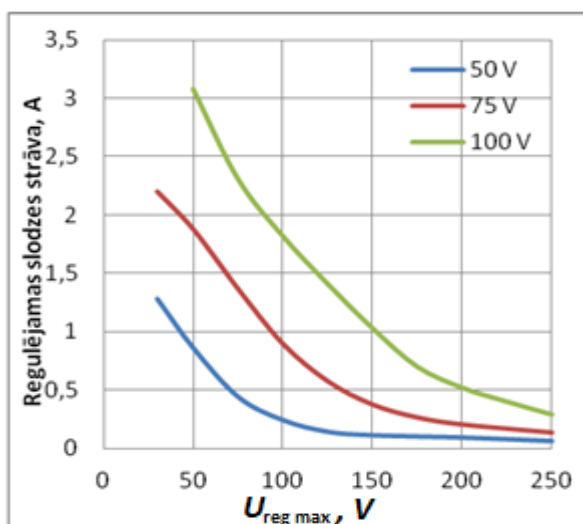
Enerģētisko parametru mērījumi tika veikti situācijā, kad ģenerators F_m meandra vadības signāla frekvence un DD induktivitātes spoļu transformatora rezonanses frekvence bija vienādas.

Šī pētījuma rezultāti redzami 3.5. un 3.6. attēlā. 3.5. a attēlā parādītas vadāmās slodzes strāvas atkarības no vadāmā sprieguma $U_{\text{reg max}}$ pie trīs sprieguma vērtībām U_c uzkrāšanas kondensatoros. Šīs atkarības ir vadāmās slodzes voltampēru līknes, kam ir hiperboliska atkarība no $U_{\text{reg max}}$ sprieguma. Uzkrāšanas kondensatoru sprieguma U_c palielināšana palielina šo līkņu stāvumu. Vadāmās slodzes ieejas pretestības atkarības no $U_{\text{reg max}}$ sprieguma un U_c parādītas 3.5. b attēlā. Šo spriegumu ietekme uz vadāmās slodzes ieejas pretestību ir pretēja.

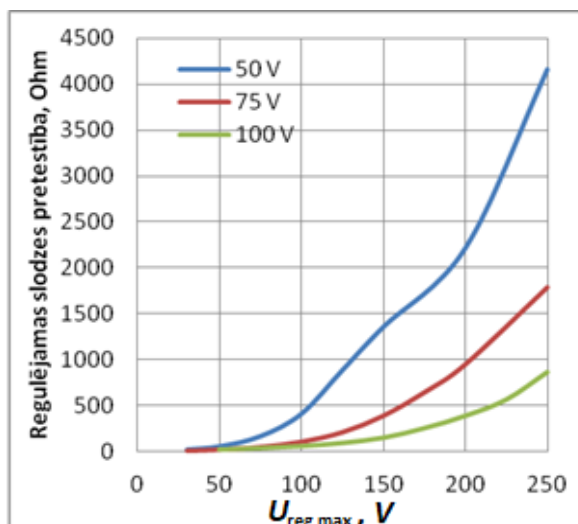
3.5. c attēlā redzamas līknes jaudai, kas nonāk slodzē atkarībā no $U_{\text{reg max}}$ vadības sprieguma pie trim sprieguma U_c vērtībām uzkrāšanas kondensatoros. Šīm atkarībām ir ekstrēmi, un maksimālās jaudas vērtības vērojamas tad, kad $U_{\text{reg max}}$ spriegums ir vienāds ar uzkrāšanas kondensatoru spriegumu U_c , tas ir, maksimālās jaudas iegūšanai slodzē $U_{\text{reg max}}$ vadāmajam spriegumam ir jābūt vienādam ar spriegumu uzkrāšanas kondensatoros U_c .

$U_{\text{reg max}}$ vadāmā sprieguma palielinājums izraisa pārraides kontūra strāvas izmaiņas (3.5. d att.). Ieejas strāva mainās tādā pašā veidā kā I_{reg} vadāmās slodzes strāva pie atbilstoša spriegumā U_c , savukārt ieejas strāvas vērtības ir aptuveni divas reizes lielākas. Tas ir uzskatāmi parādīts 3.6. a attēlā, kur redzamas ieejas strāvas (rezonanses transformatora pārraides spoles strāvas) atkarības no vadāmās slodzes strāvas I_{reg} pie trim fiksētajiem uzkrāšanas kondensatoru spriegumiem U_c .

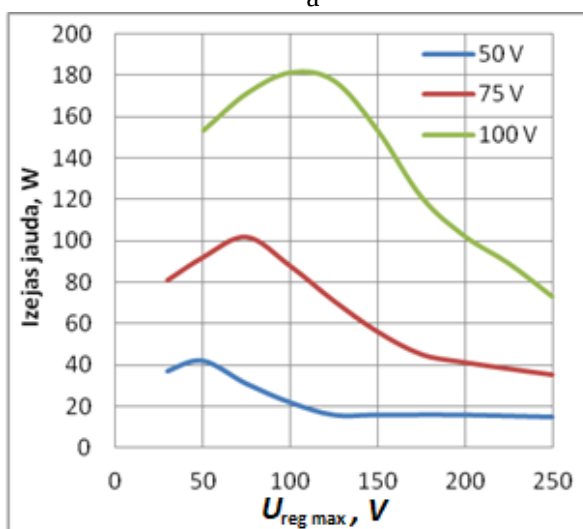
3.6. b attēlā redzamas izejas jaudas (jauda, kas nodota slodzē) atkarības no vadāmās slodzes ieejas pretestības. Katrai atkarībai ir maksimums, kam atbilst vadāmās slodzes ieejas pretestības optimālā vērtība. Ieejas pretestību optimālajām lielumiem ir tuvas vērtības, ja sprieguma U_c uzkrāšanas kondensatoros ir norādītie spriegumi: 54,9 Ω , kad $U_c = 50$ V, 54,8 Ω , kad $U_c = 75$ V, un 58 Ω , kad $U_c = 100$ V. Starp izejas jaudas atkarībām no vadāmās slodzes ieejas pretestības (3.6. b att.), kā arī no vadāmā sprieguma $U_{\text{reg max}}$ (3.5. c att.) ir viennozīmīga saikne.



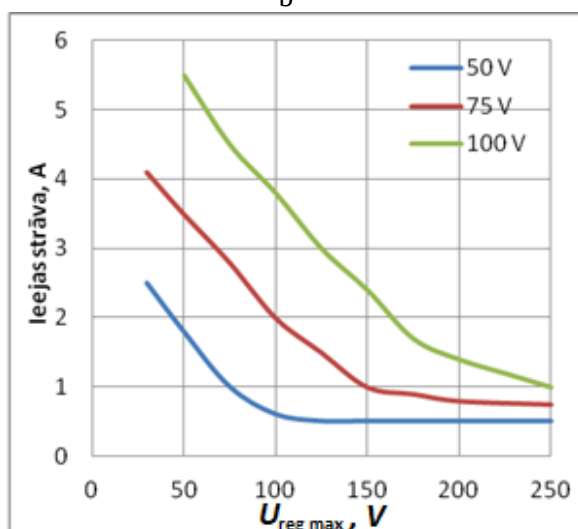
a



b



c

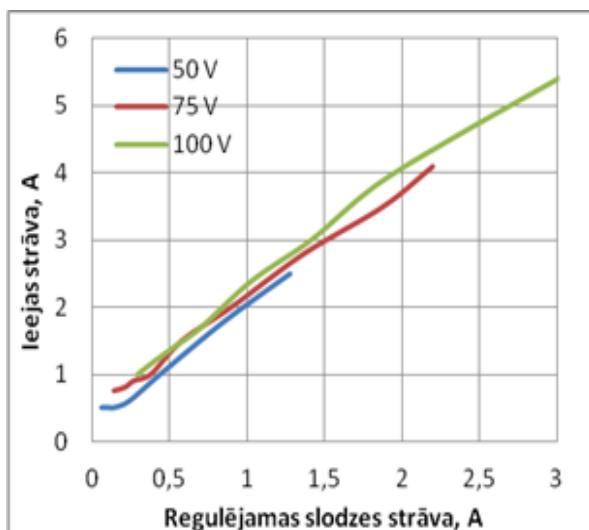


d

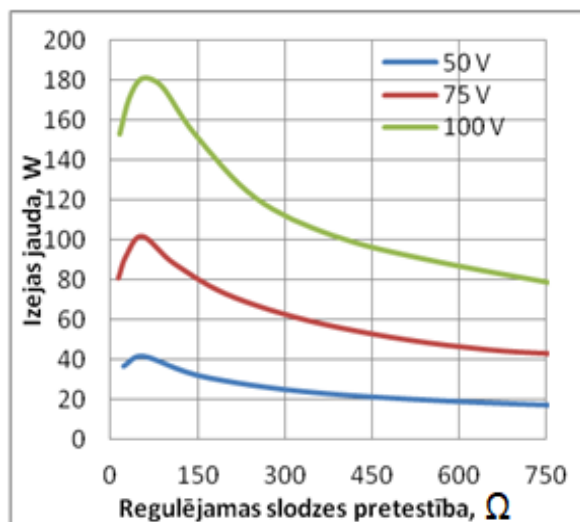
3.5. att. Sprieguma $U_{\text{reg max}}$ ietekme uz DD spoļu rezonanses transformatora enerģētiskajiem parametriem, ja $d = 13,5$ cm (a – regulējamas slodzes strāvas atkarība no regulētā sprieguma; b – regulējamas slodzes pretestības no regulētā sprieguma; c – izejas jaudas no regulētā sprieguma; d – ieejas strāvas no regulētā sprieguma).

Atšķirībā no atkarībām, kas redzamas 3.6. b attēlā, ieejas jaudas atkarībai no vadāmās slodzes ieejas pretestības ekstrēmu nav. Ieejas jaudas vērtība samazinās hiperboliski, palielinot vadāmās slodzes ieejas pretestību. Jo lielāks ir spriegums U_c , jo straujāk samazinās ieejas jauda.

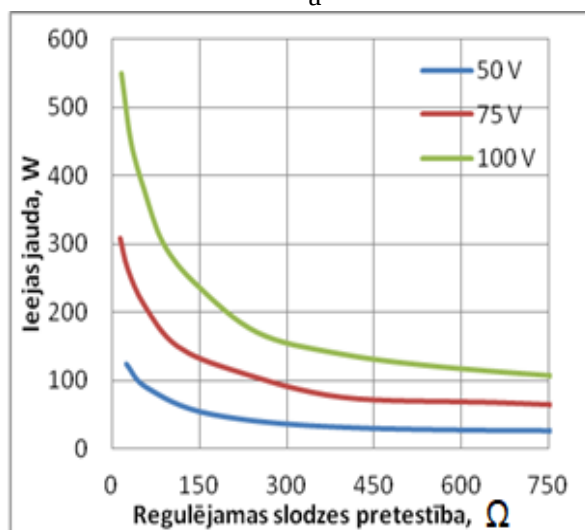
Tomēr vadāmās slodzes ieejas pretestības optimālo (maksimālās izejas jaudas) vērtību izmantošana neļauj iegūt jaudas pārraides lietderības koeficienta maksimālās vērtības (maksimālo efektivitāti), tas ir skaidri redzams 3.6. d attēlā. Maksimālās jaudas pārraides lietderības koeficienta vērtības var iegūt, ja vadāmās slodzes ieejas pretestības vērtības ir lielākas nekā tās, kas ir optimālas 3.6. d attēlā redzamajām atkarībām. To izskaidro gan izejas, gan ieejas jaudas samazinājums, ja tiek palielināta vadāmās slodzes ieejas pretestība (3.6. b un 3.6. c att.). Tālāk palielinot vadāmās slodzes ieejas pretestību, jaudas pārraides lietderības koeficientu vērtības paliek nemainīgas, to pamato atkarība, kas iegūta, ja $U_c = 50$ V.



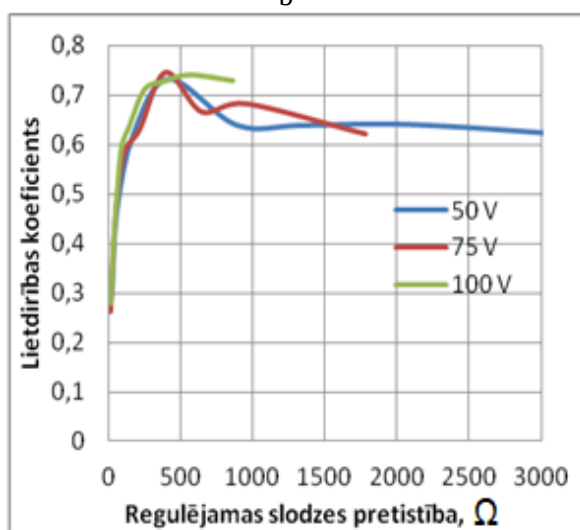
a



b



c



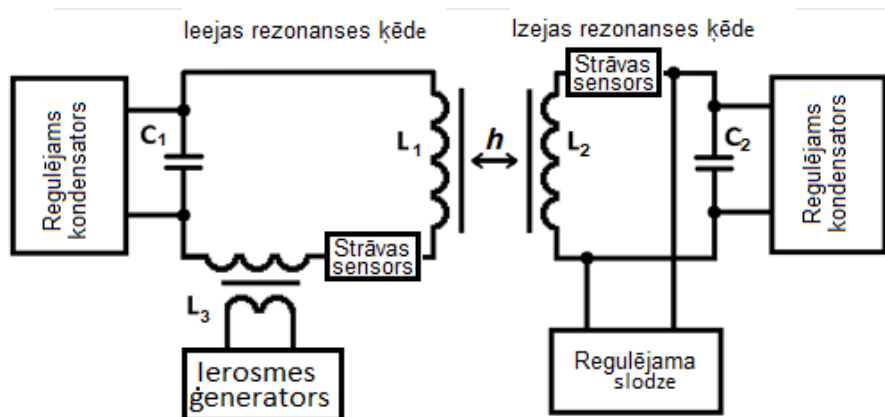
d

3.6. att. Vadāmās slodzes ietekme uz DD spoļu rezonanses transformatora enerģētiskajiem parametriem, ja $d = 13,5$ cm (a – ieejas strāvas atkarība no izejas strāvas; b – izejas jaudas atkarība no regulējamas slodzes pretestības; c – ieejas jaudas atkarība no regulējamas slodzes pretestības; d – lietderības koeficienta atkarība no regulējamas slodzes pretestības).

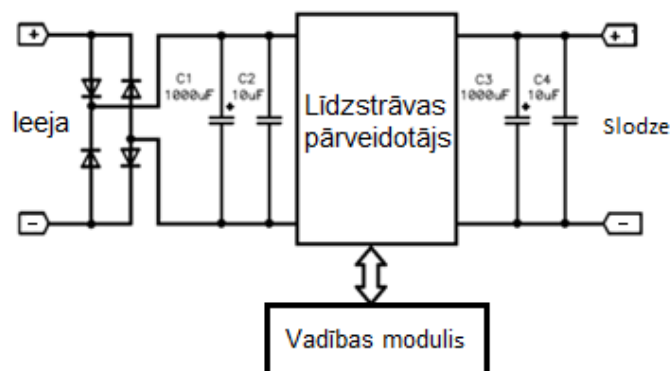
4. OPTIMĀLO PARAMETRU PIESKAŅOŠANAS SISTĒMAS IZSTRĀDE DINAMISKAJĀ ENERĢIJAS BEZVADU PĀRRAIDES SISTĒMAI KUSTĪBĀ

4.1. Ievads

Kā noskaidrots iepriekšējā nodaļā, lai sasniegtu maksimāli efektīvu enerģijas bezvadu pārraides sistēmas darbību, nepieciešams kompensēt spoļu inuktivitātes, saites parametru un slodzes pretestības, kā arī primārā kontūra ierosmes ģenerators sprieguma izmaiņas. Ierosmes ģenerators sprieguma maiņa nerada grūtības. Kompensēt inuktivitātes izmaiņas un pielāgot svārstību kontūru frekvenci iespējams, izmantojot svārstību kontūrā ieslēgto kapacitāti. Slodzes pretestību var mainīt ar elektroniskas slodzes palīdzību. Enerģijas bezvadu pārraides sistēmas parametru kontroles struktūrshēma redzama 4.1. attēlā.



4.1. att. Enerģijas bezvadu pārraides sistēmas iestatījumu pieskaņošanas sistēma.



4.2. att. Slodze ar mainīgu pretestību.

Slodzes shēma ar mainīgu pretestību redzama 4.2. attēlā. Shēmas darbības laikā kondensatori C_1 un C_2 tiks uzlādēti līdz sprieguma amplitūdas vērtībai kontūrā. Slodzes pretestība būs vienāda ar šī sprieguma attiecību pret strāvu, ko patērē līdzstrāvas pārveidotājs. Pārveidotāja izejai tiek pievienota lietderīgā slodze [14], [15]. Kontrolējot līdzstrāvas pārveidotāja darbu, var mainīt sekundārajā kontūrā ieslēgto aktīvo pretestību [16], [17].

4.2. Svārstību kontūru savstarpējās izskaņošanās kompensācija

Viens no enerģijas bezvadu pārraides sistēmas darba maksimālās efektivitātes režīma nosacījumiem ir pilnīga rezonanse (*full resonance*) [18], kad pārraides un uztvērējkontūra svārstību frekvences sakrīt. Lai to sasniegtu, ir jākompensē spoles induktivitātes izmaiņas. Viens no spoļu induktivitātes izmaiņu kompensācijas variantiem ir kontūrā ietvertās kapacitātes pieskaņošana [12], [19], [21].

Autors piedāvā kapacitātes elektroniskās komutēšanas metodi. Metodes būtība ir kapacitātes magazīnā, kas pieslēgta paralēli koriģējamā svārstību kontūra kapacitātei. Eksperimentālās ierīces shēma redzama 4.3. attēlā. Metodes īpatnība ir tā, ka tiek izmantota pusvadītāju atslēga, kas šuntēta ar diodi, kas ļāva izmantot vienu tranzistoru katras kapacitātes pieslēgšanai. Šāds slēgums ļauj sasniegt minimālos jaudas zudumus, jo atvērta lauka tranzistora kanāla pretestība, kas ir ieslēgts virknē ar kondensatoru, nepārsniedz 0,1 Ω.

Svārstību kontūra kapacitātes pieskaņošanas matemātisko modeli var izskaitļot, izmantojot šādu vienādojumu:

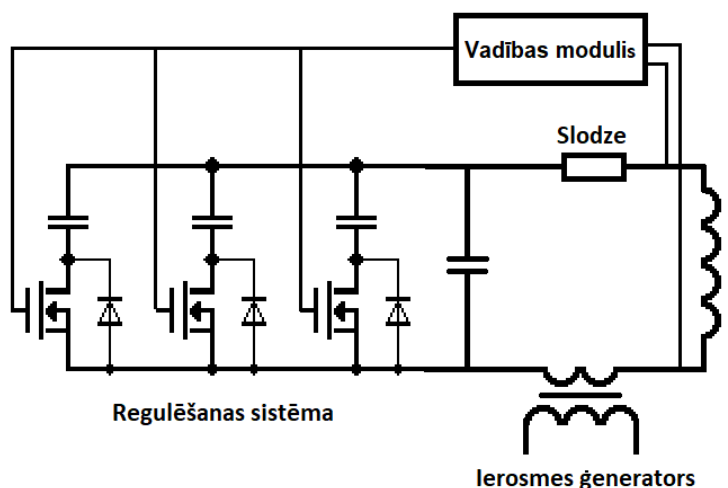
$$C_{\text{new}} = f_{\text{old}} C_{\text{old}} \frac{1}{f_{\text{const}}}, \quad (4.1.)$$

kur C_{new} – aprēķinātā kondensatoru kapacitātes vērtība nākamajam darba ciklam, F;

f_{old} – svārstību kontūra izmērītā kapacitāte, Hz;

C_{old} – svārstību kontūra kapacitātes iepriekšējās vērtības, F;

f_{const} – vēlamā frekvence, uz kuru tiecas sistēma, Hz.



4.3. att. Kapacitātes pieskaņošanas shēma, izmantojot kapacitātes magazīnu.

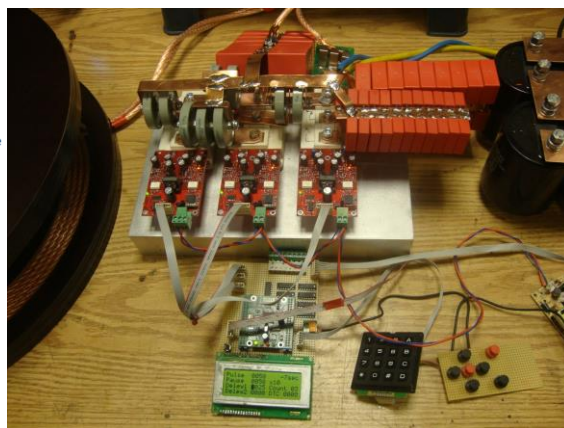
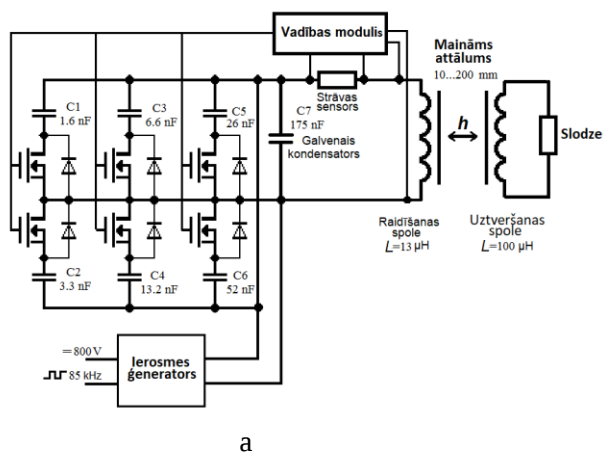
Lai pārbaudītu mērogojamības principu, tika veikts eksperiments rezonanses frekvences pieskaņošanai kontūrā ar strāvu 100 A. Tika izgatavota ierīce, izmantojot magnētisko sistēmu ar diametru 450 mm. Tās shēma un ārējais izskats redzams 4.4. attēlā. Iekārta sastāv no kapacitāšu magazīnas C1–C6, kas ļauj pievienot kontūram kapacitāti no 0 nF līdz 102 nF ar diskretumu 1,6 nF. Ja galvenā kondensatora C7 ietilpība ir 175 nF, tad ir iespējams kompensēt

pārtraides spoles induktivitātes izmaiņas intervālā no 13 μH līdz 20 μH ar frekvences izmaiņu diskretumu no 258 Hz līdz 397 Hz.

Eksperimentālās iekārtas svārstību kontūrs tika izveidots kā paralēls kontūrs. Kontūra ierosme notika, izmantojot *IGBT* pustiltu (*H-bridge*), kas tiek barots no 800 V līdzsprieguma avota un vadīts no taisnstūra impulsu ģenerators ar frekvenču diapazonu no 60 kHz līdz 100 kHz. Vadība notiek no *dsPIC33FJ64GS610* procesora moduļa. Uztvērējsspolei tika pievienota rezistīvā slodze, kas pazemina sistēmas kvalitātes faktoru un imitē enerģijas pārraidī.

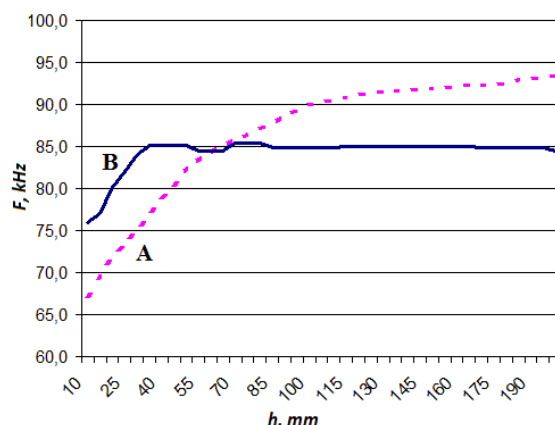
Lai iestatītu attālumu starp pārtraides spoli un uztvērējsspoli, tika izmantots nemagnētiska materiāla starpliku komplekts ar 10 mm soli. Frekvences un svārstību amplitūdas mērīšanai tika izmantots oscilogrāfs *DSO6032A*. Induktivitātes mērīšanai tika izmantots *LRC* tilts *HM8118*.

Spoļu rezonanses raksturlielumu mērījums tika veikts, mainot ierosmes ģenerators frekvenci ar soli 1 kHz, lai atrastu maksimālo amplitūdu. Izmēģinājumā ierīce atbilda agrāk izskaitļotajiem parametriem, 100 A strāva kontūrā tika sasniegta pie barošanas ģenerators sprieguma 815 V.



4.4. att. Eksperimentālās iekārtas ar komutējamo kapacitāšu magazīnu shēma (a) un ārējais skats (b).

Pārtraides spoles rezonanses frekvences mērījumu rezultāti atkarībā no attāluma līdz uztvērējsspolei pie nemainīga kondensatora redzami 4.5. attēlā. Pie kondensatora kapacitātes 220 nF pārtraides kontūra rezonanses frekvence bija no 67 kHz līdz 93 kHz. Ja tiek pieņemts, ka darba frekvence ir 85 kHz un attālums 70 mm, tad attāluma maiņa starp spolēm par 20 mm izraisīs rezonanses frekvences nobīdi par 3 kHz un raidītāja un uztvērēja salāgošanas zudumu.



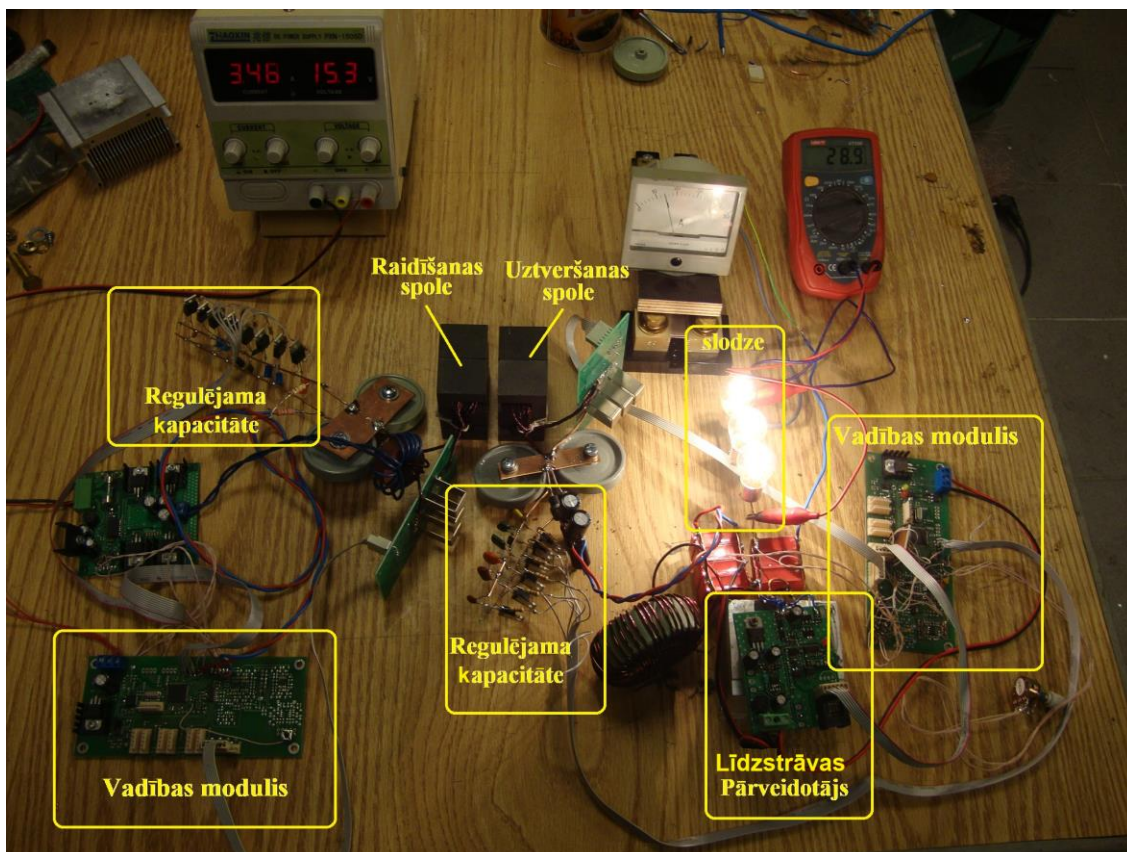
4.5. att. Pārtraides kontūra rezonanses frekvence pie fiksētas kondensatora kapacitātes (A); izmantojot rezonanses frekvences pieskaņošanas sistēmu (B).

4.5. B attēlā tiek sniegti rezonanses frekvences mērījumu rezultāti, izmantojot rezonanses frekvences pieskaņošanas sistēmu. Sistēma ļāva kompensēt induktivitātes izmaiņas un spēja noturēt svārstību frekvenci 85 kHz, ja attālums starp testa spolēm bija diapazonā no 40 mm līdz 200 mm. Šajā diapazonā frekvences novirze no pamata vērtības bija ne vairāk kā 800 Hz. Intervālā no 10 mm līdz 40 mm sistēma pārsniedza regulēšanas iespējas, un rezonanses frekvenci noteica kontūra pamata kondensators ar 175 nF.

Eksperimentu gaitā šajā iekārtā tika pārbaudīts kontūra rezonanses frekvences mērījumu algoritms. Darbības princips balstīts uz svārstību kontūra pašsvārstību mērīšanu, ja ierosmes ģenerators ir atvienots. Pēc ierosmes ģeneratora atslēgšanas tiek novēroti pārejas procesi, kas nepārsniedz trīs periodus. Ja frekvence ir 85 kHz, kontūra pašsvārstību frekvences mērīšanai nepieciešamais laiks bija 35 μs. Kontūra pārregulēšana ilga vienu svārstību periodu jeb 12 μs.

4.3. Maza mēroga prototips

Piedāvātās enerģijas pārtraides indukcijas rezonanses sistēmas parametru regulēšanas metodes tika eksperimentāli izpētītas ar nelielas jaudas prototipu (4.6. att.). Maza mēroga prototipa blokshēma redzama 4.7. attēlā. Šī eksperimenta mērķis bija noteikt pārveidotāja nodoto jaudu un lietderības koeficientu atkarībā no slodzes, kā arī pārbaudīt pieņēmumu, ka maksimālās jaudas punktu iespējams atrast un tas ir sasniegts automātiskajā režīmā. Eksperimentālā iekārta sastāv no raidītāja un uztvērēja. Tā nominālā pārtraides jauda ir 60 W. Raidītāja uzbūve: laboratorijas enerģijas avots ar iebūvētu strāvas un sprieguma mērīšanas funkciju; barošanas ģenerators, izpildīts lauktranzistoru H-tilta veidā; pārtraides spole, kas uzlīta uz ferīta serdes FERROXCUBE E71/33/32 ar 20 licendrāta vada vijumiem un šķērsriezuma laukumu 4 mm²; pamatkontūra 6,6 nF kondensators; papildu kondensatoru komutācijas sistēma; strāvas sensors, kas ieslēgts pārtraides rezonanses kontūrā, kā arī vadības modulis uz mikrokontrollera bāzes.

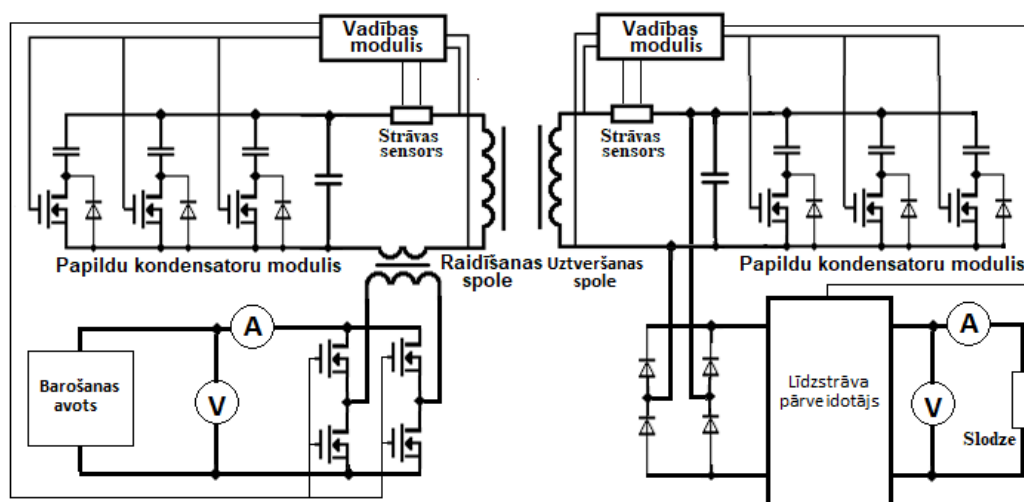


4.6. att. Maza mēroga bezvadu enerģijas pārnese sistēmas laboratorijas prototips.

Uztvērēja uzbūve: spole; pamatkontūra kondensators; papildu kondensatori ar komutācijas atslēgām, kā arī kontūra strāvas sensors, analogisks raidītāja sensoram. Papildus tas ietver regulējamo slodzi, kas sastāv no tilta taisngrieža ar 4 Šotkija diodēm, vadāma līdzstrāvas pārveidotāja un pastāvīgas slodzes no trim virknē savienotām kvēlspuldzēm (12 V, 2 A), kā arī vadības moduļa uz mikrokontrollera bāzes. Slodzes ķēde ietver arī strāvas indikatoru un ciparu voltmetru, lai noteiktu slodzē nododamās jaudas.

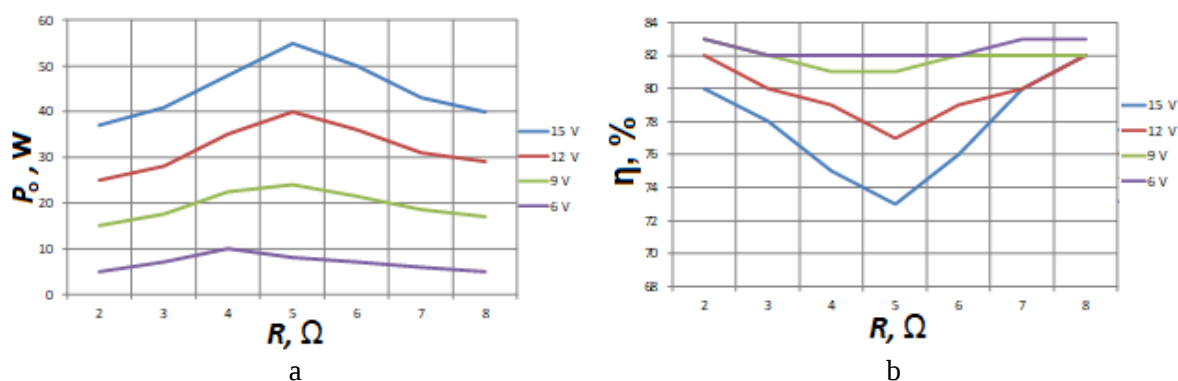
Eksperimentālā iekārta ir īstenota, izmantojot iepriekš aprakstīto rezonanses frekvences automātiskās iestatīšanas algoritmu. Raidītāja un uztvērēja rezonanses kontūru korekciju veic, izmantojot regulējamu astoņu pakāpju kondensatora bateriju. Šo elementu kapacitāte ir no 50 nF līdz 6,4 nF. Tas nodrošina papildu kapacitāti diapazonā no 0 nF līdz 12,75 nF ar 50 pF soli. Tas savukārt ļauj regulēt rezonanses frekvenci ar 500 Hz soli. Darba pamatfrekvencē 85 kHz, ja pamatkondensatora kapacitāte 1 nF, minētā kondensatoru baterija var kompensēt spoles induktivitātes izmaiņas no 0,26 mH līdz 3,6 mH.

Turklāt rezonanses uztvērējkontūrā tika realizēta elektroniskā slodze, kas nodrošina iespēju izvēlēties papildu pretestību ar elektronisko stabilizāciju. Veicot eksperimentus, slodzes pretestība tika izvēlēta manuāli no 2 Ω līdz 8 Ω diapazonā ar 1 Ω soli.



4.7. att. Maza mēroga prototipa blokshēma.

Eksperiments tika atkārtots četras reizes – ar barošanas ģenerators spriegumu 6 V, 9 V, 12 V un 15 V. Katrai sprieguma vērtībai ir veikts eksperiments pie dažādām papildu slodzes vērtībām, kas ir ieslēgtas virknē galvenajai. Katram mērījuma punktam tika mērīta pārveidotāja ieejas strāva, kā arī slodzes spriegums un strāva. Pamatojoties uz mērījumu iegūtajiem datiem, tika aprēķināta pārveidotāja izejas jauda (4.8. a att.) un tā enerģētiskā efektivitāte (4.8. b att.). 3 W pastāvīgā jauda, ko patērē mikrokontrolleru vadības bloki un elektroniskie sensori, eksperimenta laikā tika ņemta vērā kā zudumi enerģijas pārraides sistēmā.



4.8. att. Pārveidotāja aprēķināta izejas jauda (a) un efektivitāte (b).

No iegūtajiem eksperimenta rezultātiem izriet, ka ir ekstrēmi izejas jaudas un lietderības koeficienta funkcijās. Izejas jaudas gadījumā (4.8. a att.) tas ir maksimālais jaudas pārraides punkts. Šajā brīdī, izmantojot elektronisko slodzi, bija iespējams samazināt rezonanses kontūra kvalitātes faktoru Q , lai tas skaitliski būtu vienāds ar magnētiskās saites atgriezenisko koeficientu $1/k$. Grafikā posms ekstrēmu kreisajā pusē atbilst pārslogotai rezonanses cilpai, kad svārstību amplitūda nav pietiekama, lai pārraidītu būtisku jaudu slodzē. Grafika labajā pusē – pretēji, kontūrs netiek pilnībā izmantots, bet svārstību amplitūda ir pārmērīga, kas rada lielus zaudējumus rezonanses kontūrā. Efektivitātes gadījumā ekstrēma punkts ir minimums. Pretēji gaidāmajam rezultātam izejas jaudas palielinājums izraisa lietderības koeficienta

vērtības samazināšanos. Šo efektu var izskaidrot ar eksperimentālās iekārtas kvalitāti, kas nav ideāla, un zudumi tās elementos ir lielāki nekā paredzēts.

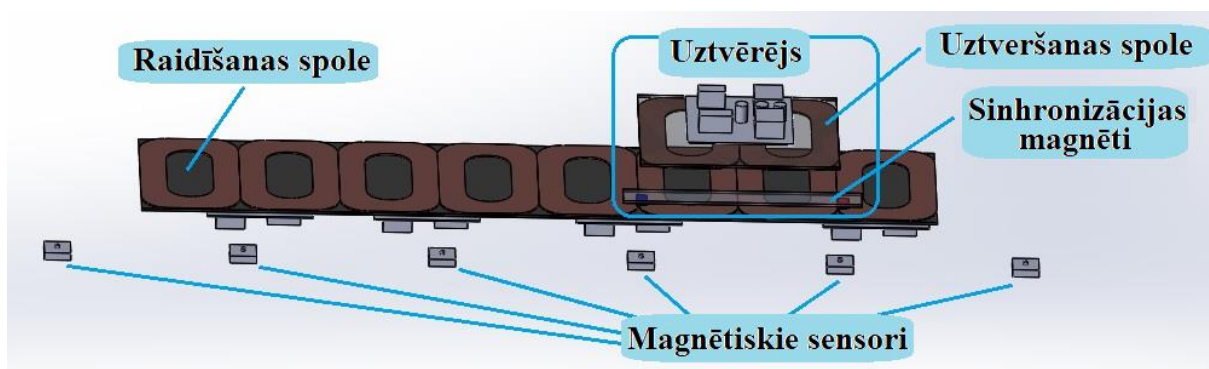
4.4. Dinamiskās enerģijas pārraides sistēmas prototips transportlīdzeklim kustībā

Šajā nodaļā aprakstīts enerģijas pārraides sistēmas prototips transportlīdzeklim kustībā. Ir sniegta 12 segmentu sistēmas prototipa konstrukcija un testa rezultāti.

Elektriskā ceļa konstrukcija

Viena no iespējamajām elektriskā ceļa konstrukcijām parādīta 4.9. attēlā, tajā ietilpst pārraides un uztveršanas moduļi, datu pārraides un sinhronizācijas sistēma. Sistēmas pārraides daļa sastāv no DD spoļu moduļiem, kas atrodas secīgi viens pēc otra un ir iemontēti ceļa segumā. Uztverošajā pusē var būt gan viens, gan vairāki DD spoļu moduļi, un tā tiek izvietota zem transporta līdzekļa. Sinhronizācijas sistēma sastāv no transportlīdzeklī izvietotajām magnētiskajām etiķetēm un ceļa segumā iemontētajiem sensoriem. Tā atšķiras no citām eksistējošām konstrukcijām [22], [23].

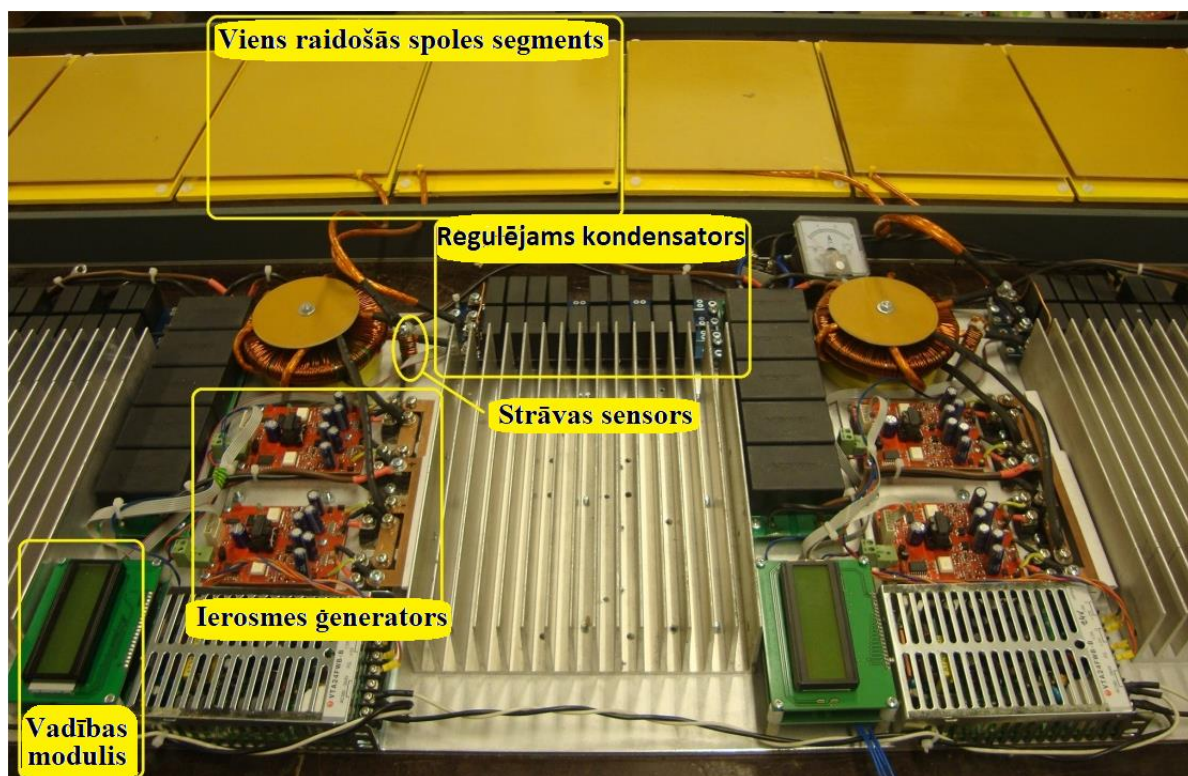
Sistēmas darbības laikā uztvērējs virzās gar pārraides moduļiem. Sinhronizācijas sistēma, kas ļauj noteikt uztvērēja atrašanās vietu un ieslēgt to pārraides moduli, kas pašlaik atrodas zem uztvērējspoles. Tas ļauj izvairīties no elektromagnētiskajiem blakus izstarojumiem un paaugstina visas sistēmas darbības efektivitāti, jo darbojas tikai tā raidītāja daļa, virs kuras atrodas uztvērējs.



4.9. att. Elektriskā ceļa struktūra.

Prototips

Elektriskā ceļa pārraides daļas kopējie izmēri ir $0,25\text{ m} \times 4,5\text{ m}$. Raidītājs sastāv no secīgi izvietotiem 12 DD spoļu moduļiem, kuru izmēri $250\text{ mm} \times 400\text{ mm}$. Ārējais izskats pārraides moduļim ar vadošo elektroniku parādīts 4.10. attēlā. Katram moduļim ir rezonanses frekvences piesaņošanas shēma, barošanas ģenerators, vadības bloks, komunikācijas un sinhronizācijas sistēma, un tas var darboties neatkarīgi no blakus moduļiem. Prototipa darba frekvence ir 85 kHz.

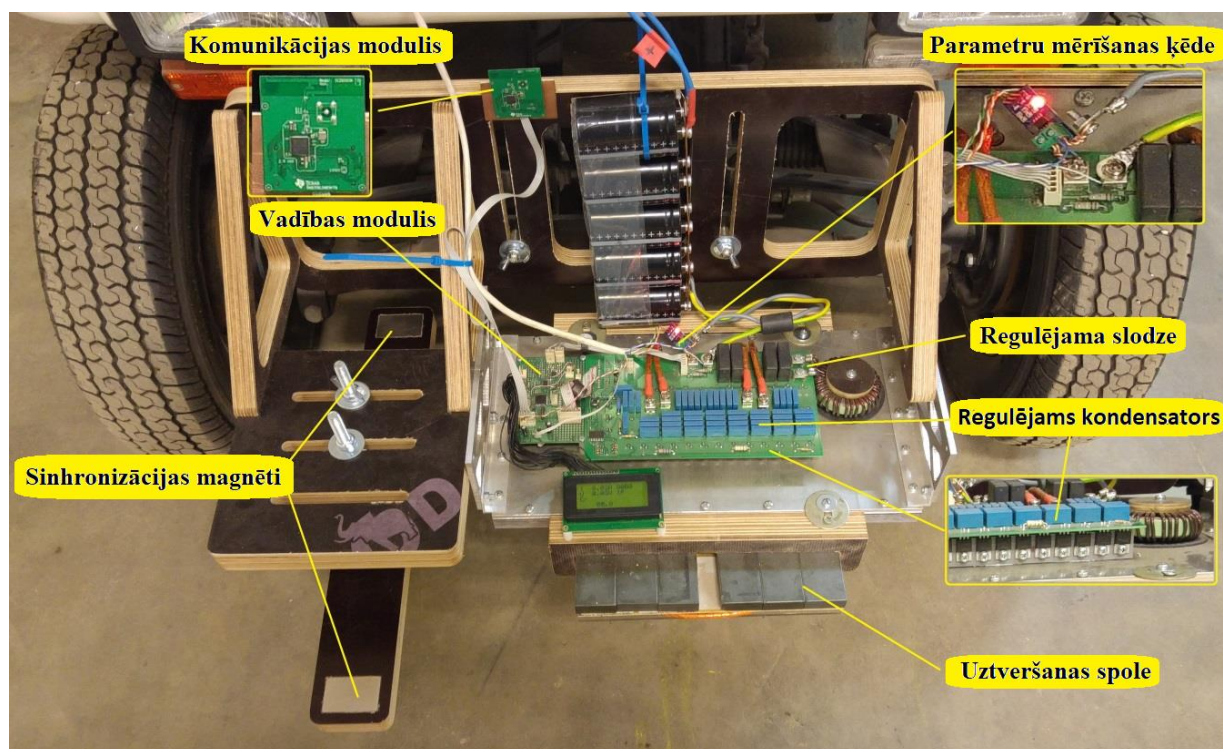


4.10. att. Pārraidis modulis.

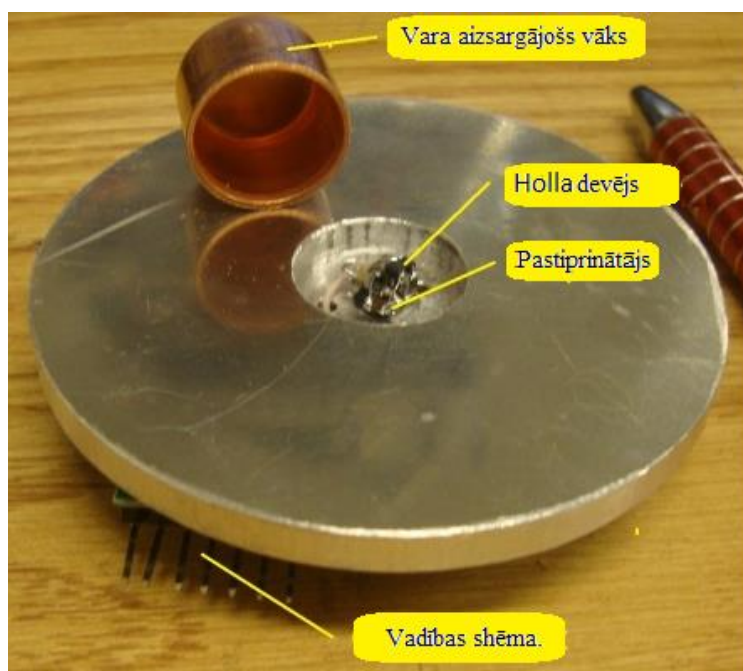
Uztveršanas moduļa ārējais izskats redzams 4.11. attēlā. Uztveršanas modulis sastāv no DD spolēm, kuru izmērs ir $250\text{ mm} \times 350\text{ mm}$, rezonanses frekvences pieskaņošanas shēmas, slodzes regulatora, vadības bloka un komunikācijas moduļa.

Lai sinhronizētu segmentu ieslēgšanu, ir izmantotas magnētiskās etiķetes. Uztvērējā ir divi pastāvīgie magnēti – viens ar dienvidu polu, otrs ar ziemeļu polu uz āru. Raidītājā pie katra spoļu pāra ir magnētiskais sensors, kas ir ekranēts no mainīgā magnētiskā lauka, izmantojot vara ekrānu. Katrs magnētiskais sensors ietver Holla devēja mikroshēmu, pastiprinātāju, komparatoru un digitālo loģiku. Sensoram ir magnētiskā lauka polaritātes izeja [24]. Katrs sensors ir pieslēgts diviem blakusesošiem segmentiem. Kad uz diviem blakus esošiem sensoriem vienlaikus iedarbojas dažādas polaritātes magnētiskais lauks, tas kalpo kā signāls, lai ieslēgtu nākamo segmentu un izslēgtu iepriekšējo. Sensora ārējais skats redzams 4.12. attēlā. Uz celiņa malām ir uzstādīti papildu sensori, kas garantē pirmā spoļu pāra ieslēgšanu un pēdējā izslēgšanu. Sinhronizācijas sistēma novietota paralēli pārraidis moduļiem 150 mm attālumā.

Komunikācijas sistēma starp pārraidis un uztverošo moduli veidota pēc 802.15.1 tehnoloģijas uz CC2650 čipa bāzes. Sakaru seanss iniciē moduli, kas atrodas enerģijas bezvadu pārraidis uztvērējā. Uztvērējs un pašreizējais raidītājs apmainās ar datiem no abiem kontūriem, kondensatoru kapacitātēm, barošanas ģenerators spriegumu un slodzes pretestību. Datu apmaiņai starp tiem tiek izmantota datu pakete, kuras lielums ir 20 baiti. Pamatojoties uz šiem datiem, tiek aprēķināts enerģijas optimālās pārraidis punkts pašreizējai saites koeficienta vērtībai pārraidis un uztvērējkontūrā.



4.11. att. Uztveršanas modulis.



4.12. att. Sinhronizācijas magnētiskais sensors.

Testēšanas rezultāti

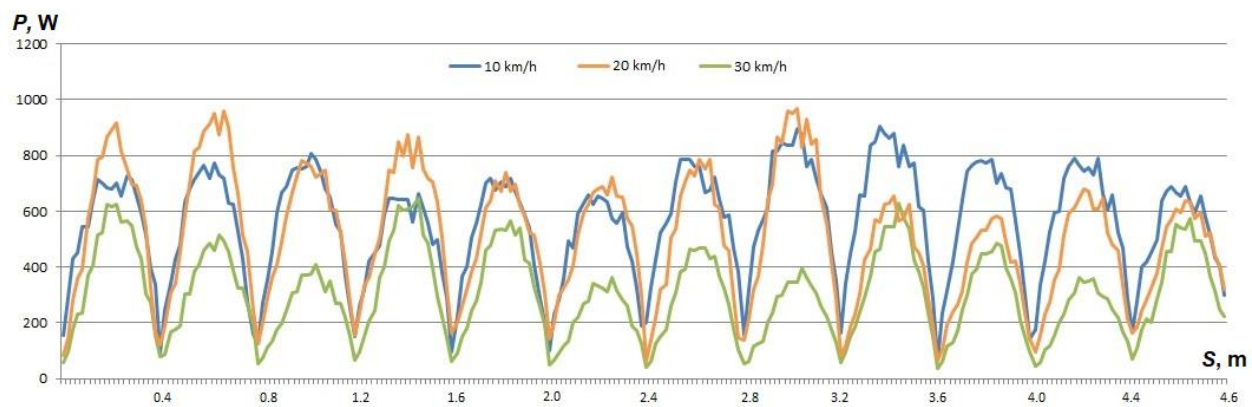
Eksperimenta laikā sistēmas darbs tika pārbaudīts kustībā. Uztveršanas modulis tika uzmontēts golfa auto, kas ar dažādu ātrumu brauca pa elektrisko ceļu. Golfa auto ātrumu regulēja ar kontrolleri, un tas varēja būt no 0 km/h līdz 30 km/h. Eksperimenta gaitā tika mērīta strāva un spriegums elektroniskās regulējamās slodzes bloka izejā, izmantojot tos, tika aprēķināta izejas jauda. Mērījumi tika veikti, izmantojot oscilogrāfu *PICOSCOPE 5444A*. Par slodzi tika izmantota golfa auto svina-skābes baterija ar 48 V spriegumu. Sistēmas pārraides daļa tika barota no maiņstrāvas tīkla, izmantojot taisngriezi. Kopējais eksperimentālās iekārtas skats redzams 4.13. attēlā.



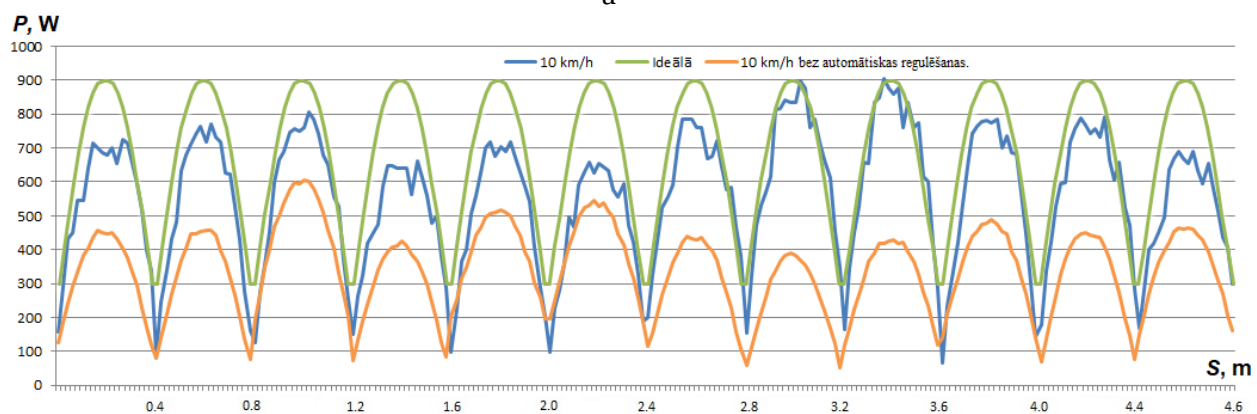
4.13. att. Kopējais eksperimentālās iekārtas skats.

4.14. a attēlā ir dots slodzei nodotās jaudas grafiks pie dažādiem kustības ātrumiem. Grafiks ir mērogots atbilstoši attālumam. Grafikā ir redzams, ka, pārvietojoties ar ātrumu 10 km/h un 20 km/h, sistēmas darbs praktiski neatšķiras. Jaudas pārraides maksimumos vērojamas svārstības, ko nosaka regulējošo sistēmu pārslēgšanas momenti. Pārraides jaudas amplitūdas starpība tiek skaidrota ar uztvērējspoles šķērsenisko novirzi attiecībā pret elektrisko ceļu. Ja kustības ātrums ir 30 km/h, jauda krīt, savukārt jaudas pārraides maksimums pārvietojas pa labi, kas liecina par parametru pieskaņošanas algoritma kavēšanos.

4.14. b attēlā redzams salīdzinājums starp sistēmas darbību ideālā gadījumā ar automātisko parametru pieskaņošanu pie ātruma 10 km/h un ar sistēmu bez parametru pieskaņošanas. Ideālie rādījumi tika iegūti, manuāli pozicionējot uztvērēju attiecībā pret raidītāju, mainot garenisko nobīdi un manuāli pieskaņojot parametru vērtības. Noņemot parametrus, bez parametru pieskaņošanas elektrodzinēja un uztvērēja kontūri tika atsevišķi noregulēti uz 85 kHz frekvenci. Sekundārā kontūra slodze bija rezistors ar 10 Ω pretestību.



a



b

4.14. att. Jauda slodzē, ja ir dažādi ātrumi (a), darba salīdzinājums ar ideāliem rādītājiem un sistēmu bez parametru pieskaņošanas (b).

SECINĀJUMI

Darba sākumā tika formulētas vairākas hipotēzes.

1. Pats optimālākais veids, kā organizēt elektrificēto ceļu sistēmu, ir induktīvā rezonanses enerģijas pārraide.
2. Induktīvās rezonanses enerģijas pārraides spoļu raksturlielumiem ir ekstrēmi, kuru atsekošana darba gaitā ļauj uzlabot enerģijas pārraides parametrus.
3. Lai induktīvā rezonanses enerģijas pārraides sistēma funkcionētu, nepieciešams pieskaņot tās parametrus.

Balstoties uz pētījuma rezultātiem, var izdarīt vairākus secinājumus.

1. Pētījuma tika aplūkotas visperspektīvākās elektrotransporta uzlādes tehnoloģijas. Lielākā daļa tehnoloģiju, kas tiek piemērotas stacionārai lādēšanai, nav piemērotas enerģijas pārraidei kustībā. No visām tehnoloģijām varētu būt noderīgas: trolejvada sistēmas ar elektrisko kontaktu, pārraide ar mikroviļņu starojumu un induktīvās rezonanses paņēmieni. Trolejvada sistēmām ir nopietnas mehāniskā kontakta nepilnības un strāvas pārraides atklāto daļu nolietojums, jutīgums pret piesārņojumiem un unifikācijas problēma dažādiem transportlīdzekļiem. Mikroviļņu enerģijas pārraide šobrīd ir iespējama tikai teorētiski, jo trūkst nepieciešamās jaudas un gabarītu uztverošā taisngriežējantena (*rectenna*). Tāpēc šobrīd vienīgā praksē īstenotā enerģijas pārraides sistēma transportam kustībā ir induktīvās rezonanses paņēmieni. Šajā darbā tas tika pierādīts praksē, īstenojot bezvadu ceļa segmentu bezvadu uzlādi transportam kustībā.
2. Lai apstiprinātu otro hipotēzi, tika veikta eksperimentu sērija, tā pilnībā tika apstiprināta. Eksperimentāli tika pētītas rezonanses induktīvās enerģijas pārraides sistēmas spoļu raksturlielumi, proti:
 - a) DD induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz pārraides induktivitātes spoles parametriem;
 - b) DD induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz rezonanses transformatora amplitūdas un frekvences raksturojumu (*AFR*);
 - c) induktivitātes spoļu savstarpējā novietojuma ietekme uz *AFR*;
 - d) enerģijas bezvadu pārraides efektivitātes pētījums, izmantojot DD spoles;
 - e) pētījums par pārraides kontūra paralēlās ierosmes ietekmi uz enerģijas bezvadu pārraides sistēmas parametriem;
 - f) pētījums par pārraides kontūra virknes ierosmes ietekmi uz enerģijas bezvadu pārraides sistēmas parametriem;
 - g) salīdzinošā jaudas novērtēšana, kas tiek nodota no dažādas konstrukcijas spoļu vienas laukuma vienības (īpatnējā pārraides jauda);
 - h) enerģijas bezvadu pārraides maksimālās efektivitātes stabilizācijas metodes izpēte, regulējot izejas spriegumu.

Ar eksperimentālās ierīces palīdzību apstiprināta iespēja regulēt rezonanses transformatora darbības režīmus, palielinot barošanas ģenerators spriegumu un sekundārā kontūra slodzes parametrus. Eksperimentos, izmantojot neliela izmēra

prototipu, kas aprakstīts 4.3. nodaļā, uzskatāmi parādīta enerģijas bezvadu pārraides iestatījumu pieskaņošana automātiskajā režīmā.

3. Hipotēze pilnībā tika apstiprināta. No eksperimentāliem datiem var secināt, ka, ja frekvences sānu nobīde ir 1 kHz, tad sistēma kļūst darbnespējīga. Tika noteikts, ka attāluma maiņa starp spolēm par 20 mm izraisa rezonanses frekvences nobīdi par 3 kHz. Tas izjauc rezonanses transformatora un svārstību avota saskaņotu darbību, kā arī rada pārraides jaudas kritumu. No tā izriet, ka nepieciešama kontūru rezonanses frekvences ieskaņošana un pārraudzība, citādi rezonanses efekts neizpaudīsies un sistēma darbosies kā indukcijas sistēma. 4.8. attēlā redzamajos grafikos ir redzams, ka slodzes pretestība, kas atbilst optimālajam darba punktam, mainās atkarībā no attāluma starp spolēm. No tā izriet, ka maksimālās jaudas vai maksimālās efektivitātes punkta sasniegšanai nepieciešama slodzes pretestības pieskaņošana. Ja izvērtē enerģijas pārraides dinamiskās sistēmas testus, kas redzami 4.14. b attēlā, tad pārraides jauda atšķiras divas reizes, strādājot ar parametru pieskaņošanu vai bez tās.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS UN AVOTU SARAKSTS

1. U.S. Department of Energy, (2010), “Alternative Fuels Used in Transportation”, pp. 216–226.
2. Volvo Bus Corporation, (2007), “VOLVO hybrid bus prototype”, from: http://www.volvobuses.com/SiteCollectionDocuments/VBC/Global%20site/Buses%20and%20coaches/Components%20fact%20sheets/Volvo_Hybrid_Eng1.pdf.
3. Dr. Andreas Festag, et al, (2008), “CAR-2-X Communication for Safety and Infotainment in Europe”, from: <http://goeckenjan.de/doc/080106.pdf>.
4. Siemens AG, (2013), “Wiener Linien Electric Bus“, from: <http://www.siemens.com/press/pool/de/events/2013/infrastructure-cities/2013-03-UITP-PK/background-ebus-wiener-linien-e.pdf>.
5. European Commission, (2001), “White Paper: European Transport Policy for 2010: Time to decide”, from: http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/2001_white_paper_en.htm
6. Prof. Dr. rer. nat. Dirk Uwe Sauer, (2012), “Electrification of bus routes with euses & fast charging stations – in case of no overhead wires”, ISEA Institute for Power Electronics and Electrical Drives, from: http://www.trolleyproject.eu/fileadmin/user_upload/download/University/TROLLEY_Rohlfes_RWTH_Aachen_ebus_comparison_01.pdf44.
7. Ж. Владимир, (2013), “12 электромобилей, которые можно купить прямо сейчас”, from: <http://www.avtovzglyad.ru/article/2013/10/08/610559-12-elektromobiley-kotoryie-mozhno-kupit-priamo-seychas.html>).
8. NPE, (2013), “Übersicht der Normen, Spezifikationen und Normungsgremien zur Elektromobilität”, from: http://www.dke.de/de/std/e-mobility/Documents/NPE-Normungsroadmap_DE_2.0a_Anhang%20D_%C3%9Cbersicht%20Normen.pdf.
9. J. Kim, et al.,(2010), “Low Frequency Electromagnetic Field Reduction Techniques for the On-Line Electric Vehicle (OLEV)”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 625–630.
10. S. Ahn, and J. Kim, (2011), “Magnetic Field Design for Low EMF and High Efficiency Wireless Power Transfer System in On-Line Electric Vehicles”, Proc. of EuCAP2011, 4148–4151, 2011.
11. K. Takei, (2012), “Mid-range Wireless Power Transmission System Using Real-time Complex Impedance Control”, PIERS Proceedings, Moscow, Russia, August 19–23, 2012.
12. А. Д. Григорьев (1990), “Электродинамика и техника СВЧ”, М.: Высшая школа, 1990.

13. J. Kim, et al., (2012), “Suppression of Leakage Magnetic Field from a Wireless Power Transfer System using Ferrimagnetic Material and Metallic Shielding, Electromagnetic Compatibility (EMC)”, 2012 IEEE International Symposium on 6–10 Aug. 2012, pp. 640–645.
14. S. Aldhafer, P. C. K. Luk and J. F. Whidborne (2014) “Tuning Class inverters applied in inductive links using saturable reactors”, Power Electronics, IEEE Transactions on (Volume: 29, Issue: 6) ISSN 0885-8993, pp. 2969–2978.
15. Маниктала С., (2008), “Импульсные источники питания от А до Z” Пер. с англ. К.: “МК-Пресс”, СПб.: “КОРОНА-БЕК”, 2008. 256 с.
16. Семенов. Б. Ю. (2005), “Силовая электроника: от простого к сложному”, М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 420 с.
17. Лабунцов В. А. (1987), “Энергетическая электроника: Справочное пособие”, М.: Энергоатомиздат, 1987. 464 с.
18. Гоноровский И. С. (1971), “Радиотехнические цепи и сигналы”, М.: Советское радио, 1971
19. D. M. Vilathgamuwa, J. P. K. Sampath (2015) “Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Vehicles (EVs)—Present and Future Trends”, “Plug In Electric Vehicles in Smart Grids”, ISBN 978-981-287-298-2, pp. 33–60.
20. T. C. Beh, “Automated impedance matching system for robust wireless power transfer via magnetic resonance coupling,” M.S. thesis, Dept. Advance Energy, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba, 2011.
21. S. Aldhafer, Patrick C. K. Luk, J. F. Whidborne, (2014) “Electronic Tuning of Misaligned Coils In Wireless Power Transfer Systems”, Power Electronics, IEEE Transactions on (Volume:29, Issue: 11) ISSN 0885-8993, pp. 5975–5982.
22. Buja, Giuseppe; Rim, Chun-Task; Mi, Chunting C. “Dynamic Charging of Electric Vehicles by Wireless Power Transfer” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Volume: 63, Issue: 10, pp. 6530–6532. Published: OCT 2016.
23. Debbou, Mustapha; Colet, Francois “Inductive Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Dynamic Charging” Book Group Author(s): IEEE Conference: IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies - Wireless Power (WoW) Location: Knoxville, TN Date: OCT 04-06, 2016.
24. В. В. Комлик (1978), “Радиотехника и измерения”, Изд-во ‘Вища школа’, Киев, 1978.