

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 darbs

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 darbs. Rīga: RTU Izdevniecība, 2020. 165 lpp.

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

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.....	6
1.1. Motivācija.....	6
1.2. Galvenās hipotēzes un mērķi.....	8
1.3. Darba aprobācija	10
2. Uzbūves principi enerģijas pārraides sistēmai uz transportlīdzekli	12
2.1. Ievads	12
2.2. Elektroenerģijas pārraides tehnoloģijas uz transportlīdzekli.....	12
2.3. Salīdzinošā analīze elektroenerģijas pārraides veidiem uz transportlīdzekli	17
2.4. Enerģijas bezvadu pārraides induktīvās rezonanses sistēmas pamatelementi	21
2.5. Matemātiskā modeļa analīze enerģijas bezvadu pārraidei ar induktīvās rezonanses metodi..	22
3. Enerģijas bezvadu pārraides induktīvās rezona	25
3.1. Enerģijas bezvadu pārraides eksperimentālās iekārta izmantojot rezonanses kontūru savstarpējo indukciju.....	25
3.2. DD induktivitātes spoļu attāluma un savstarpējā novietojuma ietekme uz rezonanses transformatora parametriem	33
3.3. Pētījums par pārraides kontūra ierosmes veidu ietekmi uz enerģijas bezvadu pārraides sistēmas parametriem	56
3.4. Salīdzinošie novērtējumi jaudai, īpatnējā pārraides jauda	87
3.5. Enerģijas bezvadu pārraides maksimālās efektivitātes stabilizācijas metodes izpēte, regulējot izejas spriegumu.....	90
4. Optimālo parametru pieskaņošanas sistēmas izstrāde dinamiskai enerģijas bezvadu pārraidei kustībā	109
4.1. Ievads	109
4.2. Svārstību kontūru savstarpējās izskaņošanās kompensācija	110
4.3. Vadības modulis	118
4.4. Informācijas procesu analīze un komunikācijas tīkla izstrāde dinamiskajai WPT	122
4.5. Frekvences automātiskā fāžu pieskaņošanas sistēma.....	136
4.6. Maza mēroga prototips.....	138
4.7. Dinamiskās enerģijas pārraides sistēmas prototips transportlīdzeklī kustībā	141
5. DISKUSIJA.....	147
SECINĀJUMI.....	156

Izmantotās literatūras un citu informācijas avotu saraksts..... 159

PIELIKUMI..... 163

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, kuriem elektrodzinējs ir vienīgā piedziņas iekārta [4].

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

Mūsdienu globālās politikas apstākļos, kad tiek reglamentēts kaitīgo gāzu emisijas apjoms atmosfērā, viena no valsts subsidējamajām jomām ir tādu sabiedriskā transporta līdzekļu 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 16000 pilni akumulatora uzlādes cikli.

Salīdzinot ar privāto vieglo automobili – diennakts nobraukums ir no 20 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 pietiks aprēķinātajam virsbūves resursam 15 gadiem, savukārt autobusam 15 gadu laikā būs jānomaina 7 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 vispilgtāk izteiktajām problēmām transporta līdzekļiem, 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 maksimālo nobraukuma attālumu 360 km, tomēr arī tas nav liels attālums starppilsētu braucieniem [7]. Tieši tāpēc liels skaits Eiropas ģimeņu, kuras jau ir iegādājušās elektromobili, nesteidzas šķirties no rezerves mašīnas ar oglekļa degvielu. Iespējamais neliela nobraukuma problēmas risinājums – akumulatoru tilpuma palielināšana, bet 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 maksu tiks veikta ātra akumulatoru bloka nomaiņa, šobrīd ir grūti realizējams – ir daudz ražotāju, kuri piedāvā daudzus un dažādus patentētus akumulatoru bloku standartus.

Iespējams, ka lietotājam visērtākais risinājums varētu būt “elektrisko ceļu” infrastruktūras izveide, kas nodrošinātu uzlādes iespējas visiem transportlīdzekļiem, kas pārvietojas pa šo ceļu. Šāds risinājums ļaus samazināt nepieciešamo barošanas elementu apjomu, palielinās 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 uzlīmētas 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.

Tā kā enerģijas bezvadu pārraides sistēmas rezonanses induktīvās spoles ir induktīvi saistītu svārstību kontūru pāris, 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 šādas 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 izvirzītos 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 automobiļus. 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 metrus garš elektrificētā ceļa segments, kurš ļauj veikt elektrotransporta uzlādi kustībā. Prototipa darbs tika pārbaudīts, gan darbojoties parametru pieskaņošanas sistēmai, gan 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 saņēma 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 metrus gara ceļa ar 12 moduļiem.

Praktiskās novitātes

1. Enerģijas bezvadu pārraides induktīvās rezonanses sistēmas pieskaņošanas metode, pārslēdzot kapacitātes magazīnu izmantojot pusvadītāju atslēgas nav iepriekš izmantota praksē.
2. Slodzes regulēšana enerģijas bezvadu pārraides rezonanses induktīvās sistēmas sekundārajā kontūrā, nosakot maksimālās jaudas punktu, iepriekš nav izmantota praksē.
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 pieskaņošanas metode iepriekš nav izmantota praksē.

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 pieskaņošanas sistēmu var izmantot gan 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 un saņemts 1 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.

Pateicības

Šī disertācija ir izstrādāta ar Eiropas Ekonomikas zonas un Norvēģijas 2014.-2021. gada finanšu instrumenta finansētas Baltijas Pētniecības programmas atbalstu tās pirmā (Igaunijas) konkursa projekta EMP474 “Optimizētas dzīvojamo māju akumulatoru enerģijas uzkrāšanas sistēmas (ORBES)” ietvaros.

Šī disertācija ir atbalstīta no projekta “Pētījums par elektroauto bezvadu uzlādes raidošā moduļa (TX) pirmsražošanas modeļa izstrādi”. 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”.

2. UZBŪVES PRINCIPI ENERĢIJAS PĀRRAIDES SISTĒMAI UZ TRANSPORTLĪDZEKLI

2.1. Ievads

Elektroenerģijas pārraide uz transportlīdzekli sniedz jaunas tā izmantošanas iespējas. Izmantojot klasiskos enerģijas pārraides veidus, kā pantogrāfu un kontakttīklu, tika radīti daži transporta veidi, piemēram, trolejbusi un tramvaji. Attīstoties elektronikai un hibrīda transportam, radās iespēja izvietot transportlīdzeklī enerģijas uzkrājējus vai hibrīda spēka iekārtas.

2.2. Tehnoloģijas elektroenerģijas pārraidei uz transportlīdzekli

Kontakta tīkla trūkumi tādi kā dārdzība, apkopes sarežģītība, fiksēts maršruts, strāvu uztverošās iekārtas straujšais nolietojums ir pamudinājuši meklēt jaunus risinājumus elektrotransporta jomā. Viena no idejām, kura kvalitatīvi maina elektrotransportu, ir uzlādes staciju izvietošana visā kustības maršrutā, lai uzlādētu transporta līdzekļa iekšējo uzkrājēju. Šobrīd eksistē vairākas konkurējošas uzlādes tehnoloģijas, dažas no tām vēl atrodas izmēģinājumu un ieviešanas stadijā, bet citas vēl tikai tiek izstrādātas. Aplūkosim visperspektīvākās no tām.

“Plugin systems”

Visvienkāršākais elektroenerģijas pārraides veids no uzlādes stacijas uz transportlīdzekli ir tiešais savienojums, izmantojot elektrokabeli (2.1. attēls.). Šobrīd ir vairāki elektrotransporta akumulatoru bateriju uzlādes staciju standarti, kur tiek izmantota gan līdzstrāva, gan maiņstrāva:

- **J1773, Magne charge** – pašlaik novecojis standarts. Tika lietots 1996. – 2001. gadā. Aprakstīja vadu un bezvadu transporta līdzekļa uzlādes sistēmu. Tika lietots kompānijas GM automobiļos EV1, Chevy S10 EV, Toyota RAV4 EV un citos tā laika elektromobiļos.
- **SAE J1772-2001, Avcon** – Aprakstīja vadu uzlādes sistēmu ar jaudu līdz 6.6 kW. Pēc kompānijas Yazaki Sōgyō veiktās revīzijas pārraidāmā jauda pieauga līdz 19.2 kW. Standarts tika pārdēvēts par SAE J1772-2009. Tika lietots un tiek lietots tādu ražotāju kā Chrysler, GM, Ford, Toyota, Honda, Nissan un Tesla transporta līdzekļos.

Tiešā savienojuma sistēma ir piemērota lielas kapacitātes uzkrājēja uzlādei ilgstošas stāvēšanas laikā un ir maz piemērota uzlādei īsas apstāšanās laikā, bet pilnīgi nepiemērota transporta līdzekļa uzlādei kustības laikā.



2.1. att. Vadu uzlādes sistēma, ko izmanto Chevrolet Spark EV automobiļos [7]

Trolley systems

Sistēma, kas elektriskajam kontaktam starp elektroenerģijas raidītāju un uztvērēju, izmanto trolleja sistēmu, atrodas netālu no stāvvietas.

Pastāv dažādi trolleja sistēmas īstenošanas varianti. Kompānija ABB piedāvā izmantot stāvvietās uzstādīto kontaktplāksņu komplektu [8]. Strāvas uztvērējs ir aprīkots ar automātisku pozicionēšanas sistēmu, kas ļauj mainīt strāvas uztvērēja atrašanās vietu attiecībā pret kontaktplāksnēm. Sistēmas skats ir sniegts 2.2. attēlā.



2.2. att. Kompānijas ABB trolleja sistēma [8]

Kompānija SIEMENS piedāvā trolleja sistēmu [9], kas ir kardināli atšķiras no kompānijas ABB sistēmas. Tās ir galvenā atšķirība – iespēja izmantot kustībā. SIEMENS piedāvātajā sistēmā ir izmantoti divi paralēli vadi un pantogrāfs, kas to padara līdzīgus ar esošajiem trolejbusiem. Sistēmas skats ir parādīts 2.3. attēlā.



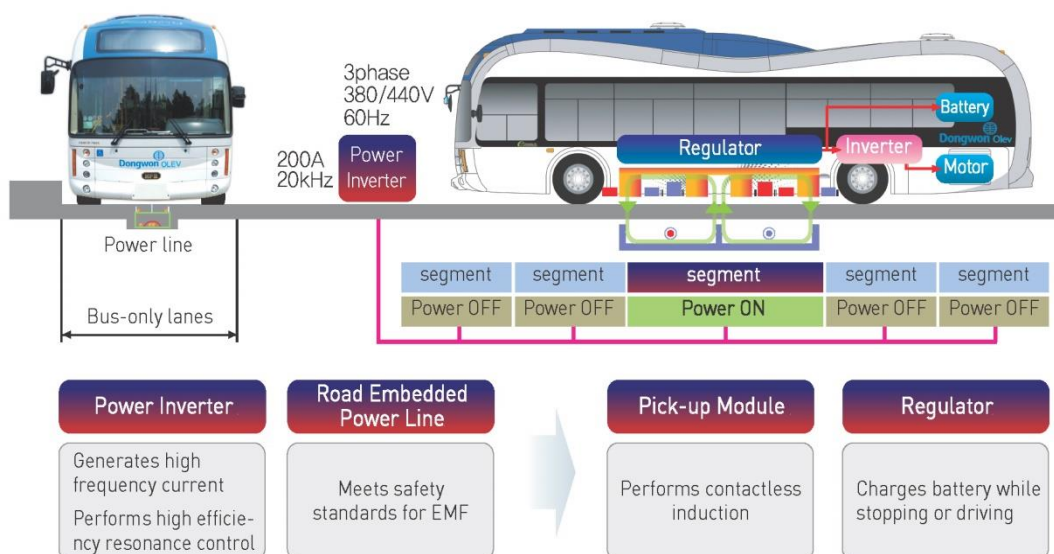
2.3. att. Kompānijas SIEMENS trolleja sistēma [9]

Šajā gadījumā enerģija tiek uzkrāta akumulatoru vai jonistoru blokos un tiek izlietota līdz nākamajam uzlādes punktam. Šī sistēma ir piemērota transportlīdzekļu uzlādēšanai stāvvietā vai satiksmē īsos ceļa posmos.

Elektromagnētiskās indukcijas metode

Sistēmas, kur izmanto elektromagnētiskās indukcijas metodi, tiek uzskatītas par visperspektīvāko virzienu, jo tās sniedz iespēju pievadīt elektroenerģiju bez tieša kontakta starp uztvērēju un pārraidītāju. Pārraide notiek, izmantojot divu blakus esošo selenoīdu, kuri veido transformatoru, magnētiskā lauka savstarpējo indukciju. Pateicoties elektrodinamiskajai indukcijai, elektriskā maiņstrāva, kura plūst caur primāro tinumu, veido mainīgo magnētisko lauku, tas iedarbojas uz sekundāro tinumu, inducējot tajā elektrisko strāvu. Transformators var būt gan ar serdi, gan bez tās, tajā pat laikā primārais un sekundārais transformatora tinums elektriski nav saistīti savā starpā. Atkarībā no transformatora konstrukcijas tajā iespējami enerģijas zudumi tinumos, serdē, kā arī notiek elektromagnētiskā lauka izkliede apkārtējā vidē. Transformatora lietderības koeficients var sasniegt 98%. Galvenais bezvadu pārraides metodes trūkums ir ļoti mazais tās darbības attālums. Uztvērējam un raidītājam ir jābūt tiešā tuvumā, lai savstarpēji efektīvi mijiedarbotos. Jo lielāks attālums starp primāro un sekundāro tinumu, jo lielāka magnētiskā lauka daļa nerasnē sekundāro tinumu. Vēl vairāk palielinot attālumu, induktīvā saikne kļūst neefektīva, tērējot lielāko pārraidāmās enerģijas daļu nelietderīgi – tukšgaitā. Lai palielinātu efektivitāti un attālumu no raidītāja līdz uztvērējam, tiek izmantots rezonanses transformators. Rezonanses transformatorā primārais un sekundārais tinums ir svārstību kontūri, kuri noskaņoti vienā frekvencē. Cits efektivitātes paaugstināšanas paņēmiens ir nesinusoidālu impulsu izmantošana svārstību kontūra ierosmei. Enerģijas impulsu veida pārraide notiek kontūra vairāku svārstību ciklu laikā. Pārraides un uztvērējspole tiek konstruktīvi izveidotas kā vienas kārtas selenoīds vai plakana spirāle ar kondensatoru komplektu, kurš ļauj noskaņot rezonanses kontūru vajadzīgajā frekvencē.

Kā piemēru transporta līdzekļa bezvadu uzlādes sistēmai var minēt OLEV: On-Line Electric Vehicle [10]. Sistēmu veido pieslēdzamie indukcijas segmenti, kuri iemontēti ceļa segumā un uztvērējā kurš izvietots transporta līdzeklī. Sistēmā OLEV tiek izmantota enerģijas pārraides frekvence 20 kHz. Shematiski sistēma ir atainota 2.4. attēlā.



2.4. att. OLEV sistēma [10]

Izmantojot šo sistēmu, ir iespējama uzlāde gan stāvošam, gan arī kustībā esošam transportlīdzeklim.

Mikroviļņu metode

Mikroviļņu frekvenču (MFV) [11] izmantošanai elektroenerģijas pārraides sistēmā ir ievērojamas priekšrocības. Atšķirībā no indukcijas paņēmiena, MFV viļņa garums ir mazāks par izstarotāja ģeometriskajiem izmēriem, tas ļauj izmantot apertūras antenas, lai izveidotu šauru virzības diagrammu. Šaura MFV kūļa izmantošana ļauj samazināt enerģijas izkliedi un palielināt atstatumu starp elektriskās enerģijas raidītāju un uztvērēju. Kā mikroviļņu frekvenču svārstību ģeneratoru parasti izmanto magnetronu – jaudīgu elektronisko lampu, kura ģenerē mikroviļņu frekvenču svārstības, savstarpēji iedarbojoties elektronu plūsmai un magnētiskajam laukam. Mikroviļņu enerģijas pārvēršanai atpakaļ elektrībā var izmantot rektenu [12], kuras enerģijas pārveidošanas efektivitāte pārsniedz 95%. Šis paņēmiens bija piedāvāts enerģijas pārraidei no orbitālajām saules elektrostacijām uz zemi un kosmosa kuģiem, kas pamet Zemes orbītu.

2.3. Salīdzinošā analīze elektroenerģijas pārraides veidiem uz transportlīdzekli

Visērtākais elektroenerģijas pārraides paņēmiens ir mikroviļņu frekvenču diapazona izmantošana, tomēr šobrīd eksistē grūtības izveidot lielas jaudas rektennas. Elektromagnētiskās indukcijas metode ir vieglāk realizējamā alternatīva, bet tai ir ierobežots darbības attālums, kā arī ir zemāks lietderības koeficients nekā mikroviļņu diapazona izmantošanas gadījumā, jo ir grūti radīt šauras iedarbības antenu un izvairīties no jaudas izkliedes uz apkārtējiem priekšmetiem. Kontakta metodēm elektriskās strāvas pārraides dēļ ir visaugstākais lietderības koeficients, bet ir nopietni ierobežojumi, jo ir nepieciešams mehāniskais kontakts starp elektroenerģijas raidītāju un uztvērēju. Kā arī lielākajā daļā gadījumu ir jānodrošina precīza uztvērēja pozicionēšana attiecībā pret elektriskās enerģijas raidītāju, tam nepieciešami papildus izdevumi.

No fiziskās realizācijas viedokļa visvienkāršākais risinājums iekšējā enerģijas uzkrājēja uzlādei ir sistēmas ar tiešu elektrisko kontaktu. Pašreiz šādas sistēmas tiek testētas pilsētas sabiedriskā transporta eksperimentālajos maršrutos. Sistēmas ar elektromagnētisko indukciju ir darba prototipu līmenī, un pašreiz tiek veikti pētījumi to īpašību uzlabošanai. Mikroviļņu frekvences diapazona sistēmām eksperimentāli ir pierādīta to kopējā efektivitāte, bet par darba prototipu kā transportlīdzekļa uzlādes ierīci datu nav.

No perspektīvā pielietojuma viedokļa vislielāko interesi izraisa bezkontakta tehnoloģijas, jo tām ir priekšrocības, salīdzinot ar sistēmām, kurās pielieto tiešu elektrisko kontaktu. Sistēmās, kurās izmanto mikroviļņu frekvences, galvenie pētījumi notiek pie iespējamajiem rektennas konstrukcijas variantiem. Sistēmām, kurās izmanto elektromagnētisko indukciju, par izpētes objektu kļūst rezonanses kontūru konstrukcija un to ierosmes paņēmieni, kā arī spoļu parametru pieskaņošana un kontrole, adaptācija dažādos darba režīmos, lai uzlādētu transporta līdzekli kustībā.

Mikroviļņu frekvences diapazona pielietošanas paņēmiens

Visaugstākie bezvadu enerģijas pārvades rezultāti tika sasniegti mikroviļņu frekvences (MVF) diapazonā. 1976.gadā amerikāņu fiziķim Viljamam Braunam izdevās pārraidīt mikroviļņu kūli ar jaudu 30 kW, 1 jūdzes (1,6 km) attālumā. Mikroviļņu diapazona frekvences ir viegli ģenerēt un fokusēt bez izkliedes apkārtējā vidē. Par galveno šīs sistēmas trūkumu var uzskatīt to, ka katrs bioloģiskais objekts, kas nokļuvis spēcīgā mikroviļņu stara

laukā, gūs smagus bojājumus, kas nav savienojami ar dzīvotspēju. Blīvi apdzīvotas pilsētas apstākļos ir nepieciešams veidot sistēmu, kura vienlaicīgi spētu pārraudzīt liela daudzuma transporta līdzekļu atrašanās vietas, bet sistēmu šādā situācijā ir grūti realizēt.

Šī paņēmiena priekšrocības ir:

- Elektriskā kontakta neesamība starp elektriskās enerģijas raidītāju un uztvērēju
- Augsts lietderības koeficients
- Tūlītēja gatavība darbam
- Darba iespējas īslaicīgās apstāšanās vietās
- Darba iespējas transportlīdzekļa kustības laikā
- Iespēja izveidot sistēmu ar lielu attālumu starp elektriskās enerģijas raidītāju un uztvērēju.

Sistēmas trūkumi ir:

- Augsts ģenerējamo traucējumu līmenis
- Konstruktijas sarežģītība;
- Elementu bāzes neesamība lielas jaudas iekārtas radīšanai.

Kontaktsistēmas izmantošanas veids

Visvienkāršākais paņemiens ir elektriskais kontakts starp raidītāju un uztvērēju. Lielākie uzlādes sistēmu ražotāji tādi kā Siemens piedāvā tieši šādu enerģijas pārraides sistēmu kustīgam objektam [13]. Tomēr, pielietojot šādu paņēmieni, rodas strāvas uztvērēja un kontaktplāksnes pozicionēšanas precizitātes problēma. Šo problēma tiek risināta, uzstādot automātiskas sistēmas raidītāja un uztvērēja pozicionēšanai, kā arī transporta līdzekļa vadības sistēmas, ar kuru palīdzību ir iespējams uztvērēju pozicionēt tieši pie raidītāja. Šai sistēmai atklājas noteikti sarežģījumi, darbojoties sarežģītos klimatiskajos apstākļos, tā ir pakļauta nolietojumam un tai nepieciešama bieža tehniskā apkope. Gadījumā, ja transporta līdzekļa kustības maršrutā ir uzstādīta trolley sistēma, ir iespējams to izmantot kā uzlādes avotu, bet tas rada transporta līdzekļa maksimālā kustības ātruma ierobežojumus konkrētajā ceļa posmā.

Šī paņēmiena priekšrocības ir:

- Augsts sistēmas lietderības koeficients, vairāk par 99,5%;
- Ātra automātiska savienojuma iespējamība;

- Elektromagnētisko traucējumu ģenerēšanas neesamība

Kā sistēmas trūkumus var minēt:

- Pārtraides un uztveršanas iekārtas mehāniskais kontaktu
- Pārtraides un uztveršanas iekārtas elektriskais kontaktu
- Strāvas kontaktu piesārņojuma ietekme uz sistēmas darbu
- Nepieciešamība precīzi pozicionēt transporta līdzekli attiecībā pret uzlādes iekārtu
- Kustīgu mehānisko daļu esamība.

Sistēmas analīze ļauj secināt, ka tā ir maznoderīga, lai uzlādētu transportlīdzekļus, kas atrodas kustībā.

Indukcijas paņēmieni ar kopējo magnētisko serdi

Klasiskais transformators enerģiju nodod magnētiskajā vadā mainīgā magnētiskā lauka veidā [14,15], tajā pat laikā elektriskais kontakts starp primāro un sekundāro tinumu vispār nenotiek. Ja tiek izveidota magnētiskās serdes konstrukcija, kura sastāv no divām ātri atdalāmām daļām, uz vienas no kurām atradīsies transformatora primārais tinums, bet uz otras – sekundārais, tad ir iespējams elektroenerģijas bezkontakta pārtraide ar efektivitāti vairāk nekā 96%. Kā šī paņēmiena priekšrocības var minēt to, ka tajā nav neizolētu konstrukcijas fragmentu, kas atrodas zem sprieguma, un arī iekārtas nelielos gabarītos. Šī paņēmiena trūkums ir tas, ka ir jābūt mehāniskam kontaktam starp divām magnētiskās serdes pusēm – sistēma ir paredzēta stacionārai uzlādei.

Minētā paņēmiena priekšrocības ir:

- Elektriskā kontakta neesamība starp elektriskās enerģijas raidītāju un uztvērēju
- Tūlītēja gatavība darbam
-]Darba iespējamība īslaicīgas apstāšanās laikā

Kā sistēmas trūkumus var minēt:

- Nepieciešams ciešs kontakts un augsta uztvērēja un pārtraides magnētisko vadu pozicionēšanas precizitāte
- Nedaudz zemāks lietderības koeficients, salīdzinot ar kontakta sistēmām
- Augsts ģenerējamo traucējumu līmenis
- Konstrukcijas sarežģītība
- Nespēja darboties, transporta līdzeklim pārvietojoties

Rezonanses indukcijas paņēmieni

Šī paņēmiena pamatā ir divu kontūru izmantošana, kuri tiek noskaņoti uz vienu rezonanses frekvenci,. Klasiski bija pieņemts uzskatīt divus tuvu esošus kontūrus kā vienu rezonanses transformatoru [16]. Tomēr kontūru spoles var izskatīt arī kā rāmja antenas, bet visu enerģijas pārraides sistēmu kā divu antenu mijiedarbību, kas atrodas tuvējā starojuma zonā, [17,18],. Šajā gadījumā antenu kombināciju pārraides un uztvērējpusē var mēģināt apskatīt kā fāzētu antenu režģi (FAR). Pašlaik divu antenu savstarpējā mijiedarbība tuvējā starojuma zonā ir maz izpētīta, tomēr eksperimenti un teorētiskie darbi pieļauj varbūtību, ka ir iespējams koncentrēt tuvējā lauka enerģiju ar FAR palīdzību [19,20]. FAR izmantošana, iespējams, samazinās vai pilnībā novērsīs gan enerģijas izkliedi uz apkārtējiem priekšmetiem, gan blakusstarojumu apkārtējā vidē, kas ir raksturīgi enerģijas pārraides indukcijas paņēmieniem.

Minētā paņēmiena priekšrocības ir:

- Elektriskā kontakta neesamība starp elektriskās enerģijas raidītāju un uztvērēju
- Tūlītēja gatavība darbam
- Darba spēja īslaicīgas apstāšanās laikā
- Darba spēja transportlīdzekļa kustības laikā

Kā sistēmas trūkumus var minēt:

- Neliela darbības distance
- Zems lietderības koeficients, salīdzinot ar kontakta sistēmām, izstarotāju vājās virziendarbības dēļ.
- Augsts ģenerējamo traucējumu līmenis
- Konstrukcijas sarežģītība.

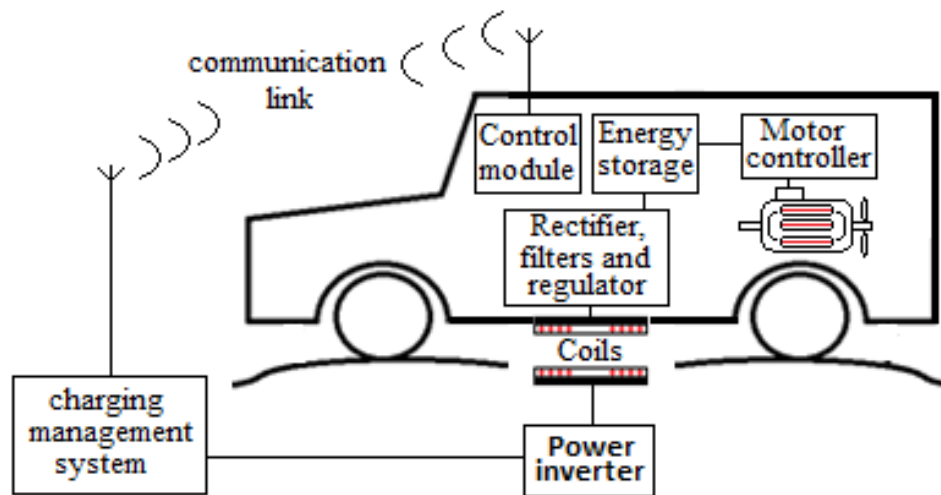
2.4. Enerģijas bezvadu pārraides rezonanses sistēmas pamatelementi

Enerģijas bezvadu pārraides rezonanses sistēmas komponenti ir redzami 2.5. 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)

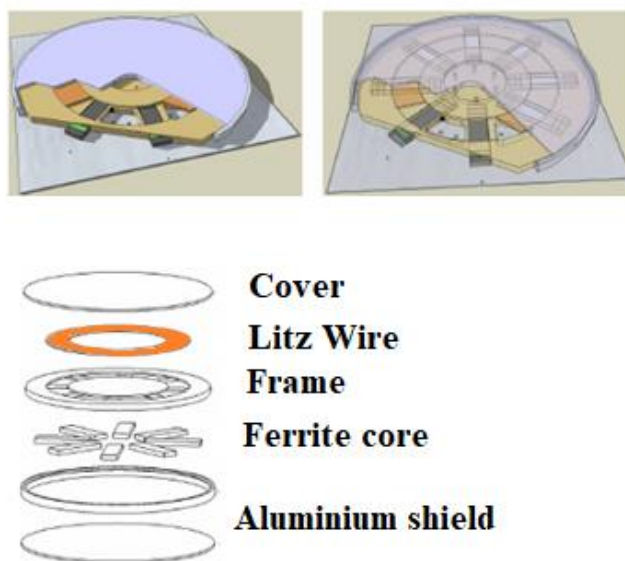
Rezonanses sistēmas uzlādes algoritms darbojas šādi: transportlīdzekli novieto virs uzlādes laukuma, pēc identifikācijas procesa jaudas invertors pārveido ienākošo strāvu rezonanses spoles ierosmes augstfrekvences strāvā. Enerģija, kas saņemta uztvērēja pusē, pēc iztaisnošanas vai filtrēšanas nonāk akumulatorā vai spēka iekārtā. Lai realizētu atgriezenisko saiti, informācija par uzlādes parametriem tiek nodota spēka invertora kontrollerim un, otrādi, bezvadu sakaru veidā.



2.5. att. Enerģijas bezvadu pārraides sistēmas pamatelementu shēma

Enerģijas pārraidei un uztveršanai izmantotās gredzenveida rezonanses spoles uzbūve

Enerģijas pārraides un uztveršanas gredzenveida rezonanses spoles uzbūve ir atainota 2.6. attēlā [21].

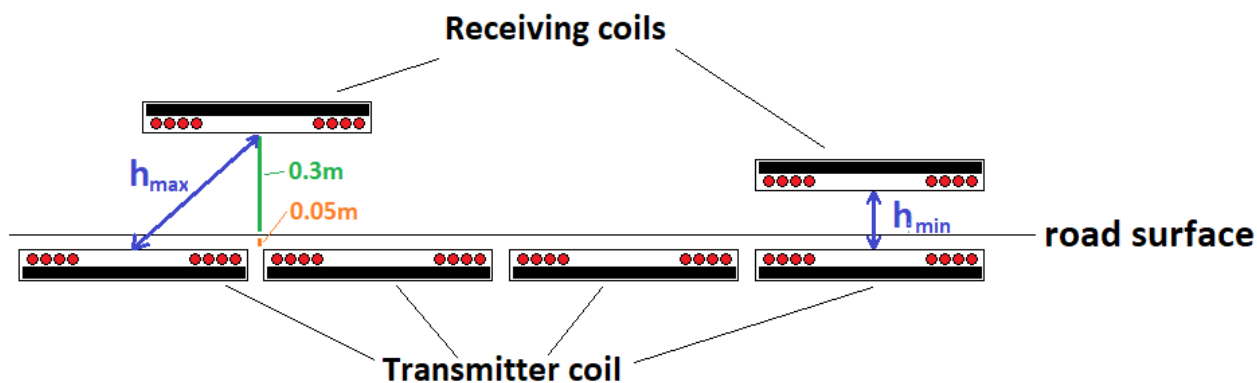


2.6. att. Gredzenveida rezonanses spoles uzbūve

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.

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

Enerģijas bezvadu pārraides sistēmas gredzenveida spoļu efektīvā darba distance ir no $0.25 D$ līdz $0.75 D$, kur D ir izmantojamās spoles diametrs. Lielākajai daļai vieglo automobiļu klīrenss ir diapazonā no 0.1 metra līdz 0,3 metriem. 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 metriem.



2.7. att. Maksimālais un minimālais attālums starp spolēm

Tā kā, pārvietojoties transportam, uztvērējsspole pārvietojas virs secīgi uzstādītajām pārraides spolēm 2.7. attēlā, tad maksimālo attālumu starp spolēm var noteikt kā attālumu starp uztvērējsspoles centriem punktā, kas atrodas vienādā attālumā no divām blakus esošajām pārraides spolēm maksimālā automašīnas klirensa augstumā, izmantojot šādu formulu:

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

Kur: $h_{\max}$ –maksimālais attālums starp spoles centriem, meklējamais lielums

h_{car} – mašīnas klirensa maksimālais augstums, mūsu piemērā ir 0.3 metri.

h_{RS} – Ceļa klājuma (Road Surface) biezums, mūsu piemērā 0.05 metri.

D_e – efektīvas maksimālās enerģijas pārraides tāluma attiecība pret spoles diametru, mūsu piemērā ir 0.75.

Atrisinot šo vienādojumu, var noteikt, ka maksimālais attālums starp spoles centriem ir 0.47 metri, no tā nav grūti noteikt, ka spoles efektīvais diametrs šādā gadījumā ir 0,63 metri.

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:

$$t_{\text{round}} = 0.1 * \frac{D}{0.278 V} \quad (2.2)$$

Kur: D – spoles diametrs, mūsu piemērā 0.63 metri

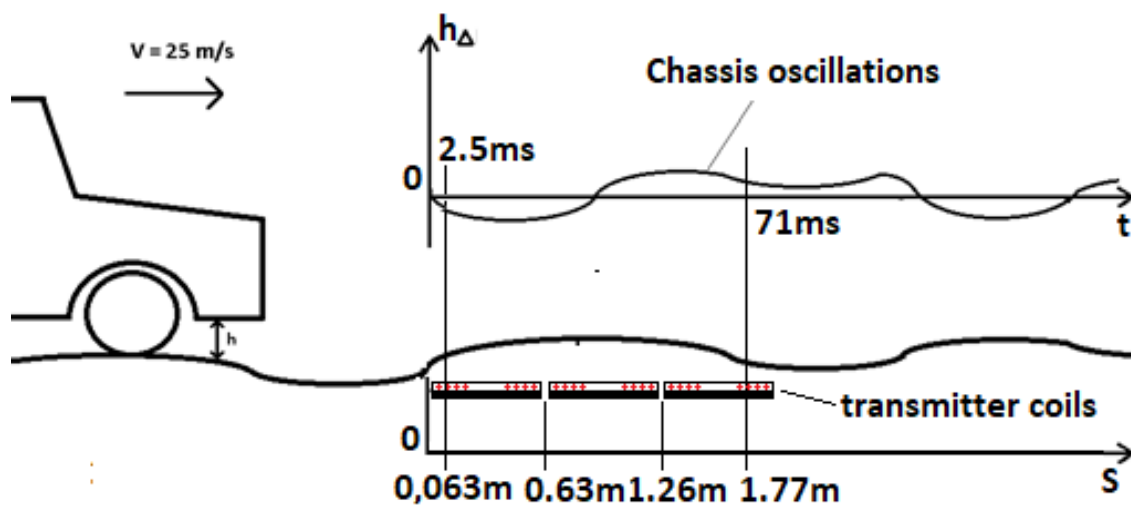
V – Transportlīdzekļa ātrums, mūsu piemērā 90 km/h.

t_{round} – Viena sistēmas pieskaņošanas cikla ilgums.

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

Tāpat, veidojot prasības pieskaņošanas sistēmai, jāņem vērā transporta virsbūves dabiskās svārstības kustības laikā. Braucot ar ātrumu 50 – 90 km/h, automobiļa virsbūves

svārstības nepārsniedz 14 Hz frekvenci, kas atbilst periodam 71 milisekunde. Tā kā iepriekš veidotās prasības sistēmas pieskaņošanas laiks ir 2.5 milisekundes, tad vienā svārstību periodā notiks 28 pieskaņošanas cikli, bet transportlīdzeklis ar ātrumu 90 km/h spāpēs pārvietoties virs 3 raidītāja spolēm, tas ir ilustrēts 2.8. attēlā.



2.8. att. Virsbūves svārstību ietekmes novērtējums

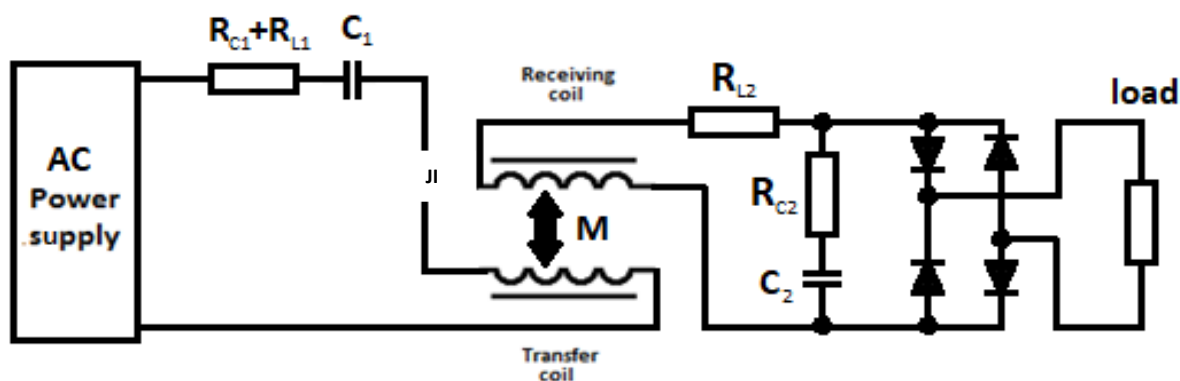
No minētā var secināt, ka enerģijas pārraides sistēmai ir vismaz divkārtīga rezerve pēc parametru pieskaņošanas ātruma darbojoties 85kHz frekvencē.

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.

3.1. Bezvadu enerģijas pārraides eksperimentālā iekārta, pielietojot rezonanses kontūru savstarpējo indukciju

3.1. attēlā atainota enerģijas bezvadu pārraides sistēmas ekvivalentā shēma, izmantojot divu rezonanses kontūru savstarpējo indukciju. Pēc būtības šie divi kontūri veido **rezonanses transformatoru** ar gaisa spraugu serdē [22].



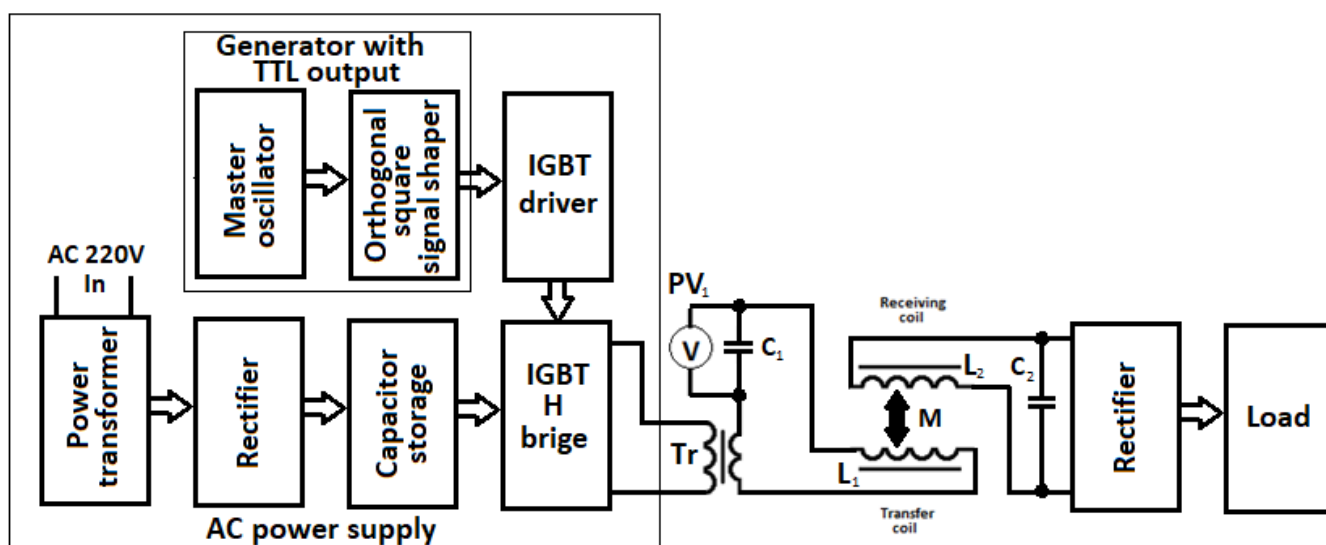
3.1. att. Bezvadu enerģijas pārraides sistēmas ekvivalentā shēma, pielietojot rezonanses kontūru savstarpējo indukciju

Pārraides kontūrs sastāv no induktivitātes L_1 un kondensatora C_1 , kuru zudumu pretestības ir R_{L1} un R_{C1} . Līdzīgi uztveršanas kontūru veido induktivitātes spole L_2 un kondensators C_2 , kuru zudumu pretestības ir R_{L2} un R_{C2} . M ir spoļu savstarpējās indukcijas koeficients. Maiņspriegums no kondensatora C_2 tiek pievadīts taisngrieža shēmai. Līdzspriegums no taisngrieža izejas tiek pievadīts slodzei.

Lai veiktu pētījumu par bezvadu pārraides rezonanses indukcijas metodes īpatnībām, tika izstrādāta enerģijas bezvadu pārraides eksperimentālās iekārtas struktūrshēma, balstīta uz rezonanses kontūru savstarpējo indukciju. Struktūrshēma tika izstrādāta atbilstoši enerģijas bezvadu pārraides sistēmas ekvivalentajai shēmai, kas atainota 3.1. attēlā. Izstrādājot

enerģijas bezvadu pārraides eksperimentālās iekārtas struktūrshēmu, tika izvēlēta virknes svārstību ierosināšanas metode pārraides kontūrā ar salāgojošā transformatora Tr palīdzību. Eksperimentālās ierīces struktūrshēma ir sniegta 3.2. attēlā.

Eksperimentālā ierīce ietver pārraides kontūru, kas sastāv no kondensatora C_1 un 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 .



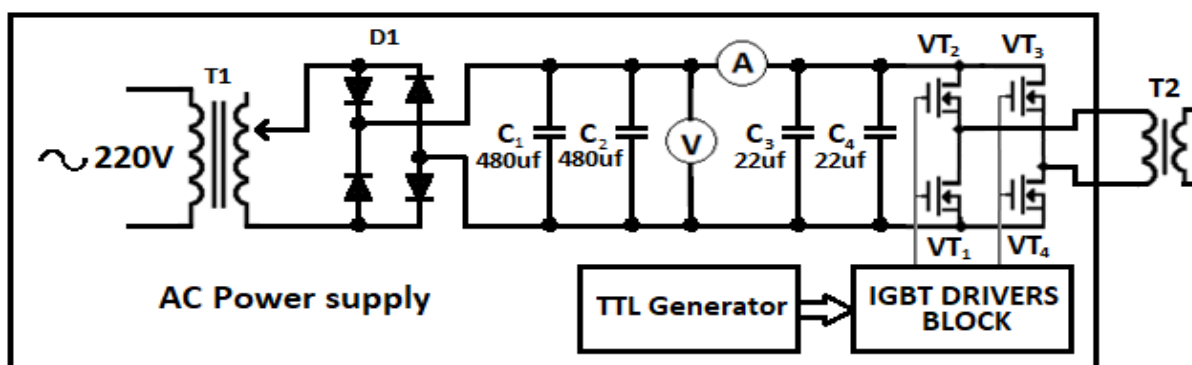
3.2. att. Bezvadu enerģijas pārraides eksperimentālās iekārtas struktūrshēma

Impulsu ģenerators formē taisnstūrveida impulsus ar regulējamu frekvenci. Taisnstūrveida impulsi nonāk IGBT tilta ortogonālo vadības signālu formētāja ieejā. No formētāja signāls nonāk IGBT tranzistoru draiveru ieejās. IGBT tranzistoru draiveri tiek izmantoti lai vadītu IGBT tranzistorus, kuri veic elektronisko jaudas atslēgu funkciju: IGBT tranzistoru draiveru lietošana nodrošina maksimālo izmantošanas koeficientu IGBT tranzistoriem, kā arī to aizsardzību pret pārslodzi.

Tīkla sprieguma taisngriezis ir pārraides enerģijas avots. Līdzspriegums no taisngrieža izejas uzlādē uzkrājējkondensatorus. Tīkla sprieguma taisngrieža shēmā paredzēta tīkla sprieguma amplitūdas regulēšana izmantojot autotransformatoru. Tas ļauj regulēt līdzspriegumu taisngrieža izejā, un rezultātā tiek regulēts spriegumu kondensatoros.

Mainspriegums, kas veidojas uz kondensatora C_2 , nonāk uztverošā kontūra taisngriezī. Šī taisngrieža izejas spriegums ir enerģijas bezvadu pārraides eksperimentālās iekārtas izejas spriegums.

Svārstību ierosināšanas shēma pārraides kontūrā ir sniegta 3.3. attēlā. Tās pamatā ir IGBT tranzistoru H tilts. Enerģijas avotu svārstību ierosināšanai veido šādas ierīces: regulējams tīkla sprieguma transformators T_1 , tilta taisngrieža shēma un uzkrājējkondensatori C_1 un C_2 . Spriegums uz C_1 un C_2 ir vienāds ar maiņsprieguma amplitūdu transformatora T_1 sekundārajā tinumā. H tilta pamatā ir IGBT tranzistori $VT_1 - VT_4$. 3.3. attēlā ir parādīta ierosmes transformatora T_2 primārās spoles ieslēgšana H tilta diagonālē. Atverot divus tranzistorus, strāva plūdis no kondensatora caur atvērto IGBT tranzistoru pāri un tilta diagonālē ieslēgto primāro spoli.



3.3. att. Pārraides kontūra ierosmes shēma

Lai īstenotu kontūra ierosināšanas shēmu, ir izvēlēts IGBT tranzistors FGL40N120AND, ko ražo firma Fairchild Semiconductor [14]. Šim tranzistoram ir labāki raksturlielumi, salīdzinot ar analogisku izmaksu tranzistoriem, piemēram, IXGR35N120B, ko ražo firma IXYS Semiconductor. Turklāt šobrīd FGL40N120AND ir viens no ātrākajiem IGBT tranzistoriem. Tā ieslēgšanās laiks ir 20 ns, bet izslēgšanās – 40 ns. Turklāt tranzistors izslēgtā stāvoklī ir spējīgs izturēt spriegumu līdz 1200 voltiem, bet ieslēgtā – 40 ampēru strāvu.

Pārraides kontūra svārstību ierosmes elektriskās shēmas elementu galvenie raksturlielumi ir atainoti 3.1. tabulā, kur norādīti elementu apzīmējumi principiālajā elektriskajā shēmā, nosaukums, tips, daudzums, tehniskais raksturojums un piezīmes. 3.3. attēlā ir parādīts arī IGBT tranzistoru draiveru funkcionālais bloks, katrs draivera kanāls ir pievienots vienam no IGBT tranzistoriem.

Elektriskās shēmas elementi ierosmes svārstību pārraides kontūrā

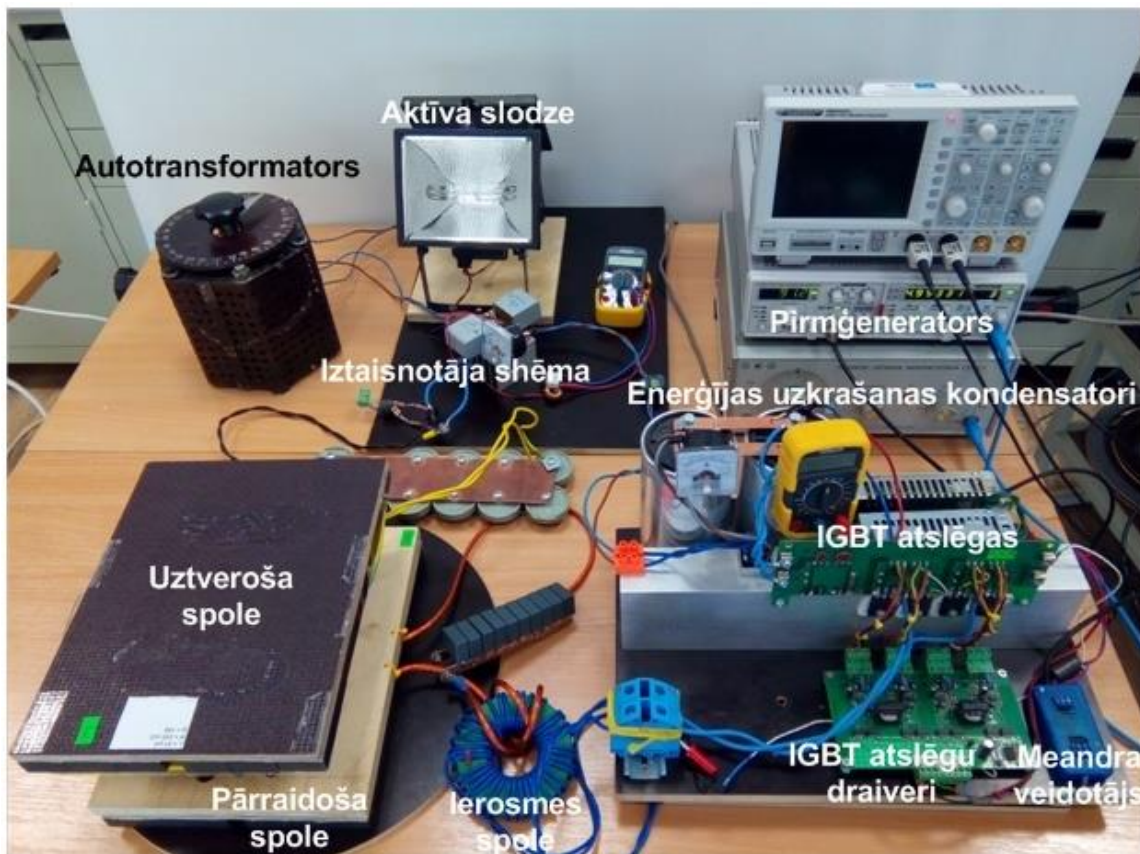
Apzīmējums	Elementa nosaukums un raksturlielumi	Skaits	Piezīmes
VT1	IGBT tranzistors FGL40N120AND	1	Veic tranzistora tilta funkciju
VT2		1	
VT3		1	
VT4		1	
C1	Poliprolēna spēka kondensatori EPCOS B25620-B1487-K101, MKP 480uF, 10%, 1100v, -55-+70 °C	1	
C2		1	
C3	Kondensators, 22 uF	1	
C4		1	
IGBT driver	IGBT draivera modulis	4	Tiek izmantots, lai vadītu IGBT tranzistorus
D1	Diožu tilts	1	Tiek izmantots, lai iegūtu līdzspriegumu
T1	Tīkla transformators	1	Ir galvaniskā atsaite
T2	Salāgotājtransformators	1	

Saskaņā ar bezvadu enerģijas pārvades sistēmas struktūrshēmu, kuras pamatā ir svārstību kontūru savstarpēja indukcija, tika izstrādāta eksperimentāla iekārta bezvadu enerģijas pārvadei ar rezonanses indukcijas metodi. Izstrādātā eksperimentālā iekārta ir parādīta 3.3. attēlā

Eksperimentālās ierīces sastāvs:

- 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.



3.3. att. Enerģijas bezvadu pārraides eksperimentālā iekārta

Autotransformators tika izmantots, lai regulētu sprieguma amplitūdu, kas tiek pievadīta tilta taisngrieža shēmi. Šādi tika nodrošināts vajadzīgais līdzspriegums uzkrāšanas kondensatoros (3.3. attēls). Kā taisngrieža aktīvā slodze uztvērējpusē tika izmantotas dažādas jaudas elektriskās apgaismojuma spuldzes. Pārraides un uztvērējkontūrā tika izmantotas divu veidu induktivitātes spoles: gredzenveida un taisnstūra DD induktivitātes spoles.

Svārstību kontūru induktivitātes spoles

Bezvadu enerģijas pārraides sistēmām, kas balstītas uz rezonanses kontūru savstarpējo indukciju, svarīgs izpētes objekts ir rezonanses transformatora svārstību kontūrus veidojošo

induktivitātes spoļu konstrukcija un enerģijas avota saites veids ar rezonanses transformatora pārraides kontūru.

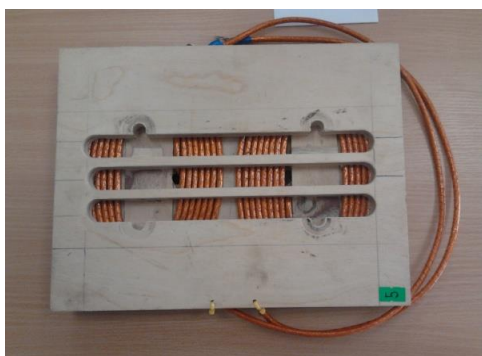
Lai izpētītu enerģijas bezvadu pārraides procesa īpatnības, izmantojot eksperimentālo ierīci, kas parādīta 3.3. attēlā, tika izveidotas 9 plakanas vienaspusējas indukcijas spoles: trīs taisnstūrveida dubultās indukcijas spoles – DD spoles [16] un 3 gredzenveida indukcijas spoles [17]. Šo induktivitātes spoļu elektriskie parametri ir parādīti 3.2. tabulā.

3.2. tabula

Eksperimentālās ierīces rezonanses transformatora induktivitātes spoles parametri

№	Spoles veids	Pielietojums	Tips и μ ferīta	Induktivitāte μH	Pretestība Ω	Kvalitātes faktors	Vijumu skaits
1	DD spole	pārraides	klucīši	33,3	0,051	450	8
2	DD spole	pārraides	klucīši	38,6	0,042	470	7
3	DD spole	uztvērējspole	klucīši	91,0	0,23	159	10
4	Gredzenveida	pārraides	klucīši	39,0	0,060	300	8
5	Gredzenveida	pārraides	stieņi	245	0,185	110	14
6	Gredzenveida	pārraides	klucīši	250	1,25	100	14
7	Gredzenveida	uztvērējspole	stieņi	236	0,081	94	14
8	Gredzenveida	pārraides	klucīši	118	0,012	55	13
9	Gredzenveida	uztvērējspole	klucīši	39	0,004	35	9

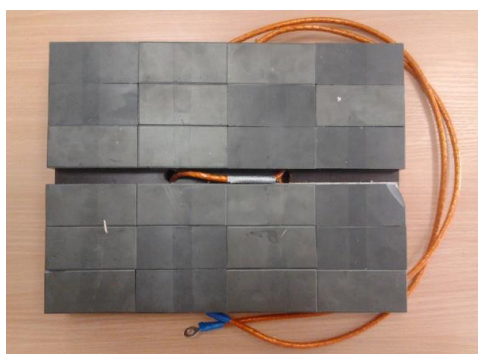
Plakano taisnstūrveida DD induktivitātes spoļu ārējais izskats ir redzams 3.4. attēlā. 3.4.a attēlā ir parādīta pārraides spole, bet 3.4.b attēlā – uztvērējspole no vijumu puses. 3.4.c attēlā ir parādīta pārraides spole no pretējās puses – no ferīta ekrāna puses, bet 3.4.d attēlā – uztvērējpoles sānu skats.



a



b



c



d

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

Katrs DD pārraides spoles spirālveida tinums satur 8 4.5mm diametra licendrāta vijumus. Katram DD uztvērējsspoles spirālveida tinumam ir 10 vijumi W-520x0.2-2L vada. Ferīta ekrāns bija izgatavots no ferīta magnētiskajiem klucīšiem ar caurlaidību $\mu=2000$ un ģeometriskajiem izmēriem 74 x 35 x 15 mm. DD pārraides spoles un uztvērējsspoles laukumi bija vienādi: 290 x 230 mm.

Plakano gredzenveida spoļu ārējais izskats ir redzams 3.5. attēlā. Plakanās gredzenveida induktivitātes spoles tika izmantotas ar diviem ferītu veidiem: izmantojot tādus pašus ferīta klucīšus (3.5. attēls), kādi tika izmantoti DD induktivitātes spoļu konstrukcijā (3.5.c attēls), un izmantojot ferīta stieņus (3.5.b attēls).

Rezonanses transformatora pārraides kontūrā tika izmantotas plakanas gredzenveida induktivitātes spoles ar diviem magnētisko ferītu veidiem. Pētījumos rezonanses transformatora uztvērējkontūrā tika izmantota spole ar magnētiskiem ferīta stieņiem vai vispār bez ferītiem.

Gredzenveida induktivitātes spolei, kas tika izmantota ar ferīta magnētisko klucīšu ekrānu, ferīta ekrāns netika iekļauts konstrukcijā, bet tā tika novietota tieši uz ferīta magnētiskajiem klucīšiem (3.5. a attēls), kuri tika izvietoti noteiktā veidā (3.6. attēls).



3.5. att. Induktivitātes gredzenveida spoles (a– izmantoti ferīta magnētiskie klucīši, b – izmantoti magnētiskie ferīta stieņi)



3.6. att. Ferīta magnētiskais ekrāns gredzenveida pārraides spolei

Pārraides induktivitātes spolei ar ferīta stieņiem tinums tika izgatavots no 4.5 mm diametra licendrāta un to veidoja 8 vijumi, bet uztvērējaspolei ar ferīta stieņiem tinums tika izgatavots no W-200-2L markas vada un to veidoja 12 vijumi. Ceturtā induktivitātes gredzenveida spole tika izgatavota no W-200-2L markas vada bez serdes, vijumu skaits šajā induktivitātes spolē bija 10. Šī spole tika izmantota arī rezonanses transformatora pārraides kontūrā. Visu plakano gredzenveida spoļu diametrs bija 400 mm.

Šajā darbā detalizēti aplūkoti DD spoļu pētījuma rezultāti, jo tās turpmāk tika izvēlētas kā pamats dinamiskās bezvadu enerģijas pārraides sistēmas prototipam.

3.2. Attāluma un induktivitātes DD spoļu savstarpējā novietojuma ietekme uz rezonanses transformatora parametriem

Lai noteiktu transformatora spoļu saites koeficientu, tika izmantota izteiksme

$$k_{\text{ce}} = \sqrt{1 - \frac{L_{1k32}}{L_{1xx2}}}, \quad (3.1)$$

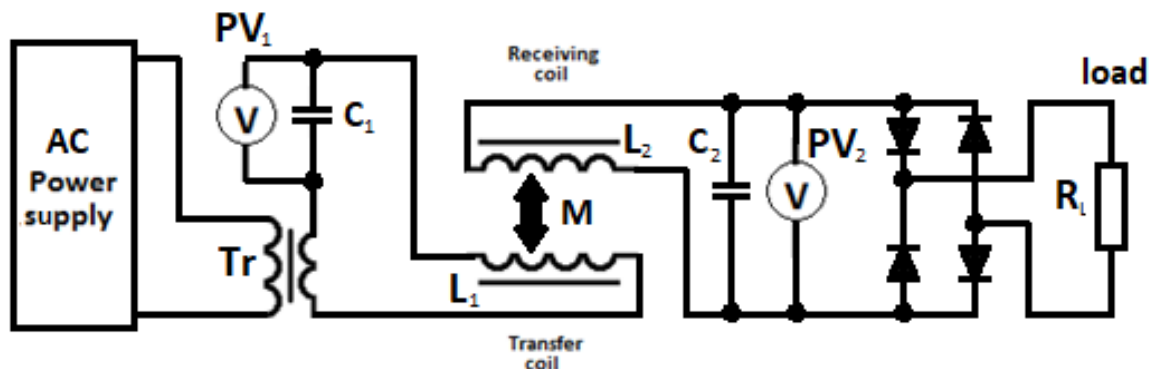
kur

- L_{1k32} – transformatora raidošās (primārās) spoles induktivitāte uztvērējspoles (sekundārās) īsslēguma režīmā L_{2i} ;
- L_{1xx2} – transformatora raidošās (primārās) spoles induktivitāte uztvērējspoles (sekundārās) brīvgaits režīmā L_{2t} .

Tāpēc fiksētajiem attālumiem d starp induktivitātes spolēm tika mērītas L_{1k2} un L_{1xx2} vērtības, bet pēc tam tika aprēķinātas saites koeficienta k_{ce} vērtības. Vienlaikus tika mērīta aktīva pretestība r_1 (zudumu pretestība) un pārraides spoles induktivitātes kvalitātes faktors Q dažādiem attālumiem starp induktivitātes spolēm. Mērījumi tika veikti ar elektrisko ķēžu elementu parametru tilta mērītāju HM8018. Lai noteiktu rezonanses transformatora savstarpējās indukcijas koeficientu M , tika izmantota izteiksme:

$$M = k_{\text{ce}} \sqrt{L_1 L_2} \quad (3.2)$$

Lai izpētītu rezonanses transformatora frekvences parametrus, tika izmantota 3.7. attēlā parādītā mērījumu shēma. Šajā shēmā tika izmantota rezonanses transformatora virknes – paralēlā topoloģija. Pārraides kontūrs – virknes kontūrs, ko veido induktivitāte L_1 un kapacitāte C_1 . Uztvērējkontūrs – paralēls kontūrs, ko veido induktivitāte L_2 un kapacitāte C_2 .



3.7. att. Rezonanses transformatora frekvenču parametru izpētes shēma

Svārstību ierosināšana pārraides kontūrā tika veikta, izmantojot papildus salāgojošo transformatoru Tr, kura sekundārais tinums tika ieslēgts virknē ar L_1 un C_1 . Tādējādi tika nodrošināta svārstību ierosmes avota ieslēgšana virknē svārstību kontūrā. Transformatorā tika izmantota toroidālā serde, tā primāro tinumu veidoja 18 vijumi, bet sekundāro tinumu – divi vijumi. Sekundārais tinums tika ieslēgts virknē svārstību pārraides kontūrā. Slodzes pretestība R_L – ir taisngriešanas shēmas ieejas pretestība.

Virknes svārstību kontūrā kontūrstrāva un sprieguma krituma moduļa vērtības katrā kontūra elementā sasniedz maksimālo vērtību rezonanses frekvencē. Tāpēc, lai izpētītu pārraides kontūra AFR, kapacitātei C_1 tika pieslēgts maiņstrāvas voltmeters PV1 un oscilogrāfs OSC1. Paralēlajā svārstību uztvērējkontūrā maiņstrāvas voltmeters PV2 un oscilogrāfs OSC1 tika pievienots paralēli kontūra elementiem, lai noteiktu sprieguma kritumu kontūrā. Maiņstrāvas voltmetra tips – V3-38. Oscilogrāfa tips – divkanālu oscilogrāfs HMO2024. Pētījumā par rezonanses transformatora kontūru frekvenču raksturlīknēm kā mērījuma harmoniskā signāla avots tika izmantots funkcionālais ģenerators HM8030-6.

DD induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz rezonanses transformatora AFR “85 kHz” frekvenču diapazonā

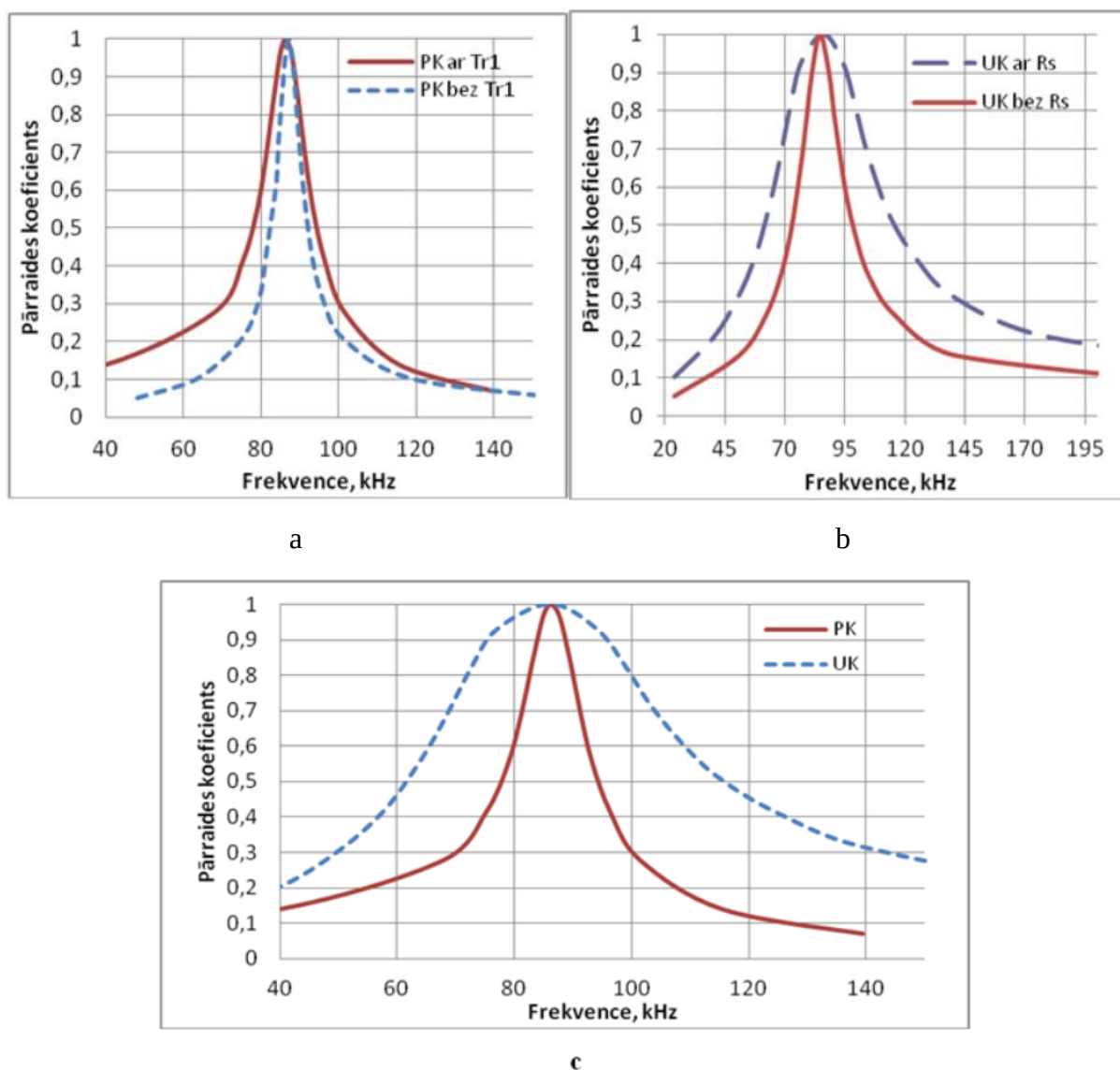
Šī pētījuma veikšanai pārraides kontūrā tika izmantota DD induktivitātes spole Nr. 1, bet uztvērējkontūrā – DD induktivitātes spole Nr.3 (skatīt 7.4. tabulu), tas ir, $L_1 = 33,3 \mu\text{H}$ un $L_2 = 91,3 \mu\text{H}$. Kondensatoru kapacitāte svārstību kontūros: $C_1 = 99,95 \text{ nF}$ un $C_2 = 37,3 \text{ nF}$. Rezonanses frekvenču aprēķinātās vērtības: pārraides kontūram – 87,633 kHz, uztvērējkontūram – 86,244 kHz.

Līdz pētījumam par DD induktivitātes spoļu attāluma ietekmi uz rezonanses transformatora AFR, tika iegūtas svārstību pārraides kontūra un uztvērējkontūra AFR bez to savstarpējās saites (3.8. attēls).

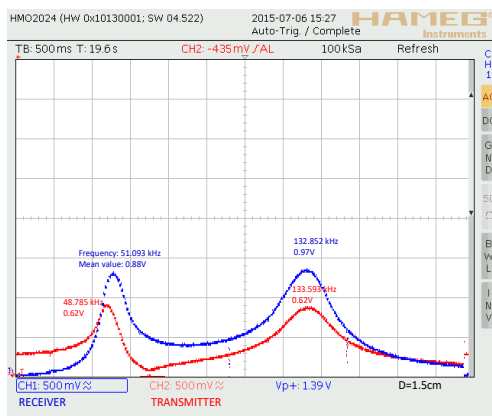
3.8.a attēlā parādīts svārstību raidošā kontūra AFR bez ierosinošā transformatora Tr1 (raustīta līnija), bet AFR ar ierosinošo transformatoru Tr2 (nepārtraukta līnija) parādīta 3.7. attēlā. Bez ierosinošā transformatora rezonanses frekvences vērtība ir vienāda ar aprēķināto vērtību. Ar pieslēgtu ierosinošo transformatoru Tr1 pārraides kontūra induktivitāte ir 33,95 μH . Pārraides kontūra rezonanses frekvence samazinās līdz 86.166 kHz. Pieslēdzot Tr1, notiek arī pārraides kontūra kvalitātes faktora samazināšanās no 17.3. līdz 8.5, kā arī AFR paplašināšanās.

3.8. b attēlā ir parādīta svārstību uztvērējkontūra AFR bez slodzes (iztaisnošanas shēma ir atslēgta, nepārtraukta līnija) un ar slodzi (raustītā līnija), kā parādīts 3.7. attēlā. Pieslēdzot slodzi, uztvērējkontūra rezonanses frekvence ir vienāda ar aprēķina vērtību. Slodzes pieslēgums samazina uztvērējkontūra kvalitātes faktoru no 5.4 līdz 2.6, un tā AFR paplašinās.

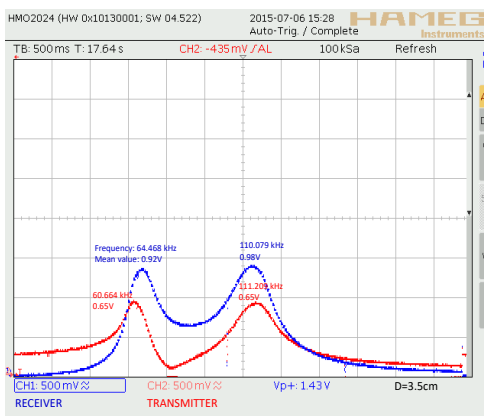
3.8.c attēlā ir parādīta svārstību uztvērējkontūra AFR ar slodzi (raustītā līnija) un pārraides kontūra AFR ar pieslēgtu ierosinošo transformatoru (nepārtraukta līnija). Redzams, ka kontūru rezonanses frekvences sakrīt, bet pārraides kontūra kvalitātes faktors ir trīs reizes lielāks.



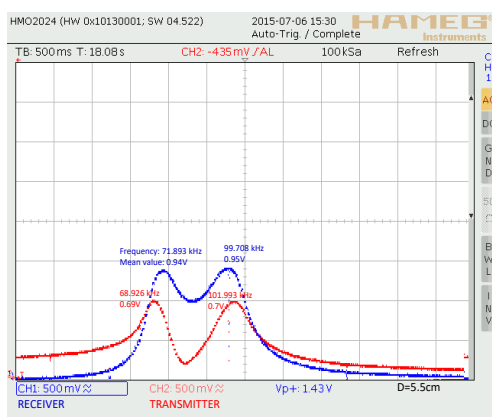
3.8. att. Rezonanses transformatora svārstību kontūru AFR bez savstarpējās saites (a – pārraides kontūra; b – uztvērējkontūra; c – uztvērējkontūra un pārraides kontūra)



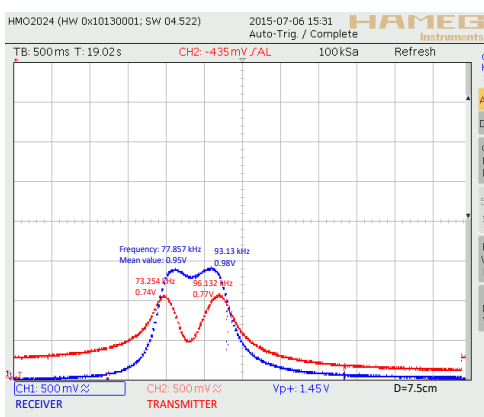
a



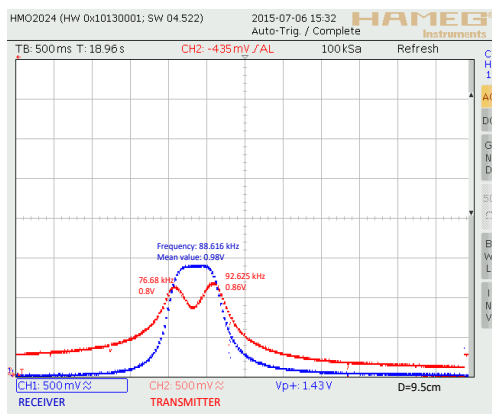
b



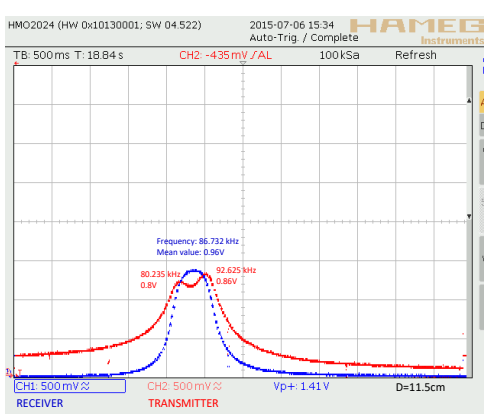
c



d

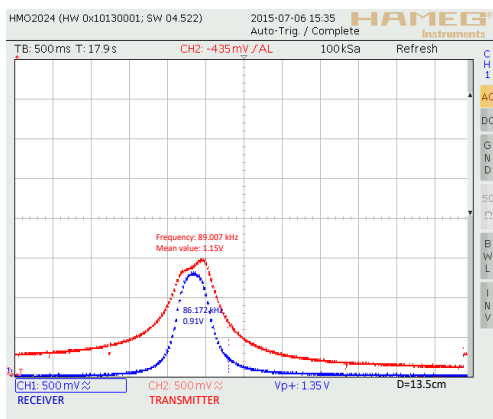


e

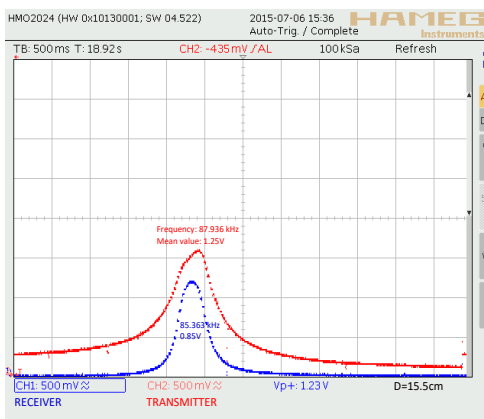


f

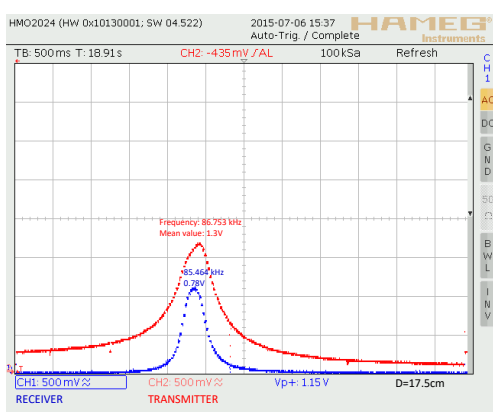
3.9. att. Spoļu attāluma d ietekme uz pārraides un uztvērējkontūru AFR ar DD induktivitātes spolēm “85 kHz” diapazonā (a – 1,5 cm; b – 3,5 cm; c – 5,5 cm; d – 7,5 cm; e – 9,5 cm; f – 11,5 cm)



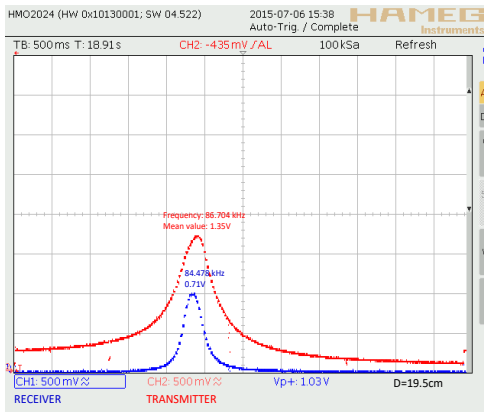
a



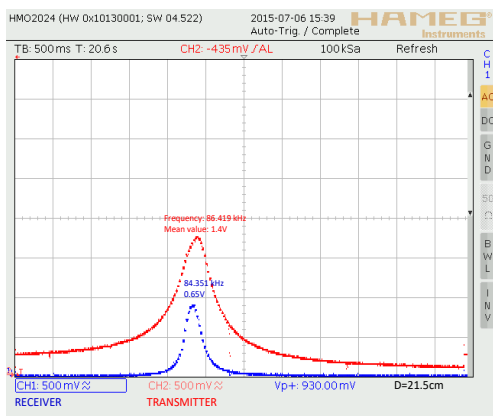
b



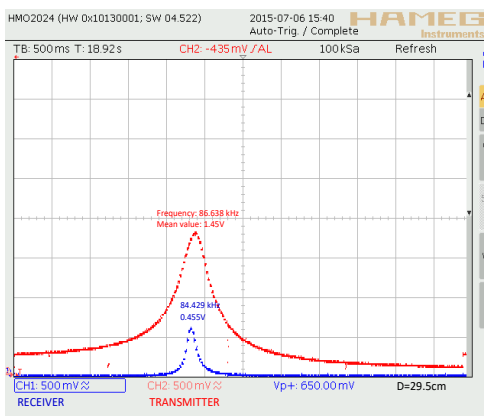
c



d



e



f

3.10. att. Spoļu attāluma d ietekme uz pārraides un uztvērējkontūru AFR ar DD induktivitātes spolēm “85 kHz” diapazonā (a – 13,5 cm; b – 15,5 cm; c – 17,5 cm; d – 19,5 cm; e – 21,5 cm; f – 29,5 cm)

3.9. attēlā parādīta svārstību uztvērējkontūra AFR (zilā krāsa) un svārstību pārraides kontūra AFR (sarkanā krāsa), kad ir cieša saite starp svārstību kontūru spolēm, bet 3.10. attēlā

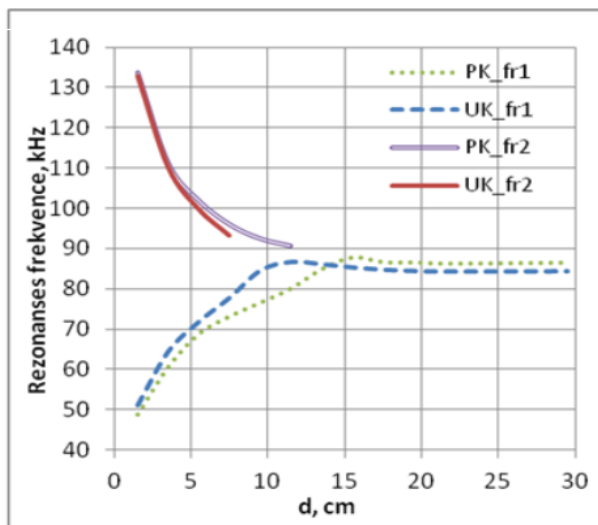
– kad saite ir vāja. Lai iegūtu minētos raksturlielumus, ieejas signāla ģenerators formēja FM signālu, bet oscilogrāfs strādāja AFR mērīšanas režīmā. Tika izmantots DD spoļu savstarpējais novietojums Nr.1 (3.2. tabula). Svārstību kontūru DD spoles atradās fiksētā attālumā d , lai iegūtu katru AFR pāri.

Svārstību pārraides kontūra AFR (sarkanā krāsa) raksturo pārraides kontūra strāvas frekvences atkarību (sprieguma kritums C1 un L1), vai rezonanses transformatora ieejas pretestības AFR. Svārstību uztvērējkontūra AFR (zilā krāsa) raksturo rezonanses transformatora izejas sprieguma frekvences atkarību. Svārstību uztvērējkontūra AFR – tā ir visa rezonanses transformatora AFR.

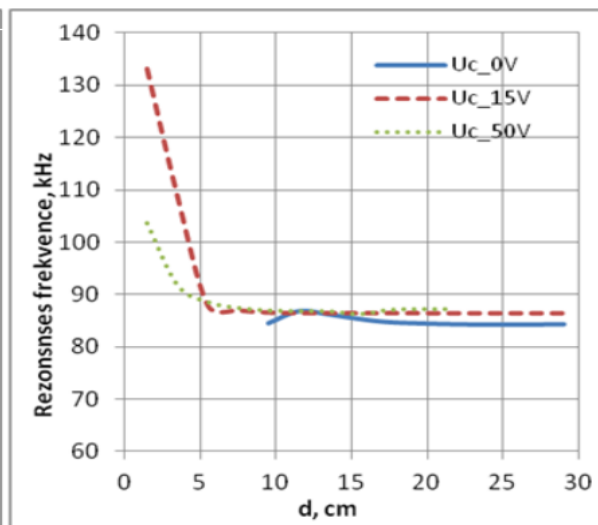
Analīze AFR parādītai 3.9. un 3.10. attēlos ļauj secināt:

- Ja attālums starp induktivitātes spolēm nepārsniedz 11.5 cm $k_{ce} > 0,1$; skatīt augšējo līkni 3.9. attēlā) rezonanses transformatora pārraides kontūra strāvas frekvences atkarībai ir divi izteikti ekstrēmi, tas ir, to raksturo divas rezonanses frekvences.
- Ja attālums starp spolēm nepārsniedz 7.5 cm $k_{ce} > 0,2$; skat. augšējo līkni 3.9. attēlā) rezonanses transformatora AFR arī raksturo divas rezonanses frekvences.
- Pārraides kontūra un uztvērējkontūra rezonanses frekvences nesakrīt jebkurā attālumā starp spolēm.
- Palielinoties attālumam rezonanses frekvences satuvinās (3.11.a. attēls), rezonanses transformatora AFR ekstrēmu līmenis paliek nemainīgs, bet pārraides kontūra strāvas frekvences atkarības ekstrēmu līmenis pieaug. Tas skaidrojams ar ienestās pretestības samazinājumu pārraides kontūrā no uztvērējkontūra, jo samazinās k_{ce} starp spolēm.
- Ja attālums starp spolēm ir lielāks par 11,5 cm, rezonanses transformatora pārraides kontūra strāvas un visa rezonanses transformatora AFR frekvences atkarībai ir pa vienam ekstrēmam, tas ir, to raksturo viena rezonanses frekvence.
- Palielinot attālumu starp induktivitātes spolēm, rezonanses transformatora AFR ekstrēmu līmenis samazinās vairākas reizes, bet pārraides kontūra strāvas frekvences atkarības ekstrēmu līmenis palielinās, bet nenožīmīgi. Būtisks rezonanses transformatora AFR ekstrēmu samazinājums skaidrojams ar pārraides spoles magnētiskā lauka līmeņa samazinājumu. Nenožīmīgs pārraides kontūra

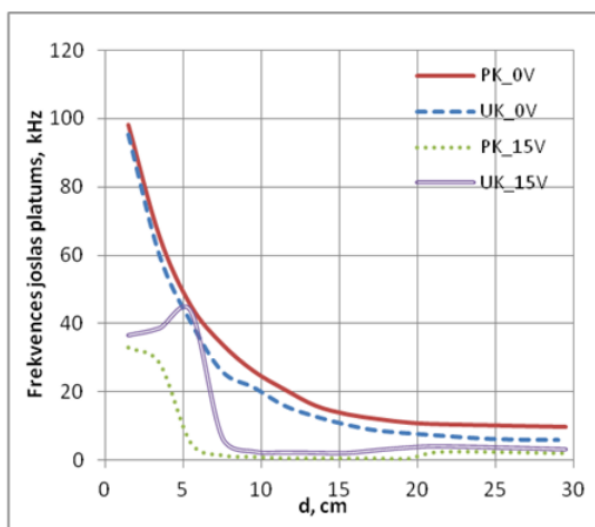
strāvas frekvences atkarības ekstrēmu palielinājums skaidrojams ar to, ka k_{ce} starp spolēm ir daudz mazāks par 1.



a



b



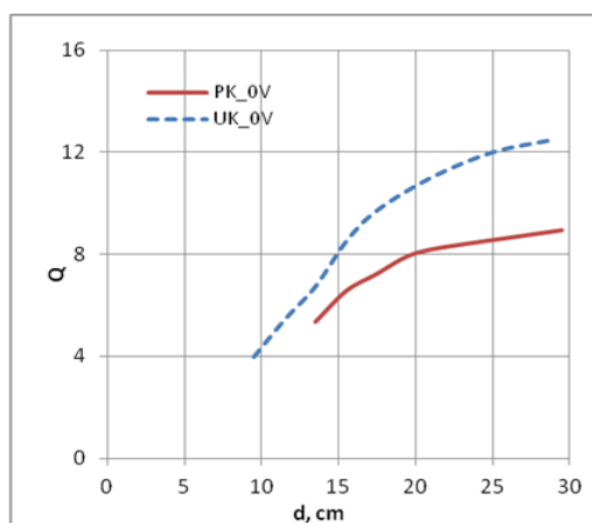
c

3.11. att. DD induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz rezonanses transformatora AFR parametriem (a – uz AFR rezonanses frekvencēm, ja $U_c = 0V$; b – uz rezonanses frekvencēm pie dažādiem U_c lielumiem; c – uz caurlaides joslas platumu)

- Jebkurā attālumā starp induktivitātes spolēm pārraides kontūra rezonanses frekvence ir lielāka par visa transformatora rezonanses frekvenci (paralēlās līnijas 3.11.a attēlā). Tas ir saistīts ar pārraides kontūra un uztvērējkontūra rezonanses frekvencēm 3.8. c attēlā.

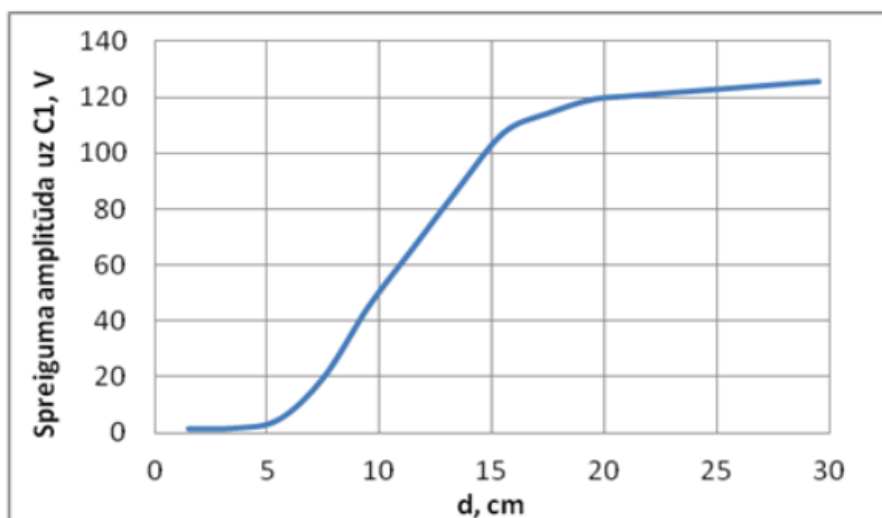
- Jebkurā attālumā starp induktivitātes spolēm rezonanses transformatora AFR caurlaides joslas platums ir mazāks (3.11 attēls) par pārraides kontūra strāvas padeves caurlaides joslas platumu (rezonanses transformatora ieejas pretestības AFR).

Pamatojoties uz diviem iepriekšējiem secinājumus, izriet, ka rezonanses transformatora kvalitātes faktors ir augstāks par rezonanses transformatora ieejas ķēdes kvalitātes faktoru (3.12 attēls).



3.12. att. DD induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz pārraides kontūra (PK) un visa rezonanses transformatora (UK) kvalitātes faktoru

3.13. attēlā parādīta attāluma ietekme uz sprieguma kritumu svārstību kontūru komponentēs, jo īpaši, pārraides kontūra kondensatorā rezonanses frekvencē. Samazinot saites koeficientu starp spolēm līdz 0,2, vērojams atkarības lineārais posms. Tālāka spoļu attāluma palielināšana rada saites koeficienta samazināšanos, kas izraisa lineāru sprieguma pieaugumu. Sprieguma lineārais pieaugums beidzas, ja starp kontūru spolēm ir ļoti vāja saite, kad $k_{CB} \ll 0,1$.



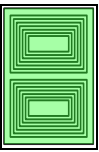
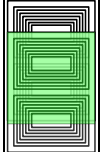
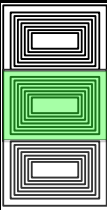
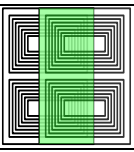
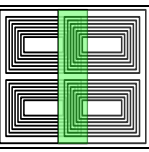
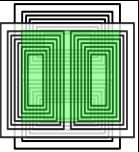
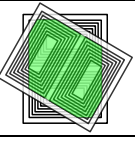
3.13. att. Attāluma ietekme uz sprieguma kritumu pārraides kontūra kondensatorā

Induktivitātes spoļu savstarpējā izvietouma ietekme uz AFR

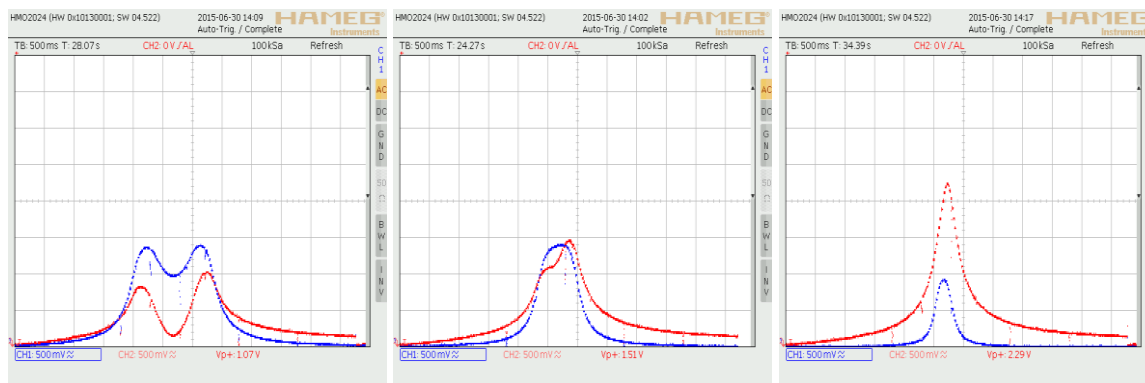
Tika veikts arī pētījums par induktivitātes DD spoļu savstarpējā novietojuma ietekmi uz pārraides kontūra AFR, un kopumā uz rezonanses transformatora AFR. 3.3. tabulā ir parādīti induktivitātes DD spoļu savstarpējā novietojuma iespējamie varianti. Attēlos zaļā krāsā ir atzīmēti induktivitātes DD spoļu pārklājumi katrā to savstarpējā novietojuma variantā.

3.3. tabula

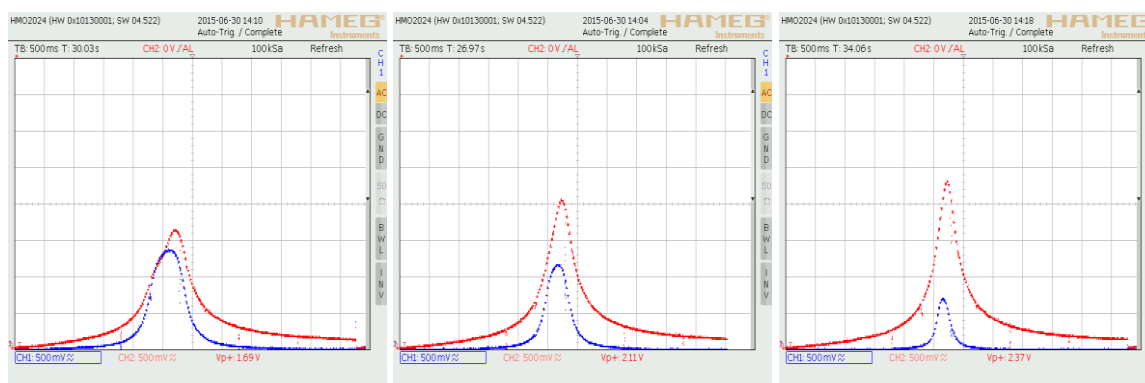
DD pārraides un uztvērējspolu savstarpējā novietojuma varianti

№	1	2	3	4	5	6	7
Tips							

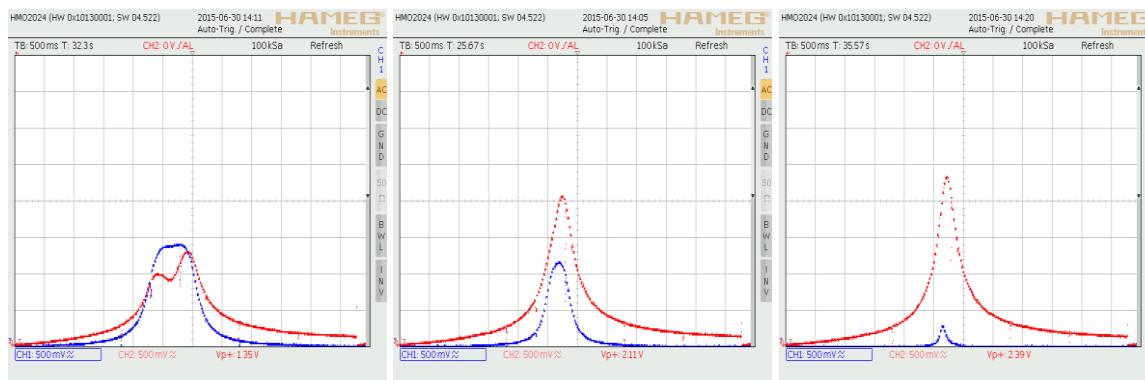
3.14. un 3.15. attēlā ir parādīta AFR, kas iegūta trijos fiksētos attālos starp spolēm: 4.5 cm (AFR kreisā sleja), 9.5 cm (AFR vidējā sleja) un 19.5 cm (AFR labā sleja). 4.5 cm attālumā pastāv intensīva saikne starp induktivitātes spolēm, 9.5 cm – vāja saikne, pie 19.5 cm savstarpējās saiknes starp spolēm praktiski nav.



a

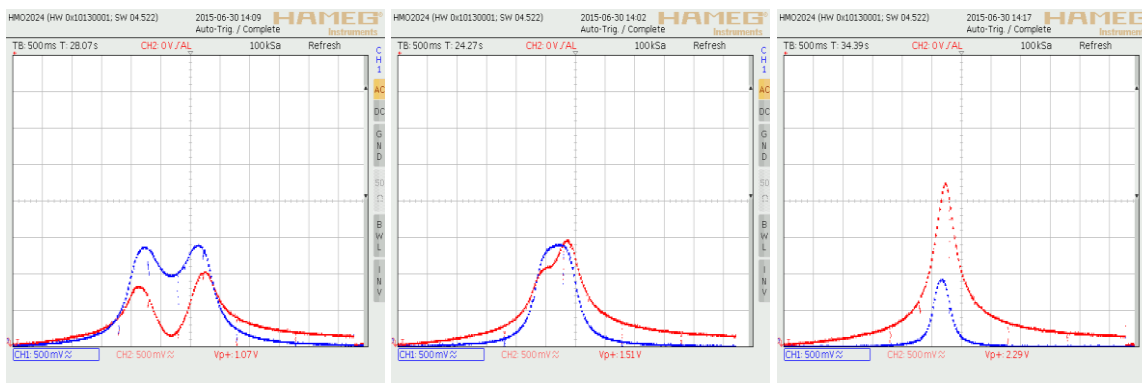


b

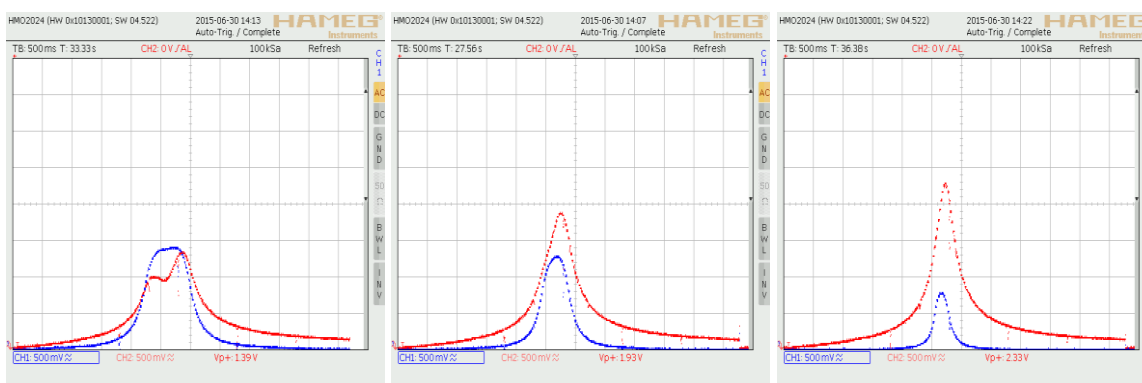


c

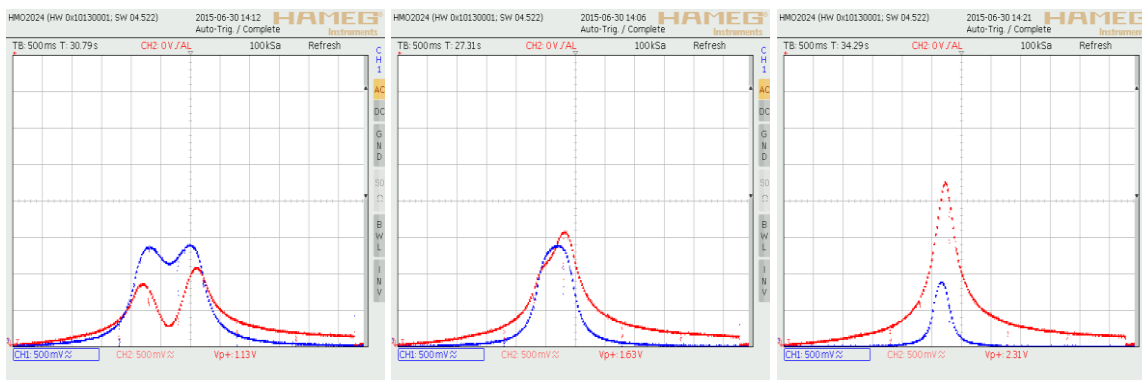
3.14. att. Induktivitātes spoļu gareniskās nobīdes ietekme uz pārraides un uztvērējkontūra AFR ar DD induktivitātes spoļēm (a – izvietojuma variants Nr. 1; b – izvietojuma variants Nr.2; c – izvietojuma variants Nr.3)



a



b



c

3.15. att. Induktivitātes spoļu šķērseniskās nobīdes ietekme uz pārraides un uztvērējkontūra AFR ar DD inductivitātes spolēm (a – izvietoējuma variants Nr.1; b – izvietoējuma variants Nr.4; c – izvietoējuma variants Nr.7)

3.14. att. ir parādītas AFR trim pirmajiem inductivitātes DD spoļu novietoējuma variantiem. Induktivitātes DD spoļu izvietoējuma otrajā variantā saites koeficients k_{CB} starp spolēm ir 0.5, tas ir, savstarpējā saikne ir ļoti vāja.

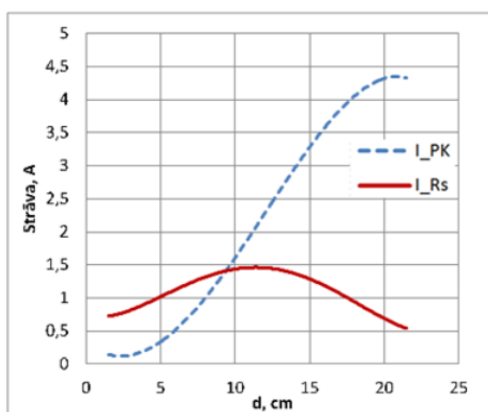
3.14. b attēlā redzams, pat ja $d = 4,5$ cm transformatora AFR (zilā krāsa) ir tikai viena rezonanse. Palielinoties attālumam, ekstrēma vērtība ir nedaudz mazāka nekā attiecīgo ekstrēmu vērtībām 3.14.a attēlā. Pārraides kontūra AFR (sarkanā krāsa) arī ir viena rezonanses frekvence, bet šo ekstrēmu AFR vērtības ir augstākas nekā ekstrēmiem DD induktivitātes spoļu izvietojuma pirmajā variantā, kas izskaidrojams ar pārraides spoles un uztverējspoles saiknes neesamību. DD induktivitātes spoļu izvietojuma trešajā variantā saites koeficients k_{ce} starp spolēm mainās hiperboliski un ir tuvs 0, ja $d > 15$ cm. Tas nosaka, kāpēc transformatora AFR (zilā krāsa) ekstrēma vērtība, ja $d = 19,5$ cm, ir būtiski mazāka par attiecīgajām ekstrēmu vērtībām 3.14.a attēlā un 3.14.c attēlā. Vājāka saite spoļu izvietojuma trešajā variantā salīdzinot ar pirmo variantu izskaidro otrās rezonanses izzušanu pārraides kontūra AFR (sarkanā krāsa) pie mazāka spoļu attāluma.

3.15. attēlā ir parādīts AFR DD induktivitātes spoļu izvietojuma ceturtajam (3.15. b attēls) un piektajam (3.15.c attēls) variantam kopā ar AFR savstarpējo izvietojumu pirmajā variantā (3.15. a attēls). DD induktivitātes spoļu izvietojuma ceturtajā variantā saites koeficients k_{ce} , palielinot attālumu d , samazinās tādā pat veidā kā, izvietojot spoles atbilstoši variantam Nr.3 un variantam Nr.4. Tāpēc AFR veids un ekstrēmu ARF vērtība 3.14.c attēlā un 3.15. b attēlā sakrīt.

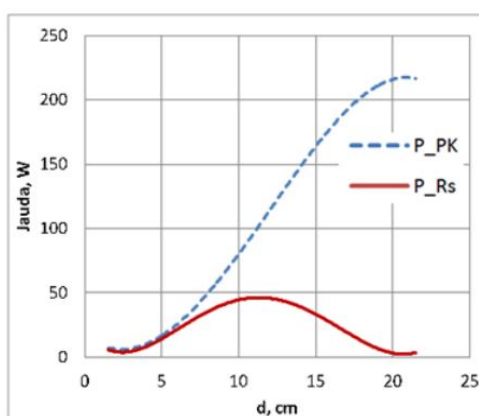
DD induktivitātes spoļu izvietojuma septītajā variantā saites koeficients k_{ce} starp spolēm, palielinot attālumu d , samazinās tādā pat veidā kā, izvietojot spoles variantā Nr.1. Saites koeficienta k_{ce} vērtības septītajā variantā ir nedaudz mazākas kā saites koeficients k_{ce} DD induktivitātes spoļu izvietojuma pirmajā variantā. Tāpēc AFR veids un ekstrēmu ARF vērtība 3.15.a attēlā un 3.15. c attēlā sakrīt.

Pētījums par enerģijas bezvadu pārraides efektivitāti, izmantojot DD spoles frekvenču diapazonā “85 kHz”

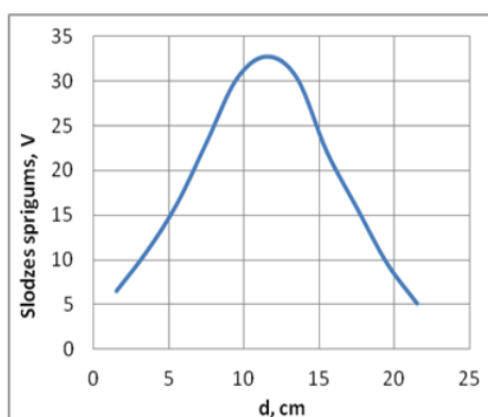
Pētījums par DD induktivitātes spoļu attāluma ietekmi uz bezvadu enerģijas pārraides efektivitāti, izmantojot rezonanses metodi, tika veikts izmantojot fiksētu spriegumu uzkrāšanas kondensatoros $U_c = 50V$. Attālums d starp svārstību kontūru DD spolēm tika palielināts ar soli 3 cm. Meandra signāla frekvence tika ieregulēta vienāda ar rezonanses sistēmas frekvenci.



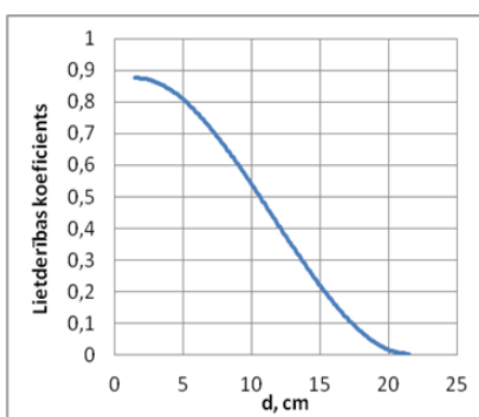
a



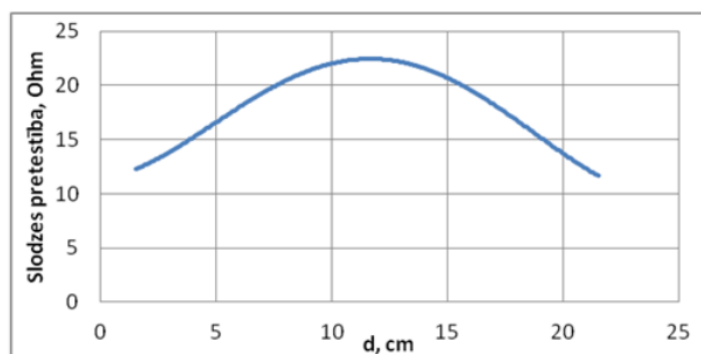
b



c



d



e

3.16. att. Induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz rezonanses transformatora elektriskajiem parametriem, ja $U_c = 50$ V (a – uz ieejas un izejas strāvu; b – uz ieejas un izejas jaudu; c – uz spriegumu uztvērējkontūra slodzē; d – uz jaudas pārvades lietderības koeficientu; f – uz slodzes pretestības izmaiņām)

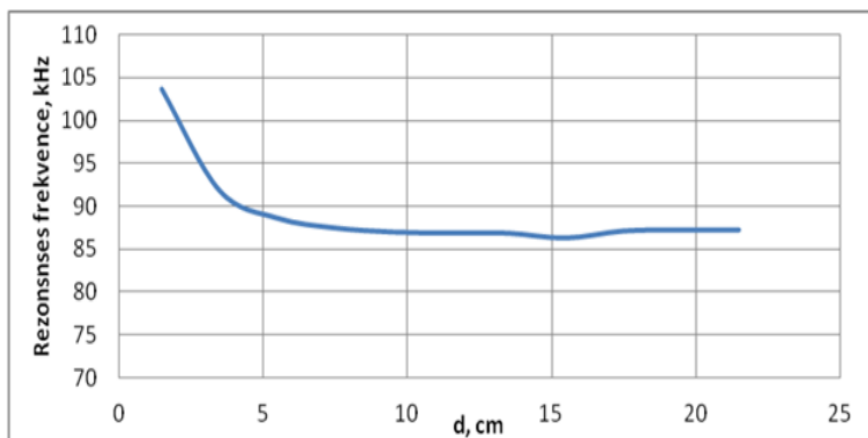
Maksimālā izejas strāvas vērtība tiek novērota, kad attālums d starp svārstību kontūru DD spolēm ir 11,5 cm (3.17. a attēls), kas atbilst spoļu saites koeficienta vērtībai 0,1. Lielāka attāluma d palielināšana izraisa izejas strāvas samazināšanos, jo tiek samazināts magnētiskā lauka līmenis uztvērējpoles tuvumā. Tāpēc pārraides kontūra strāva ir lineāri atkarīga no d ,

izņemot galējos posmus. Sākumposmā strāvas vērtība ir neliela, jo ir liels saites koeficients. Pārraidē kontūra strāva ir maksimāla, ja $d > 20$ cm. Turklāt pie šī nosacījuma praktiski nepastāv saite starp kontūru spolēm, jo $k_{ce} \ll 0,1$. Sākumposmā izejas strāvas samazināšanās, ja tiek samazināts attālums, notiek palielinoties k_{ce} jo strāva pārraidē kontūrā samazinās.

Aktīva slodzes pretestība R_n , kas vienāda ar 18Ω , nosaka sprieguma atkarības vērtības uztvērējkontūra slodzei (3.16.c attēls), bet šīs atkarības raksturs atbilst izejas strāvas izmaiņām (3.16.a attēls). Izejas jaudas atkarības raksturu no attāluma starp spolēm (3.16. b attēls) nosaka arī transformatora izejas strāvas atkarību. Visām trim izejas atkarībām ir ekstrēms, kad attālums starp spolēm d ir aptuveni 11,5 cm.

Palielinot attālumu d , ieejas jauda (3.16. b attēls) mainās tāpat kā ieejas strāva (3.16. a attēlā), jo $U_c = 50$ V. Jaudas pārvades koeficienta atkarība no attāluma d starp spolēm ir parādīta attēlā 3.16. d. Redzams, ka pie $d > 7,5$ cm jaudas pārvades koeficients samazinās praktiski lineāri, tāpēc ka šādos attālos notiek vienlaicīga ieejas jaudas palielināšanās pieaugot ieejas strāvai un samazinās izejas jauda, samazinoties izejas strāvai. Līknes sākumposmā jaudas pārvades koeficients arī samazinās, bet samazinājums ir lēnāks, jo izejas jauda palielinās, palielinoties attālumam d .

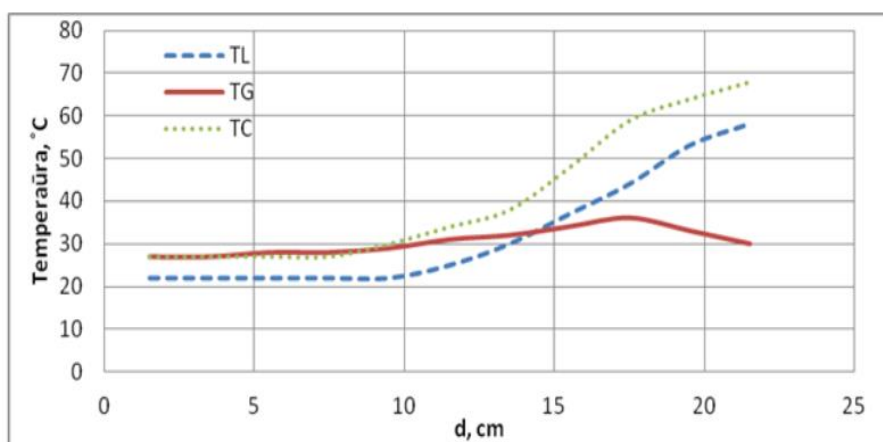
Palielinot attālumu, notiek saistīto kontūru rezonanses frekvences samazināšanās (3.11.a attēls un 3.12. attēls, pie 15V). Tāpēc, iegūstot 3.16. attēlā redzamās atkarības, tika fiksēta rezonanses transformatora rezonanses frekvences vērtības katrai attāluma vērtībai d . Induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz transformatora rezonanses frekvenci enerģijas pārvades režīmā, ja $U_c = 50$ V, ir parādīta 3.17. attēlā.



3.17. att. Induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz transformatora rezonanses frekvenci enerģijas pārraidē režīmā, ja $U_c = 50$ V

Redzams, ka transformatora rezonanses frekvence samazinās un tiecas uz pārraides kontūra rezonanses frekvenci. Tomēr, ja $d > 16$ cm ($k_{cs} < 0,05$), tad notiek nenozīmīga rezonanses frekvences palielināšanās par vairākiem simtiem Hz. Šādos attālumos strāva pārraides kontūrā palielinās līdz 4 ampēriem (3.17. attēls), tas izraisa enerģijas bezvadu pārvades sistēmas konstruktīvo elementu temperatūras pieaugumu.

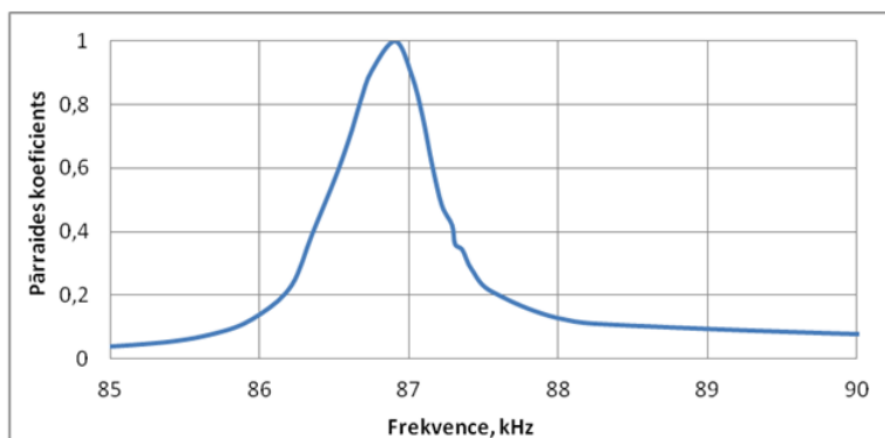
3.18. attēlā parādītas konstruktīvo elementu temperatūras izmaiņas, kas ietekmē rezonanses frekvenci: pārraides kontūra DD inductivitātes spoļu (T_L), pārraides kontūra kondensatora (T_C) un IGBT tranzistoru (T_G) temperatūras izmaiņas. Šie rādītāji tika iegūti, veicot šo konstruktīvo elementu gaisa dzesēšanu. Palielinoties attālumam starp inductivitātes spolēm, IGBT tranzistoru temperatūras (T_G) izmaiņas nav būtiskas. Redzams, ka pārraides spoles un kondensatora temperatūra palielinās lineāri, ja $d > 10$ cm. Šajos pētījumos izmantotajiem kondensatoriem ir raksturīga augsta termostabilitāte, tāpēc to kapacitātes izmaiņas nav būtiskas. Inductivitātes spoles DD temperatūras paaugstināšanās izraisa tās inductivitātes samazināšanos un rezonanses transformatora rezonanses frekvences palielināšanos, ja $d > 15$ cm (3.17. attēls).



3.18. att. Rezonanses transformatora pārraides daļas konstruktīvo elementu temperatūras izmaiņas, mainot attālumu starp inductivitātes spolēm enerģijas pārraides režīmā pie $U_c = 50$ V

3.19. attēlā redzama rezonanses transformatora AFR enerģijas pārraides režīmā, ja attālums starp spolēm $d = 11,5$ cm un $U_c = 50$ V. Minētā AFR sakrīt ar pārraides kontūra AFR. Izvēlētais attālums ir tuvs optimālajam attālumam, lai iegūtu maksimālo izejas jaudu. No AFR izriet, ka rezonanses frekvence ir 86.9 kHz, rezonanses transformatora caurlaides joslas platums ir 473 Hz, bet kontūra kvalitātes faktors ir 183. Uzkrāšanas kondensatora U_c sprieguma ietekme uz rezonanses transformatora enerģijas bezvadu pārraides sistēmas frekvenču un enerģētikas parametriem ir parādīta 3.20. attēlā. Atkarības šajā attēlā ir iegūtas,

ja starp DD induktivitātes spolēm attālums $d = 11.5$ cm, kā arī meandra un transformatora rezonanses frekvences sakrīt.

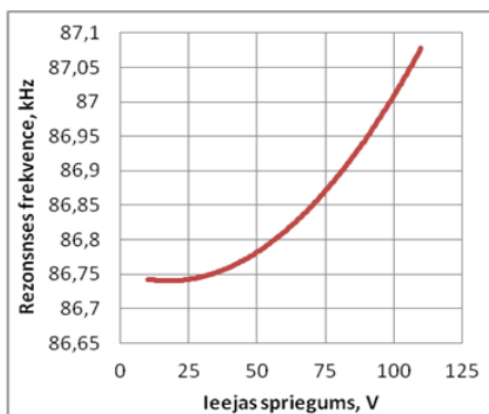


3.19. att. Rezonanses transformatora AFR enerģijas pārraides režīmā, ja spriegums kondensatorā = 50 V un attālums starp spolēm ir 11,5 cm

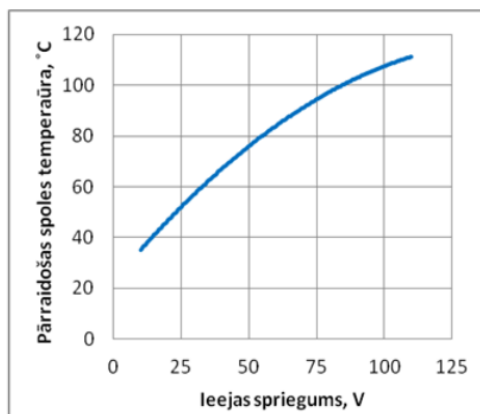
Uzkrāšanas kondensatoru U_c spriegums tika mainīts no 10V līdz 110 V. Uzkrāšanas kondensatora U_c sprieguma palielināšana izraisa pārraides kontūra ieejas strāvas un izejas strāvas palielināšanos. Turklāt atkarībā no novērojama neliela nelinearitāte sākumposmā (3.20. d attēls). Pārraides spoles strāva sasniedza 3,5 A pie maksimālā kondensatora U_c sprieguma. Pie šādām strāvas vērtībām pārraides kontūra DD induktivitātes spoles sasila līdz temperatūrai, kas ir tuva maksimāli pieļaujamai spoles tinumos izmantotā licendrāta vada temperatūrai (120°C) (3.20. b attēls). Spoles tinuma uzkaršana izraisīja DD pārraides spoles induktivitātes samazināšanos un tās rezonanses frekvences palielināšanos, kā arī attiecīgi palielinājās rezonanses transformatora (visas enerģijas bezvadu pārraides sistēmas) rezonanses frekvences.

Rezonanses frekvence tika noteikta, ģeneratoram F_m mainot vadības signāla frekvenci (3.3. attēls), līdz tika iegūts uztvērējkontūra slodzes maksimālais spriegums. 3.20. attēlā redzams, ka frekvence pieaugusi paraboliski līdz ar sprieguma palielināšanu uzkrāšanas kondensatoros U_c un ir mainījusies gandrīz par 0,5 kHz.

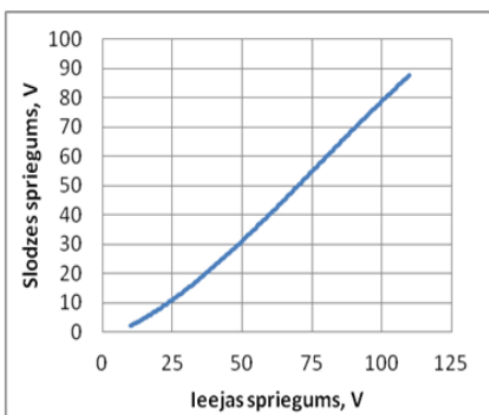
Spriegums uztvērējkontūra slodzē ir vāji nelineāri atkarīgs no U_c sprieguma (3.20.c attēls). Šāda nelinearitāte skaidrojama ar spuldžu kvēldiega pretestības palielināšanos, kas tika izmantotas kā taisngrieža shēmas slodze (3.3. attēls).



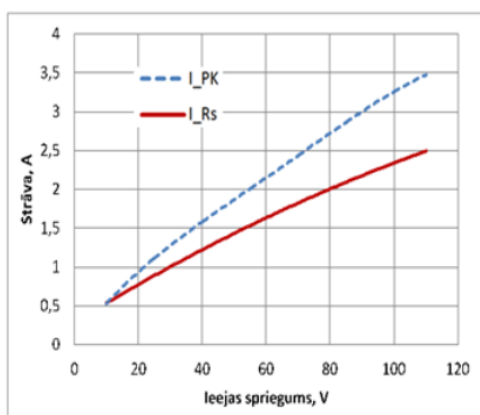
a



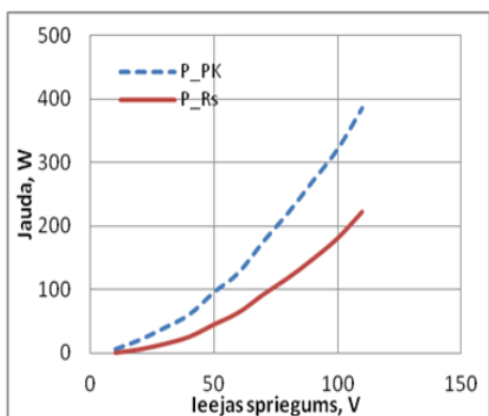
b



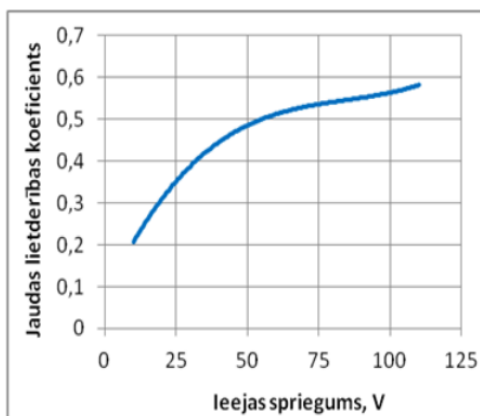
c



d



e



f

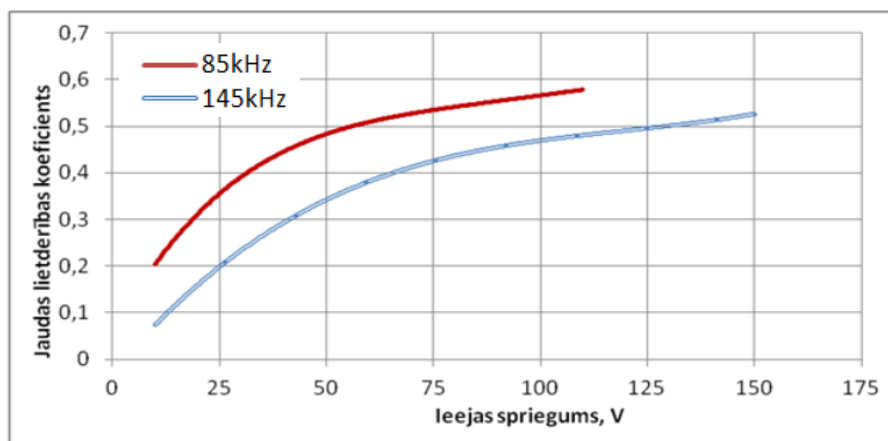
3.20. att. U_c sprieguma ietekme uz rezonanses sistēmas raksturlielumiem, ja $d = 11.5$ cm (a – uz rezonanses frekvenci; b – uz pārraides spoles temperatūru; c – uz slodzes spriegumu; d – uz strāvām kontūros; e – uz ieejas un izejas jaudu; f – uz enerģijas pārraides efektivitāti)

Palielinoties spriegumam U_c palēninās izejas strāvas pieaugums un turpina palielināties apgaismes spuldžu pretestība. Tas izraisa izejas sprieguma atkarības linearizāciju. Ieejas un izejas jaudas atkarībām ir kvadrātveida atkarība no U_c sprieguma (3.20.e attēls), kas atbilst

pārtraides kontūra pretestības pieaugumam rezonanses frekvencē un izejas kontūra slodzes pretestības pieaugumam, kvēldiegam sasilstot. U_c sprieguma palielināšana dod jaudas pārtraides koeficienta pieaugumu (3.20.f attēls), ko nosaka kā izejas jaudas attiecību pret ieejas jaudu. Tomēr jaudas pārtraides koeficienta pieaugums palēninās, ja U_c spriegums pārsniedz 50 V

3.21. attēlā ir apvienotas iepriekš 3.20.f attēlā parādītās jaudas pārtraides lietderības koeficientu atkarības. Enerģijas bezvadu pārtraide ar rezonanses indukcijas metodi, izmantojot DD spoles, 85 kHz frekvencē ir efektīvāka nekā 145 kHz frekvencē, jo 85 kHz frekvencē:

- jaudas pārtraides lietderības koeficients ir lielāks pie viena un tā paša sprieguma U_c uzkrāšanas kondensatoros;
- optimālais attālums starp svārstību kontūru spolēm ir lielāks.



3.21. att. U_c sprieguma ietekme uz enerģijas pārtraides efektivitāti optimālos attālumos starp induktivitātes spolēm dažādās frekvencēs

Enerģijas bezvadu pārtraides efektivitātes izpēte, izmantojot DD induktivitātes spoles frekvenču diapazonā “125 kHz”

Šī pētījuma veikšanai pārtraides kontūrā tika izmantotas tās pašas DD induktivitātes spoles kā eksperimentos frekvencē 85 kHz, bet kondensatoru kapacitāte tika samazināta, lai palielinātu rezonanses frekvences. Spoļu induktivitāte bija identiska: $L_1 = 33,3 \mu\text{H}$ un $L_2 = 91,3 \mu\text{H}$. Kondensatoru kapacitāte svārstību kontūros: $C_1 = 40,6 \text{ nF}$ un $C_2 = 17 \text{ nF}$. Rezonanses frekvenču aprēķina vērtības: pārtraides kontūra – 127.13 kHz, uztvērējkontūra – 127.7 kHz. Starp pārtraides un uztvērējpolēm nepastāvēja savstarpējā nobīde – savstarpējā izvietojuma variants Nr. 1 (3.3. tabula).

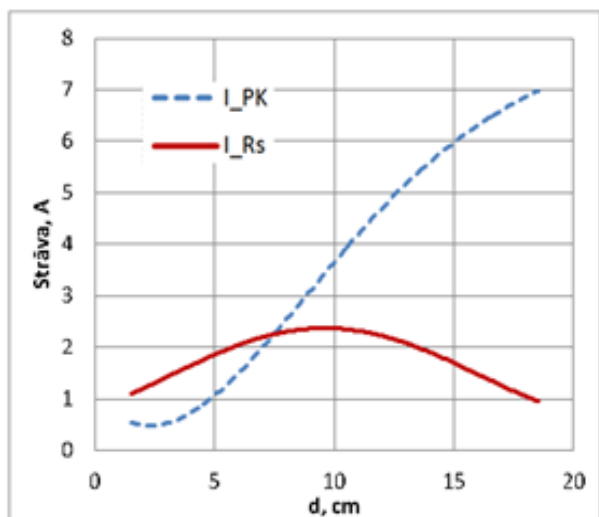
Pētījums par kontūru DD spoļu attāluma ietekmi uz enerģijas bezvadu pārraides efektivitāti, izmantojot rezonanses metodi, tika veikts, izmantojot fiksētu spriegumu $U_c = 50V$ uzkrāšanas kondensatoros. Svārstību kontūru DD spoļu attāluma d palielinājuma solis bija 3 cm. Meandra signāla frekvence bija vienāda ar transformatora rezonanses frekvenci. 3.22. attēlā ir parādīta ietekme attālumam d uz rezonanses transformatora elektriskajiem parametriem.

Rezonanses transformatora izejas strāva ir strāva kas plūst slodzē. Ieejas strāva ir pārraides kontūra strāva, kas plūst no uzkrāšanas kondensatoriem. Maksimālā izejas strāvas vērtība tika novērota, kad attālums d starp svārstību kontūru DD spolēm bija 10,0 cm (3.22. a attēls), kas atbilst saites koeficienta vērtībai 0,12 starp spolēm. Tālāka attāluma d palielināšana izraisa izejas strāvas samazināšanos, jo tiek samazināts magnētiskā lauka līmenis uztvērējspoles tuvumā un krītas saites koeficients starp spolēm. Tādēļ pārraides kontūra strāva lineāri ir atkarīga no d , izņemot malējos posmus.

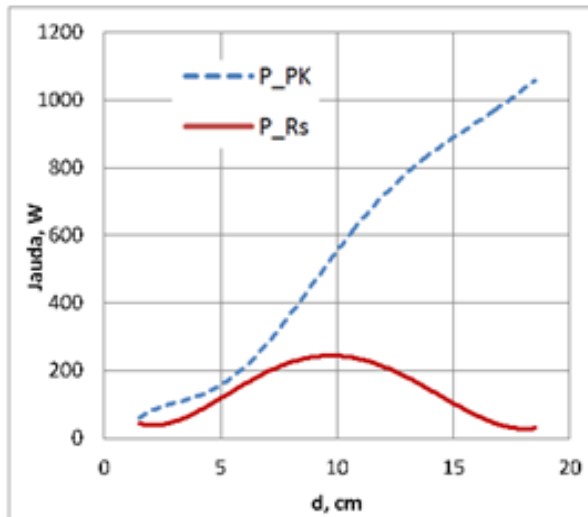
Sākuma posmā (ja $d < 4$ cm) ieejas strāvas vērtība ir pastāvīga un nepārsniedz 0,5A liela saiknes koeficienta dēļ. Pārraides kontūra strāva sasniedza 8 A, kad starp spolēm bija maksimālais attālums ($d = 18$ cm). Šādā attālumā praktiski nepastāv saite starp kontūru spolēm, jo $k_{cs} \ll 0,1$. Izejas strāvas samazinājums, samazinot attālumu sākuma posmā, notiek, jo k_{cs} ir liels un, attiecīgi, pārraides kontūra strāva ir neliela.

Aktīvā slodzes pretestība R_s nosaka uztvērējkontūra slodzes sprieguma atkarību (3.22. c attēls), šīs atkarības raksturs atbilst izejas strāvas izmaiņām (3.22.a attēls). Izejas jaudas atkarības raksturs no attāluma starp spolēm (3.22. b attēls) tiek noteikts no transformatora izejas strāvas atkarības. Visām trim izejas atkarībām (strāvas, sprieguma un jaudas) ir ekstrēmi, ja starp spolēm attālums $d = 10,0$ cm.

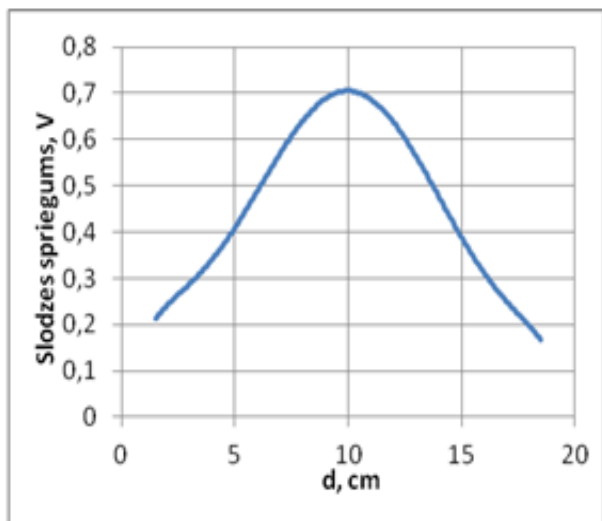
Palielinot attālumu d , ieejas jauda (3.22. b attēls) mainās, tāpat kā ieejas strāva 3.22. a attēlā, jo spriegums $U_c = 50$ V ir pastāvīgs. Jaudas pārraides lietderības koeficienta atkarība no attāluma d starp spolēm ir parādīta 3.22. d attēlā. Redzams, ka pie $d > 7,5$ cm jaudas pārraides koeficients samazinās praktiski lineāri, jo šādos attālumos notiek vienlaicīga ieejas jaudas palielināšanās, ko rada ieejas strāvas palielināšanās un izejas jaudas samazināšanās, jo samazinās izejas strāva. Sākumposmā jaudas pārraides koeficienta vērtība arī samazinās, tomēr lēnāk, jo samazinoties attālumam d , ieejas jauda samazinās lēnāk kā izejas jauda.



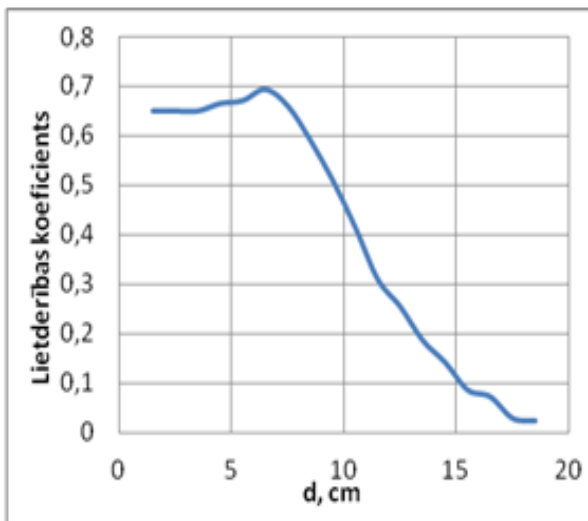
a



b



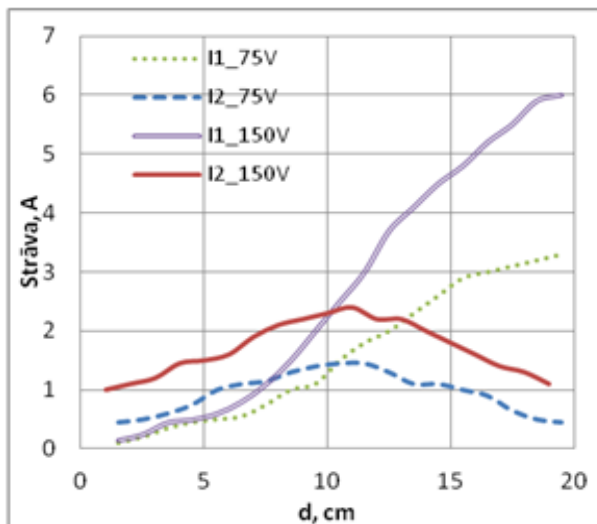
c



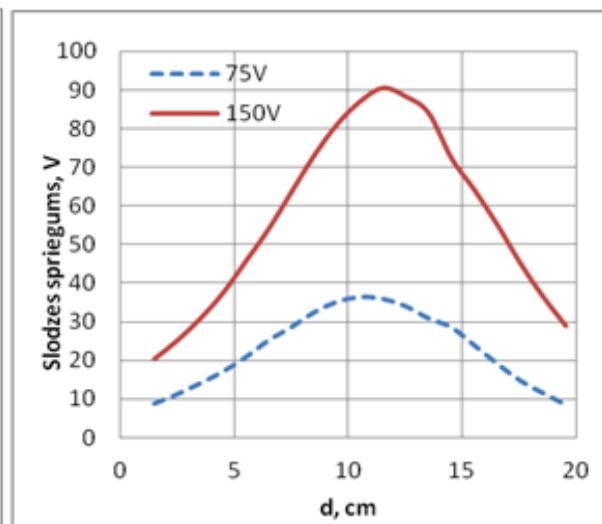
d

3.22. att. Induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz rezonanses transformatora elektriskajiem parametriem pie $U_c=50V$ (a – uz ieejas un izejas strāvu; b – uz ieejas un izvades jaudu; c – uz spriegumu uztvērējkontūra slodzē; d – uz jaudas pārraides lietderības koeficientu)

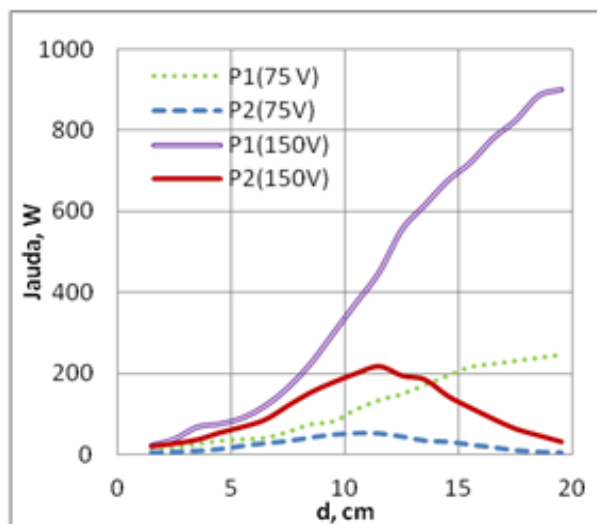
Frekvenču diapazonā “125 kHz” arī tika pētīta DD induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz rezonanses transformatora elektriskajiem parametriem pie uzkrāšanas kondensatoru sprieguma vērtībām U_c : 75 V un 150 V. Meandra signāla frekvence bija vienāda ar transformatora rezonanses frekvenci. Pētījumu rezultāti ir parādīti 3.23. attēlā un 3.24. attēlā.



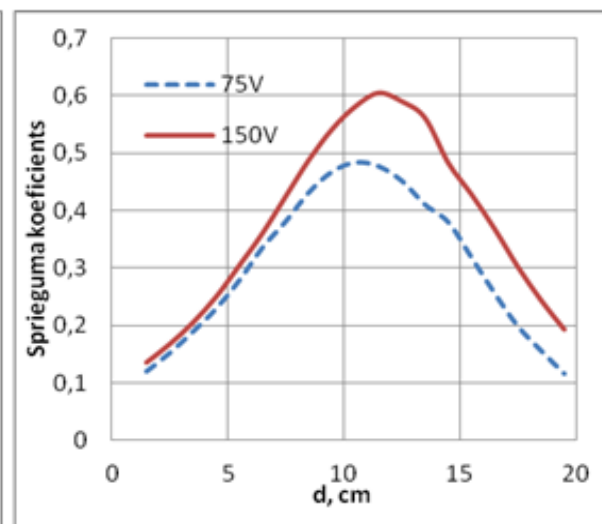
a



b



c



d

3.23. att. Induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz rezonanses transformatora elektriskajiem parametriem pie $U_c = 75\text{ V}$ un $U_c = 150\text{ V}$ (a – uz ieejas un izejas strāvu; b – uz spriegumu uztvērējkontūra slodzē; c – uz ieejas un izejas jaudu; d – uz sprieguma pārraides koeficientu)

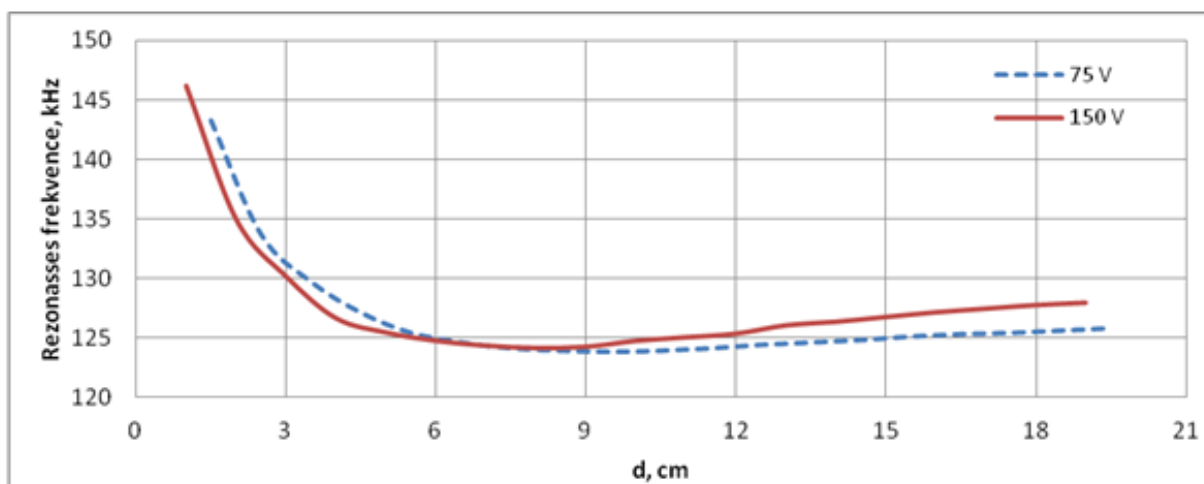
Palielinoties spriegumam U_c uzkrāšanas kondensatoros, izejas strāvu maksimālās vērtības tiek novirzītas lielo attālumu virzienā starp svārstību kontūru DD spolēm (3.23.a attēls), kas atbilst mazākām spoļu saites koeficienta vērtībām. Tālākā attāluma d palielināšana izraisa izejas strāvas samazināšanos, jo samazinās magnētiskā lauka līmenis uztvērējpoles tuvumā. Tālākā attāluma d palielināšanās izraisa arī saites koeficienta samazināšanos starp spolēm. Tāpēc pārraides kontūra strāva pie abiem uzkrāšanas kondensatoru spriegumiem U_c lineāri ir atkarīga no d , izņemot malējos posmus. Sākumposmā ($d < 4 - 5\text{ cm}$) ieejas strāvu vērtības ir vairākkārt mazākas par maksimālajām vērtībām lielo saites koeficientu dēļ.

Maksimālos attālumos starp kontūru spolēm ($d = 20 \text{ cm}$) praktiski nav saites starp kontūru spolēm, jo $k_{ce} \ll 0,1$, tāpēc pārraides kontūra strāva sasniedz maksimālās vērtības. Izejas strāvas zudums, samazinot attālumu sākuma posmā, notiek lielu k_{ce} un, attiecīgi, nelielas pārraides kontūra strāvas dēļ.

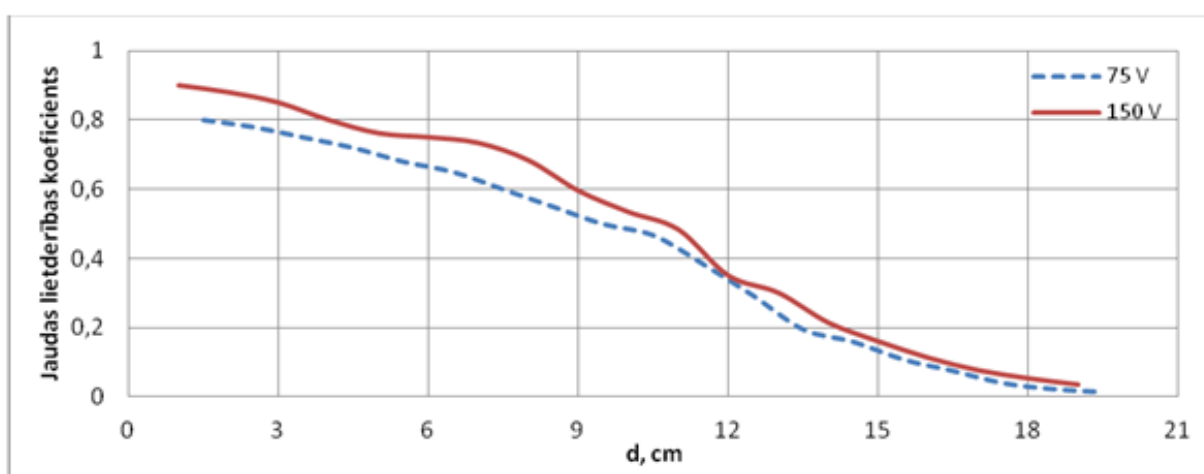
Aktīvā slodzes pretestība R_s nosaka sprieguma vērtības atkarības uztvērējkontūra slodzē (3.23. c attēls), bet šo atkarību raksturs atbilst izejas strāvas atkarībām (3.23. a attēls). Izejas jaudas atkarības raksturs, ievērojot attālumu starp spolēm (3.23. b attēls), atbilst transformatora izejas strāvas atkarībai. Visām trim izejas atkarībām (strāva, spriegums un jauda) ir ekstrēmi pie viena attāluma d starp spolēm. Ekstrēma atrašanās vieta ir atkarīga no sprieguma U_c uzkrāšanas kondensatoros. Ekstrēmu nobīde ir vērojama arī sprieguma pārraides koeficienta atkarībām (3.23. d attēls), turklāt lielāks sprieguma uzkrāšanas kondensatoros U_c dod lielāku pārraides koeficienta vērtību tikai tad, ja starp rezonanses transformatora kontūru spolēm ir vāja saite.

Iegūstot 3.23. attēlā redzamās atkarības, tika fiksētas rezonanses transformatora rezonanses frekvences vērtības katrai attāluma d vērtībai. Induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz transformatora rezonanses frekvenci enerģijas pārraides režīmā pie diviem spriegumiem U_c 75 V un 150 V ir parādīta 3.24. a attēlā.

Palielinot spoļu attālumu d transformatora rezonanses frekvence samazinās un tiecas uz pārraides kontūra rezonanses frekvenci gan pie sprieguma 75 V, tā arī pie sprieguma 150 V. Pie $d = 7,5 \text{ cm}$ rezonanses frekvence sasniedz minimālo vērtību. Šajā attālumā saites koeficients starp spolēm ir vienāds ar $k_{ce} = 0,2$ (7.13. b attēls). Tālākā d palielināšana izraisa k_{ce} samazināšanos, vairākkārtēju strāvas palielināšanos pārraides kontūrā, pārraides spoles temperatūras paaugstināšanos un rezonanses frekvences palielināšanos. Ja $U_c = 150 \text{ V}$, rezonanses frekvences palielinājums ir būtisks un sasniedz gandrīz 4 kHz.



a



b

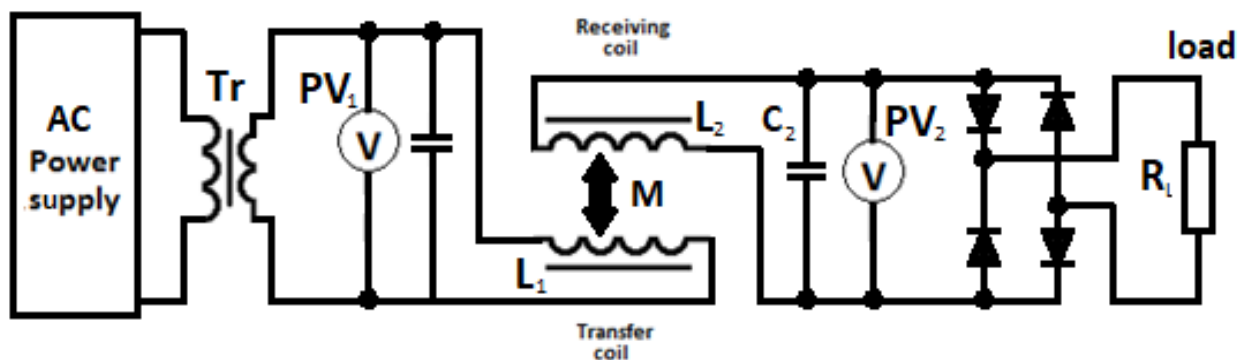
3.24. att. Induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz rezonanses frekvenci (a) un uz rezonanses transformatora jaudas pārraides lietderības koeficientu (b) enerģijas pārraides režīmā, ja $U_c = 75 \text{ V}$ un $U_c = 150 \text{ V}$

Jaudas pārraides lietderības koeficienta atkarība no attāluma d starp spolēm pie diviem spriegumiem uzkrāšanas kondensatoros ir parādīta 3.24.b attēlā. Redzams, ka jaudas pārraides koeficienta vērtības ir vāji atkarīgas no sprieguma, ja $d > 9 \text{ cm}$. Šādos attālos jaudas pārraides lietderības koeficients samazinās praktiski lineāri, jo notiek vienlaicīga ieejas jaudas palielināšanās, palielinoties ieejas strāvai un samazinās izejas jauda, samazinoties izejas strāvai dēļ magnētiskā lauka līmeņa samazināšanās uztvērējantenas atrašanās vietā. Līknes sākuma posmā jaudas pārraides lietderības koeficients arī palielinās, bet lēnāk, jo satuvinot spoles, ieejas jauda krītas ātrāk nekā izejas. Turklāt pārraides lietderības koeficients mazos attālos ir lielāks, ja $U_c = 150 \text{ V}$.

3.3. Pētījums par pārraides kontūra ierosmes veidu ietekmi uz enerģijas bezvadu pārraides sistēmas parametriem

Enerģijas bezvadu pārraides sistēmas parametru izpētes shēma izmantojot kontūra paralēlo ierosmi

Lai pētītu rezonanses transformatora parametrus, tika izmantota mērījumu shēma, kas parādīta 3.25. attēlā. Pētījumos tika izmantota rezonanses transformatora paralēli – paralēlā pieslēguma topoloģija. Pārraides kontūrs ir paralēlais kontūrs, ko veido induktivitāte L_1 un kapacitāte C_1 . Uztvērējkontūrs – paralēlais kontūrs, ko veido induktivitāte L_2 un kapacitāte C_2 . Svārstību ierosme pārraides kontūrā tika veikta, izmantojot papildu salāgojošo transformatoru Tr_1 , kura sekundārais tinums tika pieslēgts paralēli L_1 un C_1 . Tādējādi tika nodrošināta svārstību ierosmes avota paralēla ieslēgšana svārstību kontūrā. Taisngrieža shēmas ieejas pretestība ir vienāda ar slodzes pretestību R_L ir (3.2. attēls un 3.3 attēls).



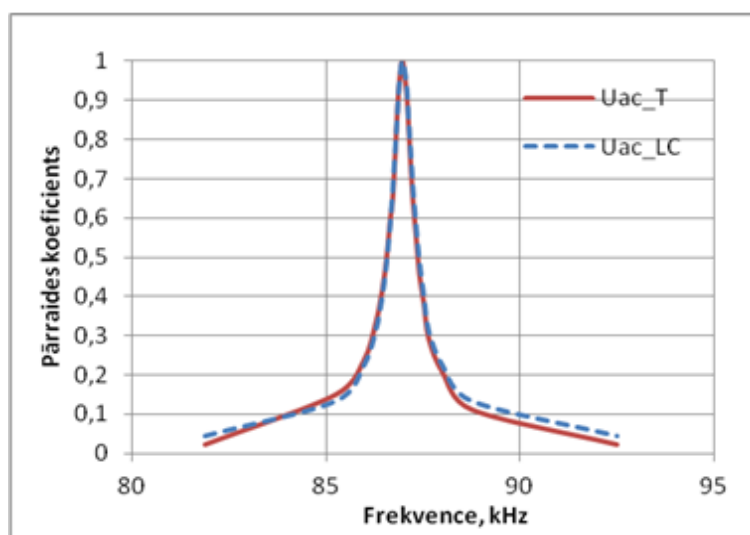
3.25. att. Rezonanses transformatora parametru izpētes shēma pie pārraides kontūra paralēlās ierosmes

Lai izpētītu pārraides kontūra AFR, tam paralēli tika pieslēgti maiņstrāvas voltmetrs PV_1 un oscilogrāfs OSC_1 . Paralēlajā svārstību uztvērējkontūrā maiņstrāvas voltmetrs PV_2 un oscilogrāfs OSC_2 tika pieslēgti paralēli kontūra elementiem sprieguma mērīšanai kontūrā. Maiņstrāvas voltmetrs – V3-38. Oscilogrāfa tips – divkanālu oscilogrāfs HMO2024. Analizējot rezonanses transformatora kontūru frekvenču raksturlīknes, kā mērījumu harmoniskā signāla avots tika izmantots funkcionālais ģenerators HM8030-6.

Attāluma ietekme uz rezonanses transformatora AFR un enerģijas pārraides efektivitāti tika pētīta, izmantojot divu veidu induktivitātes spoles: gredzenveida un DD induktivitātes spoles.

Pārtraides kontūra paralēlās ierosmes ietekme uz enerģijas bezvadu pārtraides sistēmas parametriem, izmantojot DD induktivitātes spoles

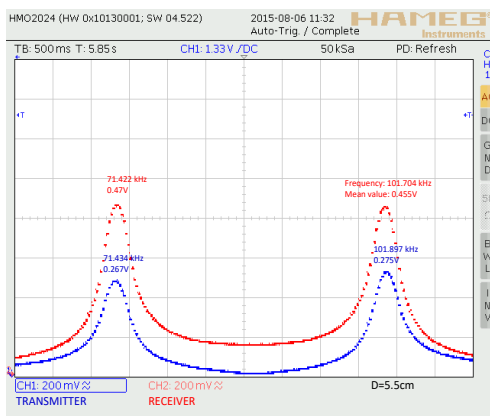
Šī pētījuma veikšanai pārtraides kontūrā tika izmantota DD induktivitātes spole Nr. 1, bet uztvērēj kontūrā – DD induktivitātes spole Nr. 3 (skat. 7.4. tabulu), tas ir, $L_1 = 33,3 \mu\text{H}$ un $L_2 = 91,3 \mu\text{H}$. Kondensatoru kapacitāte svārstību kontūros: $C_1 = 99,95 \text{ nF}$ un $C_2 = 37,3 \text{ nF}$. Rezonanses frekvenču aprēķina vērtības: pārtraides kontūra – 87,633 kHz, uztvērējkontūra – 86,244 kHz. Pārtraides un uztvērējspoles tika novietotas bez savstarpējas nobīdes – savstarpējās izvietojuma variants Nr. 1 (3.3. tabula). 3.26. attēlā ir parādītas svārstību pārtraides kontūra AFR, kas iegūtas eksperimentāli: ar ierosmes transformatoru Tr_1 (nepārtraukta līnija) un bez tā (raustīta līnija). Redzams, ka ierosmes transformators Tr_1 neietekmē paralēlā kontūra frekvences parametrus, kuri ir šādi: rezonanses frekvence – 86.959 kHz, caurlaides joslas platums – 418 Hz, kvalitātes faktors – 208.



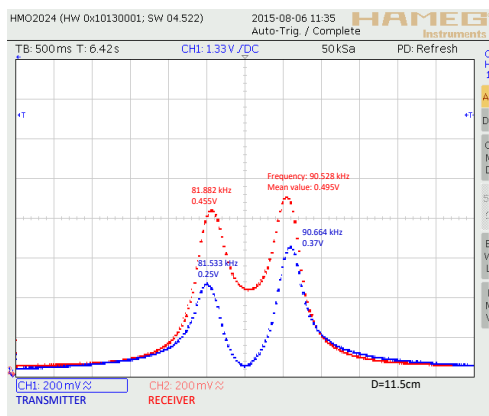
3.26. att. Paralēlā svārstību pārtraides kontūra AFR ar DD induktivitātes spolēm

Pirms enerģijas pārtraides efektivitātes pētījuma tika izpētīta induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz svārstību pārtraides kontūra un rezonanses transformatora AFR (3.27. attēls).

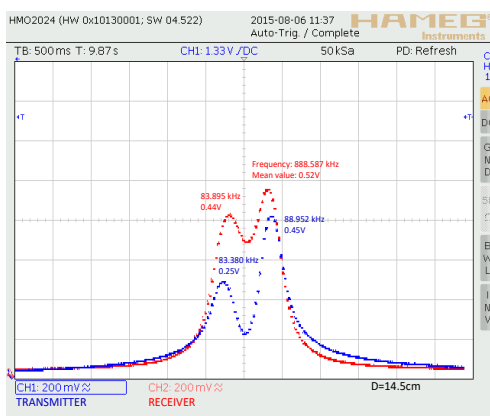
3.27. attēlā rezonanses transformatora AFR parādīta sarkanā krāsā, bet svārstību pārtraides kontūra AFR – zilā krāsā. Lai iegūtu šīs AFR, ieejas signāla ģenerators formēja FM signālu, bet oscilogrāfs strādāja AFR mērījumu režīmā. Svārstību kontūru spoles atradās fiksētos attālumos d , lai iegūtu katru AFR pāri.



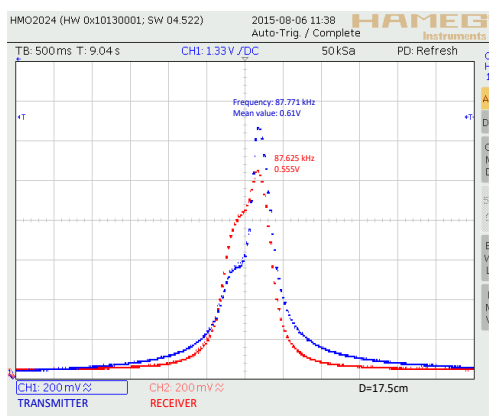
a



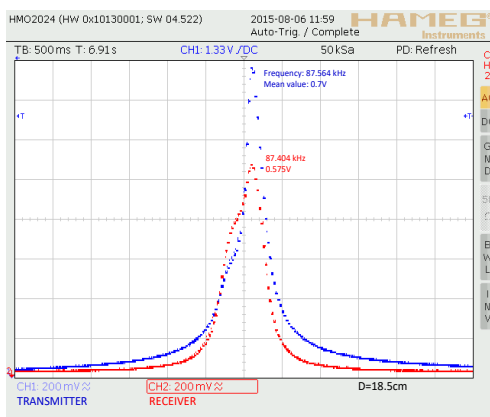
b



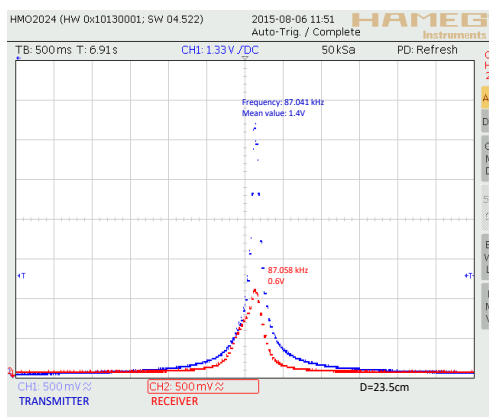
c



d



e



f

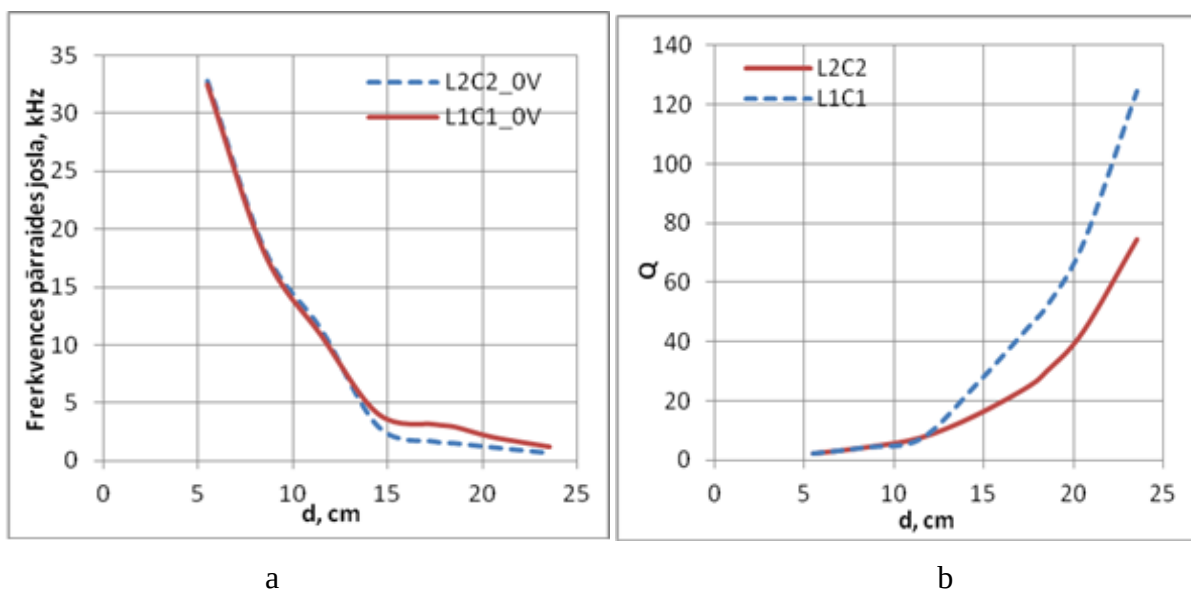
3.27. att. DD spoļu attāluma d ietekme uz pārraides kontūra un rezonanses transformatora AFR diapazonā “85 kHz” (a-5,5 cm; b – 11,5 cm; c – 14,5 cm; d – 18,5 cm; f – 23,5 cm; f – 23,5 cm)

AFR analīze 3.27. attēlā ļauj secināt:

- Ja attālums starp induktivitātes spolēm nepārsniedz 17,5 cm, tad pārraides kontūra AFR būtiski atšķiras no 3.27. attēlā redzamās pārraides kontūra AFR: AFR ir divi

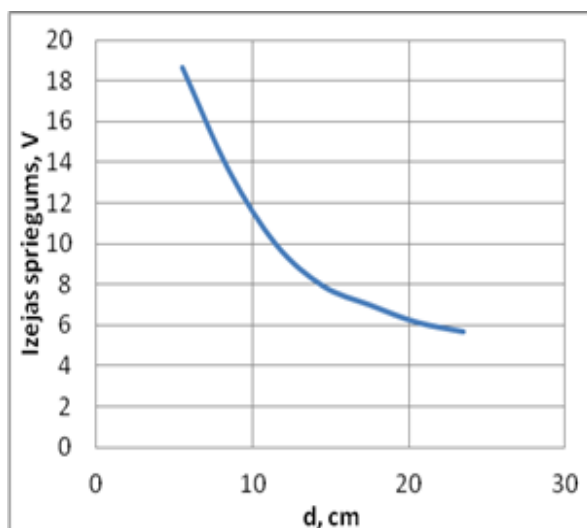
izteikti ekstrēmi un to raksturo divas rezonanses frekvences, ja saites koeficients starp spolēm ir lielāks par 0,05. (7.13.d attēls).

- Saites samazināšana starp kontūriem izraisa arī pārraides kontūra AFR ekstrēmu vērtību pieaugumu.
- Pārraides kontūra AFR otrās rezonanses izzušana notiek attālumā, kas ir 1,5 reizes lielāks nekā rezonanses transformatora topoloģijā “virknes kontūrs – paralēlais kontūrs” DD spolēm (3.10. attēls).
- Pārraides kontūra un rezonanses transformatora pamatrezonanses frekvences ir tuvas (3.27. attēls), jo pārraides kontūra josla ir šaurāka un nosaka visa rezonanses transformatora AFR. Rezonanses frekvences samazinās, palielinot attālumu starp kontūriem.
- Pārraides kontūra un rezonanses transformatora caurlaides joslu atšķirības ir nenozīmīgas, un tikai lielos attāļumos starpība sasniedz vairākus kHz (2.28.a attēls). Šī iemesla dēļ pārraides kontūra kvalitātes faktors ir vairākkārt lielāks nekā visam rezonanses transformatoram kopā (3.28. b attēls).

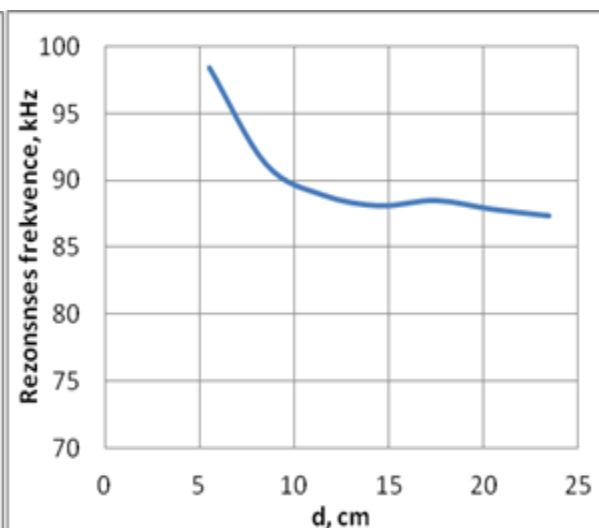


3.28. att. DD spoļu attāluma d ietekme uz rezonanses transformatora AFR parametriem pārraides kontūra paralēlā ierosmē (a – uz caurlaides joslas platumu; b – uz kvalitātes faktoru)

3.29.a attēlā ir parādīta attāluma d ietekme uz izejas spriegumu (spriegums uztvērējkontūra slodzē). Izejas spriegums tika noteikts enerģijas pārraides režīmā, uzkrāšanas kondensatoru spriegums $U_c = 15V$.

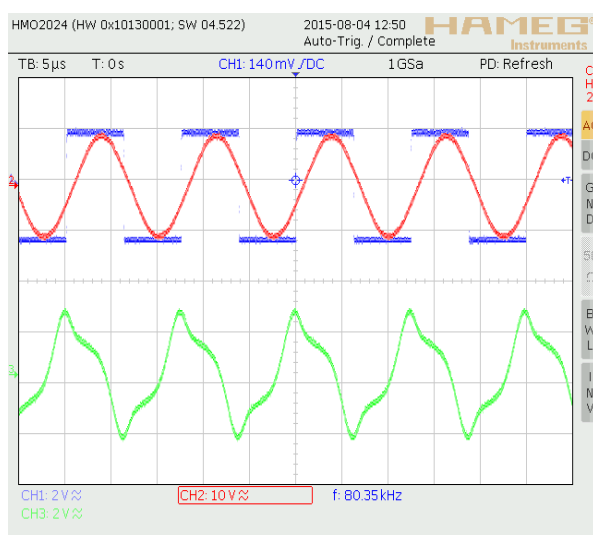


a

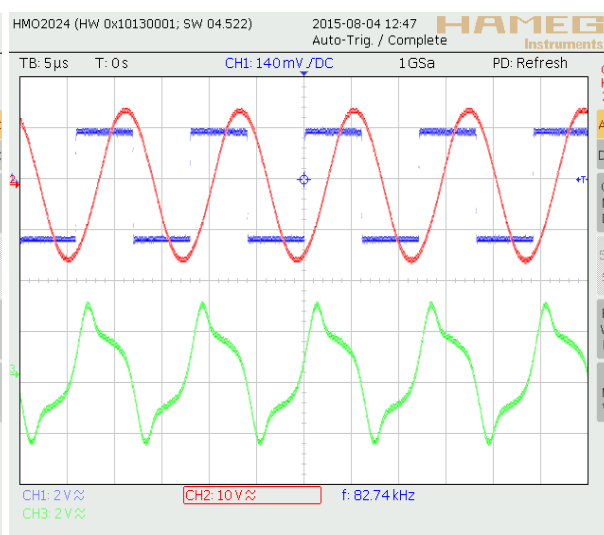


b

3.29. att. Induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz izejas spriegumu (a) un rezonanses frekvenci (b) pie rezonanses transformatora pārraides kontūra paralēlās ierosmes



a

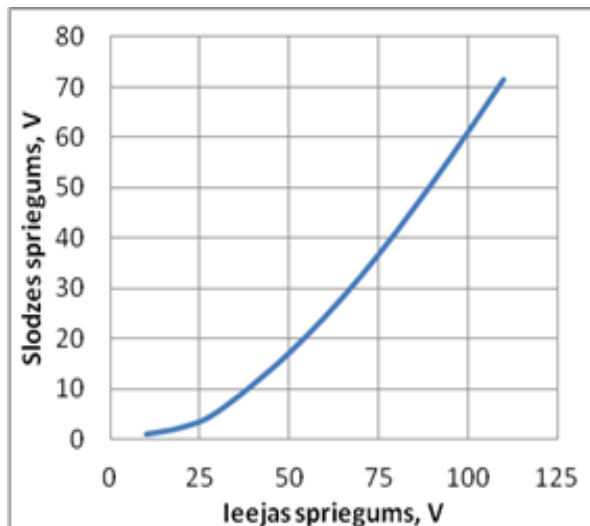


b

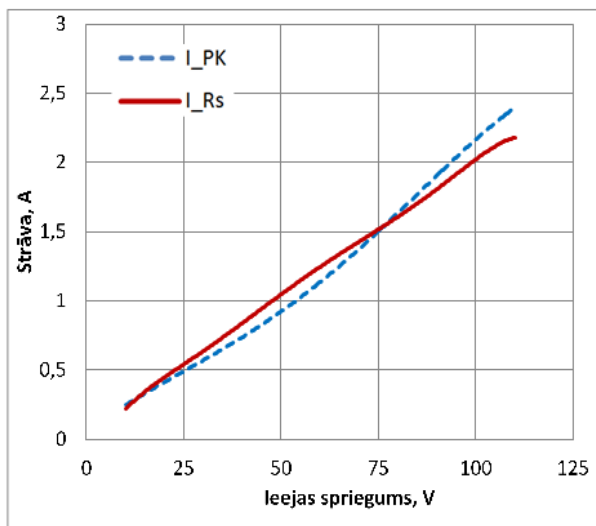
3.30. att. Oscilogrammas pie pārraides kontūra paralēlās ierosmes (a – meandra frekvence ir vienāda ar pārraidošā kontūra rezonanses frekvenci; b – meandra frekvence pārsniedz pārraides kontūra rezonanses frekvenci)

3.29.b attēlā ir parādītas transformatora rezonanses frekvences izmaiņas enerģijas pārraides režīmā, palielinot attālumu d starp spolēm. Rezonanses frekvence samazinās, nesasniedzot vērtību kura tika iegūta pie harmoniska ieejas signāla.

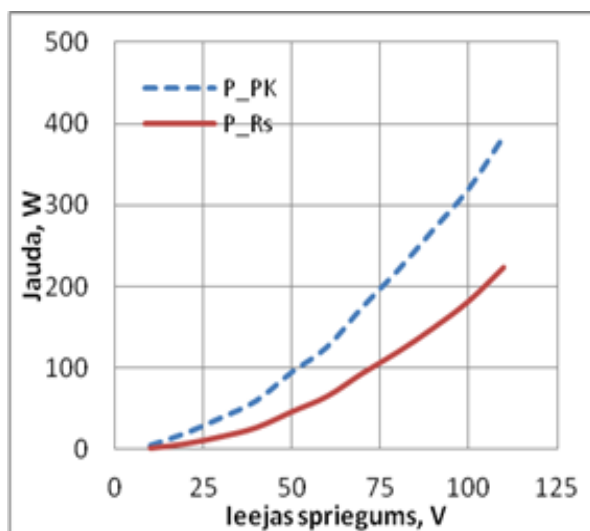
3.30.a un 3.30.b attēlos redzamas oscilogrammas, paralēli ierosinot pārraides kontūru: meandra vadošais signāls tranzistoru IGBT draivera ieejā (zilā krāsa), sprieguma harmoniskās svārstības pārraides kontūrā (sarkanā krāsa) un signāls uztvērējkontūrā (zaļā krāsa).



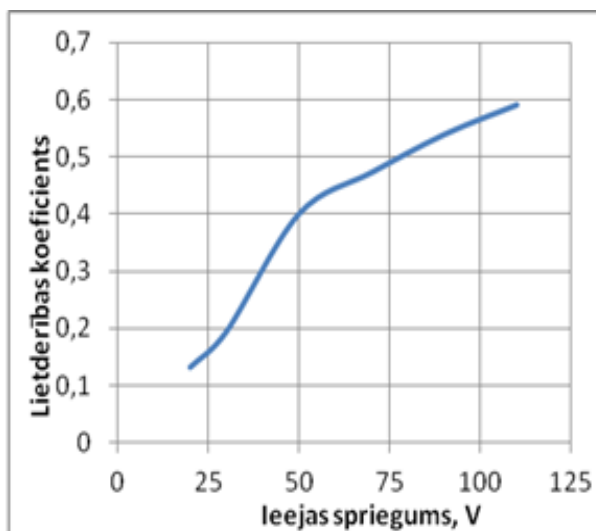
a



b



c

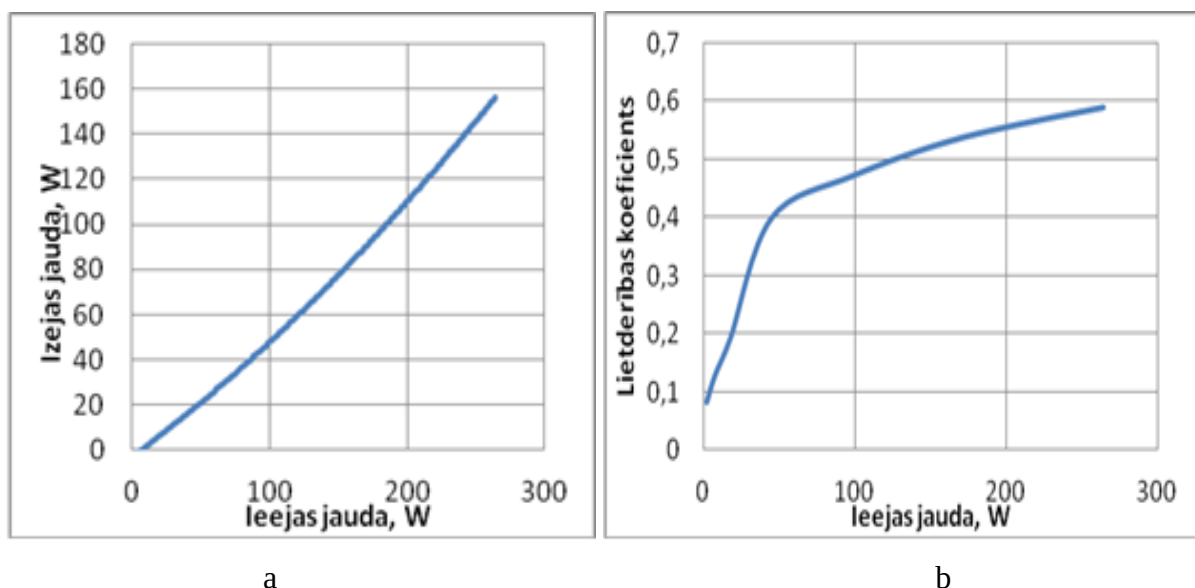


d

3.31. att. Sprieguma U_c ietekme uz DD spoļu rezonanses sistēmas ar parametriem pie pārraides kontūra paralēlās ierosmes un $d = 5,5$ cm (a – uz spriegumu slodzē; b – uz strāvām kontūros; c – uz ieejas un izejas jaudām; d – uz enerģijas pārraides efektivitāti)

3.31. – 3.36. attēlos parādīti rezonanses transformatora efektivitātes pētījuma rezultāti, izmantojot DD induktivitātes spoles un pārraides kontūra paralēlo ierosmi, ja meandra un pārraides kontūra rezonanses frekvences ir vienādas. Rezultāti iegūti trīs dažādos attālumos starp DD induktivitātes spolēm: 5,5 cm (3.31. attēls un 3.32. attēls), 14,5 cm (3.33. attēls un

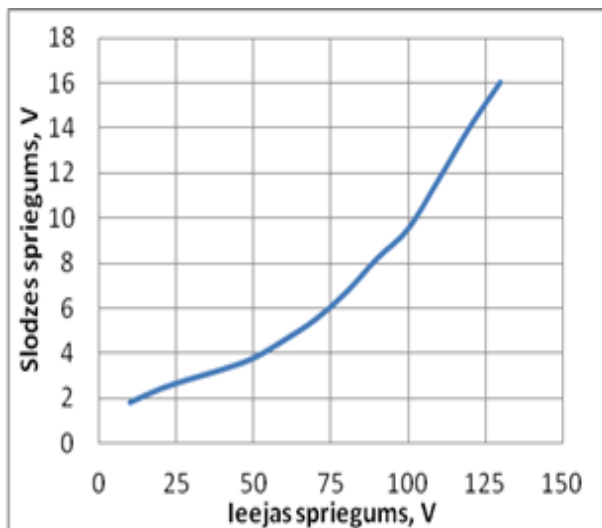
3.34. attēls) un 23,5 cm (3.35. attēls un 3.36. attēls). Veicot efektivitātes pētījumus, uzkrāšanas kondensatoru spriegums U_c tika mainīts no 10 V līdz 130 V.



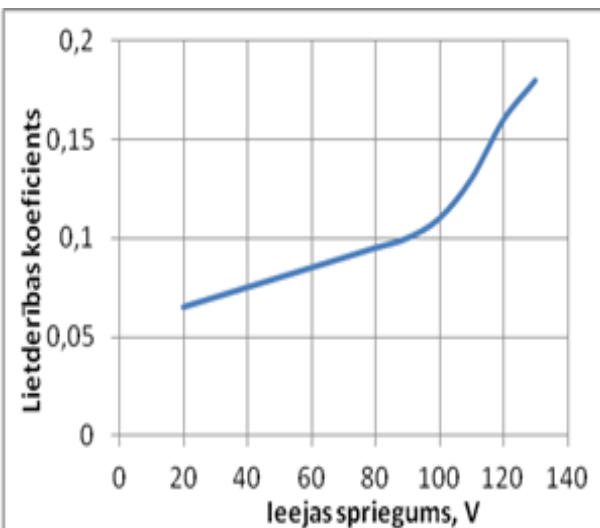
3.32. att. Enerģijas pārraides efektivitāte, ja attālums starp DD induktivitātes spolēm ir 5.5 cm un pārraides kontūrs tiek ierosināts paralēli (a – izejas jaudas atkarība no ieejas jaudas; b – jaudas pārraides lietderības koeficienta atkarība no ieejas jaudas)

Spriegums uztvērējkontūra slodzē ir nelineāri atkarīgs no sprieguma U_c divos attālos starp spolēm (3.31. a attēls un 3.33. a attēls), turklāt, ja d tiek palielināts, slodzes spriegums samazinās. Ja $d = 23,5$ cm spriegums slodzē nepārsniedz 3 V pie maksimālās U_c vērtības (3.35.a attēls). Rezonanses transformatora izejas strāva jebkurā attālumā d starp DD induktivitātes spolēm ir lineāri atkarīga no sprieguma U_c (3.31 b attēls, 3.33.b attēls un 3.35.b attēls). Rezonanses transformatora izejas strāvas (slodzes strāvas) linearitāte un izejas sprieguma nelinearitāte nozīmē, ka nelineāra ir slodzes pretestības atkarība.

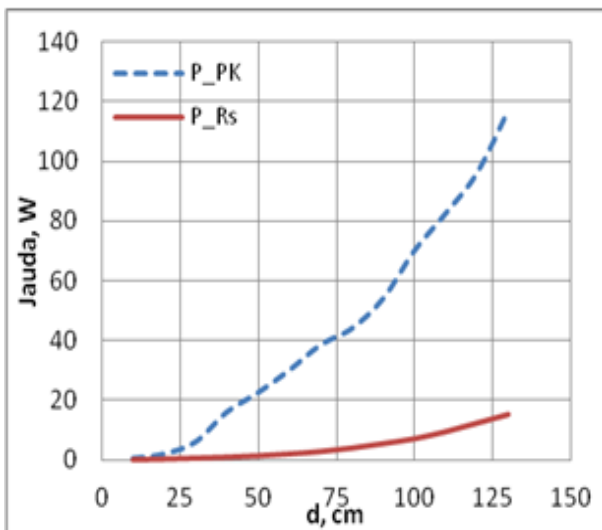
Rezonanses transformatora ieejas strāva (ierosmes transformatora Tr_1 primārā tinuma strāva) mazos attālos d starp DD induktivitātes spolēm ir lineāri atkarīga no sprieguma U_c (3.31. b attēls). Jo lielāka ir d vērtība, jo lielāka kļūst pretestība, kas tiek no paralēlā pārraides kontūra transformēta ierosmes transformatora Tr_1 primārajā tinumā no (3.33.b attēls un 3.35.b attēls), tāpēc strāvas vērtība kļūst mazāka un atkarības nelineārākas.



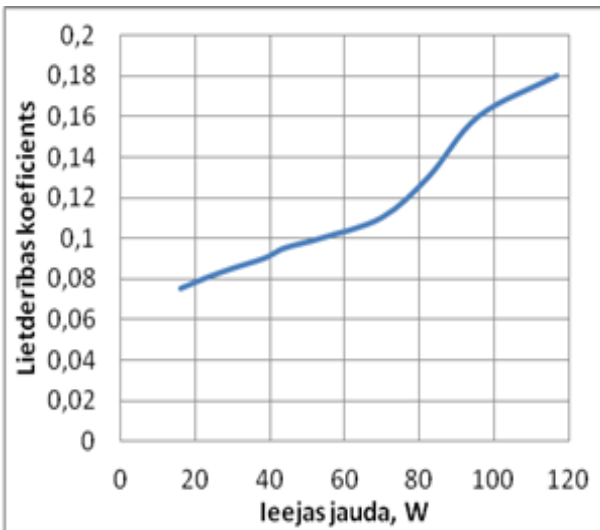
a



b



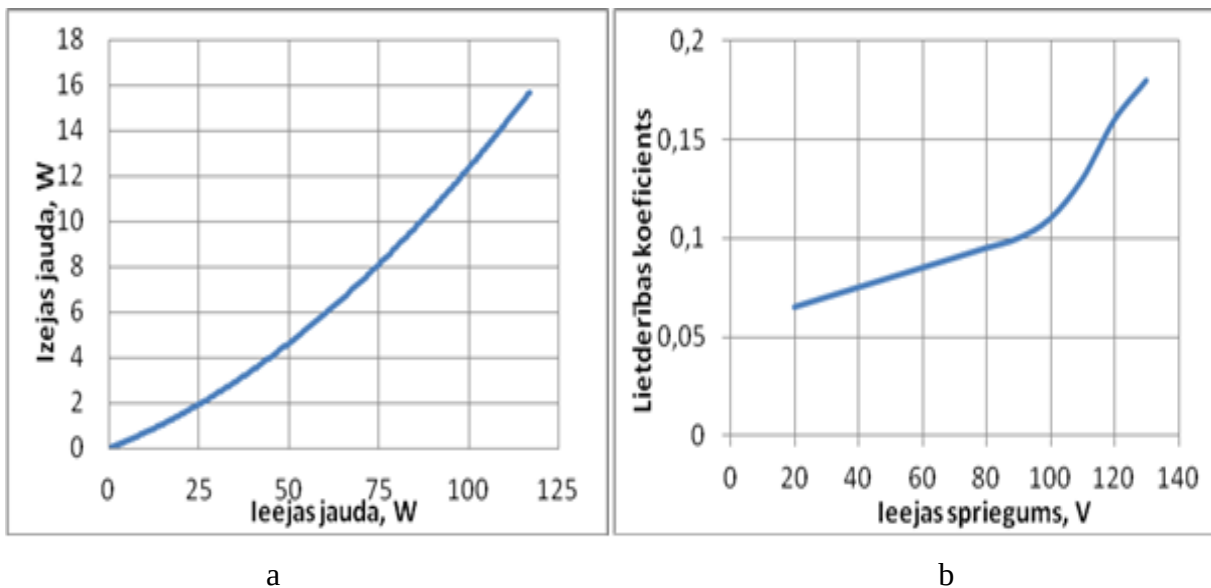
c



d

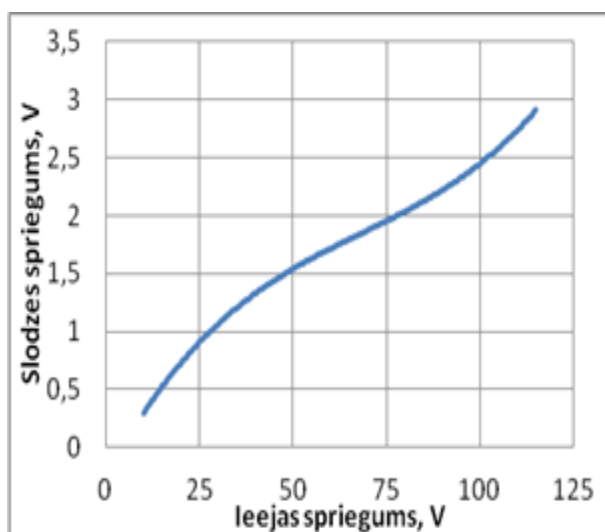
3.33. att. Sprieguma U_c ietekme uz DD spoļu rezonances sistēmas raksturlielumiem pie pārraides kontūra paralēlās ierosmes un $d = 14,5$ cm (a – uz spriegumu slodzē; b – uz strāvām kontūros; c – uz ieejas jaudu un izejas jaudu; d – enerģijas pārraides efektivitāti)

Ieejas jauda ir kvadrātiski atkarīga no sprieguma U_c (3.31.c attēls, 3.33.c attēls un 3.35.c attēls), un atbilst ieejas strāvas lineārajām izmaiņām. Ieejas jaudas vērtību samazināšanās, palielinot d vērtības, ir saistīta ar mazākām ieejas strāvām. Rezonances transformatora izejas jauda samazinās lielākā mērā, ja palielinās d , tas ir saistīts gan ar sprieguma samazināšanos slodzē, gan ar pārraides kontūra strāvas slodzes samazināšanos.

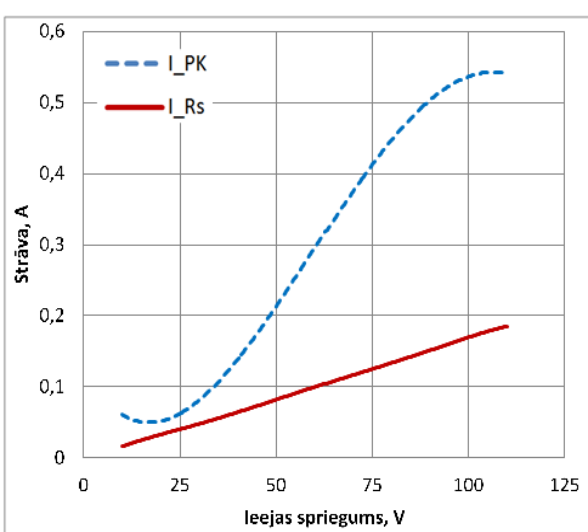


3.34. att. Enerģijas pārraides efektivitāte, ja starp DD induktivitātes spolēm attālums ir 14.5 cm un pārraides kontūrs tiek ierosināts paralēli (a – izejas jaudas atkarība no ieejas jaudas ; b – jaudas pārraides lietderības koeficienta atkarība no ieejas sprieguma)

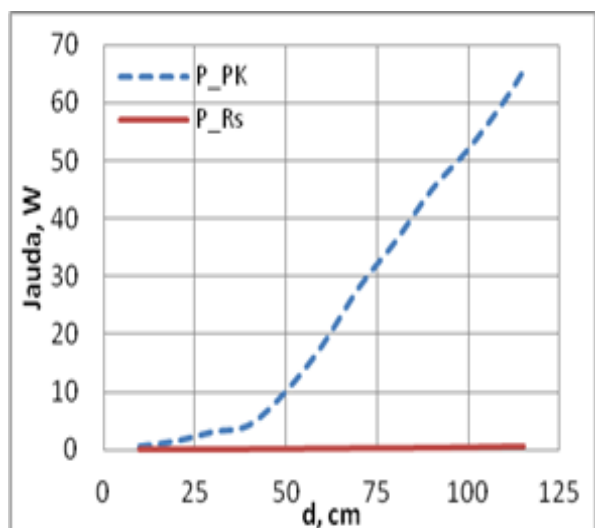
U_c sprieguma palielināšana izraisa jaudas pārraides lietderības koeficienta palielinājumu, ko nosaka kā izejas jaudas attiecību pret ieejas jaudu, bet tikai mazos spoļu attālumos (3.31.d attēls). Palielinoties spoļu attālumam, kad samazinās izejas jauda, jaudas pārraides lietderības koeficients samazinās līdz 0,1 un zemāk, kas liecina par neefektīvu enerģijas pārraidi.



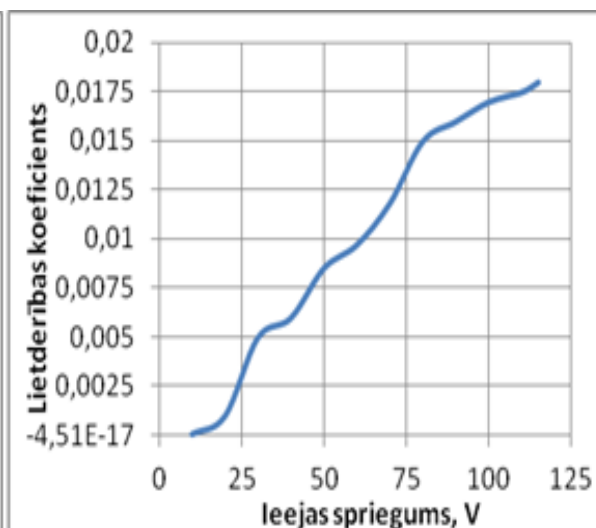
a



b



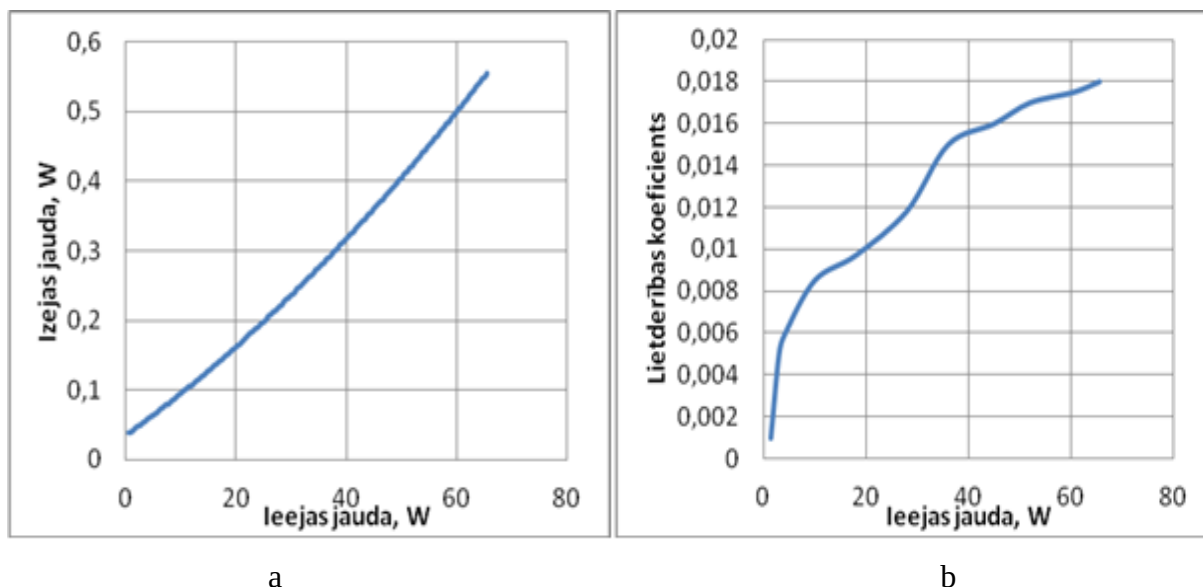
c



d

3.35. att. Sprieguma U_c ietekme uz DD spoļu rezonanses sistēmas raksturlielumiem pie pārraides kontūra paralēlās ierosmes un $d = 23,5$ cm (a – uz spriegumu slodzē; b – uz strāvām kontūros; c – uz ieejas jaudu un izejas jaudu; d – enerģijas pārraides efektivitāti)

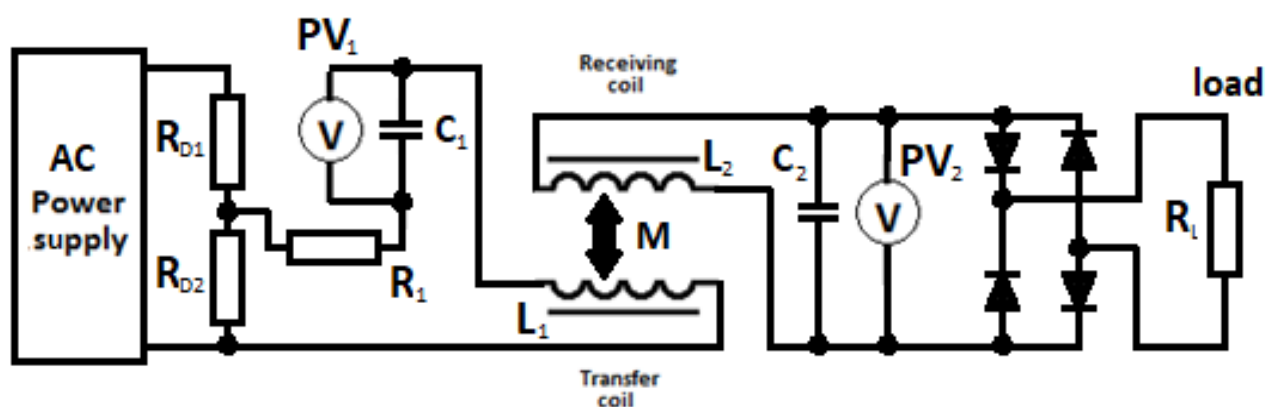
3.32. attēlā, 3.34. attēlā un 3.36. attēlā ir parādīta izejas jaudas un jaudas pārraides lietderības koeficienta atkarība no ieejas jaudas. Izejas jaudām ir nelineāra atkarība no ieejas jaudām (3.32.a attēls, 3.34.a attēls un 3.36.a attēls) jebkurā attālumā starp induktivitātes spolēm. Tomēr jaudas pārraides koeficientu atkarības 3.32.b attēlā un 3.34.b attēlā parāda, ka tikai mazos attālos jaudas pārraides lietderības koeficients var būt lielāks par 0,5. Palielinoties attālumam, jaudas pārraides lietderības koeficients samazinās, tuvojoties simtdaļām.



3.36. att. Enerģijas pārraides efektivitāte, ja starp DD inuktivitātes spolēm attālums ir 23.5 cm un pārraides kontūrs tiek ierosināts paralēli (a – izejas jaudas atkarība no ieejas jaudas; b – jaudas pārraides lietderības koeficienta atkarība no ieejas jaudas)

Enerģijas bezvadu pārraides sistēmas parametru izpētes shēma pie pārraides kontūra virknes ierosmes

Pētījumiem tika izmantota izmantota rezonanses transformatora virknes – paralēlā topoloģija ar tiešo saiti. Lai pētītu rezonanses transformatora parametrus, tika izmantota mērījumu shēma, kas parādīta 3.37. attēlā.



3.37. att. Rezonanses transformatora parametru izpētes shēma pie pārraides kontūra virknes ierosmes

Pārraides kontūrs – virknes kontūrs, ko veido induktivitāte L_1 un kapacitāte C_1 . Lai ierosinātu svārstības pārraides kontūrā, tika izmantota tiešā saite ar nododamās jaudas avotu.

Maksimālās strāvas ierobežošanai virknes kontūrā tika ieslēgts papildus rezistors R_1 , kura pretestība bija $2\ \Omega$.

Uztvērējkontūrs – paralēlais kontūrs, ko veido induktivitāte L_2 un kapacitāte C_2 . Slodzes pretestība R_L ir taisngrieža shēmas ieejas pretestība (3.2. attēls un 3.3 attēls).

Lai izpētītu pārraides kontūra AFR, paralēli tika pieslēgti maiņstrāvas voltmeters PV1 un oscilogrāfs OSC1. Paralēlajā svārstību uztvērējkontūrā maiņstrāvas voltmeters PV2 un oscilogrāfs OSC2 tika pievienoti paralēli kontūra elementiem sprieguma mērīšanai kontūrā. Maiņstrāvas voltmetra tips – V3-38. Oscilogrāfa tips – divkanālu oscilogrāfs HMO2024. Pētījumā par rezonanses transformatora kontūru frekvenču raksturlielumiem kā mērījuma harmoniskā signāla avots tika izmantots funkcionālais ģenerators HM8030-6, kura izeja tika pieslēgta klemmēm 1. – 2., izmantojot rezistorus R_{D1} un R_{D2} . Šo rezistoru pretestība bija $51\ \Omega$ un $0,8\ \Omega$. Minēto rezistoru izmantošana nodrošināja funkcionālā ģenerators HM8030-6 saskaņošanu ar slodzi, kā arī pastāvīgu spriegumu starp klemmēm 1. – 2. mainoties virknes pārraides kontūra pretestībai. Pētījumā par enerģijas pārraides efektivitāti klemmes 1. – 2. tika pieslēgtas tieši IGBT tranzistoru komutācijas tilta shēmas diagonālei (3.3. attēls). Attāluma ietekme uz rezonanses transformatora AFR un enerģijas pārraides efektivitāti tika pētīta, izmantojot DD induktivitātes spoles.

Pārraides kontūra virknes ierosmes ietekme uz enerģijas bezvadu pārraides sistēmas parametriem, izmantojot DD induktivitātes spoles

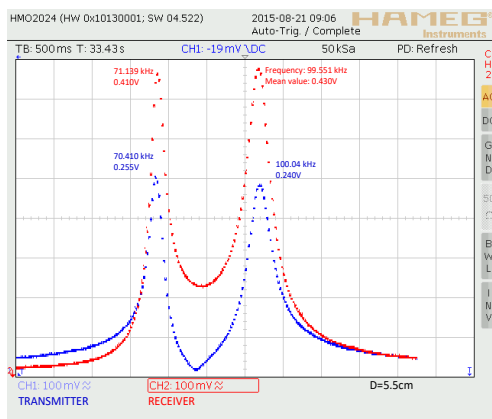
Šī pētījuma veikšanai pārraides kontūrā tika izmantota DD induktivitātes spole Nr.1, bet uztvērējkontūrā – DD induktivitātes spole Nr.3 (skat. 7.4. tabulu), tas ir, $L_1 = 33,3\ \mu\text{H}$ un $L_2 = 91,3\ \mu\text{H}$. Kondensatoru kapacitāte svārstību kontūrā: $C_1 = 99,95\ \text{nF}$ un $C_2 = 37,3\ \text{nF}$. Rezonanses frekvenču aprēķina vērtības: pārraides kontūra – $87,633\ \text{kHz}$, uztvērējkontūra – $86,244\ \text{kHz}$. Pārraides un uztvērējpoles izvietotas bez savstarpējas nobīdes – savstarpējā izvietojuma variants Nr.1 (7.2. tabula).

Pirms enerģijas pārraides efektivitātes pētījuma, izmantojot pārraides kontūra virknes ierosmi, tika izpētīta DD induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz pārraides kontūra AFR un paša rezonanses transformatora AFR (3.38. attēls un 3.39. attēls).

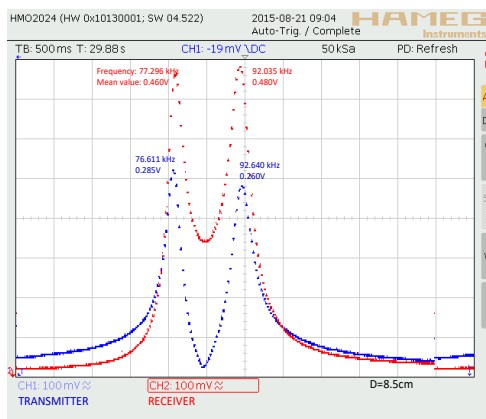
Šajos attēlos rezonanses transformatora AFR ir atainotas sarkanā krāsā, bet svārstību pārraides kontūra AFR – zilā krāsā. Lai iegūtu šīs AFR, ieejas signāla ģenerators formēja FM signālu, bet oscilogrāfs strādāja AFR mērījumu režīmā. Lai iegūtu katru AFR pāri, svārstību kontūru DD induktivitātes spoles tika novietotas dažādos fiksētos attālos d .

AFR analīze, kas iegūta pie minimāliem aktīviem zudumiem pārraides kontūrā (3.38. attēls, $R_1 = 0\Omega$) ļauj secināt:

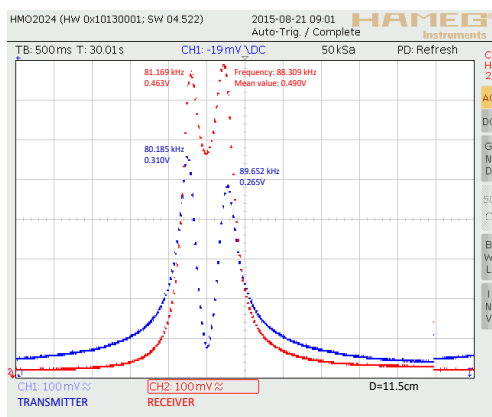
- Ja attālums starp DD induktivitātes spolēm nepārsniedz 20 cm, tad pārraides virknes kontūra AFR būtiski atšķiras no atsevišķi novietota virknes kontūra – tai ir divi izteikti ekstrēmi un to raksturo divas rezonanses frekvences, ja saites koeficients starp spolēm ir lielāks par 0,05. (7.13.d attēls).
- Pārraides kontūra AFR otrā rezonanse izzūd attālumā, kas ir 1,5 reizes lielāks nekā gadījumā, ja tiek izmantota ierosmes transformators un rezonanses transformatora topoloģija “virknes kontūrs – paralēls kontūrs” ar DD spolēm (3.9. attēls).
- Rezonanses transformatora AFR otrā rezonanse izzūd tādā pašā attālumā kā izmantojot ierosmes transformatoru un rezonanses transformatora topoloģiju “paralēlais kontūrs – paralēlais kontūrs” ar DD spolēm (3.27. attēls).
- Saites samazināšanās starp kontūriem nerada būtiskas pārraides kontūra AFR ekstrēma vērtības izmaiņas.
- Pārraides kontūra un rezonanses transformatora pamatrezonanses frekvences ir tuvas (3.40. a attēls), bet nav vienādas ar svārstību pārraides un uztvērējkontūru rezonanses frekvenču aprēķina vērtībām, turklāt kopējā transformatora rezonanses frekvence ir mazāka. Rezonanses frekvences samazinās, ja tiek palielināts attālums starp kontūru spolēm.
- Ja nav otrās rezonanses, tad rezonanses transformatora josla ir šaurāka un tiek noteikta ar uztvērējkontūra AFR (3.40.b attēls).
- Pārraides kontūra un rezonanses transformatora caurlaides joslas samazināšanās, palielinot attālumu starp svārstību kontūru spolēm, izraisa kvalitātes faktora palielināšanos kā raidošajā virknes kontūrā, tā arī visā rezonanses transformatorā (3.40.d attēls).



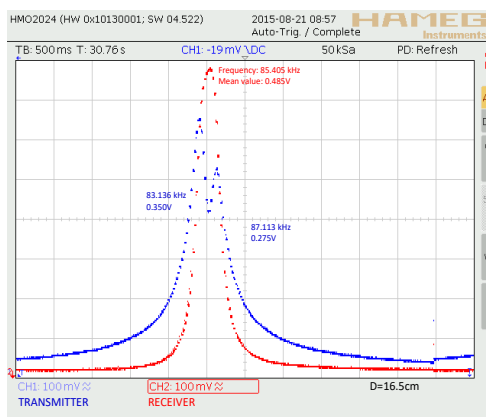
a



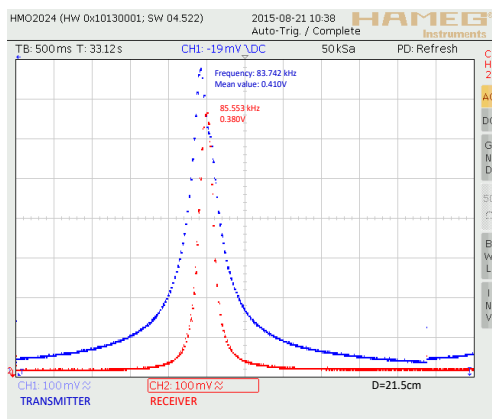
b



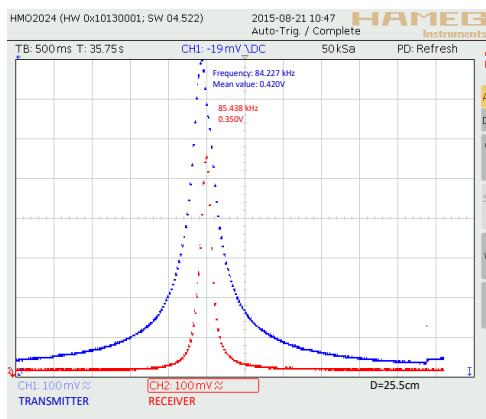
c



d

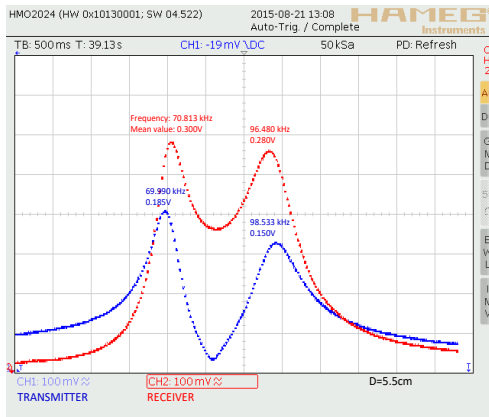


e

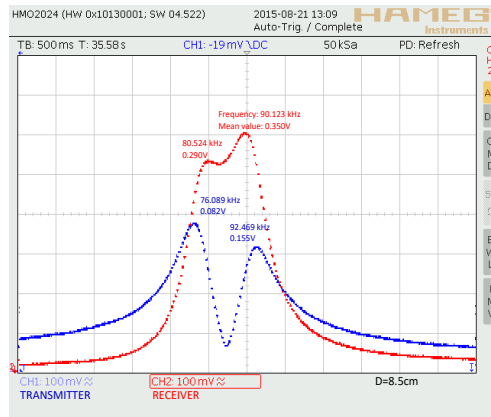


f

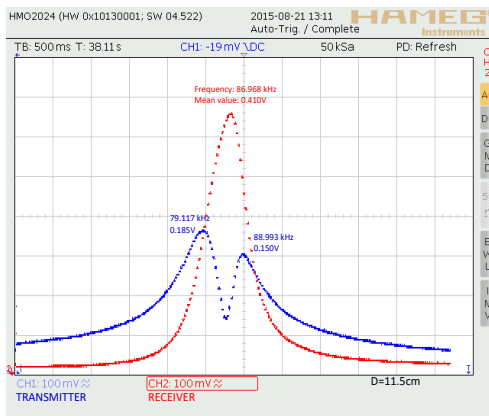
3.38. att. DD spoļu attāluma d ietekme uz pārraides kontūra un rezonanses transformatora AFR izmantojot virknes ierosmi pie $R_1 = 0 \Omega$ (a – 5,5 cm; b – 8,5 cm; c – 11,5 cm; d – 14,5 cm; e – 21,5 cm; f – 25,5 cm)



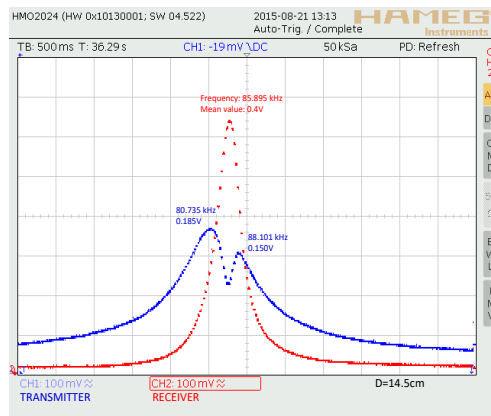
a



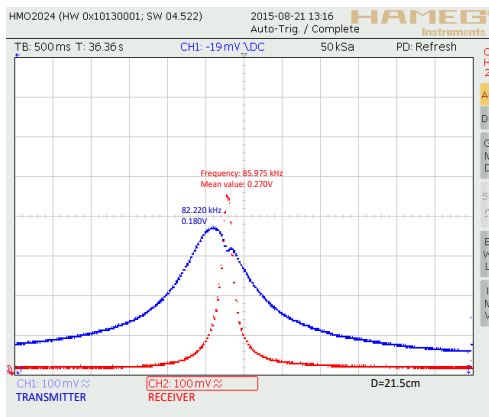
b



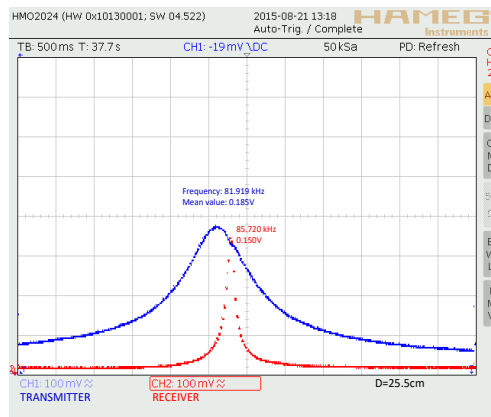
c



d

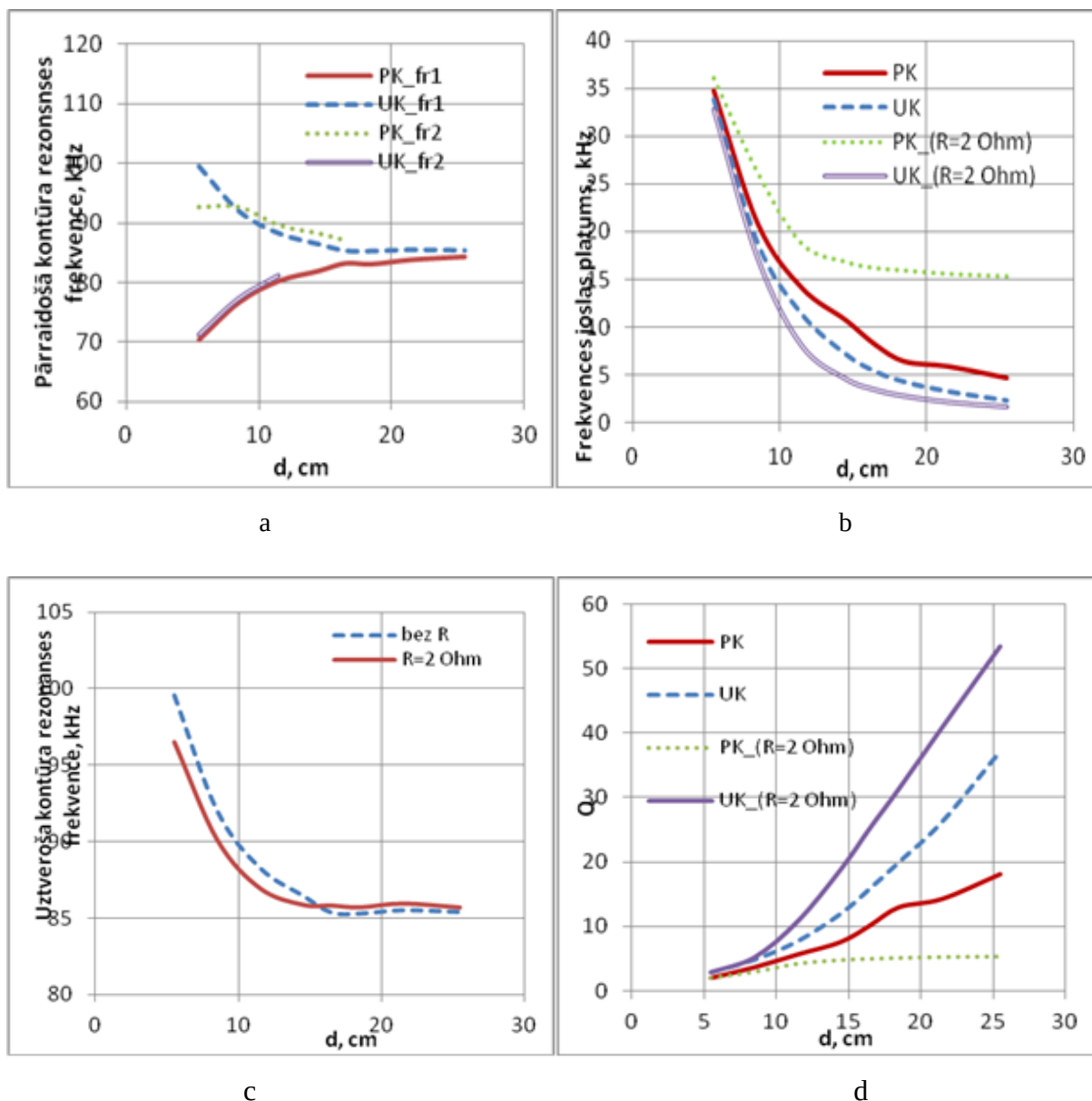


e



f

3.39. att. DD spoļu attāluma d ietekme uz pārraides kontūra un rezonanses transformatora AFR izmantojot virknes ierosmi pie $R_1 = 2 \Omega$ (a – 5,5 cm; b – 8,5 cm; c – 11,5 cm; d – 14,5 cm; e – 21,5 cm; f – 25,5 cm)



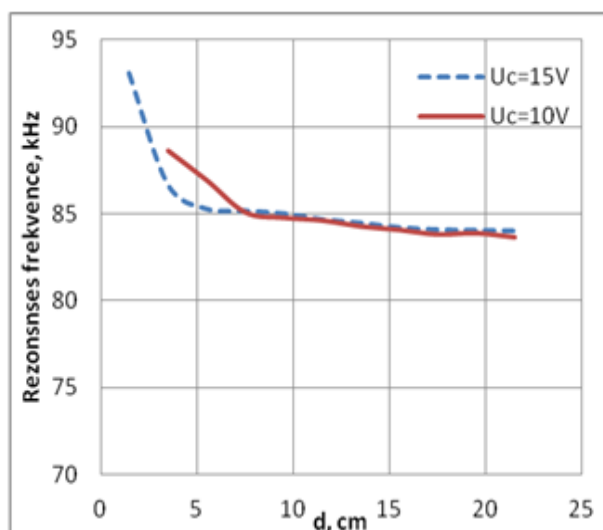
3.40. att. DD spoļu attāluma ietekme uz rezonanses transformatora AFR parametriem pie virknes ierosmes (a – uz raidošā kontūra rezonanses frekvencēm pie $R_1 = 0 \Omega$; b – uz caurlaidības joslas platumu; c – uz rezonanses transformatora rezonanses frekvenci; uz pārdaides kontūra un rezonanses transformatora kvalitātes faktoru)

Papildus aktīvo zudumu ienešana virknes pārdaides kontūrā ($R_1 = 2 \Omega$) rada šādas izmaiņas virknes pārdaides kontūra AFR un paša rezonanses transformatora AFR (3.39. attēls):

- Samazinās virknes pārdaides kontūra kvalitātes faktors, un pēc otrā ekstrēma zuduma pārdaides kontūra caurlaides josla pārsniedz 15 kHz pat tad, ja nepastāv kontūru savstarpējā ietekme (3.40.b attēls).
- Pārdaides kontūra AFR ekstrēma līmenis samazinās vairāk nekā divas reizes.

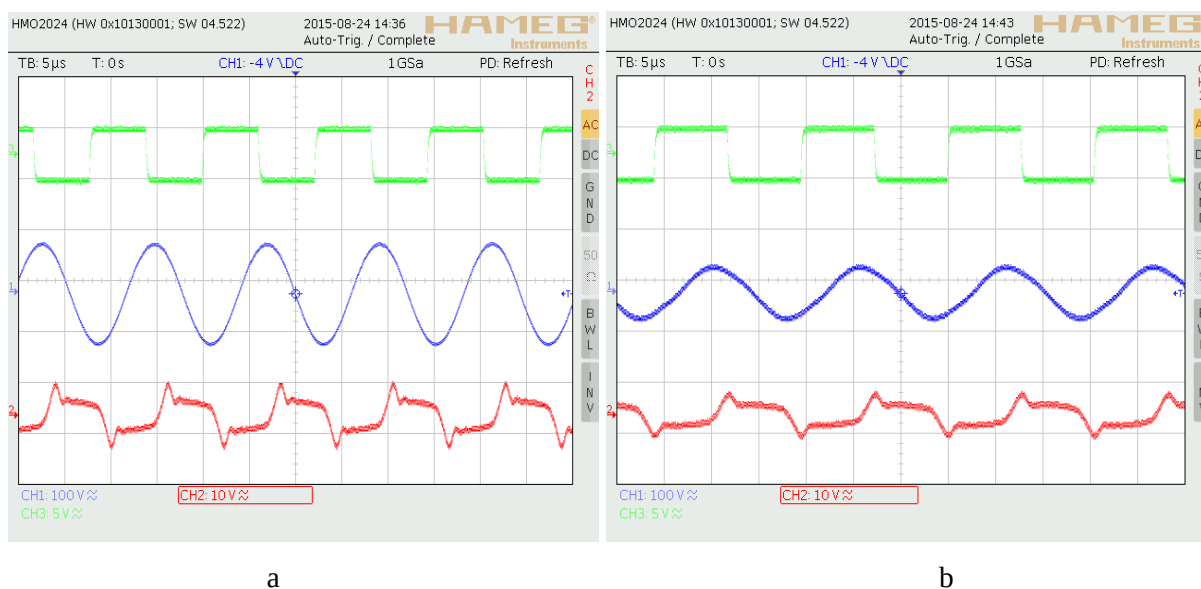
- Kontūru saites samazināšanās (attāluma palielināšana starp kontūru spolēm) nerada būtiskas izmaiņas pārraides kontūra AFR ekstrēma vērtībā.
- Transformatora AFR otrā rezonanse izzūd pie mazākiem attālumiem.
- Attāluma palielināšana starp kontūru spolēm izraisa rezonanses transformatora kvalitātes faktora lineāru pieaugumu, kas pārsniedz 50 pie maksimālā attāluma, tā rezultātā AFR josla kļūst mazāka par 2 kHz (3.39.c attēls – 3.39.f attēls, 3.40.b attēls un 3.40.d attēls).
- Pārraides kontūra AFR ekstrēma amplitūdas samazināšanās rada tādu pat visa rezonanses transformatora AFR pīķa vērtības samazināšanos.
- Pārraides kontūra un rezonanses transformatora rezonanses frekvences atšķiras par 3 – 4 kHz. Rezonanses frekvenču attālums ir atkarīgs no distances starp kontūru spolēm, turklāt pārraides kontūra rezonanses frekvence jebkurā attālumā ir zemāka. Tā ir arī zemāka par šī kontūra aprēķināto rezonanses frekvences vērtību.
- Ja attālums starp kontūru spolēm ir lielāks par 15 cm, transformatora rezonanses frekvenci un caurlaides joslu pamatā nosaka uztvērējkontūra AFR un tā nav atkarīga no zudumu pretestības virknes pārraides kontūrā (3.40.d attēls).

Pētījums par DD spoļu kontūru attāluma ietekmi uz bezvadu enerģijas pārraides efektivitāti, pielietojot rezonanses metodi, pie pārraides kontūra virknes ierosmes, tika veikta pie diviem fiksētiem spriegumiem uzkrāšanas kondensatoros (3.3. attēls) $U_c = 10 \text{ V}$ un $U_c = 15 \text{ V}$. Papildus rezistora pretestība bija $R_1 = 2 \text{ } \Omega$. Palielinājuma solis attālumam d starp svārstību kontūru DD spolēm bija 3 cm. Meandra signāla frekvence bija vienāda ar rezonanses transformatora rezonanses frekvenci. Palielinot attālumu, notiek saistīto kontūru rezonanses frekvences samazināšanās (3.40. attēls), tāpēc, veicot efektivitātes pētījumus, tika fiksētas transformatora rezonanses frekvences vērtības pie katras attāluma d vērtības. Induktivitātes spoļu attāluma d ietekme uz transformatora rezonanses frekvenci enerģijas pārraides režīmā pie diviem spriegumiem uzkrāšanas kondensatoros $U_c = 10 \text{ V}$ un $U_c = 15 \text{ V}$ ir parādīta 3.41. attēlā.



3.41. att. DD induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz transformatora rezonanses frekvenci enerģijas pārraides režīmā izmantojot pārraides kontūra virknes ierosmi

Redzams, ka palielinot spoļu attālumu transformatora rezonanses frekvence samazinās un tiecas uz frekvenci, kuras vērtība ir nedaudz zemāka par 85 kHz. Šīs frekvences arī ir zemākas par tām vērtībām, kuras tika iegūtas, veicot rezonanses transformatora AFR pētījumu (3.40.c attēls).



3.42. att. Laika procesu oscilogrammas pie pārraides kontūra virknes ierosmes (a –meandra frekvence un pārraides kontūra rezonanses frekvence ir vienādas; b – meandra frekvence ir vienāda ar virknes pārraides kontūra caurlaides joslas augšējo robežu)

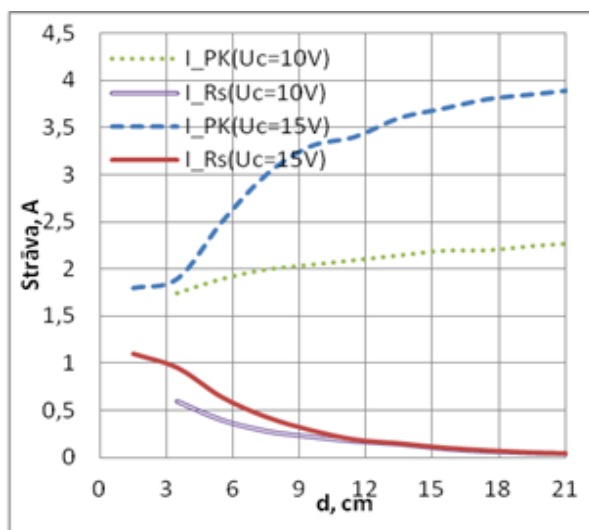
3.42. attēlā ir parādītas signālu oscilogrammas, ierosinot virknes pārraides kontūru: meandra vadības signāls IGBT tranzistoru draivera ieejā (zaļā krāsa), pārraides kontūra sprieguma harmoniskās svārstības kondensatorā C_1 (zilā krāsa) un signāls uztvērējkontūrā (sarkanā krāsa). Oscilogrammas iegūtas pie DD induktivitātes spoļu attāluma 9,5 cm, kas atbilst saites koeficientam 0,175. Ja meandra un virknes pārraides kontūra rezonanses frekvences sakrīt, harmonisko svārstību pīķa vērtības kondensatorā C_1 sakrīt ar meandra vadības signāla pārslēgšanas momentiem (3.42.a attēls). Harmonisko sprieguma svārstību amplitūda ir 100 V.

Palielinot meandra frekvenci paralēlajā uztverošajā kontūrā arī tiek ierosinātas svārstības, kuru frekvence ir vienāda ar meandra frekvenci, bet nobīdītas fāzē un ar mazāku amplitūdu. Kontūra strāvas samazināšanos izsauc tas, ka palielinās virknes svārstību kontūra pretestība (3.42.b attēls). Virknes pārraides kontūra strāvas samazināšanās izraisa magnētiskā lauka samazināšanos uztvērējpoles atrašanās vietā. Rezultātā samazinās sprieguma vērtība uztvērējkontūrā (3.42. b attēls, apakšējā laika diagramma).

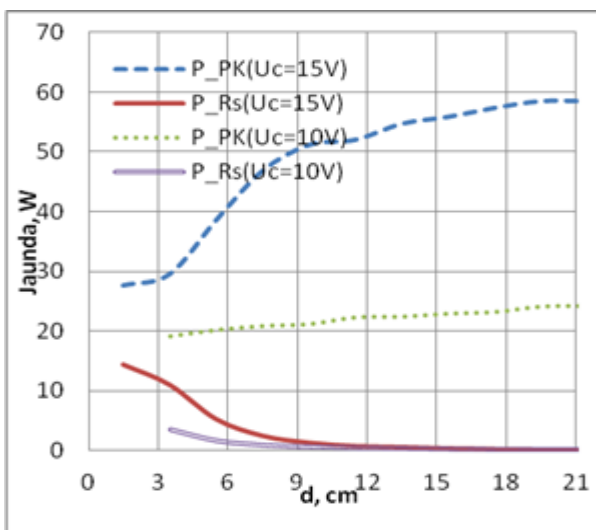
3.43. attēlā ir parādīta attāluma d ietekme uz rezonanses transformatora elektriskajiem parametriem pie pārraides kontūra virknes ierosmes.

Rezonanses transformatora izejas strāva – tā ir strāva, kas plūst tā slodzē (3.2. attēls, 3.3. attēls un 3.37. attēls). Ieejas strāva – pārraides kontūra strāva, kas plūst no uzkrāšanas kondensatoriem caur IGBT tranzistoru tiltu (3.37. attēls). Izejas strāvas maksimālās vērtības ir novērojamas, ja starp svārstību kontūru DD induktivitātes spolēm attālums d ir daži centimetri (3.43. a attēls). Tas atbilst spēcīgai saitei starp induktivitātes spolēm: saites koeficients starp DD spolēm ir lielāks par 0,75. Pie intensīvas saites starp induktivitātes spolēm ieejas strāvas vērtību nosaka ienestie zudumi, tādēļ ieejas strāvas lielums ir vāji atkarīgs no uzkrāšanas kondensatoru sprieguma U_c . Nelieli attālumi starp spolēm ļauj iegūt maksimālo slodzes strāvu.

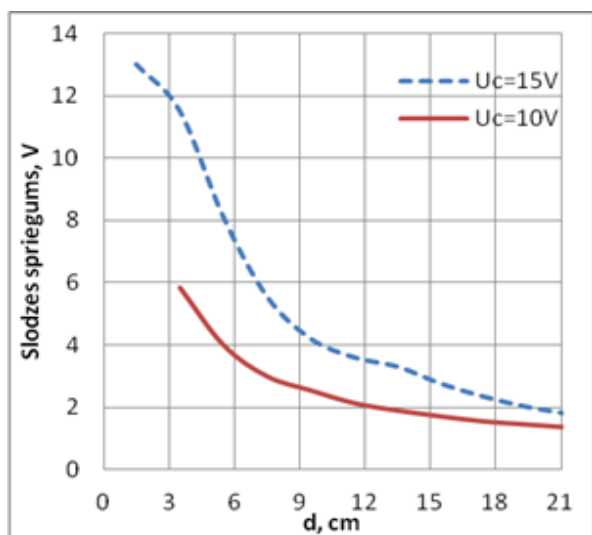
Tālāka attāluma d palielināšana izraisa spoļu saites koeficienta samazināšanos un pārraides kontūrā ienestās pretestības samazināšanos. Tāpēc pārraides kontūra strāva palielinās, un ieejas strāvas vērtība ir atkarīga no uzkrāšanas kondensatoru sprieguma U_c . Vienlaikus attāluma d palielināšana samazina izejas strāvu (3.43.a attēls, apakšējās atkarības), jo samazinās magnētiskā lauka līmenis uztvērējpoles tuvumā.



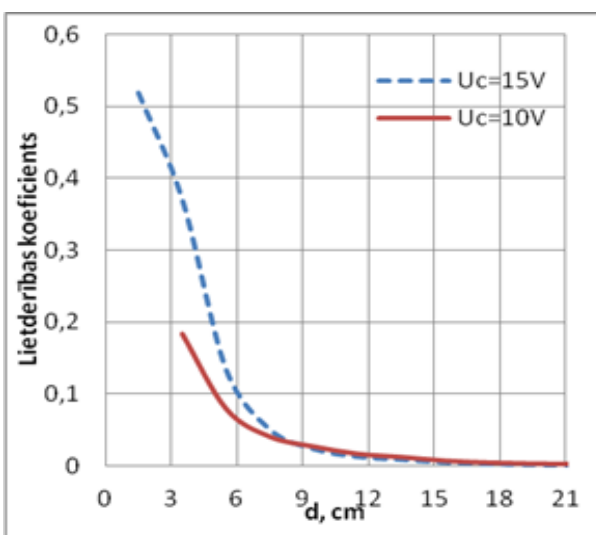
a



b



c



d

3.43. att. DD induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz elektriskajiem parametriem pie pārraides kontūra virknes ierosmes (a – uz ieejas un izejas strāvu; b – uz ieejas un izejas jaudu; c – uz spriegumu uztvērējkontūra slodzē; d – uz lietderības koeficientu)

Spriegumu atkarības uztvērējkontūra slodzē (3.43.d attēls) atbilst izejas strāvas atkarībām (3.43.a attēls), jo slodzes pretestība ir aktīva un vienāda ar 18Ω . Ieejas un izejas jaudas atkarību raksturu (3.43.b attēls), nosaka transformatora ieejas un izejas strāvu izmaiņas palielinot attālumu starp spolēm. Transformatora izejas parametru samazināšanās, palielinot attālumu, atbilst rezonanses transformatora AFR maiņai, ja tiek palielināts attālums starp DD spolēm (3.40. attēls). Jaudas pārraides koeficients strauji samazinās, ja tiek palielināts attālums d starp induktivitātes spolēm (3.43.d attēls), jo izejas jauda samazinās, vienlaikus palielinoties ieejas jaudai.

Enerģijas bezvadu pārraides efektivitātes novērtējums, izmantojot pārraides kontūra ierosmes veidu Nr.1.

Darba gaitā tika pētīti vairāki veidi, kā ierosināt pārraides kontūru:

1. Izmantojot salāgojošo transformatoru (3.7. attēls).
2. Ar paralēlo ierosmi (3.25. attēls).
3. Ar virknes ierosmi (3.37. attēls).

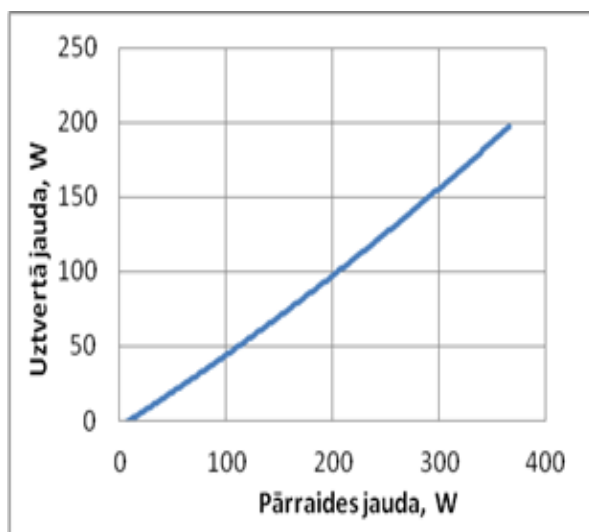
Pārraides kontūra ierosmes veidu ietekmes analīze uz enerģijas bezvadu pārraides sistēmas parametriem ļauj secināt:

- Ierosmes veidus Nr.2 un Nr.3 var izmantot tikai tad, ja attālums starp rezonanses transformatora pārraides spoli un uztvērējsspoli ir neliels, neatkarīgi no induktivitātes spoļu konstrukcijas;
- Attāluma palielināšana, izmantojot ierosmes veidus Nr. 2 un Nr. 3, izraisa lietderības koeficienta un visu triju enerģijas izejas parametru (strāvas, sprieguma un jaudas) hiperbolisku samazināšanos;
- Izmantojot ierosmes veidu Nr.1, enerģijas bezvadu pārvades sistēmu raksturo maksimālās izejas parametru (strāvas, sprieguma un jaudas) vērtības, bet attālumi starp pārraides un uztvērējsspolēm, kas atbilst izejas enerģijas parametru lielākajām vērtībām, atrodas intervālā no 9 cm līdz 15 cm;
- Nr. 1 ir labākais pārraides kontūra ierosmes veids no trim izpētītajiem veidiem.

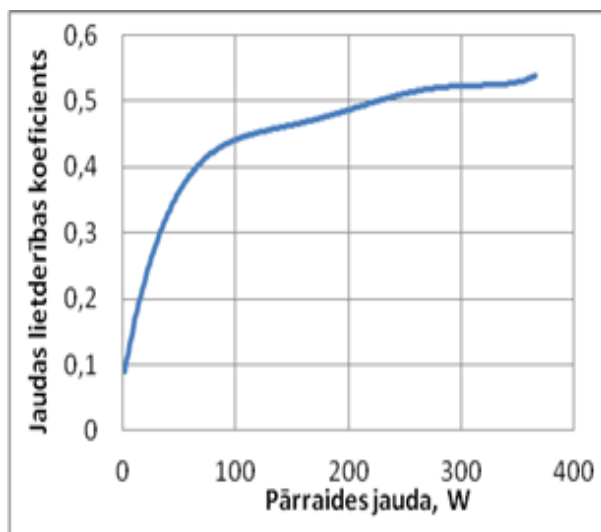
Galvenais bezvadu enerģijas pārvades sistēmas efektivitātes raksturlielums ir lietderības koeficients, kas raksturo enerģijas daļu, kura no enerģijas avota nonāk sistēmas slodzē (enerģijas uzglabāšanas ierīcē), tāpēc, izmantojot pārraides kontūra ierosmes veidu Nr.1, tika noteiktas lietderības koeficienta atkarības no pārraides jaudas. Atkarības tika iegūtas pie tādām pašām induktivitātes spoļu un rezonanses frekvenču kombinācijām, kādas tika izmantotas pētījumos, kas aprakstīti iepriekšējā nodaļā.

3.44. attēlā ir parādītas izejas jaudas (3.44.a attēls) un jaudas pārraides lietderības koeficienta (3.44. b attēls) atkarības no pārraides jaudas, izmantojot DD spoles frekvenču diapazonā “140 kHz”. 3.45. attēlā ir parādītas analogiskas atkarības, izmantojot DD spoles frekvenču diapazonā “85 kHz”. Atkarības tika iegūtas tādos attālumos starp DD spolēm,

kuros parametriem uztvērējusē (slodzes strāvai, spriegumam slodzē un izejas jaudai) ir maksimālās vērtības (skat.7.56. attēls un 3.16. attēls).

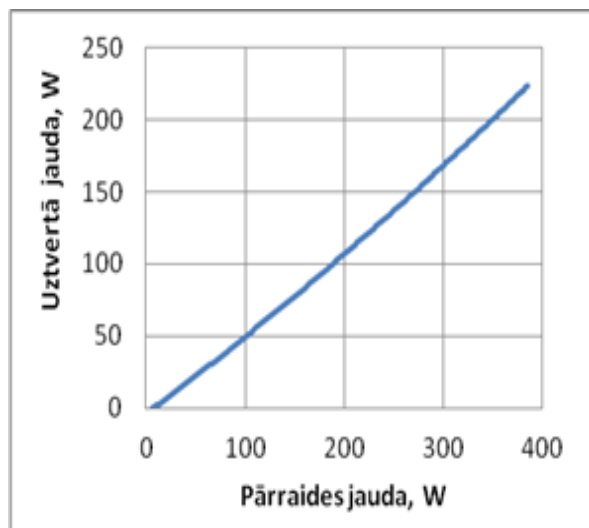


a

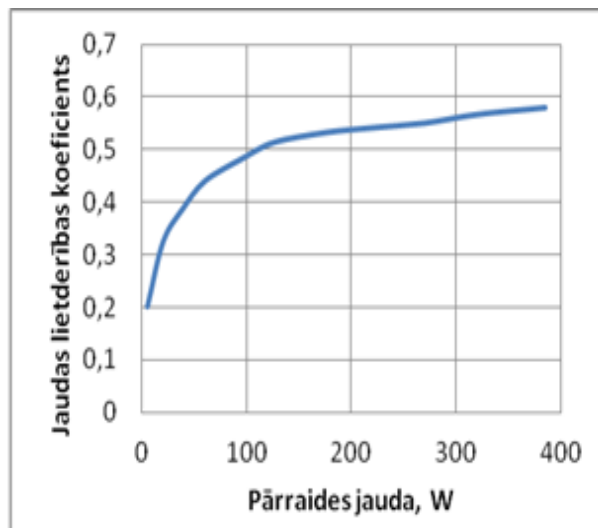


b

3.44. att. Enerģijas pārtraides efektivitāte, izmantojot DD spoles frekvencē 140 kHz pie $d = 9,5$ cm (a –izejas jaudas atkarība no ieejas jaudas; b – jaudas lietderības koeficienta atkarība no ieejas jaudas)



a



b

3.45. att. Enerģijas pārvades efektivitāte, izmantojot DD spoles frekvencē 85 kHz pie $d = 11,5$ cm (a -izejas jaudas atkarība no ieejas jaudas; b – jaudas lietderības koeficienta atkarība no ieejas jaudas)

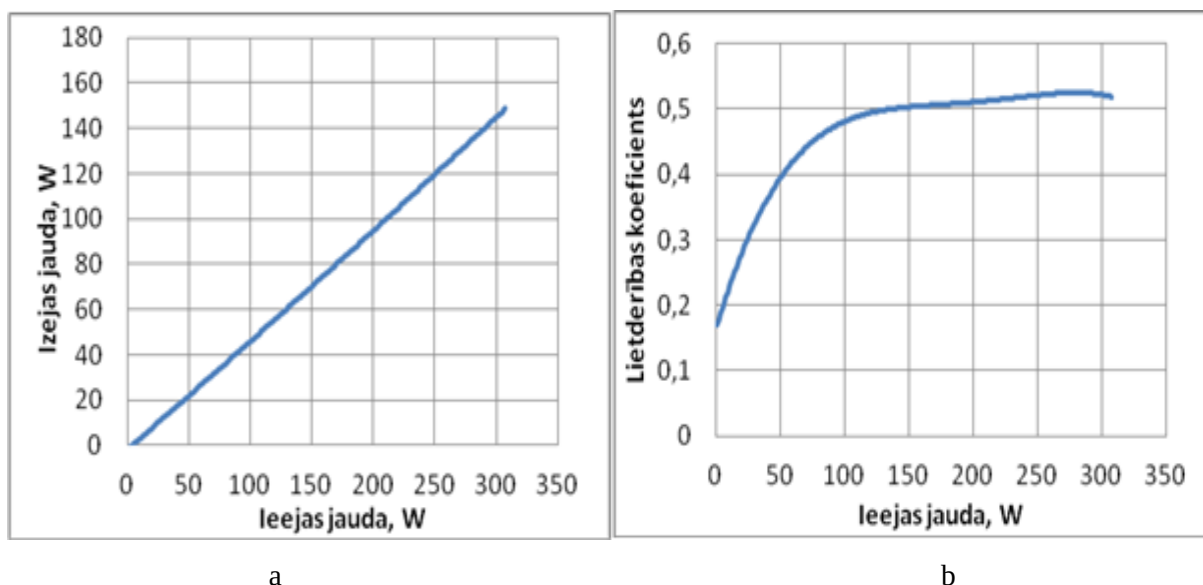
Redzams ka, ja attālumi ir optimāli, pārtraidītā jauda ir gandrīz lineāri atkarīga no ieejas jaudas (3.44.a attēls un 3.45. a attēls). Tomēr jaudas pārtraides lietderības koeficienta atkarības

attēlos 3.44. b un 3.45. b parāda ka, ja ieejas jauda ir mazāka par 50 W, tad jaudas lietderības koeficients ir neliels, bet tā palielinājums ir stāvs. Ja ieejas jauda pārsniedz 100 W, tad pārraides lietderības koeficienta kāpums palēninās, un tas tiecas uz vērtību 0,6.

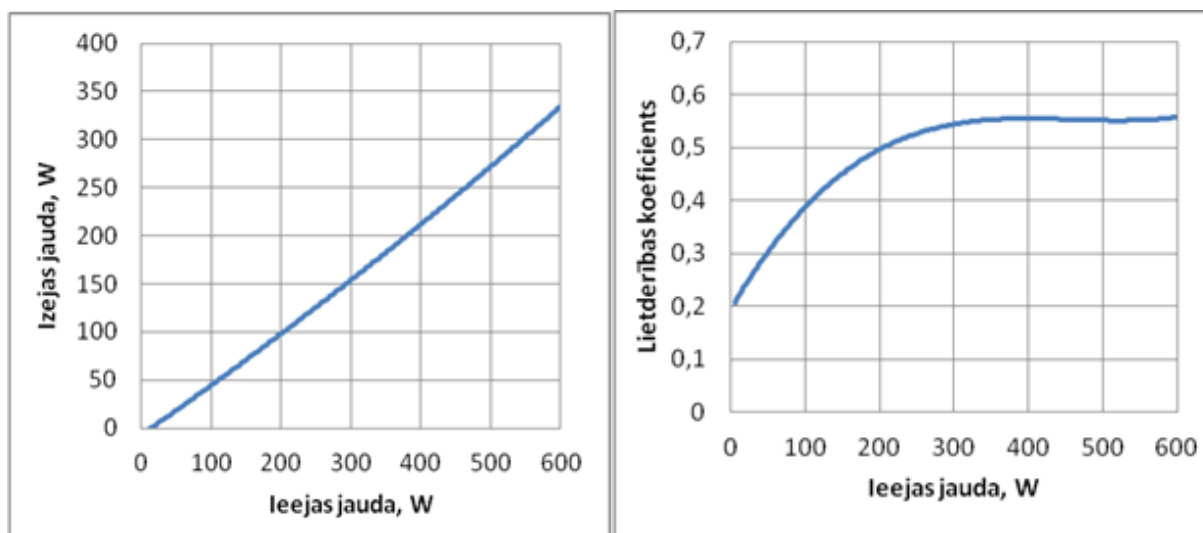
85 kHz refkvencē, kaut arī attālums starp DD indukcijas spolēm ir nedaudz lielāks, izejas jauda un jaudas lietderības koeficients ir nedaudz labāki.

Attēlā 3.46. ir parādītas izejas jaudas (3.46.a attēls) un jaudas lietderības koeficienta (3.46. b attēls) atkarības no ieejas jaudas, ja gredzenveida spoles tiek izmantotas frekvenču diapazonā “120 kHz”. Attēlā 3.47. redzamas analogiskas atkarības, ja gredzenveida spoles tiek izmantotas frekvenču diapazonā “80 kHz”. Atkarības tika iegūtas tādos attālumos starp gredzenveida spolēm, kad uztvērējpusē parametriem (slodzes strāvai, spriegumam slodzē un izejas jaudai) ir maksimālas vērtības.

Redzams ka, ja attālumi starp gredzenveida spolēm ir optimāli, izejas jauda ir lineāri atkarīga no ieejas jaudas (3.46.a attēls un 3.47.a attēls). Tomēr lietderības koeficienta atkarības 3.46.b attēlā un 3.47.b attēlā parāda ka, izmantojot mazas jaudas, lietderības koeficients ir mazs, bet tā pieaugums ir būtisks, tāpat kā gadījumā, kad tiek izmantotas DD induktivitātes spoles. Palielinoties ieejas jaudai, lietderības koeficienta vērtības stabilizējas. Ja rezonanses frekvence ir zemāka, jaudas lietderības koeficients ir nedaudz lielāks, bet tā vērtība stabilizējas pie divas reizes lielāka sprieguma. DD induktivitātes spoļu izmantošana ļauj iegūt nedaudz lielākus lietderības koeficientus.



3.46. att. Enerģijas pārraides efektivitāte, izmantojot gredzenveida spoles frekvencē 120 kHz pie $d = 11.5$ cm (a – izejas jaudas atkarība no ieejas jaudas ; b – jaudas lietderības koeficienta atkarība no ieejas jaudas)



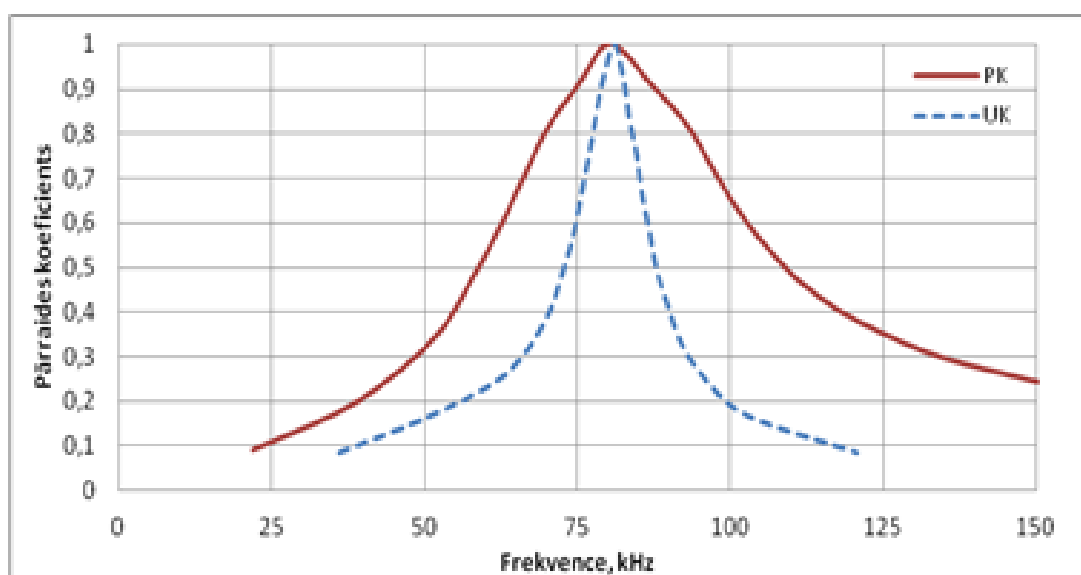
a

b

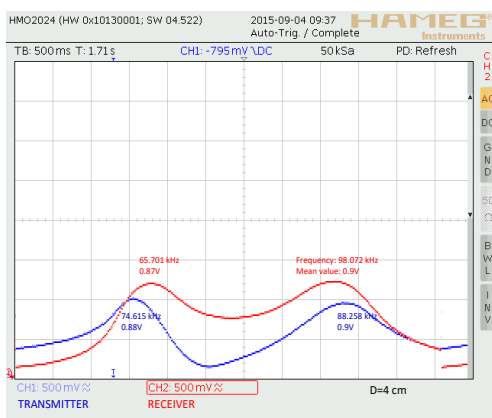
3.47. att. Enerģijas pārraides efektivitāte, izmantojot gredzenveida spoles frekvencē 80 kHz pie $d = 15.5$ cm (a – izejas jaudas atkarība no ieejas jaudas ; b – jaudas lietderības koeficienta atkarība no ieejas jaudas)

Bezvadu enerģijas pārraides efektivitātes novērtējums, izmantojot pārraides kontūra ierosmes veidu Nr. 1 un gredzenveida spoles

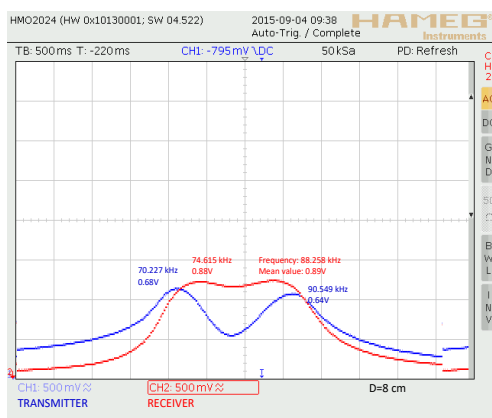
Šī pētījuma veikšanai pārraides kontūrā tika izmantota gredzenveida induktivitātes spole Nr.8 bet uztvērējkontūrā – gredzenveida induktivitātes spole Nr.9 (7.4. tabula): $L_1 = 118,0 \mu\text{H}$ un $L_2 = \mu\text{H}$. Kondensatoru kapacitātes svārstību kontūros bija: $C_1 = 33 \text{ nF}$ un $C_2 = 99.95 \text{ nF}$. Rezonanses frekvenču aprēķina vērtības: pārraides kontūram – 80.653 kHz, uztvērējkontūram – 80.611 kHz. Pārraides un uztverošās spoles diametri bija 22 cm. Pārraides un uztverošā svārstību kontūra AFR bez to savstarpējās saites ir parādīta attēlā 3.48.



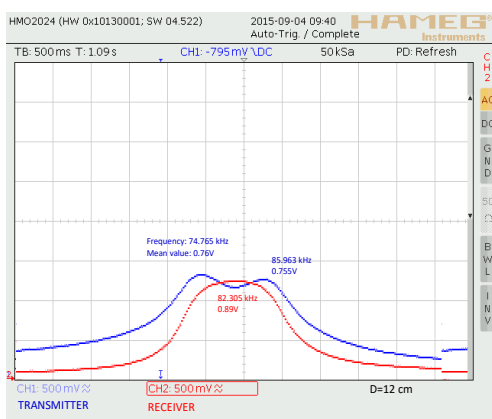
3.48. att. Pārraides kontūra un uztvērējkontūra AFR, izmantojot gredzenveida spoles, kuru diametrs ir 22cm



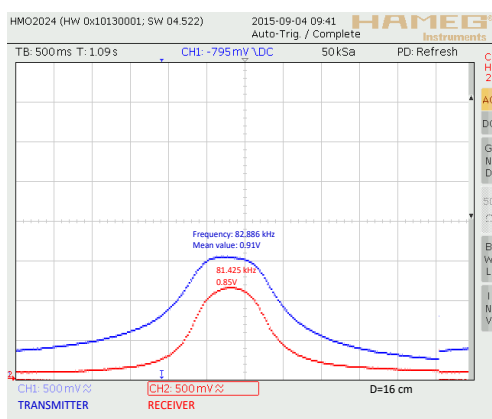
a



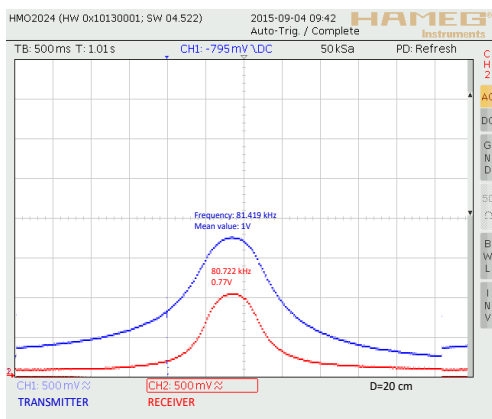
b



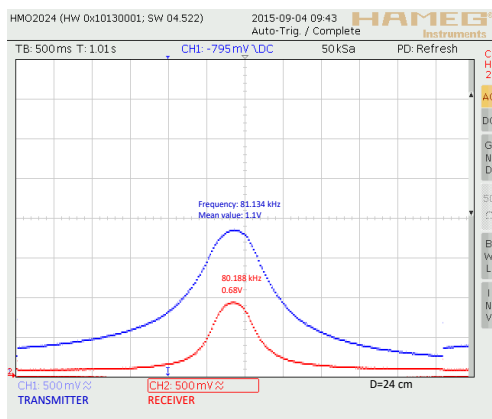
c



d



e



f

3.49. att. Mazo gredzenveida spoļu attāluma ietekme uz pārraides un uztvērējkontūra AFR diapazonā “80 kHz” (a-4 cm; b – 8 cm; c – 16 cm; d – 16 cm; e-16cm; f – 24 cm)

3.49. attēlā parādīta visa rezonanses transformatora AFR (sarkanā krāsa) un raidošā svārstību kontūra AFR (zilā krāsa). Lai iegūtu šīs līknes, ieejas signāla ģenerators formēja FM

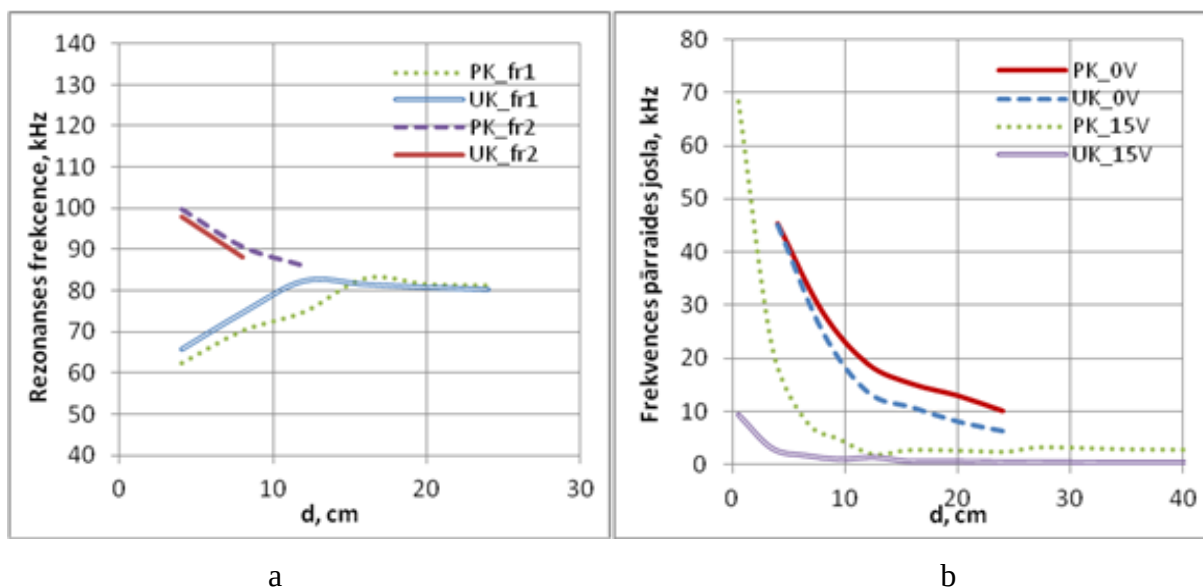
signālu, bet oscilogrāfs strādāja AFR mērījumu režīmā. Lai iegūtu katru AFR pāri, svārstību kontūru gredzenveida spoles tika novietotas fiksētos attālumos d . AFR iegūšanai tika izmantots pārraides kontūra ierosmes veids Nr.1.

Pārraides svārstību kontūra AFR (zilā krāsa) raksturo pārraides kontūra strāvas frekvences atkarību vai rezonanses transformatora ieejas pretestības AFR. Svārstību uztvērējkontūra AFR (sarkanā krāsa) raksturo kopējo rezonanses transformatora izejas sprieguma frekvences atkarību. Svārstību uztvērējkontūra AFR – tā ir visa rezonanses transformatora AFR.

AFR analīze 3.49. attēlā ļauj secināt:

- Ja attālums starp gredzenveida induktivitātes spolēm nepārsniedz 15 cm ($k_{ce} > 0,1$; skatīt 3.49.c attēlu), rezonanses transformatora pārraides kontūra strāvas frekvences atkarība būtiski atšķiras no pārraides kontūra AFR (3.49.b attēls). Ja attālums d nepārsniedz 10 cm ($k_{ce} > 0,3$; skatīt 3.49.b attēlu), tad pārraides kontūra AFR ir divi izteikti ekstrēmi un tos raksturo divas rezonanses frekvences.
- Ja attālums starp gredzenveida induktivitātes spolēm nepārsniedz 5 cm ($k_{ce} > 0,35$; skatīt 3.49.b attēlu), kopējo rezonanses transformatora AFR arī raksturo divas rezonanses frekvences.
- Jebkurā attālumā starp spolēm pārraides kontūra un uztvērējkontūra rezonanses frekvences sakrīt (3.49.a attēls un 3.50.a attēls).
- Palielinot attālumu starp induktivitātes spolēm, rezonanses transformatora AFR ekstrēmu līmeņa samazinājums ir nenozīmīgs, bet pārraides kontūra strāvas frekvences atkarības ekstrēmu līmenis pieaug gandrīz pusotru reizi. Rezonanses transformatora AFR ekstrēmu samazināšanos izskaidro pārraides spoles magnētiskā lauka līmeņa samazināšanās uztvērējspoles atrašanās vietā. Pārraides kontūra strāvas frekvences atkarības ekstrēmu palielinājums saistīts ar to, ka saite starp spolēm pavājinās.
- Jebkurā attālumā starp induktivitātes spolēm rezonanses transformatora AFR caurlaides joslas platums ir šaurāks (7.50.b attēls) nekā pārraides kontūra frekvences strāvas caurlaides joslas platums (rezonanses transformatora ieejas pretestības AFR). To izskaidro pārraides kontūra un uztvērējkontūra AFR, kas parādītas 3.48. attēlā.

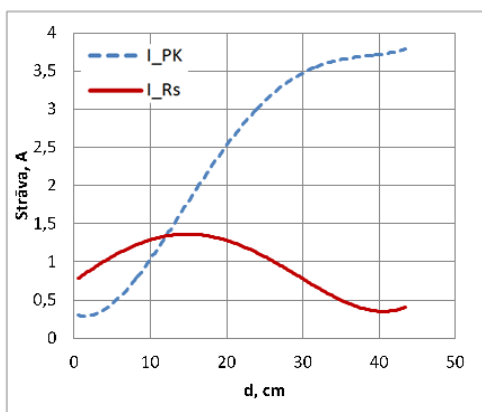
Attēlā 3.51. ir parādīta attāluma d ietekme uz rezonanses transformatora elektriskajiem parametriem, Rezonanses transformatora izejas strāva – tā ir strāva, kas plūst tā slodzē. Ieejas strāva – pārraides kontūra strāva, kas plūst no uzkrāšanas kondensatoriem. Maksimālā izejas strāvas vērtība tiek novērota, ja attālums starp svārstību kontūru gredzenveida spolēm ir aptuveni 15 cm, kas atbilst spoļu saites koeficienta vērtībai 0,1. Tālākā attāluma d palielināšana izraisa izejas strāvas samazināšanos, jo samazinās magnētiskā lauka līmenis uztvērējpoles tuvumā. Tādēļ pārraides kontūra strāva ir lineāri atkarīga no d , izņemot attālumus, kuros $d > 25$ cm. Pārraides kontūra strāva sasniedz maksimumu, kad d tuvojas 40 cm. Šajā gadījumā saite starp kontūru spolēm kļūst vāja, jo k_{ce} ir mazāks par 0,1 (7.34. c attēls).



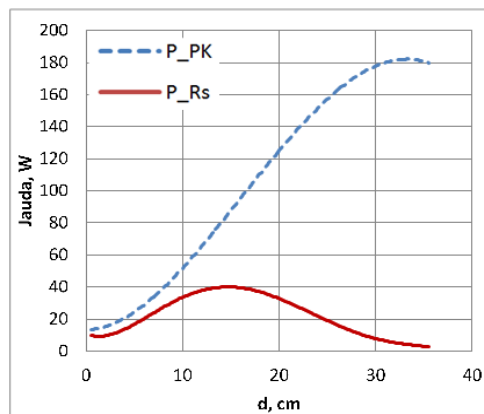
3.50. att. Gredzenveida spoļu attāluma ietekme uz rezonanses transformatora AFR parametriem (a- uz rezonanses AFR, ja $U_c = 0V$; b – uz caurlaides joslas platumu, ja U_c ir dažādas vērtības)

Ieejas strāvas maksimālo lielumu nosaka uzkrāšanas kondensatoru spriegums $U_c = 50 V$ un virknes svārstību kontūra pretestība rezonanses frekvencē. Izejas strāvas kritums, samazinot attālumu sākuma posmā notiek, palielinoties k_{ce} un attiecīgi samazinoties pārraides kontūra strāvai.

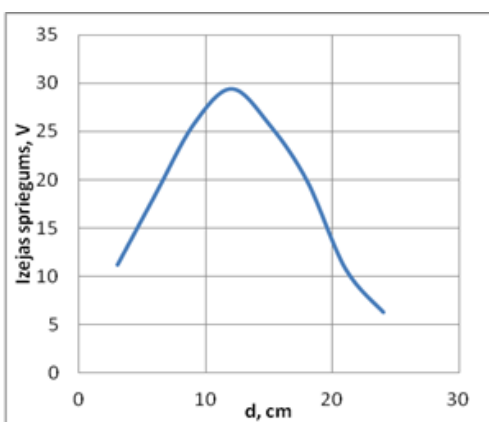
Palielinot attālumu d , ieejas jauda (3.51.b attēls) mainās tāpat kā ieejas strāva 3.51.a attēlā, jo spriegums $U_c = 50 V$ ir konstants. Jaudas lietderības pārraides koeficienta atkarība no attāluma d starp spolēm ir parādīta 3.51.d attēlā. Redzams, ka pārraides lietderības koeficientam ir maksimums, bet mazākā attālumā $d = 7,5$ cm, salīdzinot ar izejas strāvas un jaudas ekstrēmiem.



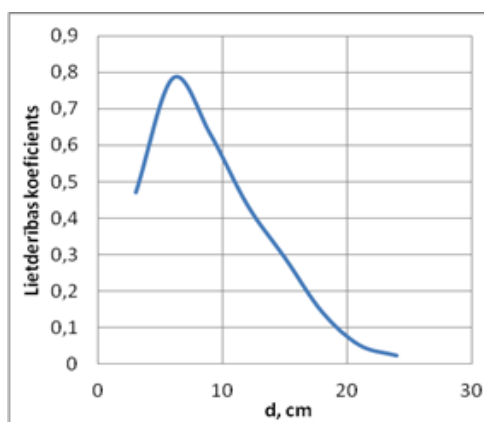
a



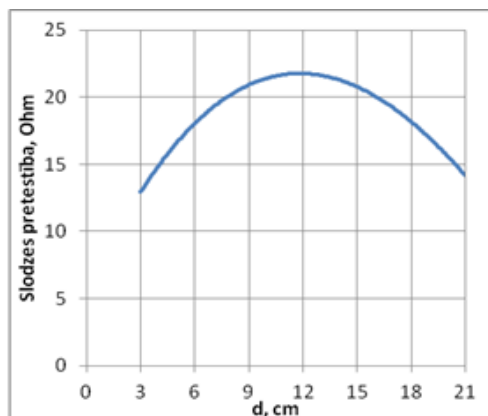
b



c



d

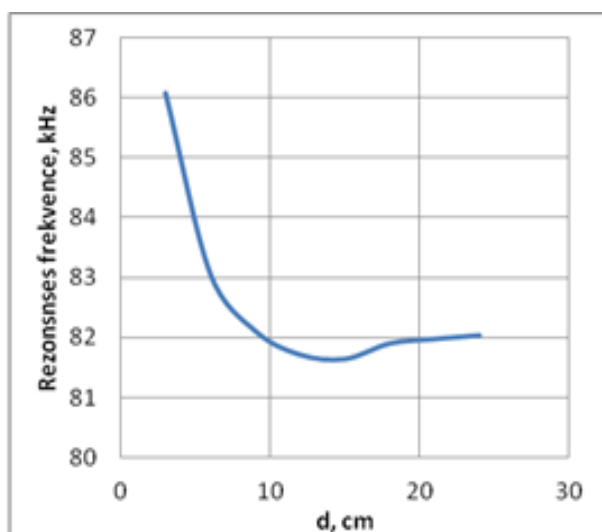


e

3.51. att. Attāluma starp gredzenveida induktivitātes spolēm, kuru diametrs ir 22 cm, ietekme uz rezonanses transformatora elektriskajiem parametriem pie $U_c = 50$ V (a – uz ieejas un izejas strāvu; b – uz ieejas un izejas jaudu; c – uz spriegumu uz uztvērējkontūra slodzē; d – uz jaudas pārraides lietderības koeficientu; e – uz slodzes pretestību)

Iegūstot 3.51. attēlā redzamās atkarības, tika fiksētas rezonanses transformatora rezonanses frekvences vērtības katram attālumam d .

Induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz transformatora rezonanses frekvenci enerģijas pārraides režīmā pie $U_c = 50 \text{ V}$ ir parādīta 3.52. attēlā.



3.52. att. Mazo gredzņveida induktivitātes spoļu attāluma ietekme uz transformatora rezonanses frekvenci enerģijas pārraides režīmā pie $U_c = 50 \text{ V}$

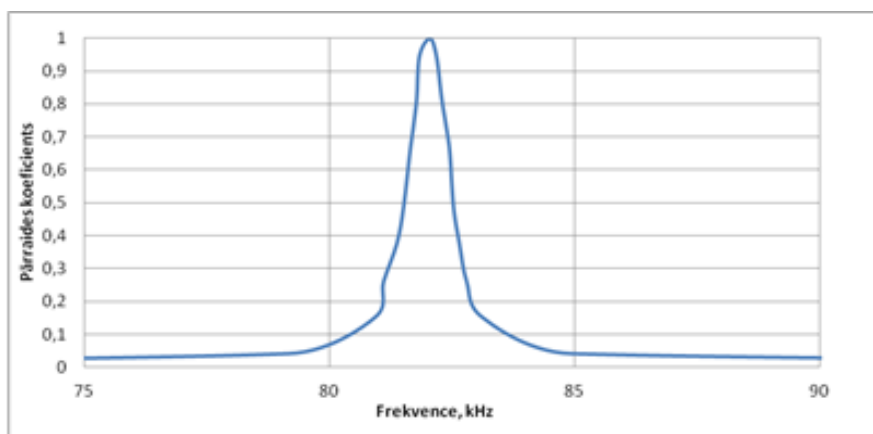
Redzams ka palielinot attālumu transformatora rezonanses frekvence samazinās un tiecas uz pārraides kontūra rezonanses frekvenci, bet, ja attālums pārsniedz 15 cm (ja saite starp induktivitātes kontūru spolēm ir vāja), tiek novērota rezonanses frekvences palielināšanās. Iemesls ir tas, ka pārraides kontūra pārraides spoles tinuma temperatūra paaugstinājās par vairākiem grādiem, ja tika palielināts attālums d starp spolēm. Pārraides kontūra kondensatora un spoles temperatūras izmaiņas maznozīmīgas padarīja gaisa dzesēšana un pārraides gredzenveida spoles konstrukcija.

3.53. attēlā ir parādīts rezonanses transformatora AFR enerģijas pārraides režīmā, ja starp spolēm attālums $d = 15 \text{ cm}$ un $U_c = 50 \text{ V}$.

Šī AFR sakrīt ar pārraides kontūra AFR. Izvēlētais attālums ir tuvs optimālam attālumam, lai iegūtu maksimālo izejas jaudu. No AFR izriet, ka rezonanses frekvence ir 80.56 kHz, rezonanses transformatora caurlaides joslas platums ir 342 Hz, bet kontūra kvalitātes faktors ir 236.

Uzkrāšanas kondensatora sprieguma U_c ietekme uz bezvadu enerģijas pārraides sistēmas enerģētiskajiem un frekvences parametriem, izmantojot gredzenveida spoles rezonanses transformatorā, ir parādīta 3.54. attēlā. Sakarības šajā attēlā iegūtas, kad starp induktivitātes gredzenveida spolēm attālums d ir 15 cm un meandra frekvence sakrīt ar

transformatora rezonanses frekvenci. Pētījums tika veikts, izmantojot divas gredzenveida uztvērējspoļes: Nr. 9 ar diametru 23 cm un Nr. 7 ar diametru 40 cm (skatīt 3.2. tabulu).

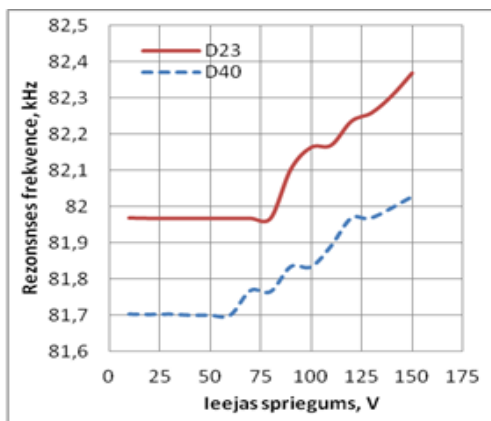


3.53. att. AFR rezonanses transformatoram ar mazajām gredzenveida spolēm enerģijas pārraides režīmā pie kondensatora sprieguma = 50 V un attāluma starp spolēm 15 cm

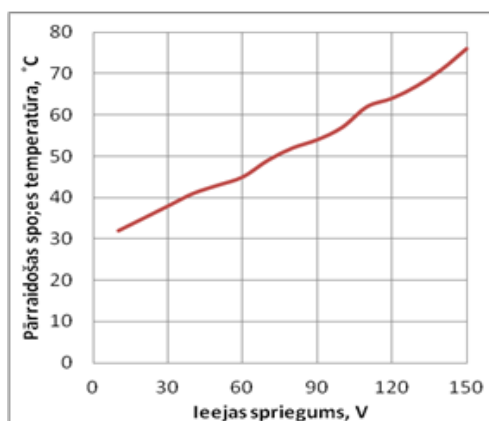
Uzkrāšanas kondensatoru spriegums U_c tika mainīts no 10 V līdz 150 V.. Uzkrāšanas kondensatoru sprieguma U_c palielināšana izraisa pieaugumu strāvai pārraides kontūrā un izejas strāvai slodzē. Atkarībā ir neliela nelinearitāte sākuma posmā (3.54.d attēls). Spoles rādiusa samazināšana izraisa pārraides spoles strāvas samazināšanos un attiecīgi arī uztvērējspoļes strāvas samazināšanos. Ja rādiuss ir mazāks, tad pārraides spoles strāva ir mazāka par 20%. Tomēr pat pie mazākām strāvas vērtībām pārraides kontūrā notika mazākā diametra pārraides spoles sasilšana līdz temperatūrai, kas ir tuva maksimāli pieļaujamai (120 °C) litcendrātam no kura tika izgatavots pārraides spoles tinums (3.54.b attēls).

Neskatoties uz gaisa dzesēšanu, pie $U_c > 75$ V, gredzenveida spoles tinuma temperatūra pieauga lineāri. Spoles tinuma sasilšana izraisīja pārraides gredzenveida spoles induktivitātes samazināšanos un tās rezonanses frekvences palielināšanos (3.54.a attēls) un, attiecīgi, kopējās transformatora rezonanses frekvences palielināšanos. Attēlā 3.54.a redzams, ka frekvences izmaiņas nav atkarīgas no gredzenveida uztvērējspoļes diametra.

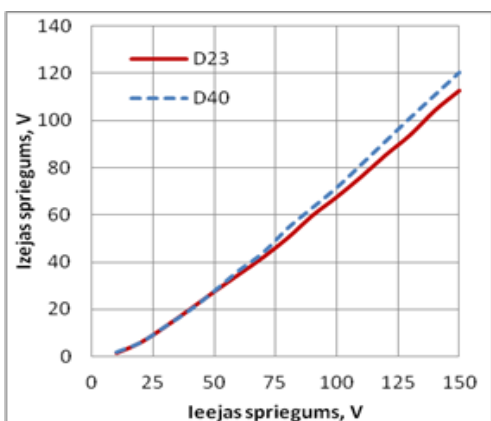
Rezonanses frekvence tika noteikta, mainot ģenerators F_m vadības signāla frekvenci (3.3. attēls), līdz uztvērējkontūra slodzē tika iegūts maksimālais spriegums. Attēlā 3.54.a redzams, ka frekvence ir pieaugusi paraboliski, palielinoties spriegumam U_c uzkrāšanas kondensatoros, un ir mainījusies gandrīz par 1 kHz. Spriegums uztvērējkontūra slodzē ir atkarīgs no sprieguma U_c nedaudz nelineāri (3.54.c attēls), bet rādiusa samazināšana izraisa sprieguma samazināšanos slodzē, jo pārraides spolē strāva arī ir mazāka.



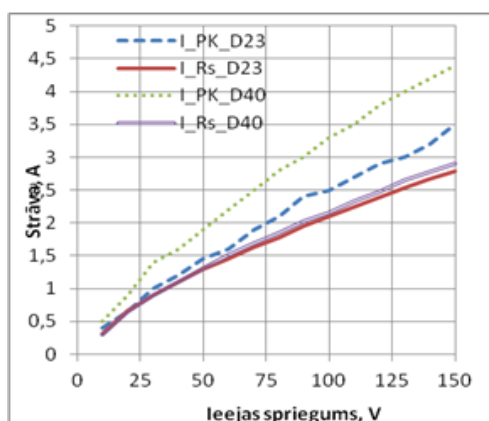
a



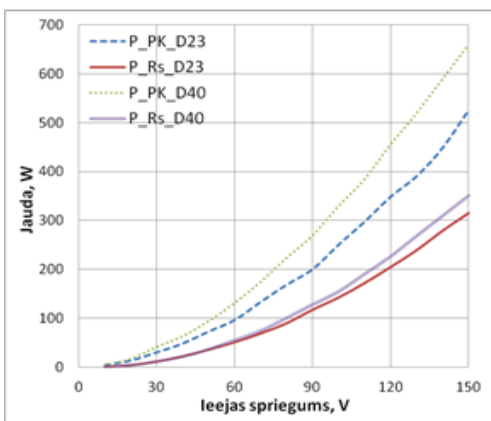
b



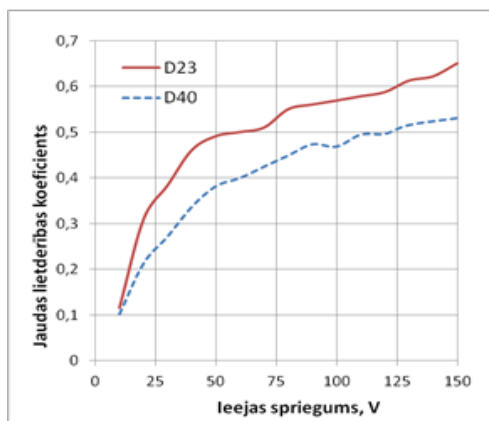
c



d



e



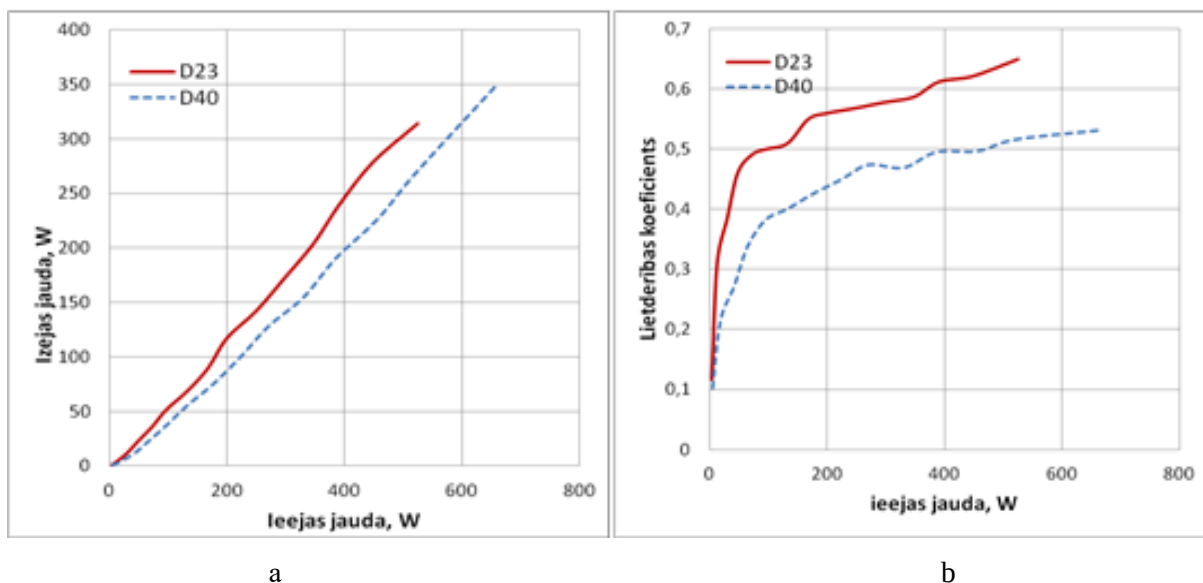
f

3.54. att. Sprieguma U_c ietekme uz gredzenveida spoļu rezonanses sistēmas raksturlielumiem pie $d = 15$ cm (a – uz rezonanses frekvenci; b – uz komponentu temperatūru; c – uz spriegumu slodzē; d – uz strāvām kontūrā; f – uz ieejas un izejas jaudu; f – uz enerģijas pārraides efektivitāti)

Ieejas un izejas jaudām ir kvadrātiska atkarība no sprieguma U_c ir visā šā sprieguma izmaiņu intervālā (3.54.e attēls). Paaugstinot spriegumu U_c pārraides kontūra pretestība rezonanses frekvencē un izejas kontūra slodzes pretestība pieaug to sasilšanas dēļ. Šī iemesla

dēļ jaudas lietderības koeficienta atkarībām (3.54.f attēls) no sprieguma U_c ir divi raksturīgi posmi ar atšķirīgu stāvumu: posms ar lielu stāvumu, ja $U_c < 40$ V, un ar zemāku stāvumu pie lieliem spriegumiem U_c .

Attēlā 3.55. ir parādītas izejas jaudas (3.55.a attēls) un jaudas pārraides lietderības koeficienta (3.55.b attēls) atkarība no ieejas jaudas, ja tiek izmantotas divu diametru gredzenveida spoles.



3.55. att. Enerģijas pārvades efektivitāte, izmantojot divu diametru gredzenveida spoles pie $d = 15$ cm
(a – izejas jaudas atkarība no ieejas jaudas; b – jaudas pārraides lietderības koeficienta atkarība no ieejas jaudas)

Redzams, ka optimālos attālumos izejas jauda palielinās, ja tiek palielināta ieejas jauda (3.55.a attēls). Taču izejas jaudas pieaugums notiek nelineāri. Tas ir labi redzams jaudas pārraides lietderības koeficienta atkarībās no ieejas jaudas 3.55.b attēlā. Šo atkarību raksturs ir tāds pats kā jaudas pārraides lietderības koeficienta atkarībām no sprieguma U_c (3.54.f attēls). Abos šajos attēlos jaudas pārraides lietderības koeficienta vērtības, lietojot gredzenveida uztvērējspoļes ar mazāku diametru, ir lielākas par aptuveni 15%.

3.4. Salīdzinošie jaudas novērtējumi, īpatnējā pārraides jauda

Bezvadu enerģijas pārraides process rezonanses indukcijas veidā tika pētīts atkarībā no vairākiem atšķirīgiem parametriem:

- vairākās transformatora rezonanses frekvencēs;
- izmantojot divas induktivitātes spoļu konstrukcijas;

- pie dažādām maksimālās ieejas jaudas vērtībām.

Izmantojot rezonanses transformatora pārraides kontūra ierosmes veidu Nr.1, jaudas lietderības koeficienta rādītājiem ir tuvas vērtības. Jaudas lietderības koeficienti atšķiras ne vairāk kā 15% atkarībā no bezvadu pārraides sistēmas parametriem vai induktivitātes spoļu konstrukcijām. Pārraides jaudas (pārraides avota sprieguma U_c) palielinājums rada ieejas jaudas palielināšanos (3.44. a attēls, 3.45. a attēls, 3.46.a attēls, 3.47. a attēls, 3.55. a attēls) un arī nenozīmīgu lietderības koeficienta palielināšanos (3.44. b attēls, 3.45. b attēls, 3.46. b attēls, 3.47. b attēls, 3.55. b attēls).

Automobiļu akumulatoru bezvadu uzlādes sistēmas pārraides pusē dinamiskajā režīmā, kad kontūra induktivitātes spoles ir atsevišķi segmenti, svarīgs rādītājs ir jauda kas tiek pārraidīta no vienas laukuma vienības (uzlādes celiņa nosacītā kvadrātmetra), izmantojot dažādas induktivitātes spoļu konstrukcijas.

Izejas jaudas atkarības ir parādītas trim pārraides induktivitātes spoļu tipiem attēlos 3.44.a, 3.45.a, 3.46.a , 3.47 a un 3.55. a. No spolēm kuras ir uzskaitītas tabulā 3.2 tika salīdzinātas:

- plakanā DD induktivitātes spole Nr.1, kuras laukumu nosaka izmēri – 290 x 230 mm;
- plakanā gredzenveida induktivitātes spole Nr. 4, kuras rādiuss ir 200 mm;
- plakanā gredzenveida induktivitātes spole Nr. 8, kuras rādiuss ir 115 mm.

Nosaukto induktivitātes spoļu platības attiecīgi ir 0,0667 m², 0,1257 m² un 0,0415 m². Katrai no tām maksimālās izejas jaudas vērtības ir dažādas, tāpēc, lai iegūtu jaudas (īpatnējās pārraides jaudas) izvērtējumu no 1 m², tika izvēlēta ieejas jauda 300 W, jo tā tika izmantota visos pētījumos. Īpatnējās pārraides jaudas aprēķinu rezultāti ir parādīti 3.4. tabulā.

Pārtraides kontūru parametru ietekme uz īpatnējo pārtraides jaudu

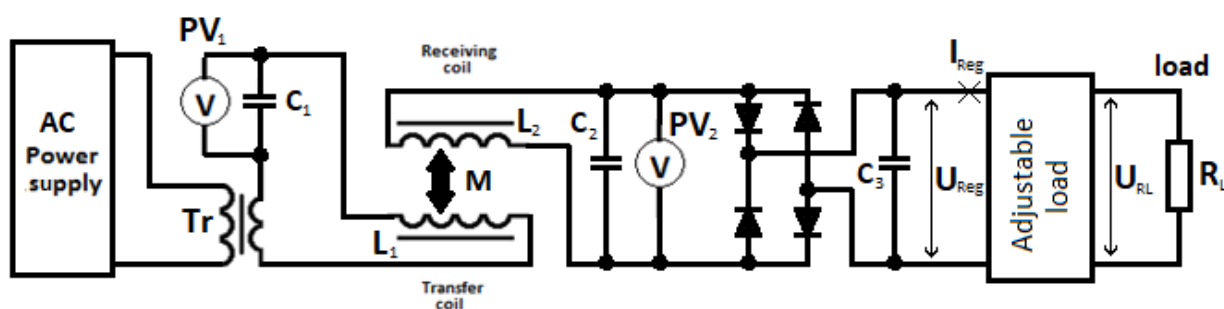
Nr.	Pārtraides kontūra induktivitātes spole	Uztvērējkontūra induktivitātes spole	Kontūru rezononanses frekvence kHz	Izejas jauda W	Īpatnējā pārtraides jauda, W/m ²
1	DD spole Nr.1	DD spole Nr.3	140	155	2249
2	DD spole Nr.1	DD spole Nr.3	85	170	2549
3	DD spole Nr.1	DD spole Nr.3	87 *	208	3118
4	Gredzenveida Nr.4	Gredzenveida Nr.7	120	142	1130
5	Gredzenveida Nr.4	Gredzenveida Nr.7	80	155	1233
6	Gredzenveida Nr.8	Gredzenveida Nr.9	80	145	3494
7	Gredzenveida Nr.8	Gredzenveida Nr.7	80	172	4145

Īpatnējās pārtraides jaudas vērtību analīze ļauj secināt:

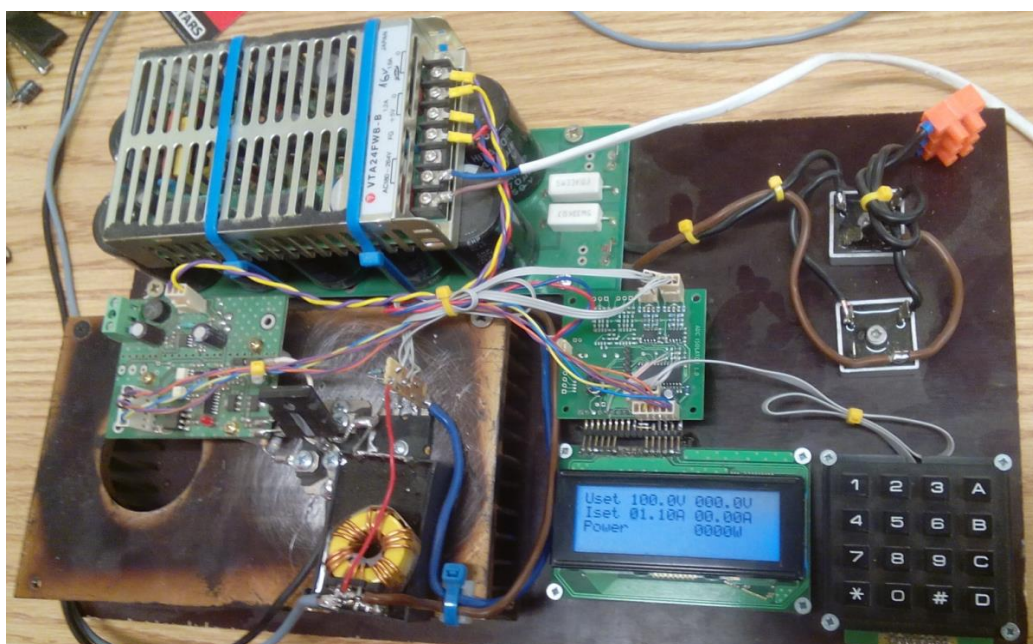
- DD induktivitātes spoļu izmantošana ļauj iegūt lielāku īpatnējo pārtraides jaudu kā izmantojot liela rādiusa gredzenveida spoles;
- gredzenveida spoļu rādiusa samazināšana paaugstina īpatnējo pārtraides jaudu arī tādā gadījumā, ja kā uztvērējspole tiek izmantota liela rādiusa gredzenveida spole.

3.5. Izpēte bezvadu enerģijas pārraides maksimālās efektivitātes stabilizācijas metodei, regulējot izejas spriegumu

Lai izpētītu enerģijas pārraides rezonanses indukcijas metodes iespējas, regulējot slodzi uz sekundāro kontūru dažādos rezonanses transformatoru sistēmas režīmos, tika izmantota mērījumu shēma, kas parādīta 3.56. 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 .



a



b

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

Pārraides kontūrā svārstību ierosme tika veikta, izmantojot papildus transformatoru Tr , kura sekundārais tinums tika ieslēgts virknē ar L_1 un C_1 . Tādējādi tika nodrošināta ierosmes avota ieslēgšana virknē ar svārstību kontūru. Transformators un tā pieslēgums svārstību kontūrā ir parādīts 3.3. attēlā, slodze R_L ir rezistors, kura nominālā pretestība ir $16\ \Omega$, bet

jauda – 3 kW. Lai novērstu slodzes rezistora sasilšanu, tika nodrošināta piespiedu gaisa dzesēšana.

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 $U_{reg\ max}$ vai strāvas I_{reg} robežvērtību ievade;
- sprieguma $U_{reg\ max}$ un strāvas $I_{reg\ max}$ 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 $U_{reg\ max}$ vērtību intervālā no 40V līdz 400 V, un $I_{reg\ max}$ intervālā no 1 A līdz 10 A.

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

Šī pētījuma veikšanai pārraides kontūrā tika izmantota DD induktivitātes spole Nr.1, bet uztvērējkontūrā – DD induktivitātes spole Nr.3 (skat.7.4. tabulu), tātad, $L_1 = 33,3\ \mu\text{H}$ 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 kHz, uztvērējkontūram – 86,244 kHz. Pārraides un uztvērējspoles izvietojums ir bez savstarpējas nobīdes – izvietojuma variants Nr.1 (3.3. tabula).

Enerģijas bezvadu pārraides efektivitātes pētījuma rezultāti, izmantojot šos svārstību kontūrus, frekvenču diapazonā “85 kHz” aprakstīti 3.2. apakšnodaļā, kur raksturota DD induktivitātes spoļu attāluma un uzkrāšanas kondensatoru sprieguma U_c ietekme uz rezonanses transformatora frekvenču un enerģētiskajiem rādītājiem, kā arī uz enerģijas bezvadu pārraides efektivitāti. Tika konstatēts, ka slodzes pretestība uztvērējpusei mainās, ja tiek mainīts attālums un spriegums U_c uzkrāšanas kondensatoros. (3.16. attēls un 3.20. attēls).

Veicot enerģijas bezvadu pārraides maksimālās efektivitātes stabilizācijas metodes izpēti, kas atainota 3.56. attēlā, tika variēti šādi parametri:

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

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

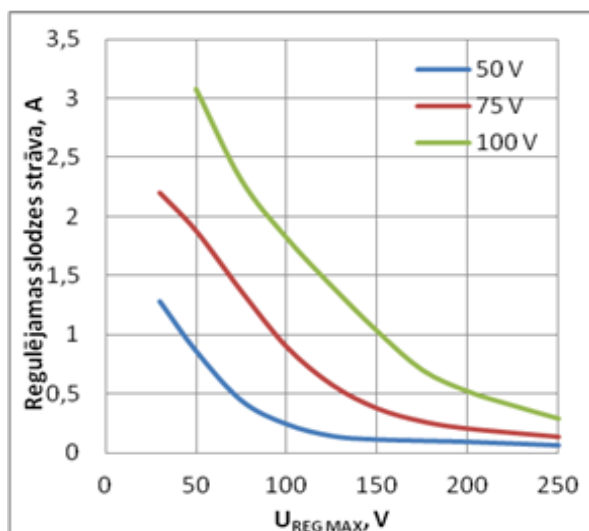
- regulējamās slodzes strāva;
- regulējamās slodzes pretestība;
- izejas jauda – jauda, kas nonāk slodzē;
- ieejas strāva;
- ieejas jauda – jauda, kas nonāk pārraides kontūrā;
- lietderības koeficients raksturo vadāmās slodzes rezonanses transformatora efektivitāti.

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

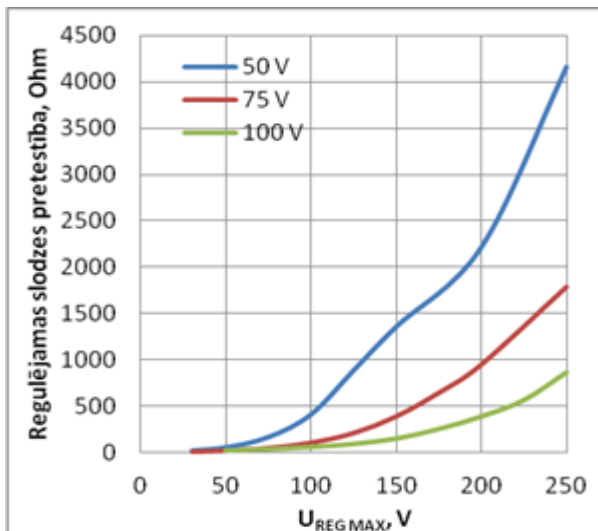
Maksimālās efektivitātes stabilizācijas metodes izpēte, DD induktivitātes spoļu attāluma 13,5 cm

Šī pētījuma rezultāti ir parādīti 3.57. attēlā un 3.58. attēlā. Šāds attālums ir nedaudz lielāks par optimālo attālumu, kurā tiek nodrošināti maksimālie sprieguma, strāvas un jaudas līmeņi rezonanses transformatora slodzes pretestībā (skatīt 3.16. attēlu).

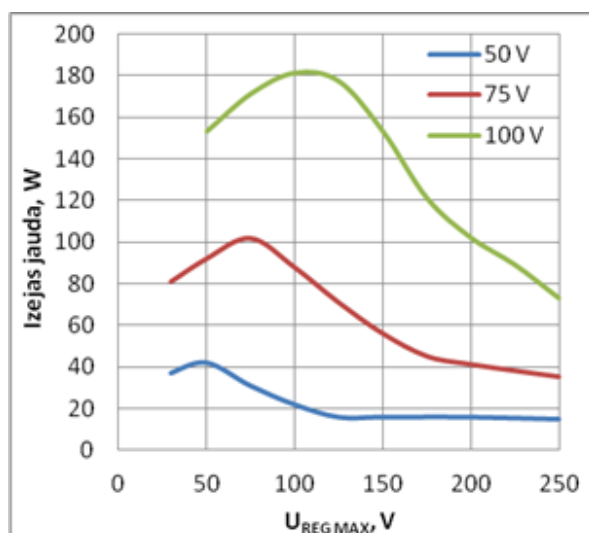
Attēlā 3.57.a ir parādītas vadāmās slodzes strāvas I_{reg} atkarības no vadāmā sprieguma $U_{reg\ max}$, pie trīs sprieguma vērtībām U_c uzkrāšanas kondensatoros. Šīs atkarības ir vadāmās slodzes voltampēru līknes, kam ir hiperpoliska atkarība no $U_{reg\ max}$ sprieguma. Uzkrāšanas kondensatoru sprieguma U_c palielināšana palielina šo līkņu stāvumu. Vadāmās slodzes ieejas pretestības atkarības no $U_{reg\ max}$ sprieguma un U_c ir parādītas 3.57. b. attēlā. Šo spriegumu ietekme uz vadāmās slodzes ieejas pretestību ir pretēja.



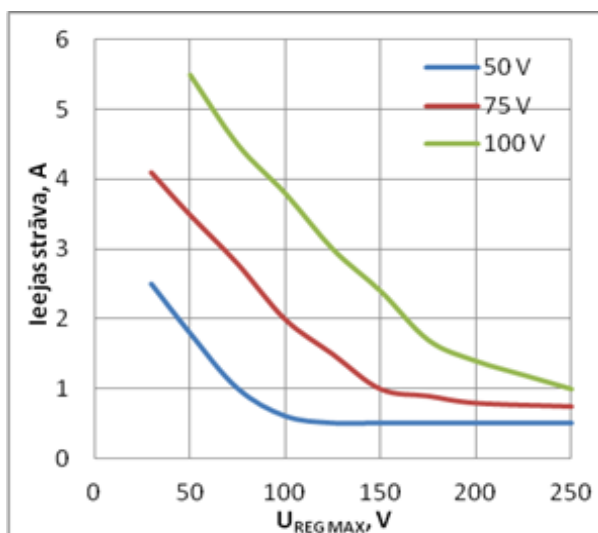
a



b



c



d

3.57. . att. Sprieguma $U_{reg max}$ ietekme uz DD spoļu rezonanses transformatora enerģētiskajiem parametriem pie $d = 13.5$ 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)

Attēlā 3.57.c ir parādītas līknes jaudai kura nonāk slodzē atkarībā no $U_{reg max}$ vadības sprieguma pie trim sprieguma U_c vērtībām uzkrāšanas kondensatoros. Šīm atkarībām ir ekstrēmi, un maksimālās jaudas vērtības vērojamas tad, kad $U_{reg max}$ spriegums ir vienāds ar uzkrāšanas kondensatoru spriegumu U_c , tas ir, maksimālās jaudas iegūšanai slodzē, $U_{reg max}$ vadāmajam spriegumam ir jābūt vienādam ar spriegumu uzkrāšanas kondensatoros U_c .

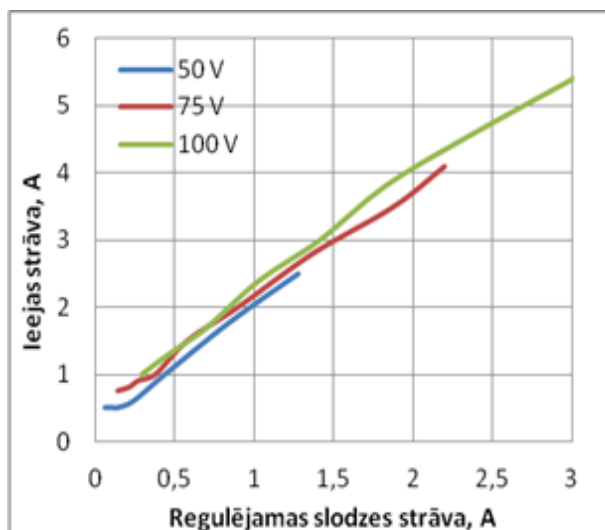
$U_{reg max}$ vadāmā sprieguma palielinājums izraisa pārraides kontūra strāvas izmaiņas (3.57.d attēls). Ieejas strāva mainās tādā pašā veidā kā I_{reg} vadāmās slodzes strāva pie

atbilstošā spriegumā U_c , bet ieejas strāvas vērtības ir aptuveni divas reizes lielākas. Tas ir uzskatāmi parādīts 3.58.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 .

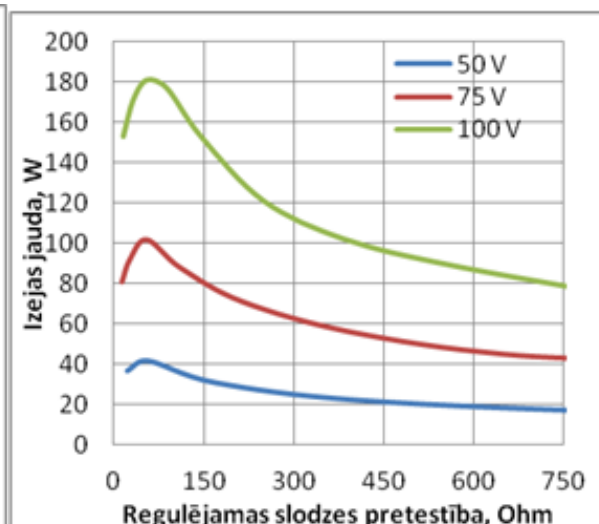
3.58. b attēlā ir parādītas izejas jaudas (jaudas, kas nodota slodzē) atkarības no vadāmās slodzes ieejas pretestības. Katra atkarībai ir maksimums, kam atbilst vadāmās slodzes ieejas pretestības optimālā vērtība. Ieejas pretestību optimālajām lielumiem ir tuvas vērtības, ja sprieguma U_c uzkrāšanas kondensatoros ir norādītie spriegumi: $54,9 \Omega$ pie $U_c = 50 \text{ V}$, $54,8 \Omega$ pie $U_c = 75 \text{ V}$ un 58Ω pie $U_c = 100 \text{ V}$. Starp izejas jaudas atkarībām no vadāmās slodzes ieejas pretestības (3.58.b. attēls) kā arī no vadāmā sprieguma $U_{reg \max}$ (3.57.c attēls) ir viennozīmīga saikne.

Atšķirībā no atkarībām, kas atainotas 3.58. 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.

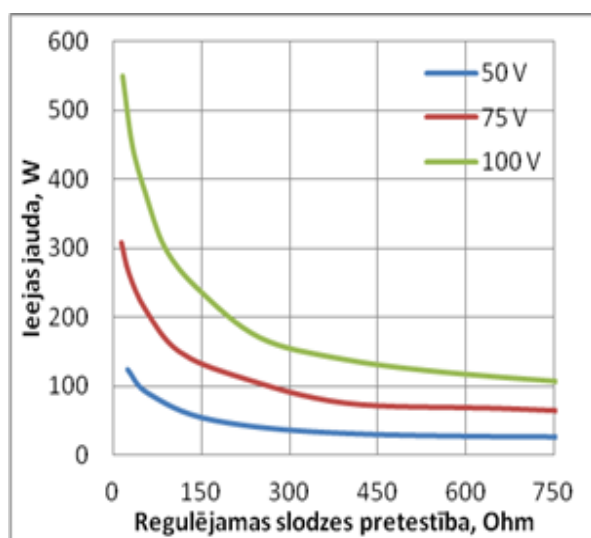
Tomēr vadāmās slodzes ieejas pretestības optimālo (maksimālās izejas jaudas) vērtību izmantošana neļauj iegūt jaudas pārraides lietderības koeficienta maksimālās vērtības (maksimālo efektivitāti), tas ir skaidri redzams 3.58.d attēlā. Maksimālās jaudas pārraides lietderības koeficienta vērtības var iegūt, ja vadāmās slodzes ieejas pretestības vērtības ir lielākas nekā tās, kas ir optimālas 3.58.b attēlā redzamajām atkarībām. To izskaidro gan izejas, gan ieejas jaudas samazinājums, ja tiek palielināta vadāmās slodzes ieejas pretestība (3.58.b attēls un 3.58.c attēls). Tālāk palielinot vadāmās slodzes ieejas pretestību, jaudas pārraides lietderības koeficientu vērtības paliek nemainīgas, to pamato atkarība, kas iegūta, ja $U_c = 50 \text{ V}$. Jaudas pārraides lietderības koeficientiem 3.58.d attēlā ir lielākas vērtības nekā tiem, kas tika iegūti, veicot 3.2. apakšnodaļā aprakstītos pētījumus (3.16.d attēls).



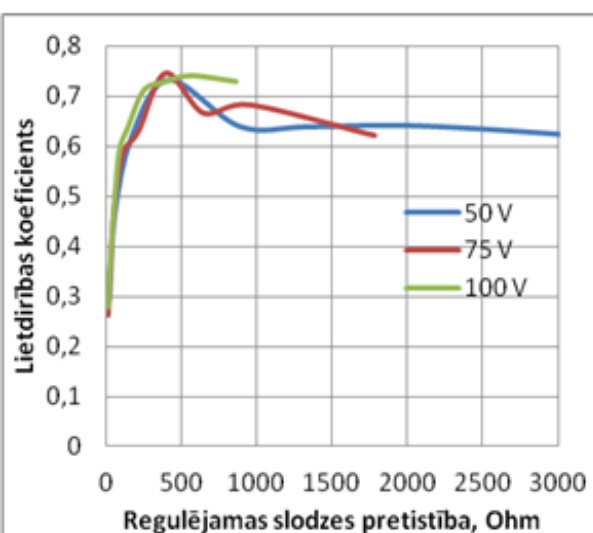
a



b



c



d

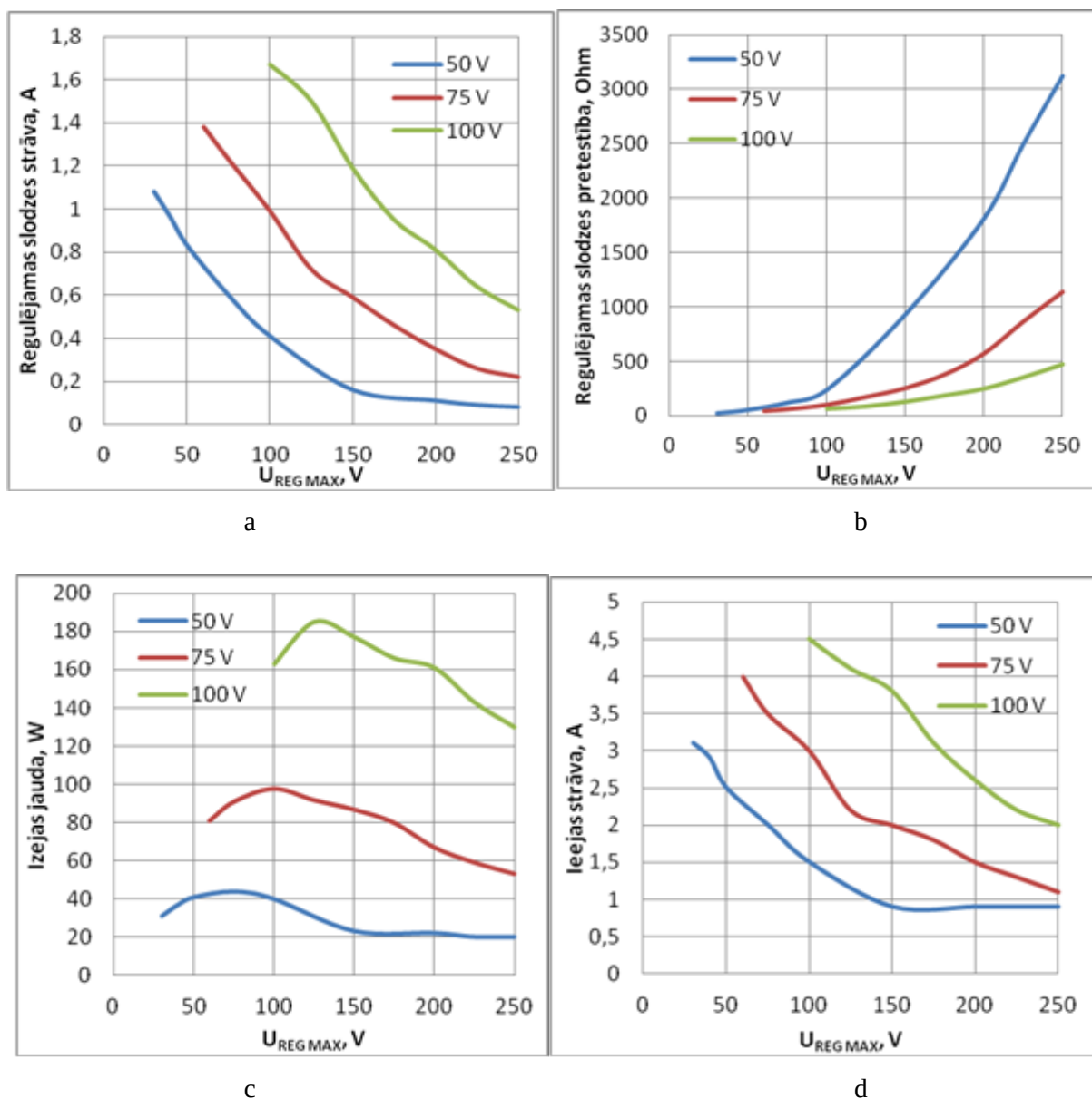
3.58. att. Vadāmās slodzes ietekme uz DD spoļu rezonanses transformatora enerģētiskajiem parametriem pie $d = 13.5$ cm (a – ieejas strāvas atkarība no izejas strāvas; b – izejas jaudas atkarība no regulējamas slodzes pretestības; c – ieejas jaudas atkarība no regulējamas slodzes pretestības; d – lietderības koeficienta atkarība no regulējamas slodzes pretestības)

Maksimālās efektivitātes stabilizācijas metodes izpēte, ja attālums d starp DD induktivitātes spolēm ir 15,5 cm

Šī pētījuma rezultāti ir parādīti 3.59. attēlā un 3.60. attēlā.

Šādā attālumā saite starp induktivitātes spolēm ir vāja: saites koeficients = 0,05 (7.13.d attēls), savstarpējās indukcijas koeficients ir 5. Šāds attālums ir lielāks par optimālo attālumu

pēc pārraides jaudas, un jaudas pārraides lietderības koeficients šādā attālumā iepriekšējā pētījumā bija 0,2 (skatīt 3.16.d attēlu).



3.59. att. Sprieguma $U_{reg max}$ ietekme uz DD spoļu rezonanses transformatora enerģētiskajiem parametriem pie $d = 15.5$ 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)

3.59.a attēlā ir parādītas vadāmās slodzes strāvas I_{reg} atkarības no vadāmā sprieguma $U_{reg max}$, pie trim sprieguma vērtībām U_c uzkrāšanas kondensatoros. Šo atkarību veids ir tāds pats kā analogiskām līknēm, kuras iegūtas ja starp DD spolēm attālums ir 13,5 cm (3.57.a attēls). Līknes atšķiras ar lielākām strāvu vērtībām pie attāluma $d = 15,5$ cm starp spolēm. Tas

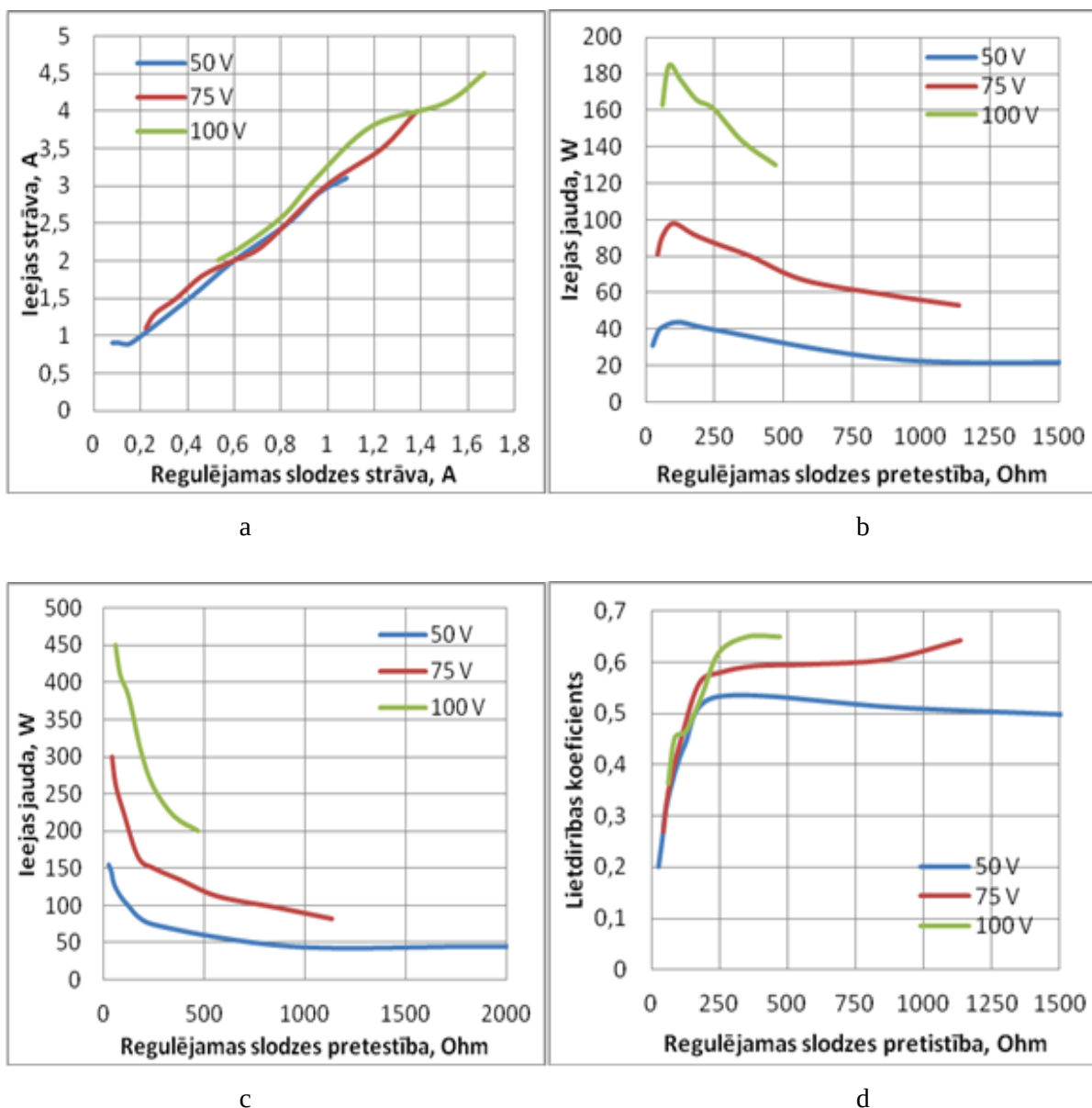
izpaužas mazākās vadāmās slodzes ieejas pretestību vērtībās pie identiskām spriegumu $U_{reg\ max}$ un U_c vērtībām (3.59. b attēls). Vadāmās slodzes ieejas pretestības ir 1,5 reizes mazākas pie $d = 15,5$ cm.

3.59.c attēlā ir parādītas izejas jaudas, kura nonāk slodzē, atkarības no iestatītā sprieguma $U_{reg\ max}$, pie trīs sprieguma vērtībām U_c uzkrāšanas kondensatoros. Šīm atkarībām, kā arī iepriekš iegūtajām atkarībām pie $d = 13,5$ cm (3.57.c attēls), ir ekstrēmi ar līdzīgām izejas jaudas vērtībām. Atkarību atšķirība ir tā, ka spoļu attālumā $d = 15,5$ cm spriegums $U_{reg\ max}$ maksimālās jaudas punktā ir lielāks par 25 V pie visiem uzkrāšanas kondensatora spriegumiem U_c .

Pārraidē kontūra strāvas izmaiņas, palielinot vadības spriegumu $U_{reg\ max}$, pie $d = 15,5$ cm (3.59.d attēls), arī ir analogiskas ieejas strāvas izmaiņām, ja attālums starp spolēm $d = 13,5$ cm (3.57. d attēls). Pārraidē kontūra strāvas vērtības ir lielākas, pie $d = 15,5$ cm un identiska sprieguma U_c . Tas skaidri redzams 3.60.a attēlā, kur parādītas ieejas strāvas (rezonanses transformatora pārraidē spoles strāvas) atkarības no vadāmās slodzes strāvas I_{reg} pie trim fiksētiem uzkrāšanas kondensatoru spriegumiem U_c . Ieejas strāva pie $d = 15,5$ cm ir trīs reizes lielāka par vadāmās slodzes strāvu I_{reg} , lai gan attālumā $d = 13,5$ cm strāvu attiecība starp strāvu bija 2 (3.58.a attēls).

3.60.b attēlā ir parādītas izejas jaudas atkarības no vadāmās slodzes ieejas pretestības, pie $d = 15,5$ cm. Katrai atkarībai ir maksimums, kam atbilst vadāmās slodzes ieejas pretestības optimālā vērtība. Tāds pats ekstrēmu veids un vērtības bija atkarībām, kuras tika iegūtas pie $d = 13,5$ cm (3.58.b attēls), bet optimālās ieejas pretestības vērtības pie attāluma $d = 15,5$ cm palielinās, samazinot uzkrāšanas kondensatoru spriegumu U_c : $83\ \Omega$ pie $U_c = 100$ V, $101\ \Omega$ pie $U_c = 75$ V un $125\ \Omega$ pie $U_c = 50$ V. Starp izejas jaudas atkarībām no vadāmās slodzes ieejas pretestības (3.60.b. attēls), kā arī no vadāmā sprieguma $U_{reg\ max}$ (3.59.c attēls) ir viennozīmīga saikne.

Ieejas jaudas vērtība samazinās hiperboliski, palielinot vadāmās slodzes ieejas pretestību. Jo lielāks ir spriegums U_c , jo straujāk samazinās ieejas jauda. Atšķirībā no līdzīgām ieejas jaudas atkarībām, kuras iegūtas pie $d = 13,5$ cm (3.58.c attēls), ieejas jaudas atkarībām 3.60.c attēlā ir lielākas vērtības, jo pie attāluma $d = 15,5$ cm ir lielākas ieejas strāvas (3.60.a attēls).



3.60. att. Vadāmās slodzes ietekme uz DD spoļu rezonanses transformatora enerģētiskajiem parametriem pie $d = 15,5$ cm (a – ieejas strāvas atkarība no izejas strāvas; b – izejas jaudas atkarība no regulējamās slodzes pretestības; c – ieejas jaudas atkarība no regulējamās slodzes pretestības; d – lietderības koeficienta atkarība no regulējamās slodzes pretestības)

Tomēr vadāmās slodzes ieejas pretestības vērtības pie maksimālās izejas jaudas nesakrīt ar vērtībām pie maksimālā jaudas pārraides lietderības koeficienta (maksimālās efektivitātes), kas skaidri redzams 3.60.d attēlā. Tāpat kā pie $d = 13,5$ cm (3.58.d attēls), jaudas pārraides lietderības koeficienta maksimālās vērtības var iegūt pie lielākām ieejas pretestības vērtībām, nekā tās, kuras ir optimālas lai iegūtu maksimālo izejas jaudu (3.60.b. attēls).

To izskaidro gan izejas, gan ieejas jaudas samazinājums, ja tiek palielināta vadāmās slodzes ieejas pretestība (3.60.b attēls un 3.60.c attēls). Tālāk palielinot vadāmās slodzes

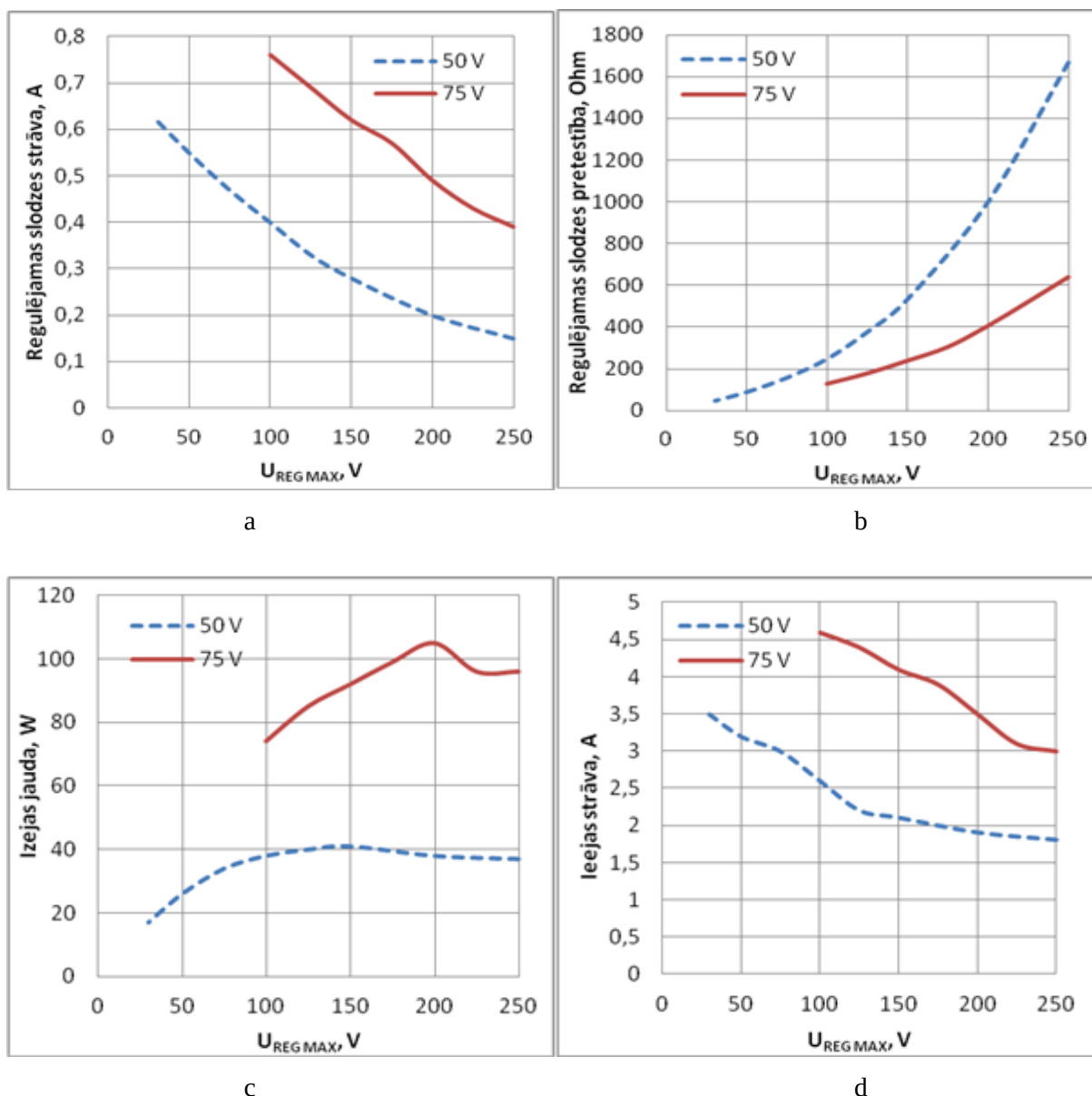
ieejas pretestību, jaudas pārraides lietderības koeficienta vērtības paliek nemainīgas, kas skaidri redzams līknei, kas iegūta, pie $U_c = 50$ B. Attēlā 3.60. d parādītajās līknēs jaudas pārraides lietderības koeficients ir vairākkārt augstāks par iegūto bez regulējamās slodzes.

Maksimālās efektivitātes stabilizācijas metodes izpēte, ja starp DD induktivitātes spolēm attālums d ir 19,5 cm

Šī pētījuma rezultāti ir atainoti 3.61. attēlā un 3.62. attēlā. Šādā attālumā starp induktivitātes spolēm praktiski nav saiknes: saites koeficients ir daudzkārt mazāks par 0,1. Šāds attālums ir lielāks par optimālo attālumu pēc jaudas pārraides līmeņa, un jaudas pārraides lietderības koeficients šādā attālumā bija 0,02 iepriekšējos pētījumos (skatīt 3.16.d attēlu).

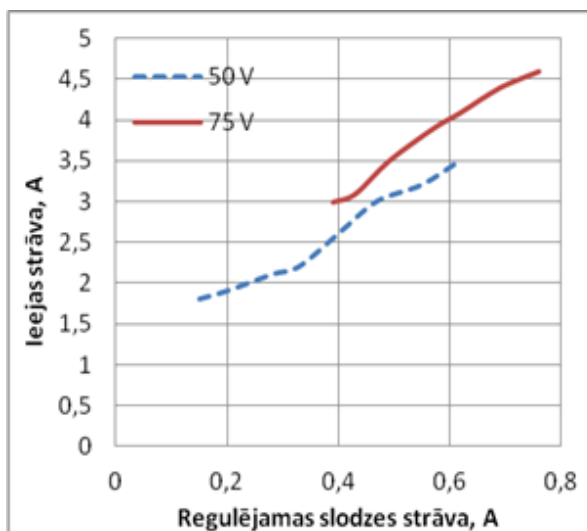
Attēlā 3.61.a ir parādītas slodzes strāvas I_{reg} atkarības no vadāmā sprieguma $U_{reg max}$, pie divām sprieguma U_c vērtībām. Šo atkarību atšķirība no analogiskām atkarībām, kas iegūtas pie DD spoļu attāluma 15,5 cm (3.59.a attēls), ir lielākas strāvu vērtības. Tas izpaužas mazākās vadāmās slodzes ieejas pretestībās pie identiskām spriegumu $U_{reg max}$ un U_c vērtībām (3.61.b attēls): vadāmās slodzes ieejas pretestības ir aptuveni 1,5 reizes mazākas pie $d = 19,5$ cm attiecībā pret vērtībām pie $d = 13,5$ cm.

Attēlā 3.61.c ir parādītas jaudas, kuras nonāk slodzē, atkarības no vadāmā sprieguma $U_{reg max}$, pie diviem spriegumiem U_c . Šīm atkarībām, tāpat kā analogiskām atkarībām, kas iegūtas pie $d = 13,5$ cm (3.57. c attēls) un $d = 15,5$ cm (3.59.c attēls), ir ekstrēmi ar tādām pašām maksimālajām izejas jaudas vērtībām. Atkarību atšķirība ir tāda, ka pie $d = 19,5$ cm, sprieguma $U_{reg max}$ vērtības atbilstošas maksimālajām izejas jaudas vērtībām, ir stipri nobīdītas lielāku spriegumu virzienā, salīdzinot ar vērtībām pie $d = 13,5$ cm (3.57 c attēls) un $d = 15,5$ cm, abiem uzkrāšanas kondensatora spriegumiem U_c .

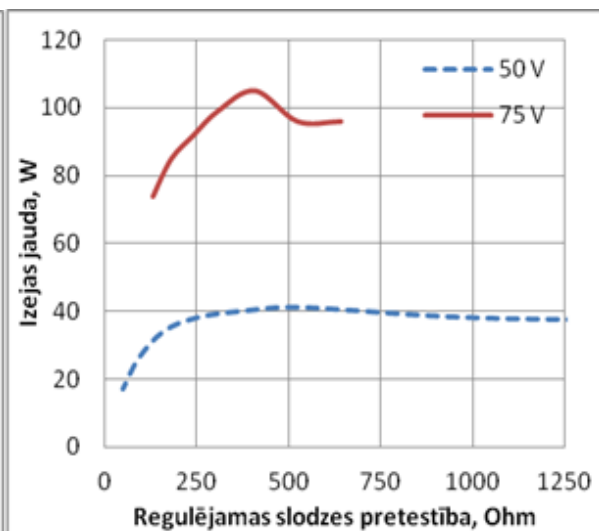


3.61. att. $U_{reg max}$ sprieguma ietekme uz DD spoļu rezonanses transformatora enerģētiskajiem parametriem pie $d = 19.5$ cm (a – regulējamas slodzes atkarība no strāvas; b – regulējamas slodzes pretestības atkarība no regulējuma sprieguma; c – izejas jaudas atkarība no regulējuma sprieguma; d – ieejas strāvas atkarība no regulējuma sprieguma)

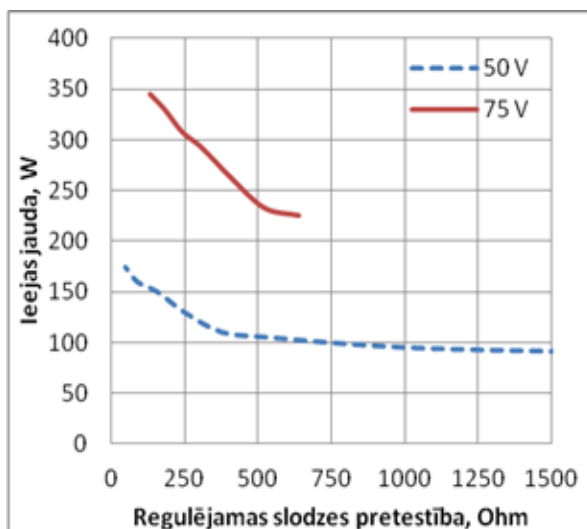
Pārraidē kontūra strāvas izmaiņu raksturs, palielinot vadāmo spriegumu $U_{reg max}$ pie $d = 19.5$ cm (3.61.d attēls), ir analogisks ieejas strāvas izmaiņām pie spoļu attālumiem $d = 13.5$ cm (3.57.d attēls) un $d = 15.5$ cm (3.59.d attēls), bet pārraidē strāvas vērtības ir lielākas, ja $d = 19.5$ cm pie atbilstošā spriegums U_c . Tas ir skaidri redzams 3.62.a attēlā, kur parādītas ieejas strāvas (rezonanses transformatora pārraidē spoles strāvas) atkarības no vadāmās slodzes strāvas I_{reg} pie diviem spriegumiem U_c . Ieejas strāva ir 6 – 8 reizes lielāka par vadāmās slodzes I_{reg} strāvu, šī attiecība ir lielāka kā pie attāluma $d = 13.5$ cm.



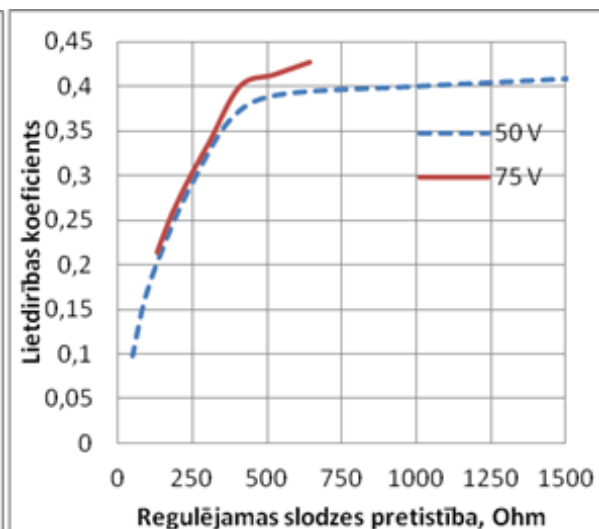
a



b



c



d

3.62. att. Vadāmās slodzes ietekme uz rezonanses transformatora enerģētiskajiem parametriem pie $d = 19.5$ cm (a – ieejas strāvas atkarība no izejas jaudas; b – izejas jaudas atkarība no regulējamas slodzes pretestības; c – ieejas jaudas atkarība no regulējamas slodzes pretestības; d – lietderības koeficienta atkarība no regulējamas slodzes pretestības)

Attēlā 3.62.b ir parādītas izejas jaudas (jaudas, kas nodota slodzei) atkarības no vadāmās slodzes ieejas pretestības pie $d = 19.5$ cm. Abām atkarībām ir maksimums, kas atbilst vadāmās slodzes ieejas pretestības optimālajai vērtībai. Tādas pat ekstrēmu vērtības un veids ir analogiskām atkarībām, kuras iegūtas, ja $d = 13.5$ cm (3.58.b attēls) un $d = 15.5$ cm (3.60.b attēls), bet ieejas pretestības optimālās vērtības pie $d = 19.5$ cm ir daudz lielākas par optimālajām slodzes pretestībām, kas iegūtas pie $d = 13.5$ cm (3.58.b attēls) un $d = 15.5$ cm

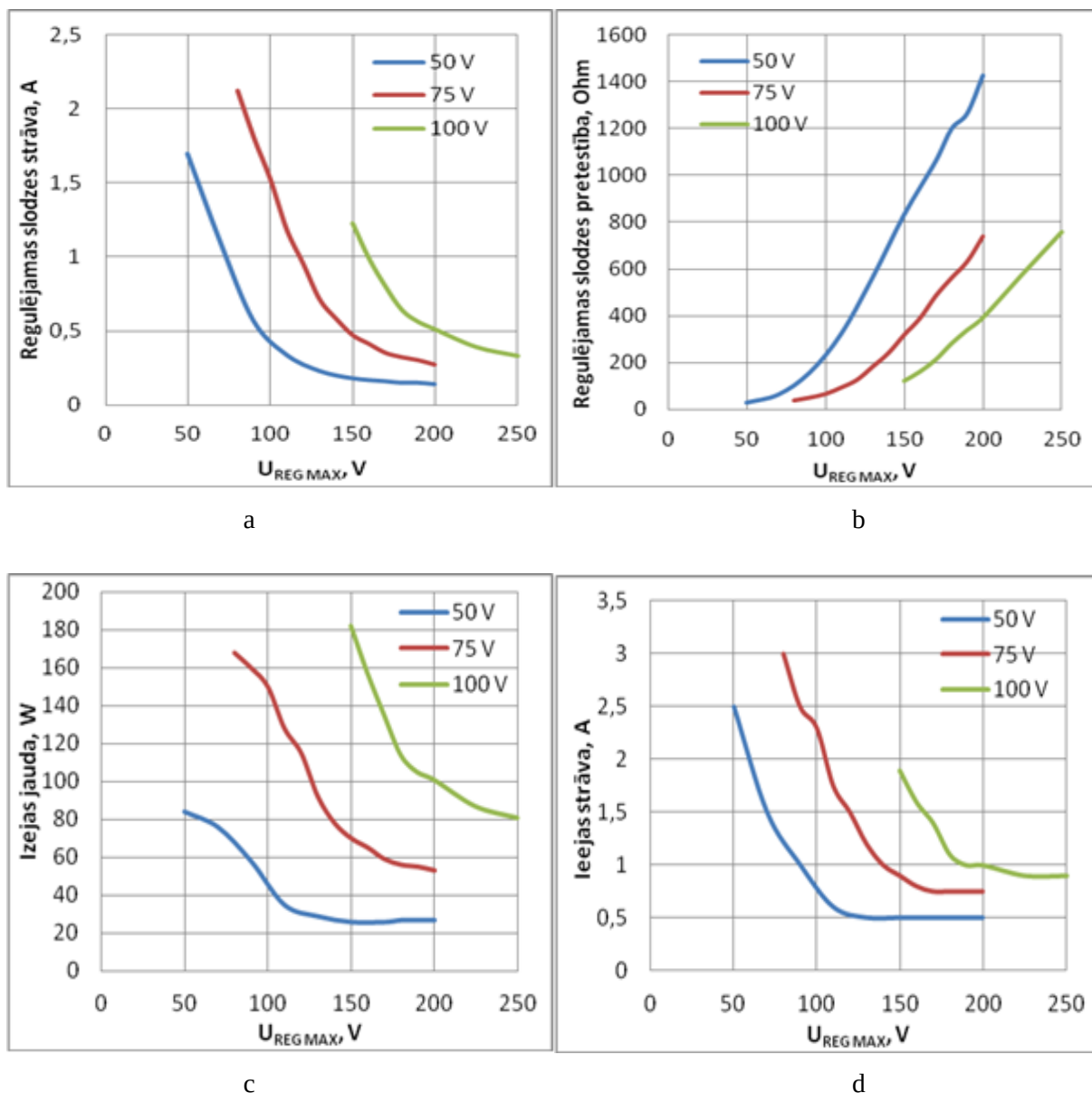
(3.60. b attēls): $408\ \Omega$ pie $U_c = 75\text{ V}$, un $536\ \Omega$ pie $U_c = 50\text{ V}$. Starp izejas jaudas atkarībām no vadāmās slodzes ieejas pretestības (3.62.b. attēls) un no vadāmā sprieguma $U_{reg\ max}$ (3.61.c attēls) viennozīmīgi pastāv saikne. Atšķirībā no līdzīgām ieejas jaudas atkarībām, kuras iegūtas pie $d = 13,5\text{ cm}$ (3.58. c attēls) un $d = 15,5\text{ cm}$ (3.60.c attēls), ieejas jaudas atkarības 3.62.c attēlā ir ar lielākām vērtībām, jo attālumā $d = 19,5\text{ cm}$ ir lielākas ieejas strāvas (3.62. a attēls).

Vadāmās slodzes ieejas pretestības optimālo (pēc izejas jaudas) vērtību izmantošana pie $d = 19,5\text{ cm}$ ļauj iegūt arī maksimālās jaudas pārraides lietderības koeficienta vērtības (maksimālo efektivitāti), kas skaidri redzams 3.62.d. attēlā. Tas skaidrojams ar to, ka pie optimālās slodzes pretestības ieejas jauda ir tuvu minimumam, bet izejas jaudas vērtība ir maksimāla (3.62.b attēls un 3.62.c attēls). Palielinot vadāmās slodzes ieejas pretestību, jaudas pārraides lietderības koeficienta vērtības paliek nemainīgas, kā arī izejas un ieejas jauda praktiski nemainās. Jaudas pārraides lietderības koeficienti, kas parādīti 3.62.d attēlā, ir daudz lielāki par jaudas pārraides lietderības koeficienta vērtību 0,02 kura tika iegūta, veicot pētījumus, kas izklāstīti 7.4.1.2. apakšnodaļā (skatīt 3.16. d attēlu).

Maksimālās efektivitātes stabilizācijas metodes izpēte, ja starp DD induktivitātes spolēm attālums d ir 11,5 cm

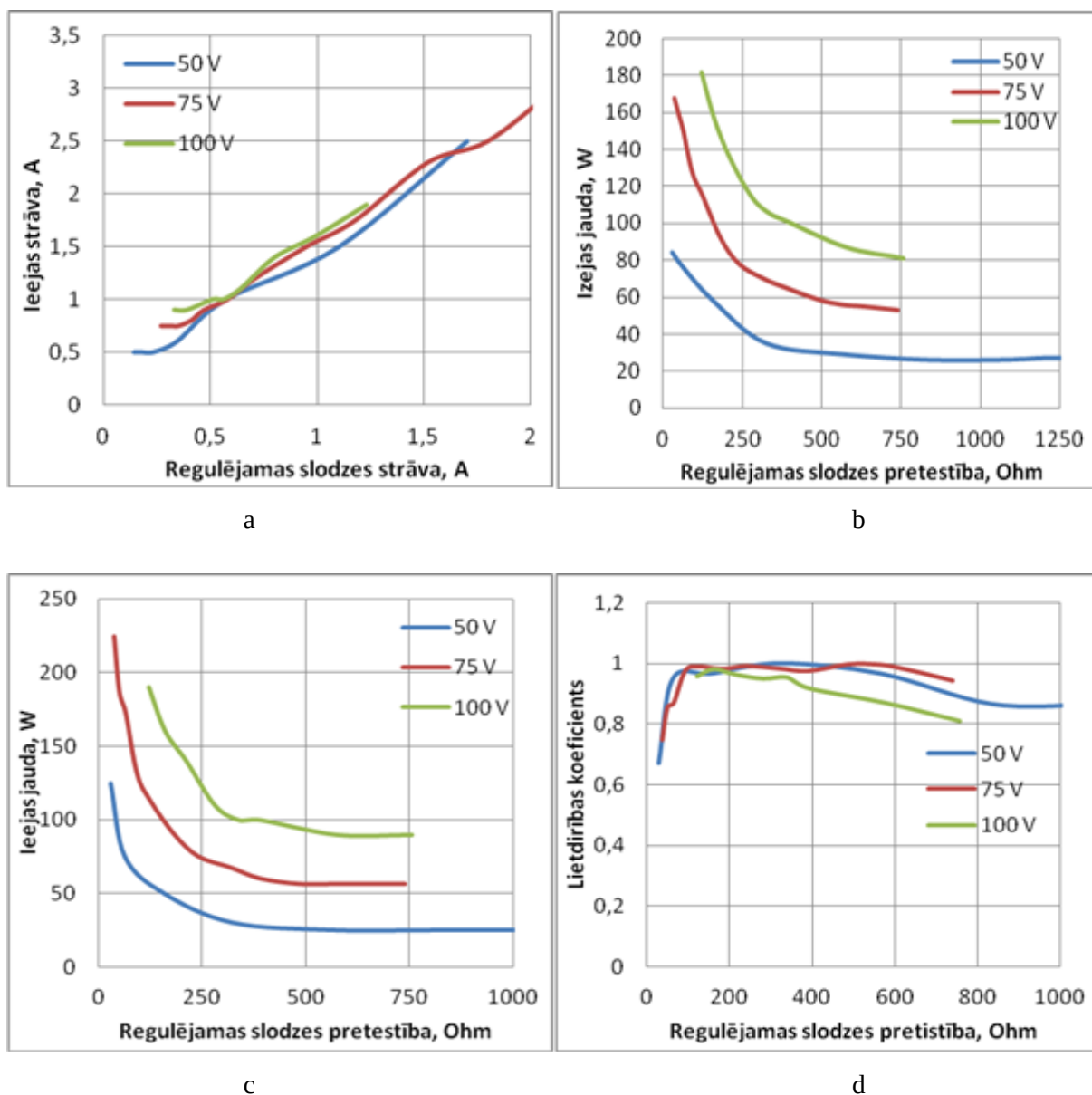
Šī pētījuma rezultāti ir parādīti 3.63. attēlā un 3.64. attēlā. Ja starp induktivitātes spolēm attālums $d = 11,5\text{ cm}$, pastāv saite, ko raksturo saites koeficients $= 0,1$. Šajā spoļu attālumā tiek nodrošinātas maksimālās slodzes strāvas, slodzes sprieguma un slodzei pievadītās jaudas vērtības (skatīt 3.16. a attēlu, 3.16. b attēlu un 3.16.c attēlu, bet jaudas pārraides lietderības koeficients iepriekšējos pētījumos sasniedza 0,45 (skatīt 3.16. d attēlu).

3.63.a attēlā ir parādītas vadāmās slodzes strāvas I_{reg} atkarības no iestatītā sprieguma $U_{reg\ max}$ pie trīs sprieguma U_c vērtībām uzkrāšanas kondensatoros. Šo atkarību veids ir tāds pats kā analogiskām atkarībām, kas iegūtas, ja starp DD spolēm attālums ir 13,5 cm (3.57.a attēls). Atkarībām, kas iegūtas pie $d = 11,5\text{ cm}$, ir lielākas strāvas vērtības. Tas izpaužas pie mazākām vadāmās slodzes ieejas pretestībām, atbilstošajiem spriegumu $U_{reg\ max}$ un U_c lielumiem (3.63.b attēls).



3.63. att. $U_{reg max}$ sprieguma ietekme uz rezonanses transformatora ar enerģētiskajiem parametriem pie $d = 11.5$ cm (a – regulējamas slodzes atkarība no strāvas; b – regulējamas slodzes pretestības atkarība no regulējuma sprieguma; c – izejas jaudas atkarība no regulējuma sprieguma; d – ieejas strāvas atkarība no regulējuma sprieguma)

Attēlā 3.63.c ir parādītas slodzei pievadītās jaudas atkarības no vadāmā sprieguma $U_{reg max}$ pie trīs sprieguma U_c vērtībām uzkrāšanas kondensatoros. Šajās līknēs atšķirībā no atkarībām kas iegūtas pie $d = 13,5$ cm (3.57.c attēlā) nav ekstrēmu. Lielas jaudas vērtības un iespējamo $U_{reg max}$ vērtību intervāla ierobežojumi neļāva izpētīt atkarības ekstrēmu posmā. Redzams, ka jaudas maksimālās vērtības ir gandrīz 2 reizes lielākas par vērtībām, kas iegūtas pie identiskām spriegumu $U_{reg max}$ un U_c vērtībām 3.57.c attēlā.



3.64. att. Vadāmās slodzes ietekme uz DD spoļu rezonanses transformatora enerģētiskajiem parametriem pie $d = 11,5$ cm (a – ieejas strāvas atkarība no izejas jaudas; b – izejas jaudas atkarība no regulējamās slodzes pretestības; c – ieejas jaudas atkarība no regulējamās slodzes pretestības; d – lietderības koeficienta atkarība no regulējamās slodzes pretestības)

Pārraidēs kontūra strāvas izmaiņas, palielinot vadāmo spriegumu $U_{reg\ max}$, ja $d = 11,5$ cm (3.63. d attēls), ir analogas ieejas strāvas izmaiņām gadījumā ja starp spolēm bija attālums $d = 13,5$ cm (3.57. d attēls), bet pārraidēs kontūra strāvas vērtības ir lielākas pie $d = 11,5$ cm un identiska sprieguma U_c . Tas ir skaidri redzams attēlā 3.64. a, kur parādītas ieejas strāvas (rezonanses transformatora pārraidēs spoles strāvas) atkarības no vadāmās slodzes strāvas I_{reg} trim fiksētiem U_c uzkrāšanas kondensatoru spriegumiem. Tomēr ieejas strāva ir

1,5 reizes lielāka par vadāmās slodzes I_{reg} strāvu, lai gan attālumā $d = 13,5$ cm strāvu attiecība bija 2 (3.58. a attēls).

Attēlā 3.64.b ir parādītas izejas jaudas (jaudas, kas pievadīta slodzei) atkarības no vadāmās slodzes ieejas pretestības pie $d = 11,5$ cm. Šīm atkarībām arī nav iegūtas ekstrēmālās vērtības, to pašu iemeslu dēļ, kā pētījuma 3.63.c attēlā. Samazinot vadāmās slodzes pretestību, izejas jauda palielinās ātrāk, kā pie $d = 13,5$ cm (3.58.b attēls). Starp izejas jaudas atkarībām no vadāmās slodzes ieejas pretestības (3.64.b attēls) un no vadāmā sprieguma $U_{reg\ max}$ (3.63.c attēls) ir viennozīmīga saikne.

Ieejas jaudas vērtības samazinās hiperboliski, palielinot vadāmās slodzes ieejas pretestību. Jo lielāks ir spriegums U_c , jo ātrāk samazinās ieejas jauda. Ieejas jaudas atkarības pie $d = 11,5$ cm (3.64. c attēls) nav būtiski atšķirīgas no līdzīgām ieejas jaudas atkarībām, kas iegūtas pie $d = 13,5$ cm (3.58.c attēls).

Vienāds ieejas jaudas (3.64.c attēls) un izejas jaudas (3.64.b attēls) samazinājums, palielinot vadāmās slodzes ieejas pretestību, ļauj iegūt maksimālās jaudas pārraides lietderības koeficienta (maksimālās efektivitātes) vērtības tuvu 1, tas ir labi redzams 3.64.d attēlā. Maksimālās jaudas pārraides lietderības koeficienta vērtības var iegūt, ja vadāmās slodzes ieejas pretestība pārsniedz $100\ \Omega$. Sprieguma U_c vērtība neietekmē jaudas pārraides lietderības koeficientu. To izskaidro gan izejas, gan ieejas jaudas samazināšanās, palielinot vadāmās slodzes ieejas pretestību (3.64.b attēls un 3.64.c attēls). Attālums starp spolēm $d = 11,5$ cm tika noteikts kā optimāls, veicot 7.4.1.2. apakšnodaļā aprakstītos pētījumus (skatīt 3.16.d attēlu). Maksimālās efektivitātes stabilizācijas metodes izmantošana ir ļāvusi nodrošināt jaudas pārraides lietderības koeficientu tuvu 1 pie jebkura sprieguma U_c šim attālumam starp DD spolēm.

Maksimālās efektivitātes stabilizācijas metodes izpēte, ja attālums starp DD induktivitātes spolēm d ir 5,5 cm

Šī pētījuma rezultāti ir parādīti 3.65. attēlā un 3.66. attēlā. Ja attālums starp induktivitātes spolēm $d = 5,5$ cm, starp induktivitātes spolēm pastāv saite, ko raksturo saites koeficients 0,35. Šādā attālumā starp spolēm iepriekš tika iegūts jaudas lietderības koeficients 0,75, bet šajā gadījumā slodzes strāvas, slodzes sprieguma un slodzei pievadītās jaudas vērtības bija mazākas par maksimālajām (skatīt 3.16. attēlu).

Attēlā 3.65.a ir parādītas vadāmās slodzes strāvas I_{reg} atkarības no vadāmā sprieguma $U_{reg\ max}$, pie četrām sprieguma U_c vērtībām uzkrāšanas kondensatoros. Redzams, ka vadāmās

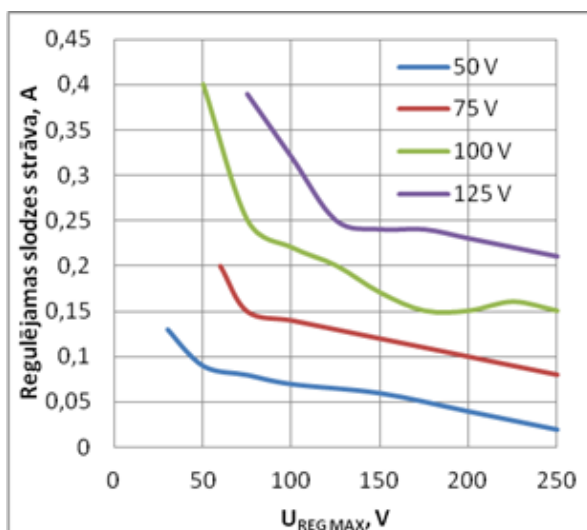
slodzes strāva samazinās, turklāt, pie lielām $U_{reg\ max}$ vērtībām, samazinājums ir lineārs. Strāvas vērtības ir ievērojami mazākas, kā pie lieliem attālumiem d . Tas izpaužas kā lielākas vadāmās slodzes ieejas pretestības pie identiskām spriegumu $U_{reg\ max}$ un U_c vērtībām (3.65.b. attēls), vadāmās slodzes ieejas pretestības sasniedz vērtības sasniedz vairākus k Ω , un ja spriegums U_c tiek samazināts līdz 50 V pat 10 k Ω .

Attēlā 3.65.c ir parādītas jaudas, kas tiek pievadītas slodzei atkarības no vadāmā sprieguma $U_{reg\ max}$, pie četrām sprieguma U_c vērtībām uzkrāšanas kondensatoros. Šīs atkarības ir tuvas lineārām un nerasniedz ekstrēmumus.

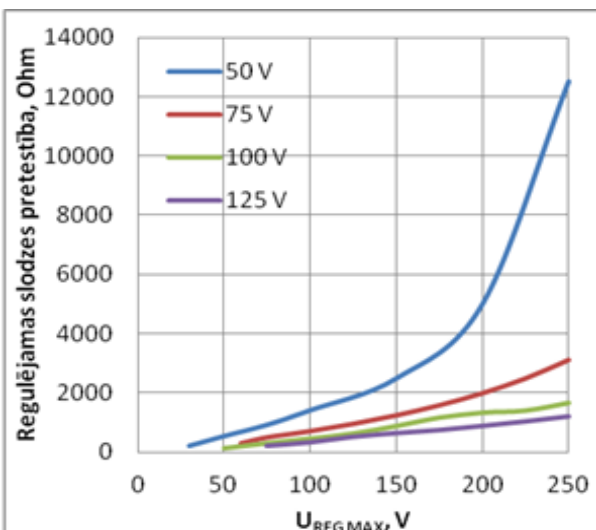
Pārraidē kontūra strāvas, palielinot vadāmo spriegumu $U_{reg\ max}$, pie $d = 5,5$ cm (3.65.d attēls), palielinās lineāri neatkarīgi no sprieguma U_c , un pārsniedzot 150 V, izejas strāvu pieaugums beidzas. Ieejas strāvu vērtības ir mazākas par tādām pašām atkarībām lielākos attālumos.

Pārraidē kontūra strāvas vērtības pie $d = 5,5$ cm, jebkuram spriegumam U_c , strauji mainās pie nelielām vadāmās slodzes I_{reg} strāvas izmaiņām. Tas ir skaidri redzams 3.66.a attēlā. Tādas atkarības tiek novērotas tikai tad, ja saites koeficienti starp induktivitātes spolēm ir lieli.

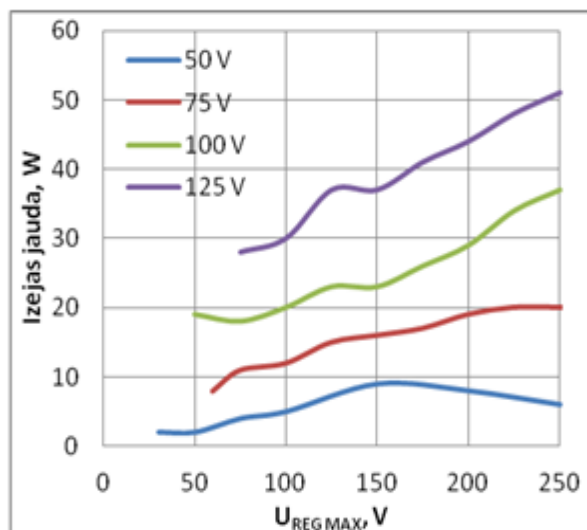
Attēlā 3.66. b ir parādītas izejas jaudas atkarības no vadāmās slodzes ieejas pretestības pie $d = 5,5$ cm. Tikai atkarībai pie $U_c = 50$ V, ir ekstrēms. Tam atbilst vadāmās slodzes ieejas pretestības vērtība, kas ir tuvu 3 k Ω . Pārējo triju atkarību ekstrēmi ir nobīdīti uz vēl lielākas ieejas pretestības pusi. Izejas jaudas līmeņi ir vairākkārt mazāki, salīdzinot ar izejas jaudu lielos attālumos (3.58 b, 3.60.b, 3.62.b un 3.64.b attēli). Starp izejas jaudas atkarībām no vadāmās slodzes ieejas pretestības (3.66.b attēls) un no vadāmā sprieguma $U_{reg\ Max}$ (3.65.c attēls) ir viennozīmīga saistība.



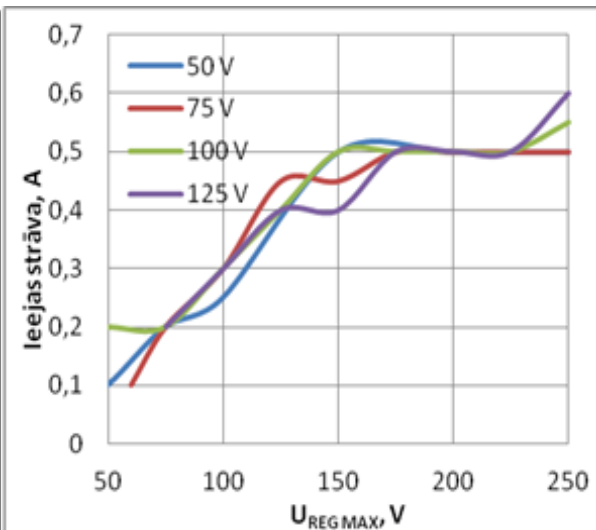
a



b



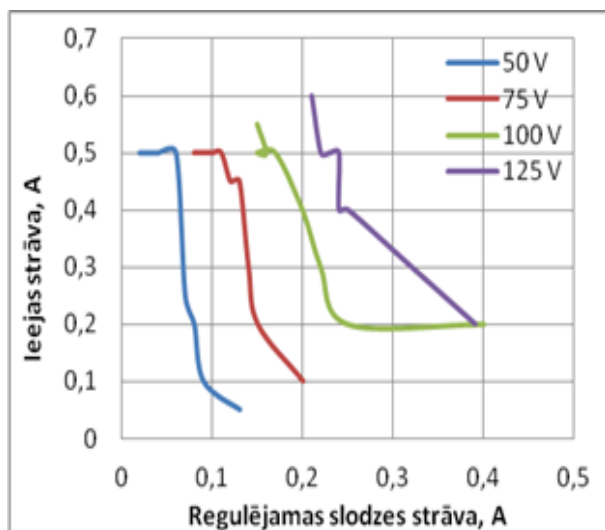
c



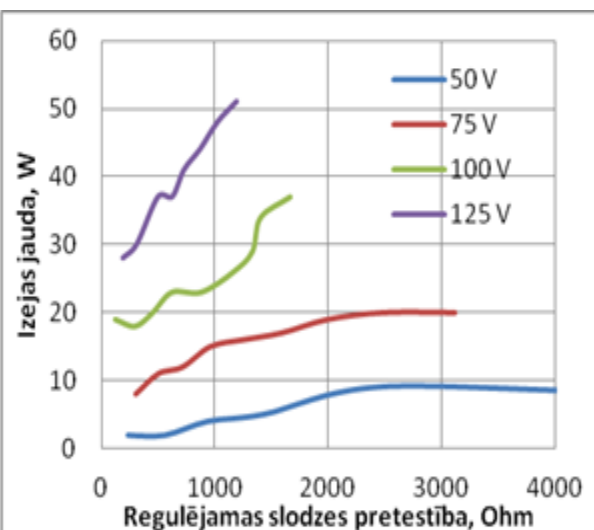
d

3.65. att. $U_{reg max}$ sprieguma ietekme uz rezonanses transformatora enerģētiskajiem parametriem pie $d = 5.5$ cm (a – regulējamas slodzes atkarība no strāvas; b – regulējamas slodzes pretestības no regulējuma sprieguma; c – izejas jaudas atkarība no regulējuma sprieguma; d – ieejas strāvas atkarība no regulējuma sprieguma)

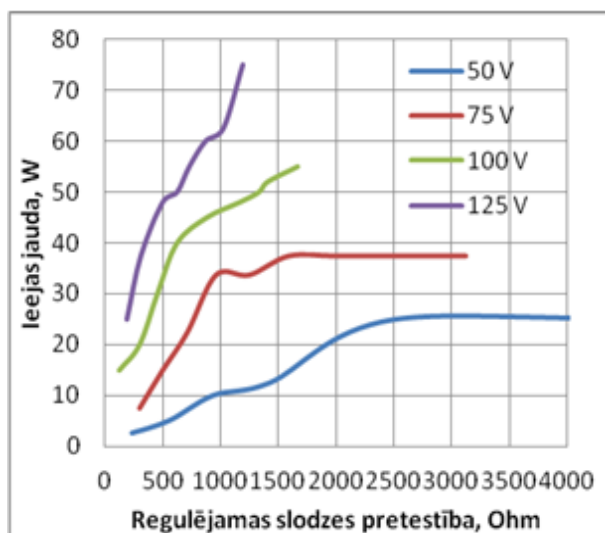
Palielinot vadāmās slodzes ieejas pretestību, ieejas jauda pieaug lineāri, tiecoties uz pastāvīgu vērtību. Pastāvīgās vērtības lielums atkarīgs no U_c sprieguma (3.66. c attēls). Ieejas un izejas jaudas atkarību veids no vadāmās slodzes pretestības ir vienāds (3.66.c attēls un 3.66. b attēls), bet ieejas jaudu pieaugums ir lielākas. Tādēļ jaudas pārraides lietderības koeficients samazinās, palielinot vadāmās slodzes ieejas pretestību (3.66.d attēls), un tikai, ja pretestības ir nelielas, vērtība tuva vienam.



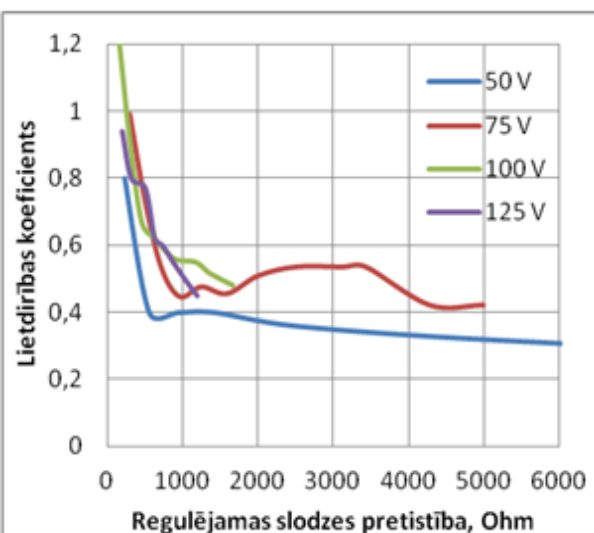
a



b



c



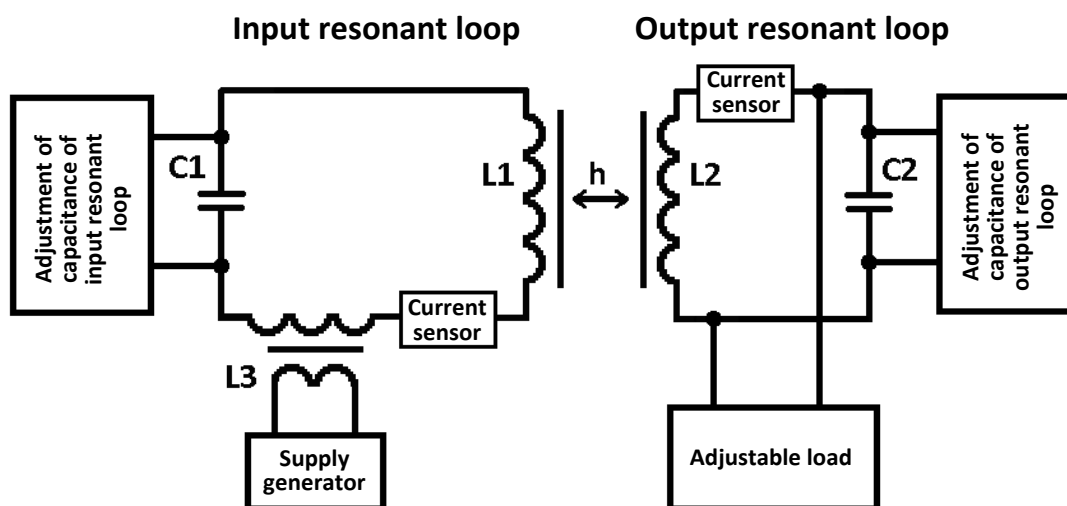
d

3.66. att. Vadāmās slodzes ietekme uz rezonanses transformatora enerģētiskajiem parametriem pie $d = 5.5$ cm (a – ieejas strāvas atkarība no izejas jaudas; 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

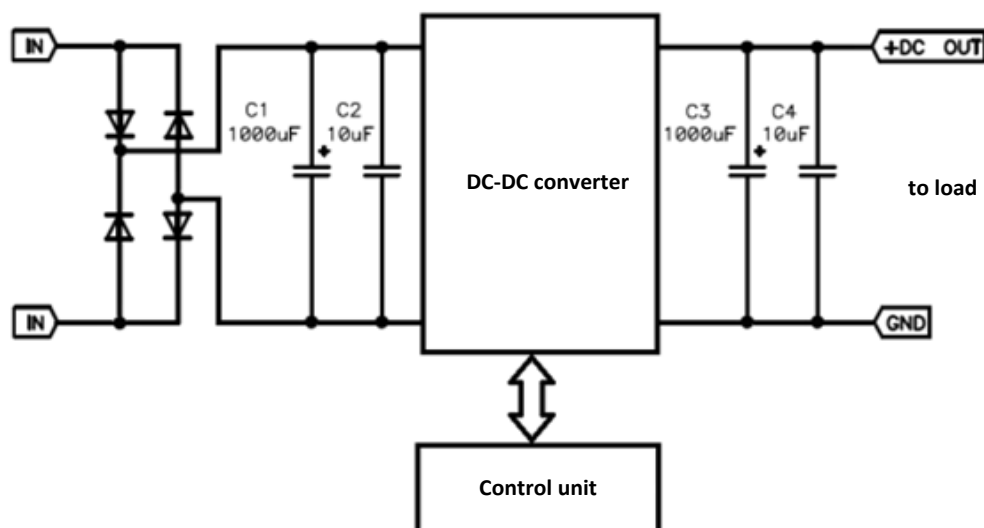
4.1. Ievads

Kā noskaidrots iepriekšējā nodaļā, lai sasniegtu maksimāli efektīvu enerģijas bezvadu pārraides sistēmas darbību, nepieciešams kompensēt spoļu induktivitātes, saites parametru un slodzes pretestības, kā arī primārā kontūra ierosmes ģenerators sprieguma izmaiņas. Ierosmes ģenerators sprieguma maiņa nerada grūtības. Kompensēt induktivitātes 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 ir atainota 4.1. attēlā.



4.1. att. Enerģijas bezvadu pārraides sistēmas iestatījumu pieskaņošanas sistēma

Slodzes shēma ar mainīgu pretestību ir parādīta 4.2. attēlā. Shēmas darbības laikā kondensatori $C1$ un $C2$ tiks uzlādēti līdz sprieguma amplitūdas vērtībai kontūrā. Slodzes pretestība būs vienāda ar šī sprieguma attiecību pret strāvu, ko patērē DC-DC pārveidotājs. Pārveidotāja izejai tiek pievienota lietderīgā slodze [22,23]. Kontrolējot DC-DC pārveidotāja darbu, var mainīt sekundārajā kontūrā ieslēgto aktīvo pretestību [24,25].



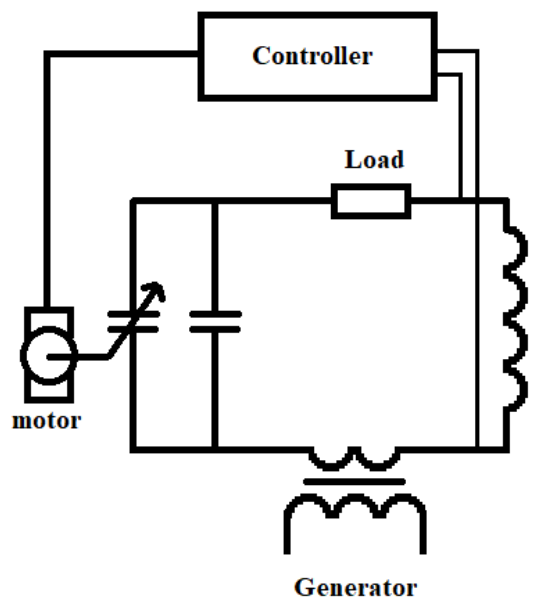
4.2. att. Slodze ar mainīgu pretestību

4.2. Svārstību kontūru savstarpējās izskaņošanās kompensācija

Viens no enerģijas bezvadu pārraides sistēmas darba maksimālās efektivitātes režīma nosacījumiem ir pilnīga rezonanse (full resonance) [26], 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 [27,28,29].

Pētījuma laikā, lai kompensētu induktivitātes izmaiņas, tika aprobēta mehāniski maināmas kapacitātes iekļaušana kontūrā. Eksperimentālās iekārtas shēma ir sniegta 4.3. attēlā.

Kā mehāniski maināma kapacitāte tika izmantots mainīgās kapacitātes kondensators (MKK) ar gaisa dielektriķi. Kondensatoram ir divas sekcijas kuru kapacitāte ir no 120 pF līdz 4 nF. Kondensatora mehāniskajai vadībai tika izmantots soļu dzinējs ДШИИ-200. Tā kā dzinēja soļu skaits nebija pietiekams, lai nodrošinātu kapacitātes izmaiņu diskretumu 50 pF, tika izmantots mehāniskais reduktors 2:1, kā rezultātā kondensatora pieskaņošanas solis bija 38 pF, bet soļu skaits – 200. MKK ārējais izskats ar piedziņu ir parādīts 4.4. attēlā.



4.3. att. Pieskaņošanas shēma, izmantojot mehāniski maināmu kapacitāti

Testu gaitā šī metode uzrādīja zemu ātrdarbību un tika noraidīta, jo svārstību kontūra pieskaņošanas laiks bija 600 ms, kas 240 reizes lēnāk kā nepieciešams sistēmas darbībai.



4.4. att. MKK ar mehānisko piedziņu

Autors piedāvāja kapacitātes elektroniskās komutēšanas metodi. Metodes būtība ir kapacitātes magazīnā, kas pieslēgta paralēli koriģējamā svārstību kontūra kapacitātei. Eksperimentālās ierīces shēma ir parādīta 4.6. attēlā. Metodes īpatnība ir tā, ka tika izmantota

pusvadītāju atslēga 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:

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

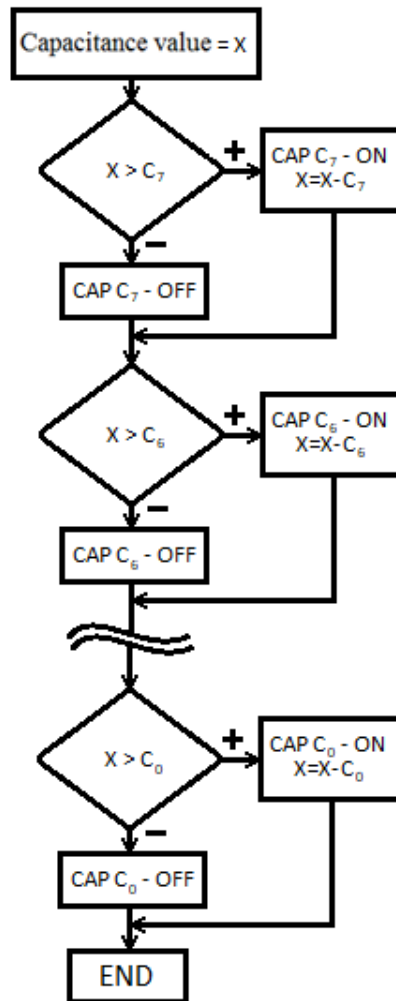
kur: C_{new} – aprēķinātā kondensatoru kapacitātes vērtība nākamajam darba ciklam.

f_{old} – svārstību kontūra izmērītā kapacitāte.

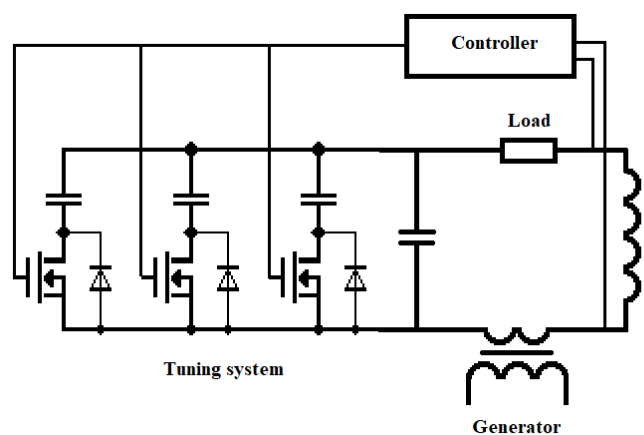
C_{old} – svārstību kontūra kapacitātes iepriekšējās vērtības.

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

Kapacitātes iegūšanas algoritms no kondensatoru magazīnas ir parādīts 4.5. attēlā. Kopējās kapacitātes nepieciešamo vērtību ieraksta mainīgajā X un skaitliski salīdzina ar vislielākās kapacitātes nominālu magazīnā. Ja nepieciešamā kapacitāte ir lielāka par šo nominālu, tad tiek pieņemts lēmums par šī kondensatora pieslēgšanu kontūram, bet no mainīgā X atskaita šī kondensatora vērtību. Ja nepieciešamā kapacitāte ir mazāka par šo nominālu, pieņem lēmumu – kondensatoru nepievienot kontūram. Nākamajā solī X vērtību salīdzina ar nākamo lielāko kondensatoru magazīnā, un tā, līdz tiks izmantoti visi kondensatori no visietilpīgākā līdz vismazākajam.



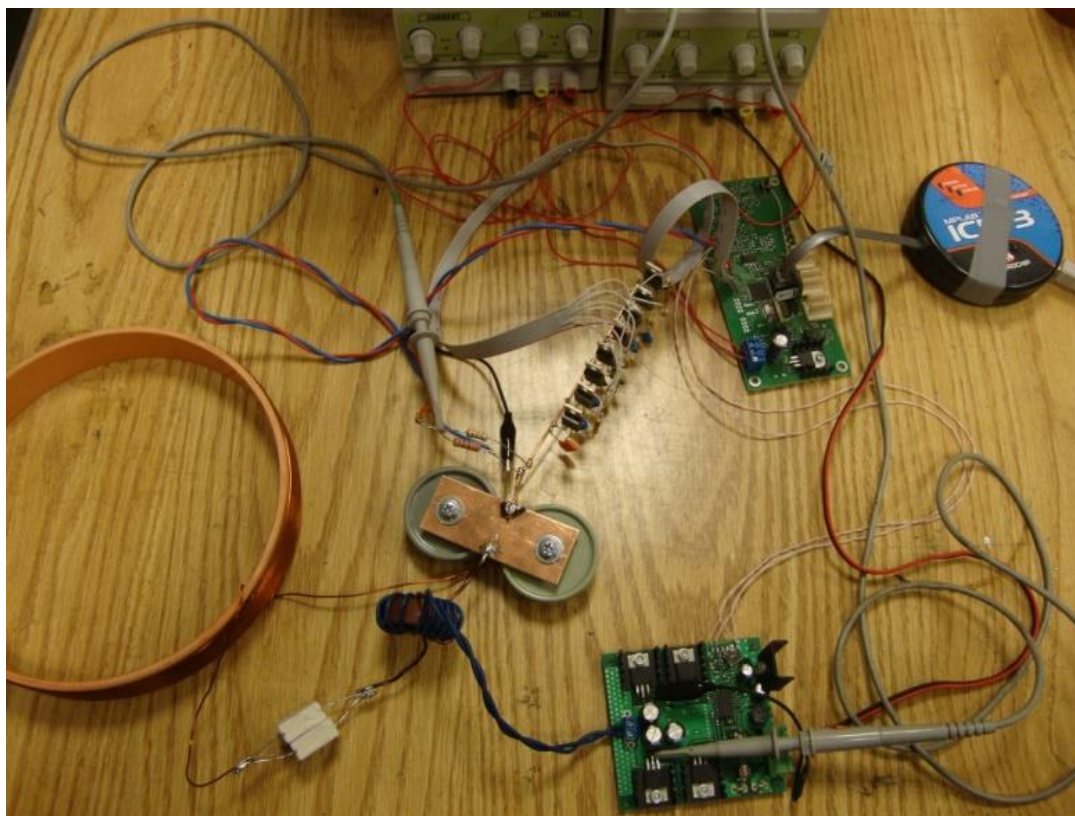
4.5. att. Kondensatoru magazīnas kapacitātes iegūšanas algoritms



4.6. att. Kapacitātes pieskaņošanas shēma, izmantojot kapacitātes magazīnu

Izmēģinājuma ierīcē tika izmantota kapacitātes magazīna, kas sastāv no 8 pakāpēm ar kapacitāti no 50 pF līdz 6.4 nF, kas ļāva izmainīt papildus kapacitāti no 0 līdz 12.75 nF ar

diskrētumu 50 pF. Tas, savukārt, ļāva regulēt rezonanses frekvenci ar 500 Hz diskrētumu. Ja sistēmas darba frekvence ir konstanta – 85 kHz un pamatkondensatora ietilpība ir 1 nF, kapacitātes magazīna spēja kompensēt kontūra spoles induktivitātes izmaiņas no 0.26 mH līdz 3.6 mH. Eksperimentālās iekārtas ārējais izskats ir parādīts 4.7. attēlā.



4.7. att. Eksperimentālā iekārta ar komutējamo kapacitāšu magazīnu

Kapacitātes magazīnas komutācijai tika izmantota mikrokontrollera vadības sistēma. Izmantojot programmatūru tika mērīts pusperioda ilgums, aprēķināta spoles pašreizējā induktivitāte un no magazīnas izvēlēts kapacitātes salikums precīzai rezonanses frekvences pieskaņošanai. Izmaiņas kapacitāšu salikumā notiek kapacitātes maksimālā sprieguma brīdī, tas ļauj pieslēgt papildu kapacitāti bez strāvas izmetiena, un minimizēt pārejas procesus, jo kapacitātes tiek pieslēgtas uzlādētas. Tas ļauj mainīt kontūra parametrus pie lielas caurplūstošās strāvas.

Ja sistēmas frekvence ir 85kHz, tad svārstību kontūru pielāgošanas laiks, izmantojot kapacitātes komutācijas metodi ir 12 μ s, kas ir piecas kārtas ātrāk par mehānisko metodi ar maiņkondensatoru. Turklāt kapacitātes izmaiņu diapazons var sasniegt vairākas kārtas ar iepriekš izvēlētu diskrētumu.

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 ir parādīts 4.8. attēlā. Iekārta sastāv no kapacitāšu magazīnas C1 – C6, kas ļauj pievienot kontūram kapacitāti no 0 līdz 102 nF ar diskretumu 1.6 nF. Ja galvenā kondensatora C7 ietilpība ir 175 nF, tad ir iespējams kompensēt pārraides spoles induktivitātes izmaiņas intervālā no 13 līdz 20 μ H ar frekvences izmaiņu diskretumu 258 – 397 Hz.

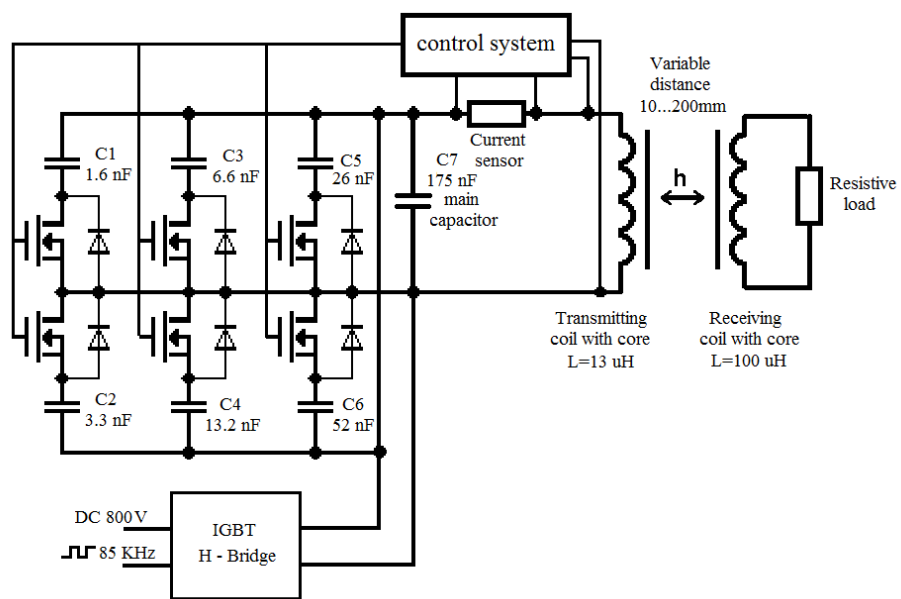
Eksperimentālās iekārtas svārstību kontūrs tika izveidots kā paralēlis kontūrs. Kontūra ierosme notika, izmantojot IGBT pustiltu (H-bridge) kurš tiek barots no 800 voltu līdzsprieguma avota un vadīts no taisnstūra impulsu ģenerators ar frekvenču diapazonu 60...100 kHz. Vadība notiek no dsPIC33FJ64GS610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

Lai ieregulētu distanci starp pārraides 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.

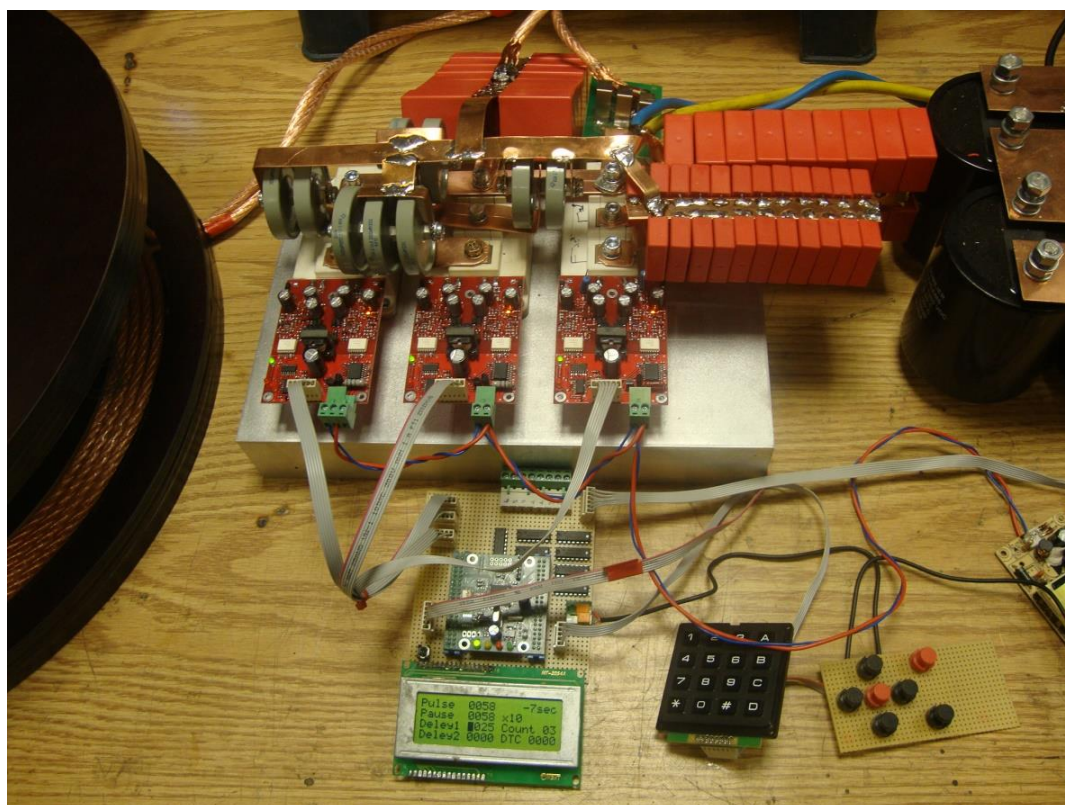
Spoļu rezonanses raksturlielumu mērījums tika veikts mainot ierosmes ģenerators frekvenci ar soli 1 kHz, lai atrastu maksimālo amplitūdu.

Izmēģinājumā ierīce atbilda agrāk izskaitļotajiem parametriem, 100 ampēru strāva kontūrā tika sasniegta pie barošanas ģenerators sprieguma 815 volti.

Pārraides spoles rezonanses frekvences mērījumu rezultāti atkarībā no attāluma līdz uztvērējsspolei pie nemainīga kondensators ir parādīti 4.9.(A) attēlā. Pie kondensators kapacitātes 220 nF pārraides kontūra rezonanses frekvence bija no 67 līdz 93 kHz. Ja tiek pieņemts, ka darba frekvence ir 85 kHz un distance 70 mm, tad attāluma maiņa starp spolēm par 20 mm izraisīs rezonanses frekvences nobīdi par 3 kHz un raidītāja un uztvērēja salāgošanas zudumu.

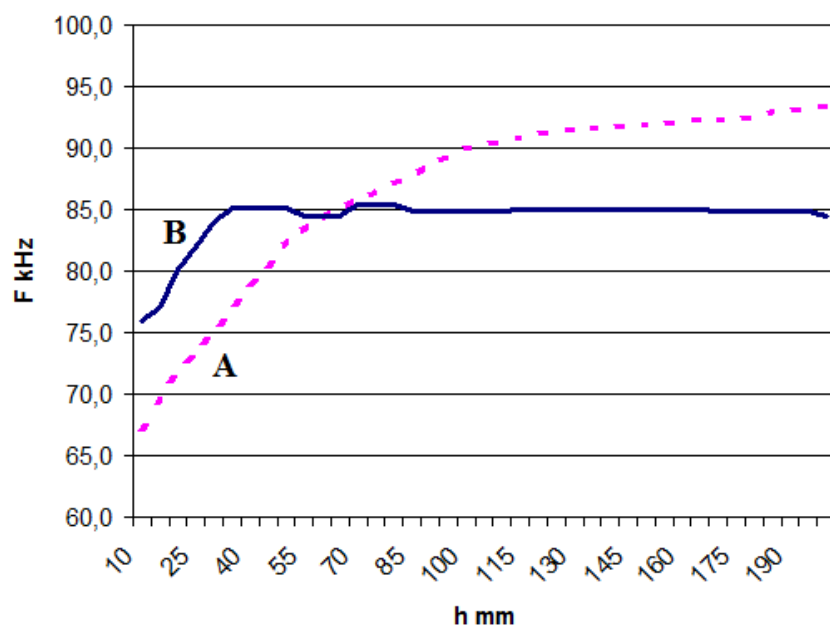


a



b

4.8. att. Eksperimentālās iekārtas ar komutējamo kapacitāšu magazīnu shēma (A) un ārējais skats (B)



4.9. att. Pārraidēs kontūra rezonanses frekvence pie fiksētas kondensatora kapacitātes (A) un izmantojot rezonanses frekvences pieskaņošanas sistēmu (B)

4.9. (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 līdz 200 mm. Šajā diapazonā frekvences novirze no pamata vērtības bija ne vairāk kā 800 Hz. Intervālā no 10 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 ir balstīts uz svārstību kontūra pašsvārstību mērīšanu, ja ierosmes ģenerators ir atvienots. Pēc ierosmes ģenerators atslēgšanas tiek novēroti pārejas procesi, kas nepārsniedz 3 periodus. Ja frekvence ir 85 kHz, kontūra pašsvārstību frekvences mērīšanai nepieciešamais laiks bija 35 μ s. Kontūra pārregulēšana ilga 1 svārstību periodu jeb 12 μ s. Šī darba metode ļauj izmērīt un pielāgot rezonanses frekvenci precīzāk nekā iepriekšējā eksperimentā. Eksperimentā ar lielu rezonanses strāvu tika konstatēts, ka pastāv traucējumi, kas ietekmē ierīces mērīšanas ķēdes kuras tika izmantotas iepriekšējā eksperimentā.

4.3. Vadības modulis

Sistēmas centrālā daļa ir vadības procesors. Tā iespējas daudzējādā ziņā noteiks visas sistēmas iespējas kopumā. Kā procesors tika izmantots specializētais signāla apstrādes mikroprocessors dsPIC33FJ64GS610, ko ražo firma MICROCHIP. Šis mikrokontrolieris tika izstrādāts lai izmantotu kā vadības ierīci dažāda tipa pārveidotājos. Šis processors tika izvēlēts dēļ šādām iespējām:

- 16 kanālu impulsu platuma modulators ar soļa diskretumu līdz 1 nc.
- Divi neatkarīgi ACP kanāli.
- DMA apakšsistēmas darbība izmanto atsevišķu divportu atmiņas apgabalu.
- Aparātiskā dalīšana.
- DSP komandas, kas paātrina digitālo filtru darbību.
- 16 bitu arhitektūra.

Neviens cits no pašlaik ražotajiem mikrokontrolleriem neatbalsta visas šīs funkcijas vienlaicīgi. Vadāmās slodzes vadības bloka shēma, kas izveidota uz mikrokontroliera dsPIC33FJ64GS610 bāzes, ir dota 1. pielikumā.

Shēma ietver strāvas un sprieguma sensoru blokus izveidotus izmantojot mikroshēmas U2, U3, U4:A, U6. Mikroshēma U4:B ir atbalsta sprieguma ģenerators, lai nodrošinātu vidējo punktu visiem visiem operacionālajiem pastiprinātājiem [30]. SX6-SX11 savienotāji ir nepieciešami, lai pieslēgtu 6 IGBT vadības kanālus. Signāli no procesora modulatora IPM izvadiem ir pieslēgti loģiskajam invertoram, jo IGBT moduļa optroniem ir invertējošā ieeja. Invertora 74HCT sērijas mikroshēma tiek arī izmantota kā signāla pastiprinātājs no 3.3 līdz 5 voltu spriegumu. IGBT_FAULT strāvas aizsardzības signāls, kas nāk no IGBT moduļiem, tiek apvienots vienā signālā pēc montāžas vai shēmas, tas ir iespējams jo optronam 6N137 ir atvērtā kolektora izeja. U10, R60, VT3 ķēde pārraida RESET signālu visiem IGBT moduļiem vienlaicīgi.

Mikroshēma U8 un tranzistors VT2 vada mikrokontrollera CPU1 signālu /MCLR. Mikroshēma U8 kontrolē barošanas līmeni un nepieļauj mikrokontrollera palaišanu pārejas procesos barošanas ieslēgšanas un izslēgšanas laikā, kā arī tad, ja rodas bojājumi mikrokontrollera barošanas ķēdē. Ja mikrokontrolleris dsPIC33FJ64GS610 atrodas apturētā (reset) stāvoklī, tā porti atrodas Z stāvoklī. Lai novērstu iespēju nejauši atvērt IGBT tranzistorus shēmā tika ieviesti rezistori R52-R57.

Vadības moduļa barošana tiek veikta caur SX2 savienotāju no 24 voltu sprieguma avota. Shēmā ir divi sprieguma integrālie stabilizatori 5V un 3.3V.

Elementi R39, C22 veido RC filtru mikrokontroliera iekšējā ADP barošanas ķēdē. Rezistori R40, R42, R44, R45 savieno ekranējošo zemes poligону mērķēdēm ar kopējo zemes poligону kas ļauj būtiski samazināt traucējumus mērīšanas ķēdēs.

Mikrokontrolera programmēšana notiek caur savienotāju SX5. Vadības bloka plates kopskats ir parādīts 2. pielikumā. Konstruktīvi vadības bloks ir izgatavots uz atsevišķas plates no divpusējā folgētā tekstolīta ar folijas biezumu 0.025 mm.

Pētījumi enerģijas bezvadu pārraides sistēmas parametru ietekmei uz pārraides procesa efektivitāti rāda, ka lai nodrošinātu efektīvu enerģijas bezvadu pārraides sistēmas darbību dinamiskā režīmā, ir jāizpilda šādas prasības:

1. Jānodrošina enerģijas bezvadu pārraidi transformatora rezonanses frekvencē.
2. Jāuztur stabils rezonanses transformatora pārraides kontūra ierosmes ģenerators spriegumu.
3. Jānodrošina enerģijas bezvadu pārraides sistēmas termostabilizāciju.
4. Jāveic uztvērējpusē slodzes pretestības regulēšana.
5. Atļaut enerģijas bezvadu pārraidi tikai tad, ja rezonanses transformatora uztvērējkontūras kustīgā spole atrodas virs stacionārās pārraides spoles.
6. Nodrošināt transformatora rezonanses frekvences vai rezonanses transformatora pārraides kontūra ierosmes ģenerators sprieguma un frekvences pieskaņošanu.

Divu pēdējo prasību izpilde ir iespējama tikai tad, ja starp bezvadu enerģijas pārraides vadības sistēmas raidītāja un uztvērēja pusēm pastāv savstarpējā saite. Šo atgriezenisko saiti nodrošina bezvadu datu pārraides sistēma.

Prasības pēc bezvadu datu pārraides apjoma un ātruma nosaka magnētiskās induktīvās saites pakāpe starp rezonanses transformatora pārraides un uztvērējpoli: $K_{sv} < 0,1$ vai $K_{sv} > 0,1$.

Ja starp pārraides un uztvērēja spoli praktiski nav induktīvās saitnes (ievērojams attālums starp induktivitātes spolēm – $K_{sv} < 0,1$), tad nav arī induktivitātes spoļu savstarpējās ietekmes. Šajā gadījumā attāluma izmaiņām starp induktivitātes spolēm nav ietekmes uz kontūra rezonanses frekvencēm un rezonanses transformatoru. Šajā gadījumā vadības datu pārraides sistēmai jānodrošina šādu datu pārraide:

- vadošās komandas, lai ieslēgtu enerģijas bezvadu pārraides sistēmu, sākot sakaru seansu starp stacionāro datu pārraides sistēmas daļu un datu pārraides sistēmas kustīgo daļu;
- vadošās komandas, lai izslēgtu enerģijas bezvadu pārraides sistēmu pēc sakaru seansa beigām starp datu pārraides sistēmas stacionāro daļu un datu pārraides sistēmas kustīgo daļu;
- vadošās komandas lai regulētu rezonanses transformatora pārraides kontūra ierosmes ģeneratora spriegumu nepieciešamā jaudas līmeņa nodrošināšanai uztvērējpusē, jo attālums starp pārraides spoli un uztvērējspoli var būt atšķirīgs dēļ automobiļu dažādā klīrensa.

Ja starp pārraides un uztvērējspolēm ir induktīvā saite (mazs attālums starp induktivitātes spolēm – $K_{sv} > 0,1$), tad pastāv induktivitātes spoļu savstarpējā ietekme. Šajā gadījumā attāluma izmaiņām starp induktivitātes spolēm ir ietekme uz kontūru rezonanses frekvencēm un rezonanses transformatoru. Šajā gadījumā datu pārraides sistēmai jānodrošina iepriekš uzskaitīto datu pārraide, kā arī vadošās komandas, lai pārskatotu pārraides kontūra elementus vai enerģijas bezvadu pārraides sistēmas vadības ģeneratoru. Minētā datu pārraide nodrošinās enerģijas bezvadu pārraidi rezonanses frekvencē ar maksimālo efektivitāti.

Vadības sistēmas divi darbības posmi ($K_{sv} < 0,1$ vai $K_{sv} > 0,1$) nosaka divas prasību jomas bezvadu pārraides kanālam. Posmam $K_{sv} < 0,1$ – tās ir vadības komandas, kas nāk no kāda “ārēja” avota, pamatojoties uz informāciju par pārraides un uztvērējkontūru pozicionēšanu. Bezvadu kanāla negatīvā ietekme būs atkarīga no paketes saņemšanas kavēšanās pret laiku, kad tiek fiksēta atbilstošās komandas nepieciešamība. Pieļaujamais aiztures laika diapazons pētītajam procesam ir 1 ms – 10 ms pie automobiļa kustības ātruma līdz 100 Km/h. Vadības sistēmas efektivitāte būs lielāka, ja mazāks būs pakešu kavēšanās laiks.

Otro posmu, kur $K_{sv} > 0,1$, raksturo regulēšanas cikli, katrā ciklā ir šādi laika intervāli:

- parametru mērīšanas laiks un to noformēšana datu paketēs;
- pakešu nodošanas laiks, izmantojot bezvadu kanālu;
- attiecīgā parametra maiņas (korekcijas) laiks;
- pārejas procesa laiks sistēmā pirms tās parametru stabilizēšanās atbilstoši jaunajām to vērtībām.

Norādītie laika intervāli tiek summēti, un to kopējais ilgums nedrīkst pārsniegt nepieciešamo viena regulēšanas intervāla ilgumu. Attiecīgo laiku mērījumi enerģijas pārraides sistēmu prototipiem sniedz šādus datus:

- parametru mērījumu laiks ir 35 μ s;
- atbilstošā parametra (rezonanses frekvences) korekcijas laiks 12 μ s;
- pārejas procesa laiks (mainot kapacitāti pārraides kontūrā) ir aptuveni 600 μ s.

Tādējādi regulējuma laika intervāls > 1 ms. Enerģijas pārraides sistēmas prototipa eksperimenti parāda enerģijas pārraides efektivitātes vājo atkarību no regulēšanas intervāla, iespējamā intervāla vērtība ir 10 ms.

Datu pārraides ātrumiem bezvadu kanālā, pamatojoties uz kanālā mērīto un pārraidīto parametru skaitu vienā regulēšanas ciklā, ir iegūts caurlaides joslas novērtējums: 8-80 Kbps. Tas ir patiess, ja paketes izmērs ir 10 baiti.

Lai optimālo parametru pieskaņošanas sistēma funkcionētu pareizi ir nepieciešams lai raidītāja un uztvērēja parametru korekcija notiktu sinhroni. Lai sinhronizētu skaitļošanas ierīces raidītājā un uztvērējā, var izmantot laika atzīmes no GPS sistēmas. Lai veiktu korekciju, katram skaitļotājam jābūt pilnīgam datu komplektam – abu kontūru strāvām, abu kontūru kondensatoru kapacitātei, barošanas ģenerators spriegumam un slodzes pretestībai. Pamatojoties uz šiem datiem, tiek aprēķināts optimālais enerģijas pārraides punkts kontūru saites koeficienta pašreizējai vērtībai. Datu apmaiņai starp enerģijas raidītāju un uztvērēju jābūt divpusīgam datu pārraides kanālam. Katra no ierīcēm veido lietderīgo datu paketi, kuras apjoms 72 biti, no kuriem:

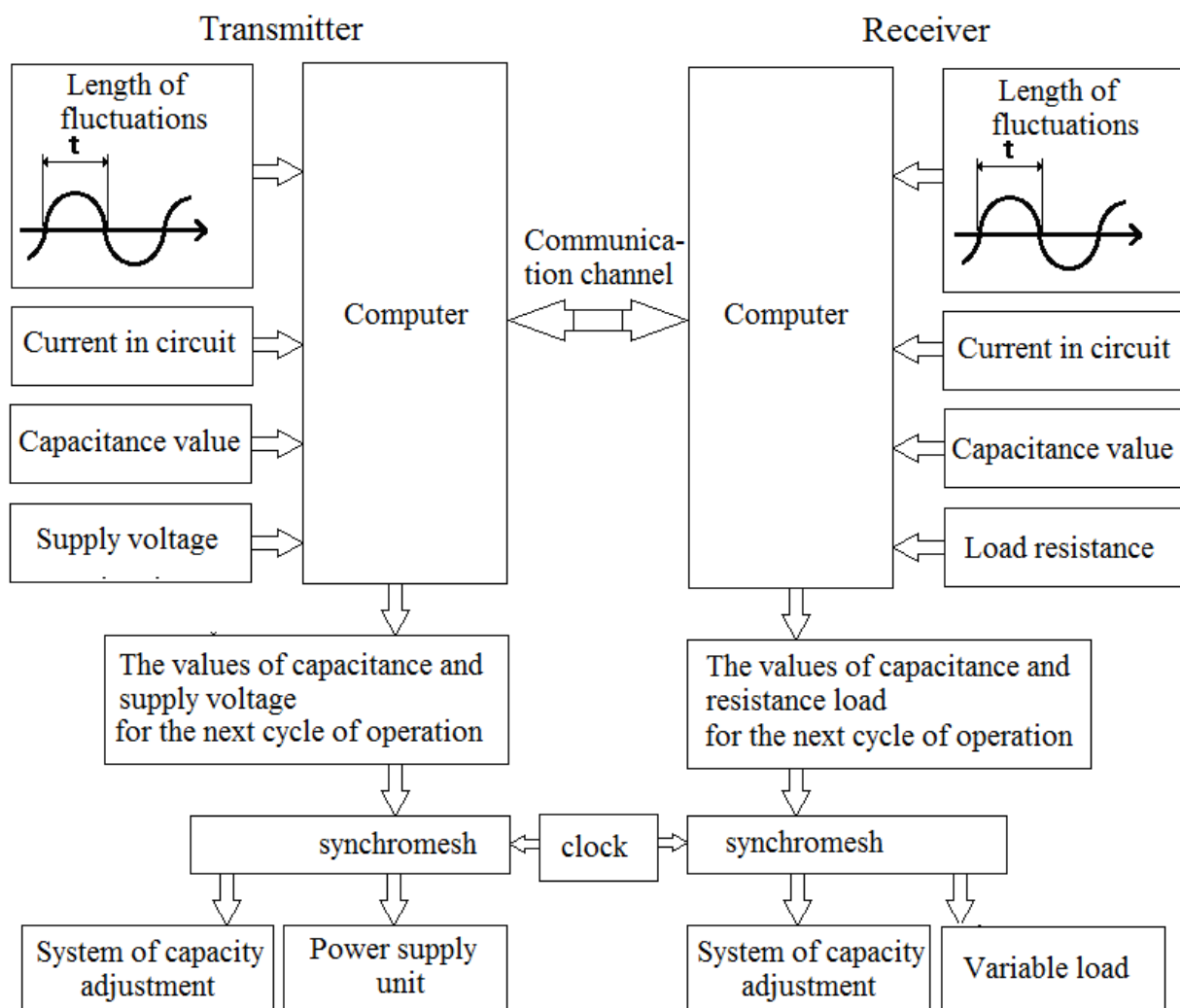
8 biti – paketes numurs, uztvērēja vai raidītāja identifikators.

16 biti – strāvas vērtība kontūrā.

16 biti – barošanas ģenerators spriegums / slodzes pretestība.

32 biti – kondensatora kapacitāte.

Skaitļošanas ierīce pēc paketes saņemšanas aprēķina sistēmas optimālos parametrus kuri, pēc laika atzīmes, tiek sinhroni pielietoti uztvērēja un raidītāja kontūriem. Pēc 1 ms vai aptuveni 8 kontūru svārstību periodiem kad var uzskatīt ka pārejas procesi ir beigušies, atkārtoti tiek mērīti sistēmas parametri, veidotas paketes un darba cikls atkārtojas. Automātiskās vadības sistēmas struktūrshēma ir parādīta 4.10. attēlā.



4.10. att. Automātiskās vadības sistēma

Pamatojoties uz datiem par svārstību periodu un kondensatoru pašreizējo kapacitāti, skaitļošanas ierīcē tiek veikti svārstību kontūru pašreizējās induktivitātes aprēķini. Pēc tam var aprēķināt saites vērtību M starp kontūriem. Tiek aprēķināta kondensatoru vērtība, lai kompensētu spoļu induktivitāti un sasniegtu nosacījumu $X_1 = X_2 = 0$ [26]. Pēc tam saskaņā ar 4.2.1.nodaļā aprakstīto metodiku tiek aprēķinātas barošanas ģenerators sprieguma un slodzes pretestības vērtības optimālās jaudas pārraides sasniegšanai.

4.4. Informācijas procesu analīze un komunikācijas tīkla izstrāde dinamiskajai WPT

Šajā nodaļā tiek analizēta enerģijas bezvadu pārraides sistēmu (WPT – Wireless Power Transfer) informācijas procesu un informācijas plūsmu analīze, ievērojot to izmantošanu enerģijas pārraides struktūrās kustīgajos objektos. Šādas struktūras bieži tiek vērtētas

enerģijas pārraides koncepcijas ietvaros transporta līdzekļos, tās strauji attīstās un nosaukums ir Vehicle to-Grid (V2G). Šajā nodaļā tiek aprakstīta komunikācijas moduļa izstrāde un datu pārraides bezvadu tīkla izveide dinamiskai WPT sistēmai.

Informācijas plūsmu, struktūras, protokolu V2G sistēmās analīze

Ir ļoti liels dažādu līmeņu informācijas materiālu apjoms ([31], [32]), kas atklāj dažādus V2G sistēmu uzbūves aspektus (tostarp arī ieviešanas un ekspluatācijas) un problēmas. Piemēram, [21] ir šīs būtiskās attīstības līmeņa pārskats problemātikas (state of the art) dažādās valstīs. Tā paša apskata īsajā formā tiek nosauktas dažādas problēmas, kas ir raksturīgas šai nozarei pašlaik.

Analizējot 4.1. tabulā sniegtos virzienus, var secināt, ka sistēmām WPT – V2G:

- dažādu aspektu standartizācijas procesa pabeigšanai vēl nepieciešams ievērojams laika periods;
- informācijas procesu standartizācija sistēmās ir nesaraujami saistīta ar ekonomisko rādītāju un drošības rādītāju pilnveidošanas virzieniem, tai ir nepieciešama tālāka attīstība;
- tādu V2G sistēmu uzbūves jautājumi, kurās notiek enerģijas pāraide uz kustībā esošiem objektiem, atrodas sākuma stadijā un nav iekļauti attīstības ģenerālvirzienā.

Informācijas apmaiņa lielajās un mazajās sistēmās, kuras izmanto WPT, ir ticis un arī turpmāk tiks izskatīts. Tiek piedāvāti (arī patentēti) [33] tehniskie risinājumi, kuros pievērsta uzmanību tam, ka nepieciešams sistēmas atbalsts tādiem informācijas procesiem kā “pieslēgšanās tīklam”, “autentificēšana un autorizācija”, informācijas apmaiņa par ierīču stāvokli, enerģijas pārraides procesa tarifikācija u.tml. Tieši šāds gadījums rodas, izmantojot WPT – V2G sistēmas. Īpašos WPT lietošanas gadījumus tiek izskatīta informācijas apmaiņa, ko var piemērot enerģijas pārraides vadības procesā, lai palielinātu tās efektivitāti [34]. Šādus vadības procesus bieži sauc par “kompensāciju”.

Informatīvie procesi, kas nepieciešami efektīvai elektromobiļa (EV) mijiedarbībai, ir autoražotāju vērīgā uzraudzībā [35]. V2G sistēmā Smart Charging System galvenās informācijas procesu mijiedarbības grupas ir:

- uzlādes procesa vadīšana posmā no pieslēguma līdz atslēgšanai;

- dažādu elektroenerģijas apmaksas veidu nodrošināšana;
- līdzsvarošanas procesu optimizācija elektroenerģijas piegādei kolektīvās uzlādes vietās (Charge spot or Hot spot);
- pasūtītājam nozīmīgi papildus servisi (Value added), kas saistīti ar elektroenerģijas iegūšanas procesu

4.1. tabula

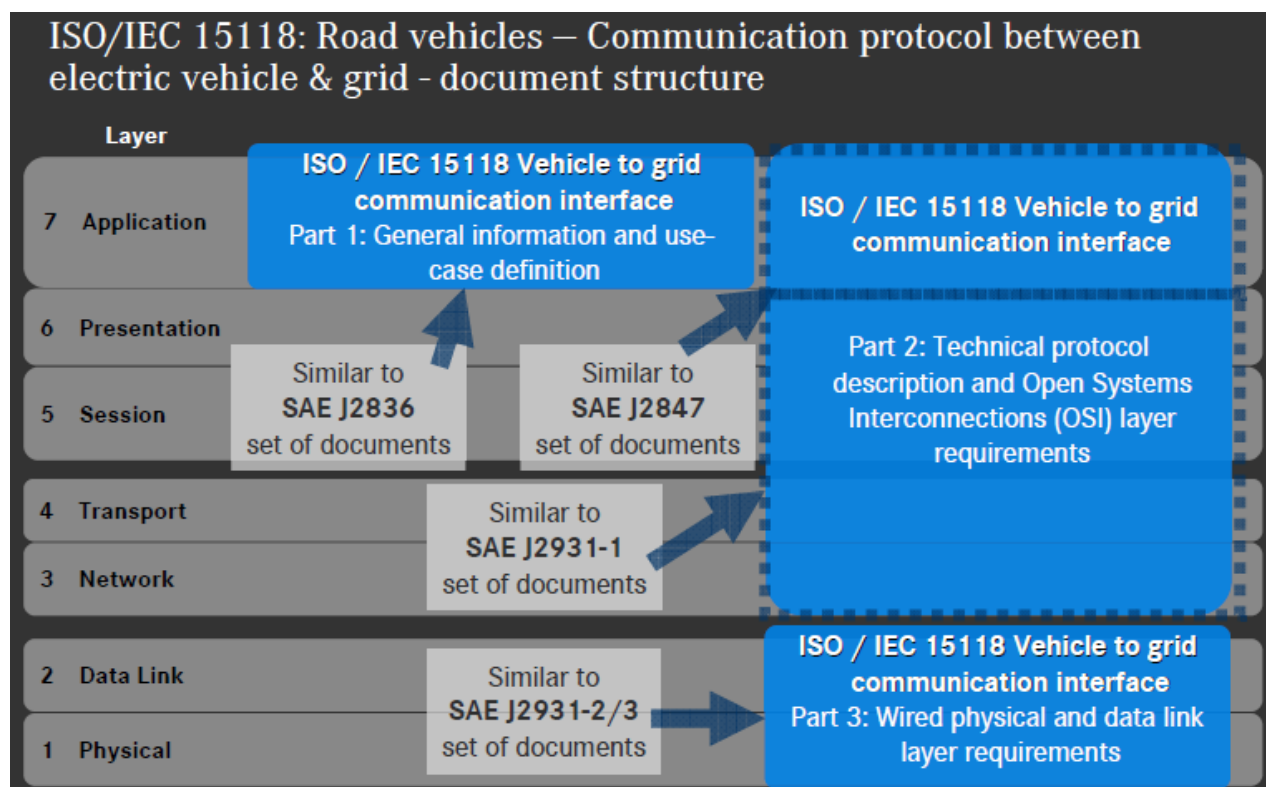
Vispārējie pētījumu virzieni WPT izmantošanai transporta sistēmās [28]

Summary of Transit WPT Research Issues and Needs	Safety	Environment	Health	Economic
Standardize WPT charging infrastructure (frequency, power) for interoperability	X	X	X	X
Standardize WPT subsystem onboard bus for cost-effective retrofit and integration with legacy vehicles	X	X	X	X
Develop acceptance testing protocols for WPT transit systems to verify safe operability, environmental compatibility, and compliance with applicable standards (SAE, IEEE) and regulations (FCC, DOT)	X	X		
Ensure workers and public health and safety for normal WPT system operations and for malfunction scenarios	X		X	
Use the FTA Safety Management System (SMS) and failure criticality analysis to compare WPT technology options	X			
Quantify and compare capital, operation and maintenance costs of WPT transit technology options using Lifecycle cost-benefit analysis (LCA)				X
Develop comparative data on WPT system reliability, availability, maintainability, safety, health and environmental impacts	X	X	X	X
Identify and develop Best Practices and Training for WPT system preventive maintenance and safe handling to ensure workers safety	X		X	
Determine how to prevent, respond to, or mitigate EMI or leakage EMF adverse impacts on human electronic implants and on wayside susceptible facilities	X	X	X	
Perform scenario analysis of WPT infrastructure vulnerability to damage from heavy traffic and extreme weather	X	X		

ISO 15118 standartu analīze

Smart Charging System tipa V2G sistēmām turpinās aktīva standartu izstrāde, kam jāklūst par pamatu tādu sistēmu izveidei.

ISO 15118 komunikācijas standarts, kas sastāv no trim daļām: 15118-1, 15118- 2 ir oficiāli izdotās daļas, 15118-3 līdz šim nav oficiāli publicēta. Standarts ir paredzēts informācijas apmaiņas strukturēšanai, datu pārraides tīkla veidošanai un objektu un tīkla aprīkojuma mijiedarbībai [36]. 4. 11. attēlā ir sniegtas standarta tēmas atbilstoši OSI (Open System Interconnection) modelim.



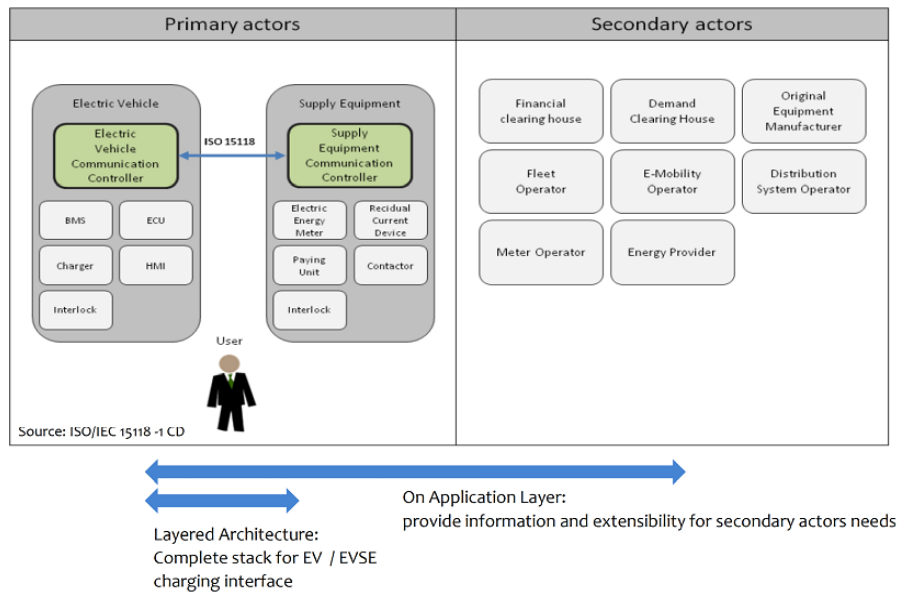
4.11. att. ISO 15118 standarta dokumentu struktūra [35]

Komunikācijas koncepcijā 15118 tiek akcentēta augstākā līmeņa komunikācija (High Level Communication – HLC) un pamatsignalizācija (Basic Signaling – BS). HLC tiek aprakstīts 15118-1 un 15118-2 un ir paredzēts funkcionalitātes atbalstam, par kuru tika minēts iepriekš:

- identifikācija
- samaksa
- slodzes līdzsvarošana
- nozīmīgi papildus pakalpojumi

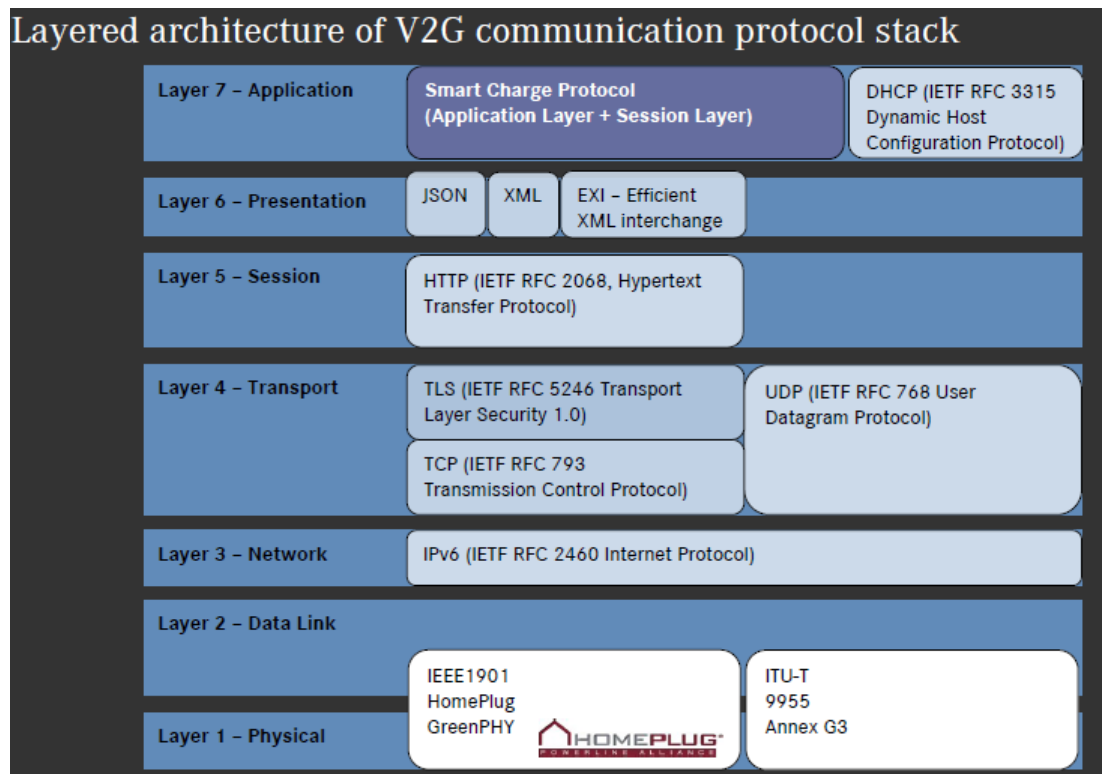
Standartā ir izdalīti divi kontrolleri, kas principiāli mijiedarbojas:

- EVCC – Electric Vehicle Communication Controller – kustīgā līdzekļa komunikācijas kontrolleris, piemēram, EV;
- SECC – Supply Equipment Communication Controller – komunikācijas kontrolleris, kas nodrošina vairākas piekļuves vietas (apgabalus) enerģijas pārraides līdzekļiem; var būt saistīts vienlaikus ar daudziem EVCC, kā arī ar citām tīkla iekārtām un datu avotiem un uztvērējiem.



4.12. att. Komunikācijas kontrolleri EVCC un SECC komunikācijas tīklā V2G [36]

4.12. attēlā ir parādīti objekti (actor) atbilstoši standartam 15118 -1, starp kuriem tiek nodrošināta informatīva tīkla mijiedarbība un komunikācijas kontrolleru vieta. Aprakstītā funkcionālā tīkla arhitektūra izraisa nepieciešamību īstenot komunikācijas kontrolleros un citos objektos protokolu steku, atbilstošu standartam 15118 -2. Galvenais to komplekts ir parādīts 4.13. attēlā.



4.13. att. 3. -7. līmeņa protokolu steka pamata komplekts atbilstoši ISO 15118 [35]

Standarta 15118-2 materiāli par protokoliem un bāzes signalizāciju (BS) ir ļoti plaši un dažādos apskatos tiek traktēti neviennozīmīgi.

Pašlaik ir aktuāls jautājums par protokolu steka praktiskās realizācijas iespējamību un vienotības analīzi, kas tiek piedāvāti dažādiem V2G tipa sistēmu variantiem. Pirmkārt, acīmredzot nav pilnībā atrisināti Physical un Data Link tehnoloģiju un protokolu līmeņu jautājumi, jo šajos līmeņos objektam, kas atrodas kustībā, ir nepieciešams izmantot datu bezvadu pārraides tehnoloģijas. Dažās analīzēs apakšējos 2 līmeņos vispirms tiek aplūkotas PLC tipa (Power Line Communication) tehnoloģijas datu pārraides kanāliem starp EVCC un SECC komunikācijas kontrolleriem.

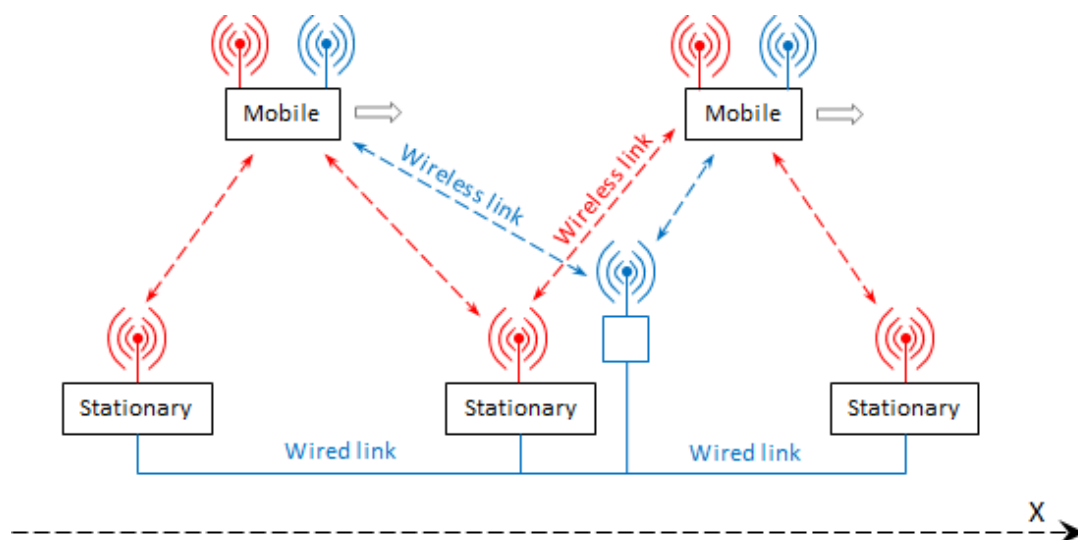
ISO 15118-1,2 standartu materiālu analīze no to pielietojamības WPT-V2G tipa sistēmās ļauj secināt:

- informācijas procesi un plūsmas, datu pārraides tīkla arhitektūra, komunikācijas objekti, tipveida lietošanas gadījumi (used cases) līmeņos OSI Level 7 – Level 3 V2G WPT – V2G sistēmās ir adekvāti un ISO 15118 standarts ir piemērojams šādu sistēmu īstenošanā;

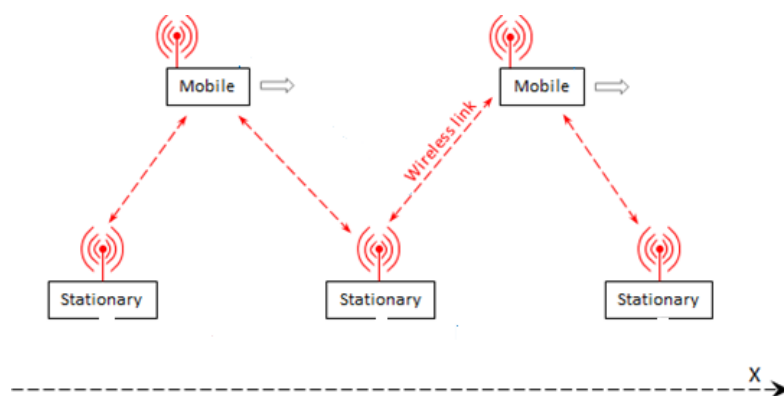
- viena no svarīgākajām lomām komunikācijas sistēmā V2G ir EVCC transportlīdzekļa komunikācijas kontrollerim, (kā arī enerģijas pārraides zonas Charge spot) SECC kontrollerim jāatbalsta protokolu steks. Steka sastāvā ietilpst gan tradicionālie dažādu līmeņu protokoli (DHCP, HTTP, TLP, TCP/IP u.tml.), gan specializētie protokoli (piemēram, V2GTP). Šāda steka esamība nav ierasta rūpnieciskajiem kontrolleriem, kas prasa papildus pūles šādu sistēmu realizācijā;
- minētie standarti praktiski neizvirza prasības, kuras ir raksturīgas reāla laika procesiem; stekā ietvertais UDP protokols netiek izmantots nevienā no tipiskiem gadījumiem;
- apakšējie mijiedarbības līmeņi (Level 2 – Level 1 saskaņā ar OSI) pagaidām nav pilnībā standartizēti; tajos tiek paredzēta vieta datu bezvadu pārraides tehnoloģijām, kuras nepieciešamas, lai pārraidītu enerģiju uz kustīgiem objektiem.

Komunikācijas tīkla īstenošana sakariem ar kustīgajiem objektiem

Kā bezvadu komunikācijas tīkla modelis WPT-V2G sistēmā ar kustībā esošiem objektiem no pilnā arhitektūras risinājuma, kas parādīts 4.14. attēlā, ir izvēlēts variants, kas vispirms nodrošina autonomo mijiedarbību starp kustīgajiem un stacionārajiem moduļiem. Atšķirībā no standarta ISO 15118 vispārīgās arhitektūras, aprakstītas iepriekšējā nodaļā, komunikācijas risinājums ir vienkāršots un tas ir atspoguļots 4.15. attēlā.



4.14. att. Datu pārraides komunikācijas tīkls sistēmā WPT-V2G ar kustībā esošiem objektiem (EV)



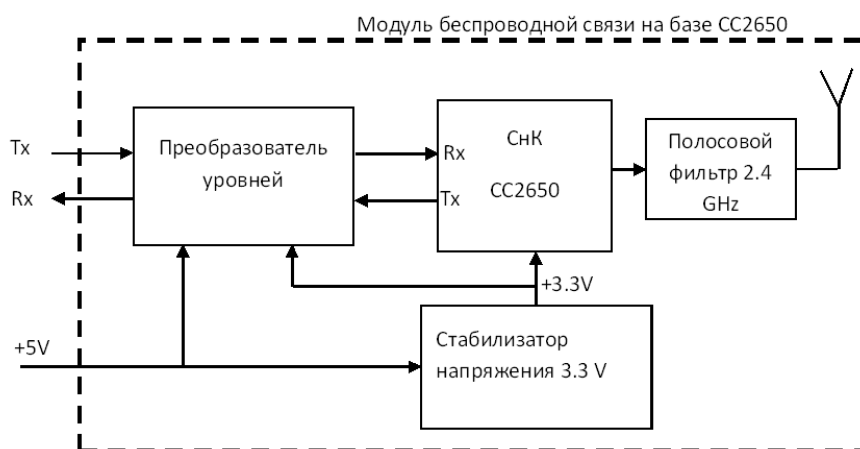
4.15. att. Darbā realizētais datu pārraides tīkls

Modeļa komunikācijas tīklā tiek izmantota tikai viena bezvadu tehnoloģija. Atbilstoši iepriekš veiktajai analīzei par prototipa bezvadu tehnoloģiju izvēlēta specifikācija 802.15.1 LE, kas ļauj iegūt atsevišķiem savienojumiem šādus raksturlielumus:

- pieslēgšanas laiks tīklam aptuveni 6 ms;
- neliela garuma (garums aptuveni 10 Byte) paketes minimālais pārsūtīšanas laiks aptuveni 1,25 ms, ja slodze uz savienojumu nav lielāka par 32 Kbps.

Modeļa komunikācijas tīklā tiek izmantoti viena tipa bezvadu komunikācijas moduļi.

Kā bezvadu sakaru ierīce WPT sistēmām tika izvēlēta kompānijas TI SimpleLink moduļu saime, datu bezvadu pārraides mezgls tika izveidots uz mikroshēmas CC2650 bāzes [37]. Moduļa funkcionālā shēma ir parādīta 4.16. attēlā. Moduļa principiālā shēma dota 3. pielikumā.



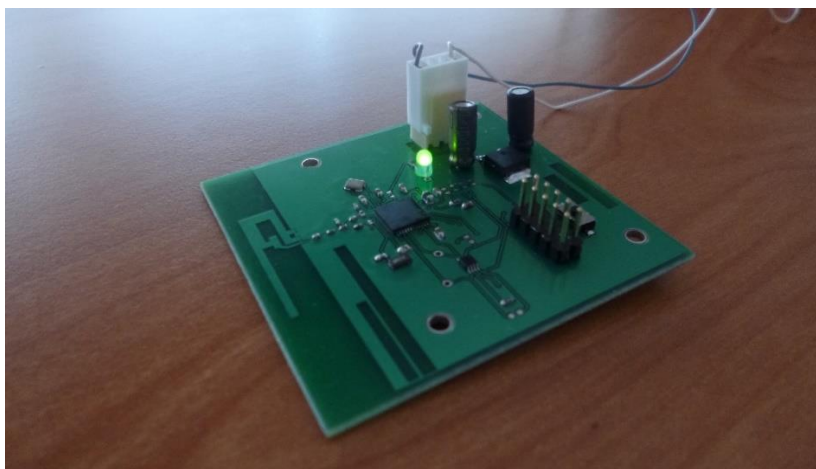
4.16. att. Radiosakaru moduļa funkcionālā shēma uz SnK CC2650 bāzes

Lai iegūtu uz SimpleLink bāzes veidota bezvadu mezgla vislabākos darba rādītājus, ražotājs iesaka izmantot rekomendāciju kopumu mazas jaudas radio moduļu projektēšanai [38]. Uz pamata rekomendācijām var attiecināt:

- Barošanas bloķēšanas kondensatoru esamība
- Radiotrakta sakaru līniju minimālais garums [39]
- 0402 izmēra komponenti radio traktam
- Simetriskās sakaru līnijas radiotrakta ieejas un izejas ķēdēm
- Zemes slāņa esamība zem radiotrakta signālu līnijām
- Nav zemes poligona zem antenas.

Modulis ir paredzēts ārējai barošanai 5V. Barošanas sprieguma samazināšanai uzstādīts stabilizators BD33KA5FP-E2 ar izejas spriegumu 3,3 V. Cīņai ar parazitiskiem traucējumiem uzstādīti vairāki bloķēšanas kondensatori.

Programmēšanai un čipa atklūdošanai JTAG kontakti izvadīti uz 10 kontaktu savienotāju. Pieslēgšanai pie vadošā kontrollera uz J3 savienotāju caur līmeņu pārveidotāju izvadīti asinhronā virknes interfeisa izvadi. Nullēšanas ieejai pieslēgta laika aiztures ķēde ar nullēšanas pogu. Kā filtrs izvēlēts TI rekomendētais balanss joslas filtrs. Izveidotais modulis ir parādīts 4.17. attēlā.



4.17. att. Izgatavotais modulis

Bezvadu sakaru moduļa darba testēšana

Izstrādātās shēmas plates darba pārbaude ar RF Studio utilītu [40].

Eksperimenta nosacījumi:

- Kā uztvērējs un raidītājs tika izmantoti izstrādātie moduļi
- Kā trokšņa avots tika izmantots CC2650EMK-7ID modulis
- CC2650EMK-7ID un izstrādātās plates izstarošanas līmeņu salīdzināšanai izmantots spektra analizators Hameg HMS3000
- Pakešu bojājumi tika novēroti kanālā punkts-punkts; pārraides modulis ģenerēja paketes ar norādīto intervālu (2ms) un norādīto “signāla” jaudu; uztvērējmodulis uztvēra paketes, fiksējot to zudumu (pārraidāmās paketes tika numurētas) vai paketes bojājumu, veicot tās pārbaudi pēc uztveršanas; paketes garums bija fiksēts 18 Byte (MAC līmenī bez preambulas);
- Moduļi tika izvietoti 1m attālumā viens no otra; moduļos tika izmantots viens un tas pats frekvences kanāls (38. kanāls – kanāls BT LE vadībai);
- Telpā, kurā notika eksperiments, tika maksimāli samazināta ierīču aktivitāte, kuras izmanto to pašu ISM frekvenču diapazonu (2,4 GHz), taču šādas „interferences” trūkums pilnībā netika nodrošināts.

Izstrādāto komunikācijas moduļu testēšanas gaitā tika noteikti **Packet Loss Ratio** (att. 4.18) un **Packet Error Rate** (att. 4.19) raksturojumi.

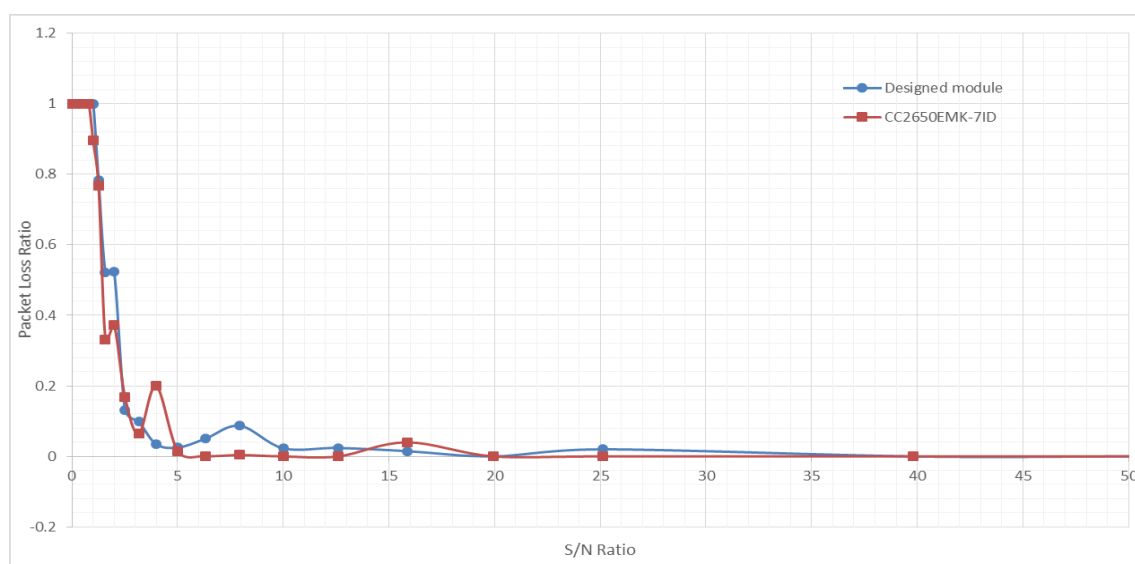
RSSI līmeņa mērījumi parādīja, ka izstrādātā komunikācijas moduļa signāla jauda ir par 5 mdB mazāka nekā modulim CC2650EMK-7ID, kas, iespējams, ir radiotrakta un antenas līnijas impedances nepietiekamas saskaņotības rezultāts.

4.2. tabula

Packet Loss Ratio izstrādātajam komunikācijas modulim atkarībā no attiecības signāls/troksnis

Noise Power, dBm \ Signal Power, dBm	-12	-9	-6	-3	0	2	4	5
-12	1	1	1	1	1	1	1	1
-9	0.624	1	1	1	1	1	1	1
-6	0.043	0.45	1	1	1	1	1	1
-3	0.087	0.027	0.469	1	1	1	1	1
0	0.015	0.087	0.098	0.487	1	1	1	1
2	0.020	0.030	0.050	0.098	0.521	1	1	1
4	0.000	0.000	0.018	0.025	0.142	0.521	1	1
5	0.000	0.020	0.023	0.050	0.127	0.587	0.783	1

Lai salīdzinātu ar CC2650EMK-7ID moduli, izveidots grafiks, kas ataino attiecības signāls/troksnis ietekmi uz zaudēto pakešu daudzumu. Vienādu signāls/troksnis attiecību dati tika vidējoti izmantojot vidējo aritmētisko rādītāju.



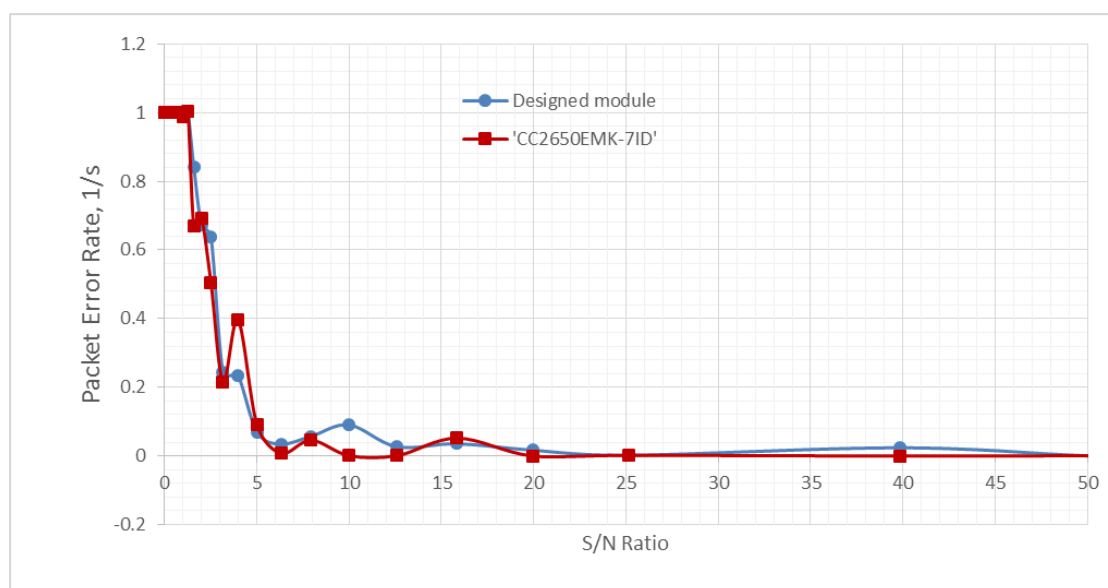
4.18. att. Packet Loss ratio atkarības grafiks no signāla/troksņa rādītāja

No atkarības redzams, ka projektētajam modulim piemīt Packet Loss Rate raksturojums līdzīgs kā modulim CC2650EMK-7ID. Redzams, ka pie lielas attiecības signāls/troksnis, zaudēto pakešu skaitu stipri ietekmē signāla atstarošanās, kura šajā eksperimentā ir būtiski atkarīga no operatora pozīcijas. Bojāto pakešu skaits sekundē ir parādīts 4.3. tabulā.

Iegūto kļūdaino pakešu skaits laika vienībā

Noise Power, dBm \ Signal Power, dBm	-12	-9	-6	-3	0	2	4	5
-12	500	500	500	500	500	500	500	500
-9	123	478	500	500	500	500	500	500
-6	150	210	500	500	500	500	500	500
-3	6	64	98	426	500	500	500	500
0	6	1	13	186	500	500	500	500
2	2	4	2	86	103	500	500	500
4	2	1	2	18	120	165	500	500
5	0	0	1	9	45	180	198	500

Lai salīdzinātu ar iepriekš pētīto CC2650EMK-7ID moduli tika izveidota Packet Error Rate raksturlīkne atkarībā no attiecības signāls/troksnis. PER parametrs tika aprēķināts, izmantojot formulu $PER = \text{Packet Loss Ratio} + (\text{Error Packet Rate}/\text{Packet Rate})(1 - \text{Packet Loss Ratio})$.



4.19. att. Packet Error Ratio atkarības grafiks no signāla/troksņa rādītāja

Iegūtā atkarība ir analogiska Packet Loss Ratio atkarībai, jo PER skaitu vairumā gadījumu noteiks tieši zaudēto pakešu skaits.

Testēšana tika veikta izmantojot izstrādātos bezvadu sakaru moduļus. Vadošā programma CC2650 tika uzrakstīta kā bāzi izmantojot izgatavotāja doto protokolu steku BLE-STACK 2.0.0.

Testēšanā tika izmantoti šādi Bluetooth ierīces savienojuma iestatījumi:

- Connection Interval – 7.5ms
- Slave Latency – 0
- Supervision Timeout – 100ms
- Sistēmas savienošana notika pēc shēmas – Just Works pairing with Bonding Enabled, t.i., bez cilvēka līdzdalības un ar šifrēšanas atslēgu iegaumēšanu.
- Tīkla topoloģija tika pieņemta 1-master (ierīce iniciators) un 7 – slave (ierīces kalpi)

Norādītie savienojuma parametri ļauj novērtēt maksimālo tīkla caurlaides spēju bāzētu uz Bluetooth LE.

GATT līmenī moduļi ir konfigurēti šādi:

- master – serveris
- slave moduļi – klienti.
- serverim bija 7 raksturlielumi 12 pa baitiem, kas tika izsniegti klientiem pēc pieprasījuma
- klienti pieprasīja raksturojumus nejauši izvēlētos laika momentos.

Testa gaitā tika noteikts: ierīču vidējais pieslēgšanas laiks, ierīču vidējais pārslēgšanas laiks un raksturojumu saņemšanas vidējais laiks. Visi mērījumi tika veikti ar Slave ierīcēm, bet rezultāti tika glabāti energoneatkarīgā atmiņā un tika nolasīti ar PC palīdzību testu beigās. Moduļu programmēšana notika, izmantojot atklūdotāju, kas iebūvēts platē SmartRF06. Moduļi atradās 30 cm attālumā viens no otra un tika savienoti ar barošanas vadiem. Pēc testēšanas rezultātiem tika iegūti šādi tīkla darbības rādītāji:

Pikotīkla darba parametri uz izstādāto moduļu bāzes

Ierīce	Saiknes izveides laiks, ms	Atkārtotas pieslēgšanas laiks, ms	Raksturojumu iegūšanas laiks, ms
Slave1	5.3	3	0,498
Slave2	5.8	2,8	0,687
Slave3	6	3	0,565
Slave4	6	2,5	0,645
Slave5	5.7	3	0,692
Slave6	5.5	3	0,423
Slave7	5.8	2.9	0,534
Vidējais lielums	5.73	2.89	0,58

Kā redzams pēc testa rezultātiem, tīkla darbība atbilst Bluetooth LE darba standarta parametriem. Šādam tīklam piemīt mazs pieslēgšanās un atkārtotas pieslēgšanās laiks, kā arī lietderīgas informācijas pārsūtīšana aizņem ļoti maz laika. Tomēr jāņem vērā, ka raksturojumu iegūšanas laiks rāda laiku no pieprasījuma līdz raksturojumu saņemšanai un neņem vērā tādu parametru kā Connection Interval, kurš veiktajā eksperimentā ir 7.5 ms. Attiecīgi nākamo raksturojumu pieprasījumu klients var veikt ne ātrāk kā pēc 7.5 ms. Tāpēc pie maziem datu apjomiem var uzskatīt, ka atjaunotus datus klients var saņemt ne ātrāk kā pēc 7.5 ms.

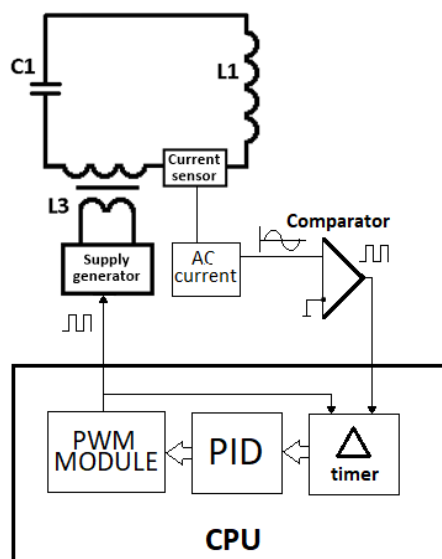
Bezvadu komunikācijas tīkla modeļa un komunikācijas moduļa prototipa izstrādes gaitā WTP-V2G sistēmai tika atrisināti šādi uzdevumi:

- Tīkla topoloģija
 - Izvēlēta novienkāršota (modeļa) bezvadu tīkla arhitektūra, kas nodrošina kustīgu un stacionāru objektu autonomu mijiedarbību uz viena tipa komutācijas moduļa bāzes;
- Bezvadu sakaru modulis
 - Izstrādājot komunikācijas modeli, veikta čipa CC2650 ražotāja rekomendāciju analīze attiecībā uz ierīču projektēšanu uz šī čipa bāzes.
 - Izstrādāta sakaru bezvadu moduļa struktūrshēma un montāžas plate.
 - Izveidoti 12 komunikācijas moduļi dinamiskajai bezvadu uzlādes sistēmai.

- Veikti izstrādātā moduļa Packet Loss Rate un Packet Error Rate parametru pētījumi, kā arī salīdzināti izstrādātā moduļa un tipveida moduļa CC2650EMK-7ID raksturojumi.
- Bezvadu linku testēšanas rezultāti parādīja, ka komunikācijas modelim piemīt apmierinoši raksturojumi attiecībā uz datu pārraidi un tas ir piemērots izmantošanai sistēmas WTP-V2G prototipa komunikācijas tīklā.
- Bezvadu tīkls
 - Konfigurēts bezvadu tīkls uz Bluetooth LE tehnoloģijas bāzes
 - Testēts izvēlēta tīkla darbs un iegūti tīkla darba laika raksturlielumi
 - Iegūtie laika raksturlielumi pierāda uz Bluetooth LE bāzes veidotā tīkla pielietojamību WPT sistēmās.

4.5. Frekvences fāžu automātiskās pieskaņošanas sistēma

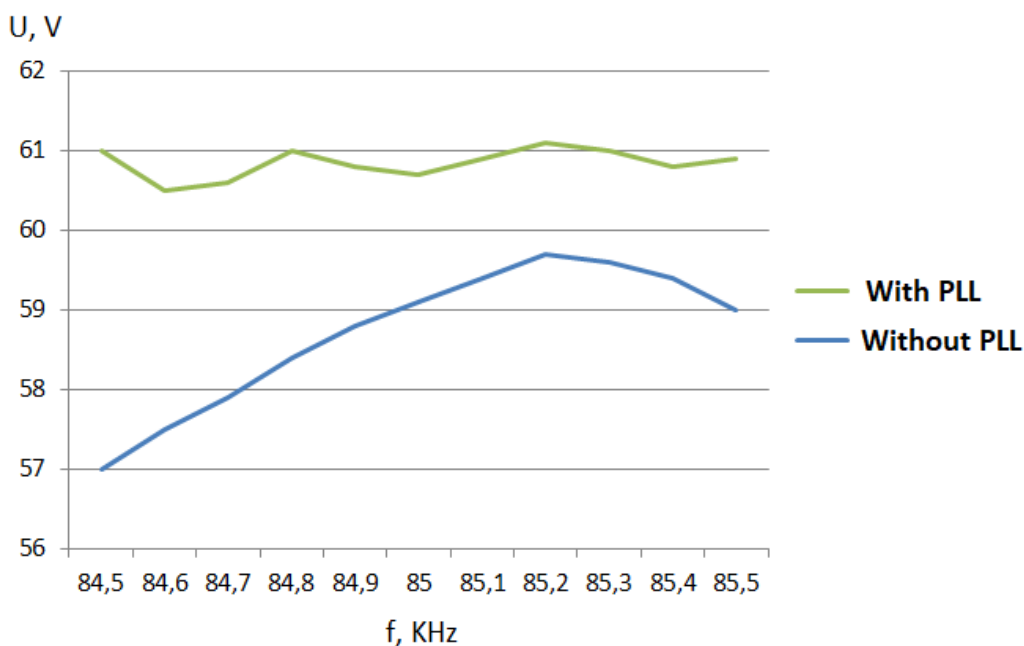
Kapacitātes korekcija svārstību kontūrā, izmantojot kapacitātes magazīnu, rada iespēju pieskaņot rezonanses frekvenci ar 500 Hz soli. Tomēr, lai precīzāk iestatītu ierosmes ģeneratoru uz pašreizējo kontūra rezonanses frekvenci un kontrolētu to, pārraides modulos tika izmantota frekvences fāžu automātiskās pieskaņošanas sistēma.



4.20. att. Frekvences fāzes pieskaņošanas sistēma

Kā zināms, rezonanses frekvencē strāva un svārstību kontūru spriegums sakrīt fāzē. Ja strāva sāk apsteigt spriegumu vai otrādi, tas liecina, ka kontūra rezonanses frekvence ir augstāka vai zemāka par pašreizējo, bet fāzu starpības lielums starp strāvu un spriegumu ir atkarīga ar no frekvenču nobīdes lieluma. Minētā īpašība ļauj izmantot šos datus, lai precizētu ierosmes ģeneratora frekvences pieskaņošanu svārstību kontūra rezonanses frekvencei. Frekvences fāzes automātiskās pieskaņošanas sistēmas (phase locked loop – PLL) struktūrshēma ir sniegta 4.20. attēlā. PLL ir ārējs komparators un strāvas sensors svārstību kontūrā, pārējās tās funkcijas tika īstenotas ar programmaparatūras metodi dsPIC33FJ64GS610 mikrokontrolierī. PLL pamatā ir taimeris, kas uzskaita aizturi starp strāvu un spriegumu. To iedarbina signāls no PWM procesora moduļa, bet apstādina ārējā komparatora signāls. Savukārt, komparators, izmantojot bezkontakta sensora strāvu, nosaka strāvas pārejas momentu svārstību kontūrā caur nulli. Taimera vērtību izmanto PID algoritms, lai veiktu moduļa PWM perioda korekciju.

Procesora dsPIC33FJ64GS610 aparatūras taimera izšķirtspēja ir 8 ns, kas teorētiski rada iespēju pieskaņot 85 kHz rezonanses frekvenci ar precizitāti līdz $8 \cdot 10^{-4}$ hercam. Tomēr praksē, ņemot vērā trokšņu klātbūtni, komparatora atbalsta sprieguma nestabilitāti un citus iemeslus, izdevās realizēt aptuveni 0.2 hercu pieskaņošanas precizitāti. Šī precizitāte tika novērtēta empīriski, izmantojot frekvenču mērītāju MASTECH MS6100.

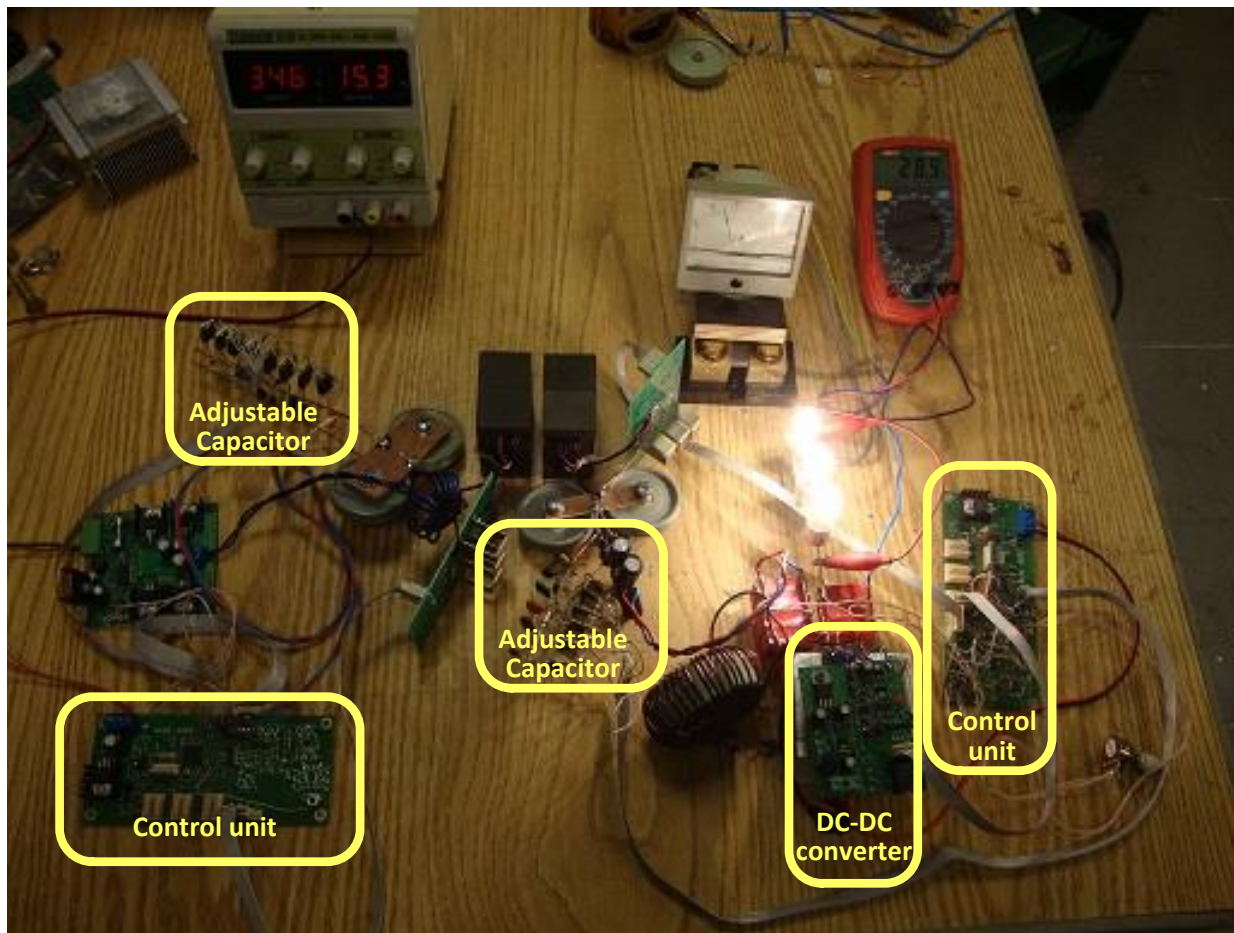


4.21. att. Sistēmas darba salīdzinājums ar PLL un bez

PLL sistēmas darbības pārbaude tika veikta, izmantojot maza mēroga prototipu, tā aprakstīta iepriekšējā nodaļā. Iekārtas uztvērējkontūrs tika nomainīts ar tukšu serdi bez spoles, kas izmēģinājumu laikā tika pārvietots, lai iegūtu dažādas pārraides kontūra rezonanses frekvences vērtības. PLL darbs tika vērtēts, pēc sprieguma amplitūdas vērtības pārraides kontūrā atkarībā no sistēmas rezonanses frekvences. Testēšanas rezultāti ir parādīti 4.21. attēlā. Zilajā grafikā ir redzams sistēmas darbs bez PLL, pēc grafika lūzuma punkta redzams, ka ierosmes ģenerators frekvence ir 85.2 kHz, bet starpība starp maksimālo un minimālo amplitūdu ir 2.7 volti jeb 4.5% no maksimālās sprieguma amplitūdas vērtības. Tajā pašā laikā, zaļajā grafikā, redzams, ka PLL sistēma atseko rezonanses frekvences izmaiņas, un sprieguma amplitūdas vērtības starpība ir 0.6 volti jeb 1% no maksimālās. Grafikos arī ir redzams, ka minimālā amplitūdas sprieguma vērtība, strādājot ar PLL sistēmu, ir lielāka par maksimālo amplitūdas spriegumu, nekā strādājot bez tās, par aptuveni 1.2%. Analizējot iegūtos rezultātus, tika secināts par PLL izmantošanas nepieciešamību precīzai kontūru pieskaņošanai.

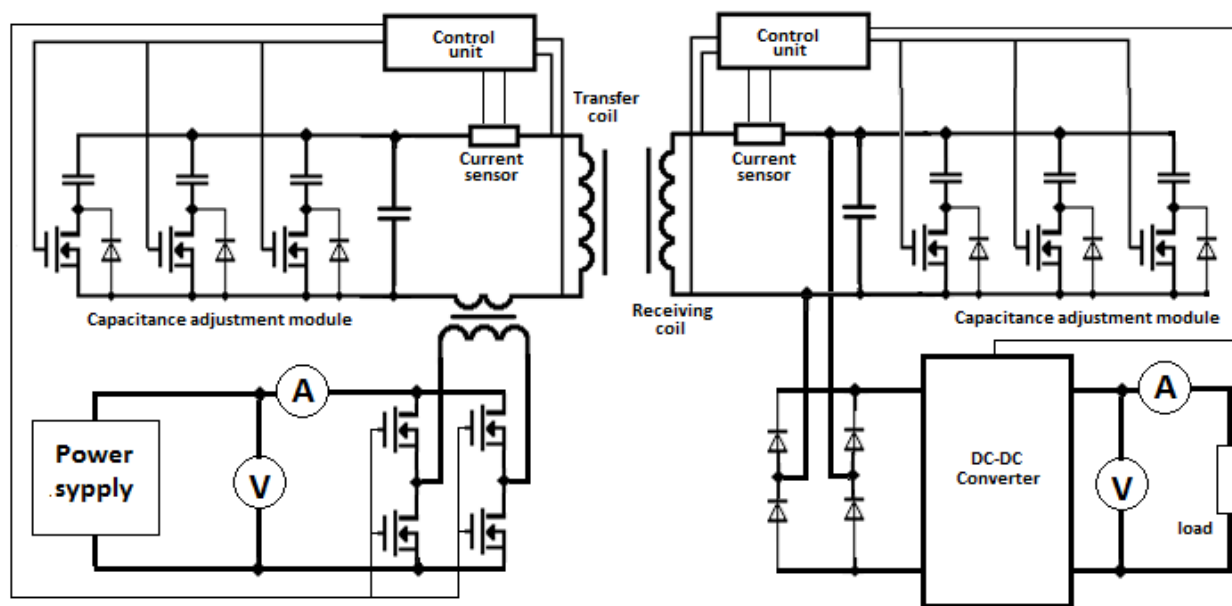
4.6. Maza mēroga prototips

Piedāvātās enerģijas pārraides indukcijas rezonanses sistēmas parametru regulēšanas metodes tika eksperimentāli izpētītas ar nelielas jaudas prototipu (4.22. attēls). Maza mēroga prototipa blokshēma ir redzama 4.23. 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 pārraides jauda ir 60 W. Raidītāja sastāvs: laboratorijas enerģijas avots ar iebūvētu strāvas un sprieguma mērīšanas funkciju, barošanas ģenerators, izpildīts lauktranzistoru H-tilta veidā, pārraides spole, kas uzlīta uz ferīta serdes FERROXCUBE E71/33/32 ar 20 licendrāta vada vijumiem un šķērsgriezuma laukumu 4 mm², pamatkontūra 6,6 nF kondensators, papildus kondensatoru komutācijas sistēma, strāvas sensors, kas ieslēgts pārraides rezonanses kontūrā, kā arī vadības modulis uz mikrokontroliera bāzes.



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

Uztvērēja sastāvs: spole, pamatkontūra kondensators un papildus 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 DC-DC pārveidotāja un pastāvīgas slodzes no trim virknē savienotām kvēlspuldzēm 12V-2A, kā arī vadības moduļa uz mikrokontrollera bāzes. Slodzes ķēde ietver arī strāvas indikatoru un ciparu voltmetru, lai noteiktu slodzē nododamās jaudas.

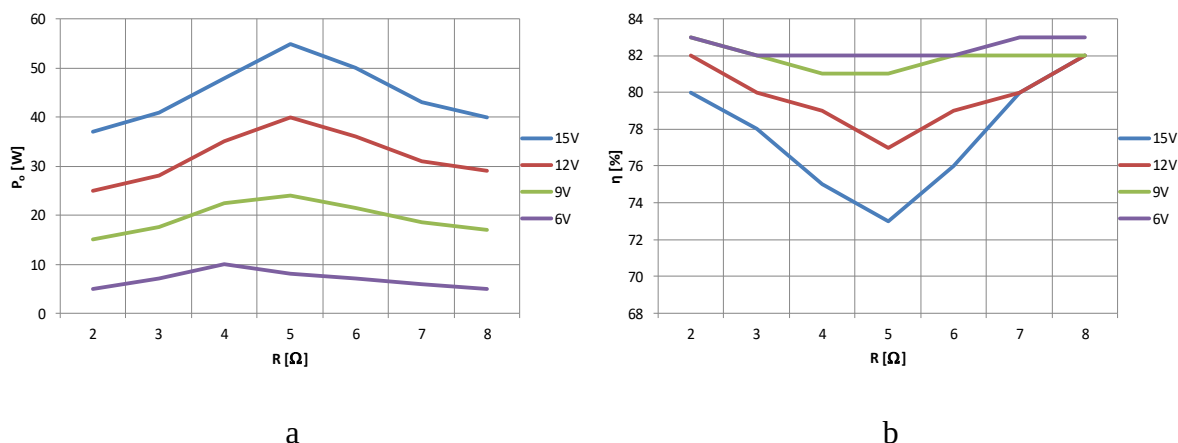


4.23. att. Maza mēroga prototipa blokshēma

Eksperimentālā iekārta ir īstenota, izmantojot iepriekš aprakstīto rezonanses frekvences automātiskās iestatīšanas algoritmu. Raidītāja un uztvērēja rezonanses kontūru korekciju veic, izmantojot regulējamu 8 pakāpju kondensatora bateriju. Šo elementu kapacitāte ir no 50 līdz 6,4 nF. Tas nodrošina papildu kapacitāti diapazonā no 0 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 papildus pretestību ar elektronisko stabilizāciju. Veicot eksperimentus, slodzes pretestība tika izvēla manuāli no 2... 8 Ω diapazonā ar 1 Ω soli.

Eksperiments tika atkārtots 4 reizes – ar barošanas ģeneratora spriegumu 6, 9, 12 un 15V. Katrai sprieguma vērtībai ir veikts eksperiments pie dažādām papildus slodzes vērtībām, kas ir ieslēgtas virknē galvenajai. Katram mērījuma punktam tika mērīta pārveidotāja ieejas strāva, kā arī slodzes spriegums un strāva. Pamatojoties uz mērījumos iegūtajiem datiem, tika aprēķināta pārveidotāja izejas jauda (4.24. a attēls) un tā enerģētiskā efektivitāte (4.24. b attēls). 3 W pastāvīgā jauda, ko patērē mikrokontrolleru vadības bloki un elektroniskie sensori, eksperimenta laikā tika ņemta vērā kā zudumi enerģijas pārraides sistēmā.



4.24. 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 (4.24. a attēls) tas ir maksimālais jaudas pārraides punkts. Šajā brīdī, pielietojot elektronisko slodzi, bija iespējams samazināt rezonanses kontūra Q kvalitātes faktoru, 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 kā paredzēts.

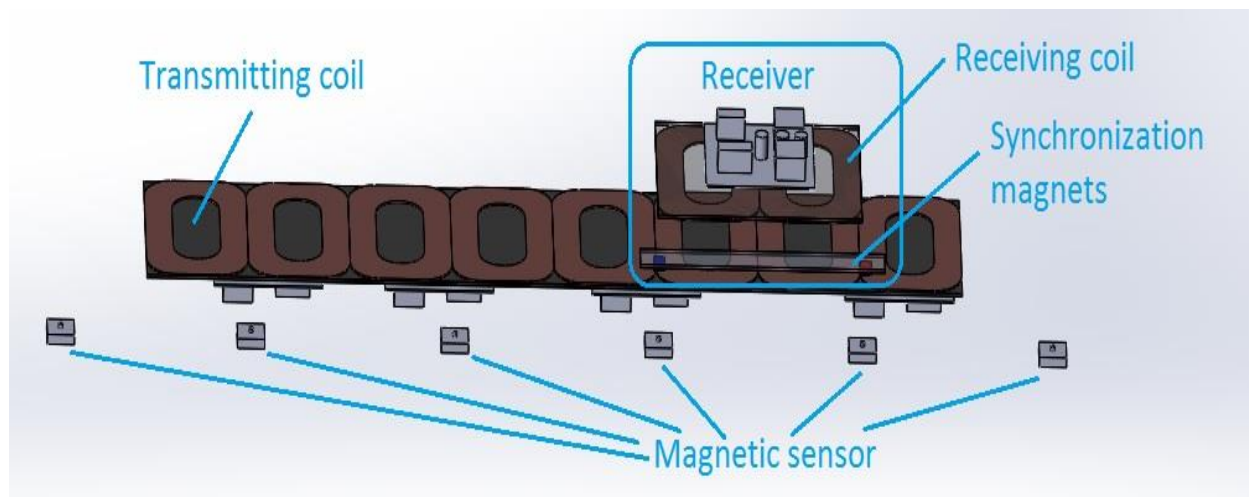
4.7. Dinamiskās enerģijas pārraides sistēmas prototips transportlīdzeklim kustībā

Šajā nodaļā ir 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 ir parādīta 4.25. attēlā, tajā ietilpst pārraides un uztveršanas moduļi, datu pārraides un sinhronizēšanas 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 birkām un ceļa segumā iemontētajiem sensoriem. Tā atšķiras no citām eksistējošām konstrukcijām [41,42].

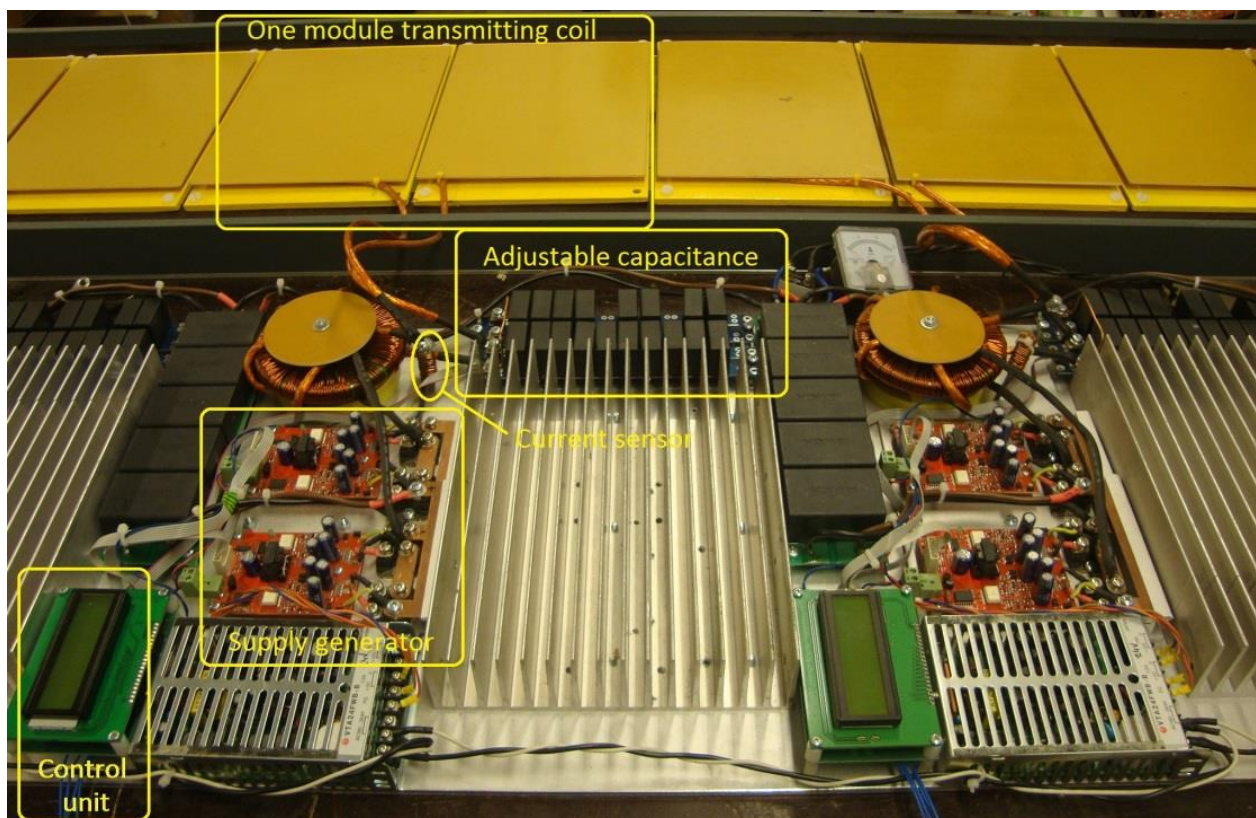


4.25. att. Elektriskā ceļa struktūra

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 uztvērējpoles. Tas ļauj izvairīties no elektromagnētiskajiem blakus izstarojumiem un paaugstina visas sistēmas darbības efektivitāti, jo darbojas tikai tā raidītāja daļa, virs kuras atrodas uztvērējs.

Prototips

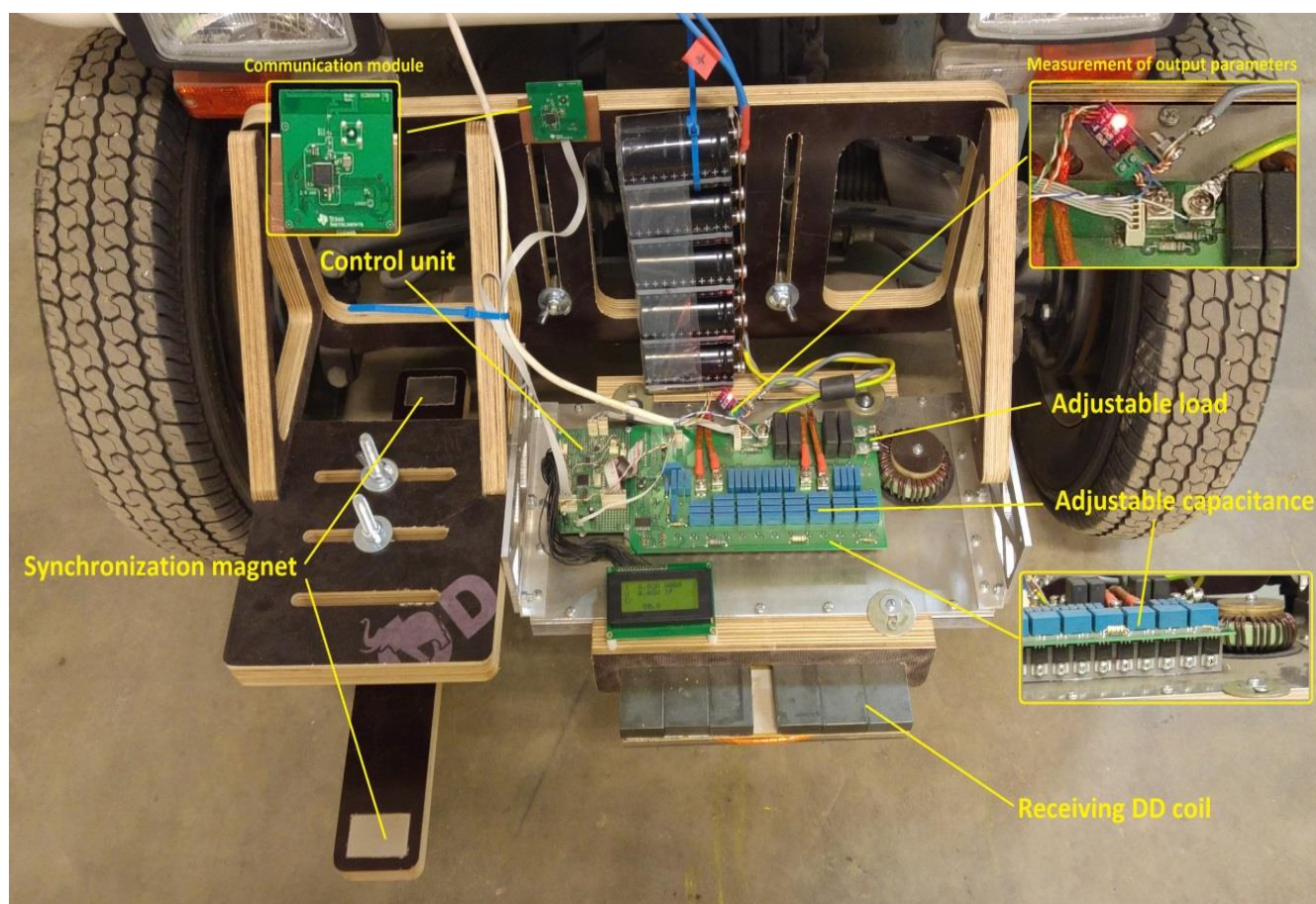
Elektriskā ceļa pārraides daļas kopējie izmēri ir 0.25 x 4.5 metri. Raidītājs sastāv no secīgi izvietotiem 12 DD spoļu moduļiem, kuru izmēri 250 x 400 mm. Ārējais izskats pārraides modulim ar vadošo elektroniku ir parādīts 4.26. attēlā. Katram modulim ir rezonanses frekvences pieskaņošanas shēma, barošanas ģenerators, vadības bloks, komunikācijas un sinhronizācijas sistēma, un tas var darboties neatkarīgi no blakus moduļiem. Prototipa darba frekvence ir 85 kHz.



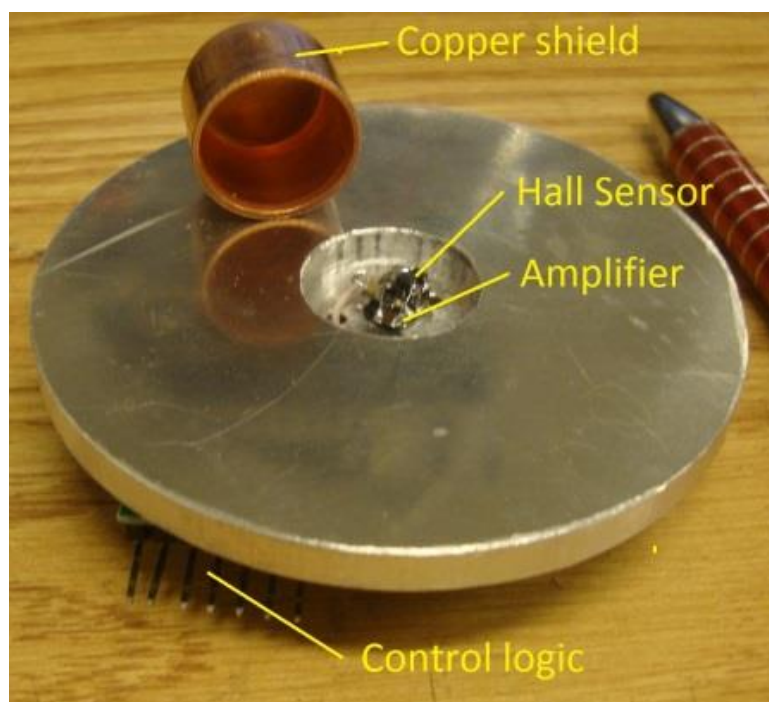
4.26. att. Pārraides modulis

Uztveršanas moduļa ārējais izskats ir redzams 4.27. attēlā. Uztveršanas modulis sastāv no DD spolēm, kuru izmērs ir 250 x 350 mm, rezonanses frekvences pieskaņošanas shēmas, slodzes regulatora, vadības bloka un komunikācijas moduļa.

Lai sinhronizētu segmentu ieslēgšanu, ir izmantotas magnētiskās birkas. 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 ar vara ekrānu. Katrs magnētiskais sensors ietver Holla devēja mikroshēmu, pastiprinātāju, komparatoru un digitālo loģiku. Sensoram ir magnētiskā lauka polaritātes izeja [43]. Katrs sensors ir pieslēgts diviem blakusesošiem segmentiem. Kad uz diviem blakus esošiem sensoriem vienlaicīgi iedarbojas dažādas polaritātes magnētiskais lauks, tas kalpo kā signāls, lai ieslēgtu nākamo segmentu un izslēgtu iepriekšējo. Sensora ārējais skats ir parādīts 4.28. attēlā. Uz celiņa malām ir uzstādīti papildus sensori, kas garantē pirmā spoļu pāra ieslēgšanu un pēdējā izslēgšanu. Sinhronizācijas sistēma novietota paralēli pārraides moduļiem 150 mm attālumā.



4.27. attēls, Uztveršanas modulis



4.28. att. Sinhronizācijas magnētiskais sensors.

Komunikācijas sistēma starp pārraides un uztverošo moduli veidota pēc 802.15.1 tehnoloģijas uz CC2650 čipa bāzes. Sakaru seanss iniciē moduli, kas atrodas enerģijas bezvadu pārraides uztvērējā. Uztvērējs un pašreizējais raidītājs apmainās ar datiem no abiem kontūriem, kondensatoru kapacitātēm, barošanas ģeneratora 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 pārraides punkts pašreizējai saites koeficienta vērtībai pārraides un uztvērējkontūrā.

Testēšanas rezultāti

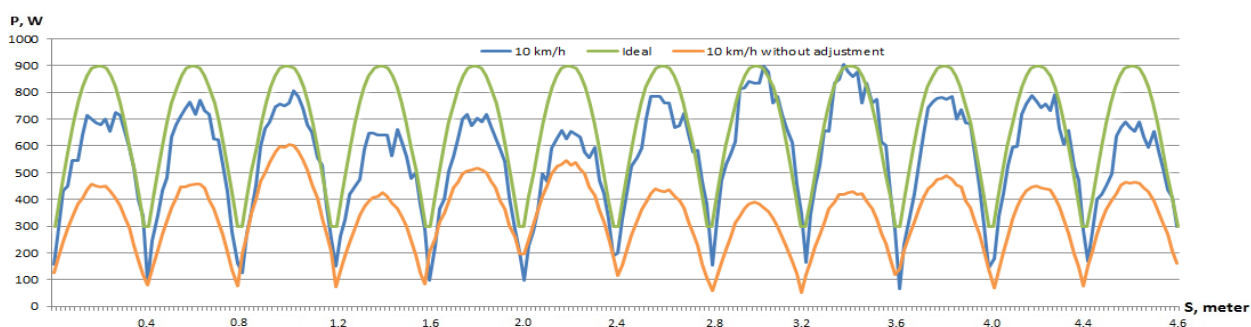
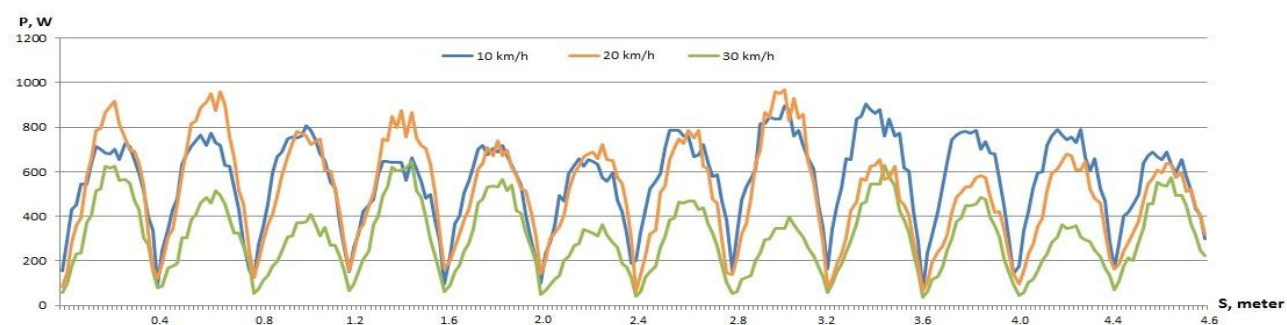
Eksperimenta laikā sistēmas darbs tika pārbaudīts kustībā. Uztveršanas modulis tika uzmontēts golfa auto, kas ar dažādu ātrumu brauca pa elektrisko ceļu. Golfa auto ātrumu regulēja ar kontrolleri, un tas varēja būt no 0 līdz 30 km/h. Eksperimenta gaitā tika mērīta strāva un spriegums elektroniskās regulējamās 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 voltu spriegumu. Sistēmas pārraides daļa tika barota no maiņstrāvas tīkla, izmantojot taisngriezi. Kopējais eksperimentālās iekārtas skats ir parādīts 4.29. attēlā.



4.29. att. Kopējais eksperimentālās iekārtas skats

4.30. 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, bet jaudas pārraides maksimums pārvietojas pa labi, kas liecina par parametru pieskaņošanas algoritma kavēšanos.

4.30.b attēlā – ir sniegts 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.



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

5. DISKUSIJA

Šī darba pamata daļā tika veikts pētījums par rezonanses spoļu īpašībām un raksturlielumiem. Tika izveidots stands, kas pēc saviem raksturlielumiem ir tuvs sērijveidā ražotajām automobiļu bezvadu uzlādes sistēmām. Mērķis ir izmantot līdzīgu izmēru un konstrukcijas spoles, lai pētījuma rezultātus varētu izmantot to optimizācijai. Šī pieeja sevi attaisnoja, jo tika atrasti konkrētās spoles konstrukcijas optimālie darba režīmi. Piemēram, tika konstatēts, ka DD spolei Nr. 1 (3.2. tabula), izmantojot pāri ar analogisku spoli, ir raksturlielumu lūzuma punkts un tai ir viena rezonanse 11 cm distancē, kur ir enerģijas pārraides lietderības maksimums. Tādējādi, veidojot stacionārās bezvadu uzlādes sistēmas, ir jāņem vērā šis fakts un starp spolēm jāizvēlas attālums, kas ir tuvs optimālajam.

Nozīmīgā stenda daļa bija IGBT tranzistoru tilts, kuram galvenokārt tika izvirzītas ātrdarbības prasības, jo bija paredzēts veikt eksperimentus 85 kHz un 145 kHz frekvencēs. Tranzistoriem arī tika izvirzītas prasības izturēt augstu spriegumu slēgtā stāvoklī, jo pārejas procesos var rasties pārsprieguma impulsi. Izvēlētais tranzistors FGL40N120AND paveica izvirzīto uzdevumu, taču 145 kHz frekvencē tika novērota tranzistora silšana, kas liecina par augstiem komutācijas zudumiem. No iepriekš minētā var secināt, ka enerģijas bezvadu pārraides sistēmām, kas darbojas 145 kHz frekvencē, ir jāmeklē ātrāki tranzistori, piemēram, no silīcija karbīda.

Vissarežģītākā un nozīgākā darba daļa bija rezonanses spoles. To izgatavošana saistīta ar virkni problēmu. Viena no tām bija vajadzīgās formas un izmēra ferīta plāksņu trūkums, tāpēc serdēs tika izmantoti mazgabarīta taisnstūra segmenti. Diemžēl nebija iespējams precīzi pielāgot klucšus vienu pret otru, starp tiem palika nevienmērīgas 0,1 mm spraugas. Tas palielināja magnētiskā lauka izkliedi un pasliktināja ekranējumu. Tiešu ietekmi gan uz spoles raksturlielumiem, gan uz visa rezonanses transformatora raksturlielumiem kopumā atstāj tinuma vads. Jo mazāki ir zudumi spoles darba frekvencē, jo spēcīgāka strāva var plūst un radīt spēcīgāku magnētisko lauku. Strāvu spolē ierobežo vada silšanas un dzesēšanas līdzsvars. Dēļ skin efekta dēļ strāva plūst gar vadītāja virsmu. 85kHz frekvencē virsējā slāņa biezums ir 0.1 mm, tāpēc ir svarīgi tinumā izmantot licendrāta vadus, kas sastāv no daudzām paralēlām dzīslām. Eksperimentos izmantotajiem licendrāta vadiem W-520x0.2-2L sasilšana virs 120 grādiem nozīmē izolācijas bojājumu, strāvu vadošo dzīslu saķepumu un spoles iziešanu no ierindas. Lai vēl vairāk paaugstinātu pārraides jaudu, jāsamazina zudumu apjoms

vados vai jānodrošina to dzesēšana. Tomēr, ņemot vērā, ka ar strāvas palielināšanos, zudumi vados pieaug kvadrātiskā atkarībā, tad kvalitatīvāka licendrāta izmantošana būs vēlmais risinājums.

Vispirms eksperimentu gaitā tika aprobēti dažādi attālumi starp rezonanses transformatora spolēm un tika noskaidrots, ka viens no lūzuma punktiem atrodas 10 cm attālumā, kurā pārraides kontūra AFR un visa rezonanses transformatora AFR kļūst vienrezonanses neatkarīgi no pamatrezonanses frekvences. Tālāka attāluma palielināšana starp spolēm izraisa magnētiskās saites samazināšanos starp tām, bet pārraides kontūra AFR tuvojas savai AFR, kāda ir ja starp rezonanses transformatora kontūriem nav savstarpējās ietekmes. Palielinoties attālumam starp spolēm, rezonanses transformatora AFR amplitūda samazinās, kas liecina par magnētiskā lauka līmeņa samazināšanos uztvērējpoles plaknē, bet rezonanses frekvence ir vienāda vai tiecas uz pārraides kontūra rezonanses frekvenci. Tas ļauj secināt, ka optimālā darba zona ir tad, ja attālums starp rezonanses transformatora pārraides un uztvērējpolēm ir 10-15 cm, tad tiek nodrošinātas maksimālās strāvas, sprieguma un jaudas vērtības uztvērējpusē.

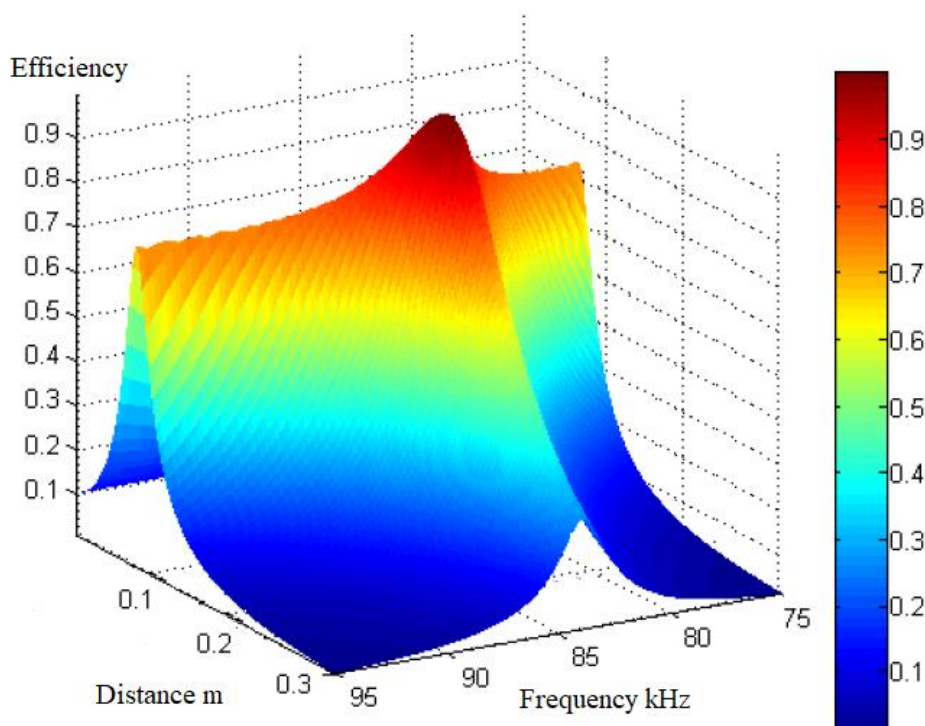
Salīdzinot dažādus spoļu veidus, tika noskaidrots, ka optimālā attāluma vērtības ir atkarīgas no induktivitātes spoļu izmēra, konstrukcijas un rezonanses frekvences. Viens no galvenajiem parametriem ir gredzenveida spoļu tinumu diametrs. No šī viedokļa DD spoli var iztēloties kā divas blakus stāvošas pretējas fāzes gredzenveida spoles. Turpmāk var mēģināt izmantot divas atsevišķas gredzeveida spoles DD spoles režīmā. Šāds risinājums ļaus samazināt zudumus, pārvietojot uztvērējpoles starp pārraides spolēm..

Attāluma palielināšana starp spolēm izraisa transformatora rezonanses frekvences samazināšanos, tā tiecas uz induktivitātes pārraides spoles rezonanses frekvenci. Viens no šī darba pamatrezultātiem ir izstrādāt šo izmaiņu automātisku kompensēšanu. Piedāvātā mehāniskā rezonanses frekvences pieskaņošanas sistēma uzrādīja neapmierinošu rezultātu pēc ātruma, pieskaņošanas diapazona un gabarītiem, tāpēc tika noraidīta. Pēc tam, kad tika piedāvāta kapacitātes magazīna komutācijas sistēma, izmantojot pusvadītāju atslēgas, darba rezultāti bija labi. Galvenā tās priekšrocība ir komutācijas ātrums, kā arī pieskaņošanas diapazons.

Attāluma palielināšana starp spolēm rada arī pārraides spoles strāvas un patērētās jaudas palielināšanos, kas izraisa tās konstruktīvo elementu sasilšanu un rezonanses frekvences un enerģijas parametru izmaiņas. Šis efekts rodas, jo ir paaugstināts kontūra kvalitātes faktors un papildus reaktīvās strāvas cirkulācija kontūrā izraisa zudumu palielināšanos vada pretestībā.

Ja attālums starp spolēm ir lielāks par optimālo, notiek jaudas samazināšanās slodzē ko izraisa magnētiskā lauka līmeņa samazināšanās uztvērējspoļu plaknē. Tas rada jaudas pārraides lietderības koeficienta samazināšanos, jo pārraides pusē patērētās jaudas lineāro palielinājumu ietekmē attālums. Tādējādi pieaug pārraides zudumi un krīt lietderības koeficients.

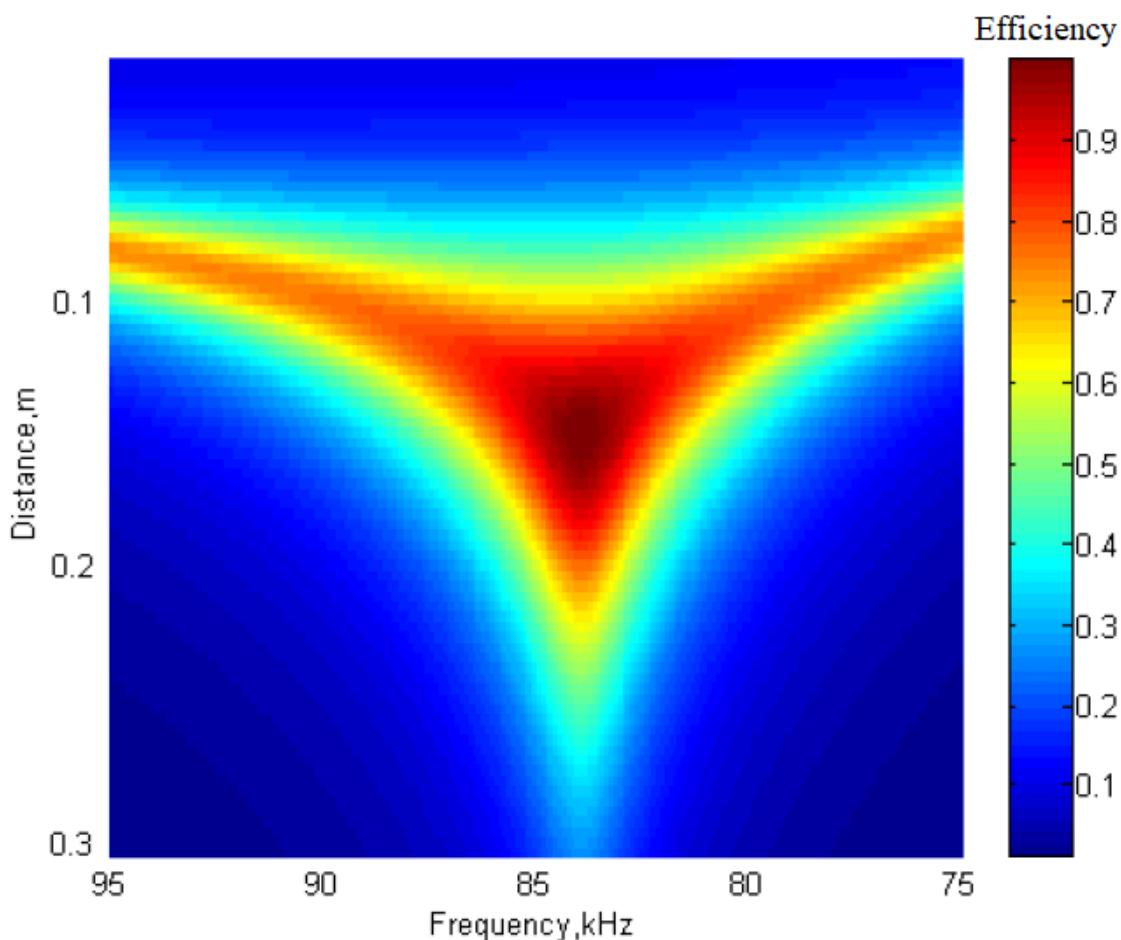
Ģenerators barošanas avota sprieguma palielinājums izraisa visu enerģijas parametru lineāru palielināšanos gan pārraides pusē, gan uztverošajā pusē. Tomēr pastāv ģenerators barošanas avota sprieguma vērtības, kuras pārsniedzot, jaudas pārraides lietderības koeficienta pieaugums palēninās. Eksperimentālajai iekārtai šādi spriegumi ir 50-70 B intervālā. Jaudas pārraides lietderības koeficienta palielināšana līdz vērtībām, kas tuvas 1, izmantojot pārraides kontūra ierosmes transformatora shēmu, ir iespējama, palielinot ierosmes transformatora transformācijas koeficientu un temperatūras stabilitāti pārraides pusē. Tas tiek panākts, pārraides spoli papildus dzesējot vai izmantojot resnāku vadu.



5.1. att. Rezonanses transformatora efektivitātes vispārinātā raksturojuma trīsdimensiju skats

Eksperimentu laikā konstatēts, ka reaktīvās strāvas pieaugums kontūrā ir drīzāk negatīva parādība, jo ar tās pieaugumu palielinās arī zudumi kontūra elementu aktīvajā pretestībā. Tā kā zudumiem ir kvadrātiska atkarība no strāvas, tā dēļ stauji samazinās lietderības koeficients. Savukārt spēcīgāka kontūra strāva rada jaudīgāku magnētisko lauku,

kas ļauj pārraidīt lielāku enerģijas apjomu lielākā attālumā. Tomēr, ja ir jaudīgāks lauks, ir lielāki arī zudumi tā izkliedes dēļ. Jaudas pieauguma un zaudējumu palielināšanās superpozīcijas dēļ efektivitātes raksturlielumam ir raksturīgs izliekums. Rezonanses transformatora lietderības koeficienta vispārinātā atkarība no frekvences un distances ir sniegta 5.1. attēlā, bet tās projekcija divdimensiju plaknē – 5.2. attēlā. Kā redzams šajos grafikos, 85 kHz rezonanses frekvencē ir ievērojama būtiska efektīvas darba distances pagarināšanās darba posmā, kas grafikā iekāsota sarkanā krāsā.



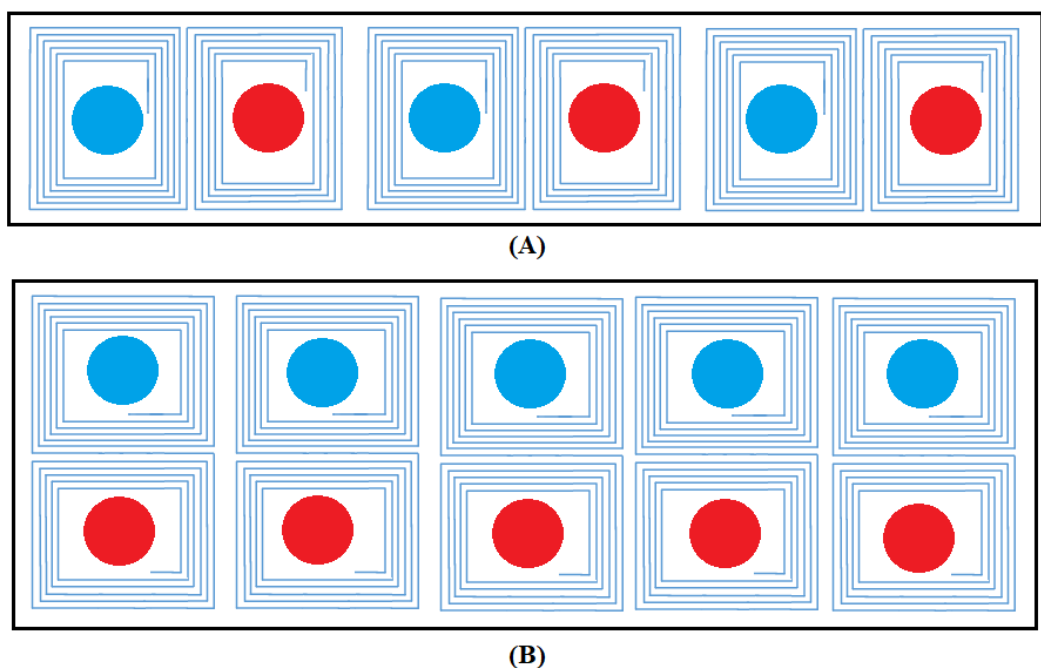
5.2. att. Rezonanses transformatora efektivitātes vispārinātais raksturojums

Sekundārā kontūra slodzes izmaiņas vispirms ietekmē pārraides jaudu. Ietekme uz lietderības koeficientu ir netieša caur pārraidīto jaudu uz sekundāro kontūru. Tā kā visi pārējie parametri nemainās, zudumi kontūrā paliek praktiski nemainīgi, ar pārraidītās jaudas pieaugumu sekundārajā kontūrā pieaug arī lietderības koeficients. Līdz ar to nobīdās arī efektīva darba punkts.

Eksperimentu gaitā tika noskaidrots, ka regulējamās slodzes spriegums ietekmē gan rezonanses transformatora izejas, gan ieejas enerģētiskos parametrus. Fiksētam attālumam

starp induktivitātes spolēm ir optimālas regulējamās slodzes sprieguma un regulējamās slodzes pretestības vērtības pie kurām tiek nodrošināta maksimālā izejas jauda un spriegums slodzē. Vadāmās slodzes izmantošana ļauj palielināt jaudas pārraides lietderības koeficientu, turklāt optimālos attālumos starp spolēm līdz vērtībām, kas ir tuvu vieniniekam. To iespējams izmantot praksē. Pie mazām ieejas pretestības vērtībām vērojama ieejas jaudas palielināšanās, bet pārraides lietderības koeficients pēc jaudas ir tāls no maksimālajām vērtībām. Stabilizācijas metode nav efektīva ja ir spēcīga saite (maza attāluma dēļ) starp induktivitātes spolēm. Dinamiskā ceļa prototipa īstenošana elektrotransportam kustībā radīja virkni inženiertehnisko uzdevumu. Pirmkārt, radās jautājums par DD spoļu novietojumu uz ceļa virsmas. Tās var izvietot 2 paņēmienos, kas atainoti 5.3. attēlā. Katram paņēmienam ir savas priekšrocības un trūkumi. Paralēli izvietotās DD spoles vienkāršāk sinhronizējas savā starpā un rada vienmērīgāku magnētisko plūsmu, jo vienas polaritātes poli atrodas blakus un uztvērējspoles pāreja starp pārraides spolēm notiek bez polu maiņas. Secīgi izvietotām spolēm ir lielāks pārraides tālums, ja pārraides kontūriem ir vienāds laukums, tomēr darba gaitā kontūriem ir lielāki pārraides jaudas zudumi, kas saistīti ar polu secību. Autors izvēlējās secīgu spoļu izvietojuma topoloģiju, jo vēlējās iegūt lielu pārraides distanci, izmantojot viņa rīcībā esošos materiālus, proti, ferīta klucīšus.

Blakus esošo induktivitātes spoļu sinhronizācija praksē izrādījās ļoti svarīgs uzdevums. Sākumā palaižot sistēmu, tika noskaidrots, ka blakus izvietotajiem augsta labuma kontūriem piemīt īpašība rezonēt vienam pēc otra, autors šo efektu nosauca par kaskādes rezonansi. Minētais efekts ļoti negatīvi ietekmēja sistēmas darbību, jo blakus esošie neaktīvie kontūri absorbēja nozīmīgu daļu aktīvā kontūra enerģijas, zudumi bija aptuveni 300 – 400 vati. Sākumā, lai cīnītos ar šo efektu, tika mēģināts attālināt blakus esošo kontūru darba frekvences maksimāli tālu vienu no otras, īstenojot eksistējošo frekvenču pieskaņošanas sistēmu. Tomēr tas pilnībā nenovērsa šo efektu, un shēmā tika iekļauts papildus IGBT tranzistors, kas noīsināja neaktīvā kontūra induktivitātes spoli. Tas radīja pozitīvu efektu, tomēr daļa no izkliedētā lauka plūda uz induktivitātes spoli un izkliedējās siltuma veidā uz vadiem un tranzistora, kas kopumā radīja aptuveni 40 vatu zudumu blakus esošajos kontūros. Pēc tam tika piedāvāts īsināt nevis spoli, bet kontūra kondensatoru. Tā rezultātā pārraides spole tika pieslēgta tieši salāgošanas transformatoram, un tas caur to plūstošo jaudu atdeva atpakaļ barošanas šinā. Tas ļāva samazināt zudumus divos blakus esošos kontūros līdz 15-20 vatiem, šajā gadījumā kaskādes rezonanses parādība neradās un pārējie ceļa kontūri nerezonēja.



5.3. att. Secīgais (a) un paralēlais (b) DD spoļu izvietojums un to sinhronizācija

Automobiļa pozicionēšanas sistēma elektriskajā ceļā bija vissarežģītāka visa projekta daļa. Tika nolemts neizmantot optiskos sensorus, jo tie ir ļoti jūtīgi pret piesārņojumu, ultraskaņas un mikroviļņu sensoriem nav nepieciešamās precizitātes, bet sensorā tīkla veidošana neietilpa projektā. Tāpēc kā sensors aktīvās spoļu sistēmas darbības pārslēgšanai tika izvēlēti holla sensori, kas reaģē uz transportlīdzeklī uzstādītiem pastāvīgajiem magnētiem. Eksperimentu sākumā tika izmantots tikai viens pastāvīgais magnēts, tad kad tas pārvietojās virs sensora, iepriekšējā spole izslēdzās, bet nākamā ieslēdzās. Tomēr šis variants izrādījās ļoti neuzticams, jo ja magnēta nobīde uz sāniem bija lielāka par 5 cm, sensors to vairs nejuta un pārslēgšanās starp spolēm nenotika. Lai atrisinātu šo problēmu, sistēmā tika izvietots otrs magnēts, abi magnēti bija izvietoti tādā veidā (skatīt 4.24. un 4.26. attēlu), lai pārslēgšanās brīdī tie atrastos virs dažādiem holla sensoriem. Lai atšķirtu vienu magnētu no otra, tie tika pagriezti ar dažādiem poliem pret devēju. Pretēji gaidītajam testu laikā nepamatota sensoru ieslēgšanās nenotika, tomēr bieži radās nepietiekama jutīguma situācijas, kad magnēts neiedarbojās uz sensoru. Kopumā šī sistēma nav pietiekami droša, lai to izmantu darbā, un ir nepieciešams to uzlabot vai aizvietot.

Lai efektīvi vadītu enerģijas bezvadu pārraides procesu, bezvadu sakaru kanālam jānodrošina aizture vadības komandu pārraidē 1 – 10 ms diapazonā, jo mazāka ir aizture, jo efektīvāka ir vadība. “Spēcīgās” kontūru saites posmā ($k_{sv} > 0,1$) vadības sistēmā ir paredzēts pārraides kontūra parametru periodisku izmaiņu process, pamatojoties uz uztverošajā kontūrā

mērītajiem parametriem. Šāda regulējuma intervāls > 1 ms. Projekta gaitā sakomplektētie komunikācijas moduļi ir droši. Īstenojot tīkla loģisko struktūru, kustīgais modulis tika pasludināts par vadošo, bet visi nekustīgie komunikācijas moduļi ieguva vadāmā statusu un kārtas numuru, kas atbilst spoles numuram ceļā. Elektromobilim virzoties pa ceļa virsmu, vadošais modulis reizi 20 ciklos aptaujā visus vadāmos moduļus un pēc magnētiskajiem sensoriem nosaka virs kuras spoles pašlaik atrodas uztverošais modulis, ar kuru turpmāk arī notiek apmaiņa. Šāda tīkla uzbūves topoloģija labi darbojas, ja kustīgais modulis ir viens, bet visi stacionārie ir zināmi un pieejami. Iespējamie risinājumi sarežģītāka tīkla veidošanai ir izklāstīti 4.6. nodaļā, to realizācija šajā darbā netika plānota. Tomēr jāuzsver, ka informācijas sistēmas veidošana, būs viens no svarīgākajiem virzieniem elektrisko ceļu infrastruktūras attīstībā.

Vēl viens svarīgs sistēmas darbības izaicinājums bija pastāvīgas slodzes nepieciešamība. Gadījumā, ja sekundārajā kontūrā pazudīs slodze, tad rezonanses parādību dēļ spriegums tajā var sasniegt kritisku vērtību un sabojāt shēmas komponentus un bojāt rezonanses spoli. Lai no tā izvairītos, eksperimenta ietvaros tika izmantots papildus slodzes rezistors ar $22\ \Omega$ pretestību. Primārais kontūrs ir mazāk pakļauts šai problēmai, jo caur salāgojošo transformatoru un IGBT tranzistoriem ir pievienots barošanas šinai.

Veicot elektrificētā ceļa prototipa praktiskos izmēģinājumus, tika noskaidrots, ka precīzi trāpīt ar elektromobili uz ceļa ir diezgan sarežģīti. Īpaši tas ir jūtams, ja tiek palielināts ātrums. Kā arī rodas problēmas ar spoļu pārslēgšanas sensoru darbību. No tā izriet, ka ceļam ir jābūt platākam vai arī tas jāizmanto vienlaicīgi ar autopilota tehnoloģiju.

Visa ceļa izmēģinājumos kopumā tika sasniegti labi rezultāti. Bija uzskatāmi parādītas darbaspējas gan idejai principā, gan arī izvēlētajiem konstruktīvajiem risinājumiem. Elektromobilim pārvietojoties pa ceļu, notika enerģijas pārraide visa ceļa garumā. Iegūtie rezultāti ir parādīti 4.29. grafikā. Analizējot tos, var secināt, ka kopumā pārraides kontūra un uztvērējkontūru parametru pieskaņošanas sistēma darbojas labi, ja elektromobiļa kustības ātrums ir neliels. Ja ātrums ir 30 km/h , sākas vadības algoritma aizkavējums, tas ir izskaidrojams ar to, ka, paaugstinot ātrumu, elektromobilis šķērsojot vienu spoļu pāri izmanto mazāku pieskaņošanas ciklu skaitu. PID algoritms nespēj uzņemt proporcionālo koeficientu, un sistēma nespēj attīstīt vajadzīgo jaudu. To var labot, izmantojot sarežģītāku vadības algoritmu parametru pieskaņošanai, tam būs nepieciešams ātrāks procesors.

Komerccēla konstrukcijas izstrāde ar dinamisko jaudas pārraidi

Zinot ogļūdeņraža degvielas patēriņu parastajiem transportlīdzekļiem, var aptuveni noteikt vidējo jaudu, kas tiek patērēta transporta kustībai. Viegļajam automobilim tas būs līdz 20 kilovatiem, autobusam un kravas automobilim līdz 60 kilovatiem. No tā var noteikt transportam nepieciešamās nododamās jaudas, ņemot vērā transportlīdzekļa degvielas patēriņu un akumulatora uzlādi. Viegļajām mašīnām tā ir 25 kilovatu, kravas – līdz 80kilovatiem.

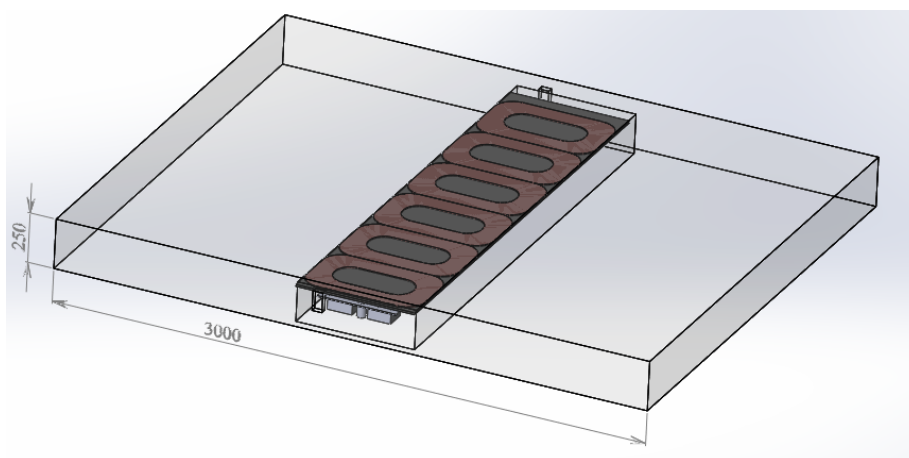
Palielinot DD spoļu ģeometriskos lielumus, pārraides jauda pieaug proporcionāli to platībai. Tādējādi palielinot prototipā izmantoto spoļu moduļa izmērus līdz 600 x 750 mm, var paredzēt pārraidāmās jaudas palielinājumu līdz 5 Kw. Turklāt maksimālais iespējamais attālums starp raidītāju un uztvērēju palielināsies līdz 300 mm. Izmantojot vienlaicīgi vairākus enerģijas uztveršanas moduļus, var iegūt nepieciešamo jaudu. Piemēram, viegļajam automobilim būs nepieciešami 5 moduļi ar kopējo jaudu 25 kilovati. Kravas transportam to skaits var būt līdz 20 gababaliem.

Ņemot vērā bezvadu uzlādes sistēmas kustībā prototipam darba gaitā izmantoto materiālu vērtības, var aprēķināt 1 km ceļa orientējošo vērtību. Aptuvenais izmaksu aprēķins ir parādīts 5.1. tabulā, vērtība norādīta euro. Ceļa segments ir sadalīts šādās daļās: spoles, serde, elektronika, konstrukcijas materiāli. Tabulā redzams, ka būtiska daļa no izmaksām ir ferīta serdei, taču masveida ražošanā gaidāms tās izmaksu kritums, jo tajā nav retu un dārgu materiālu. Tāpat gaidāms izmaksu kritums arī citiem komponentiem.

No konstruktīvā viedokļa visracionālākais sistēmas realizācijas veids ir tās integrācija betona plāksnē, kuras izmēri 3 x 12 metri un biezums 0,2-0.3 metri (skatīt 5.4. attēlu), kas stiegrota ar kompozītmateriālu un fibrošķiedru. No galiem plāksnēs būtu lietderīgi ierīkot spēka šinas savienojumus, lai savienotu blakus esošos elektrobarošanas segmentus. Segmentu ir lietderīgi padarīt pilnīgi neapkalpojamu, iespējams izveidot tehnoloģisku logu ar noslēgtu vāku, kas atrodas apakšā, lai veiktu pilnīgi demontētas plāksnes remontu darbnīcas apstākļos. Šādas konstrukcijas plāksne pārklās joslu visā platumā, kas novērsīs sistēmas nobīdi attiecībā pret ceļa segumu, grunts nosēšanos un garāmbraucošā transporta pastāvīgi mainīgās slodze dēļ, un ļaus izvietot joslu zīmes un transportlīdzekļu klātbūtnes sensorus ārpus spoļu magnētiskā starojuma.

5.1. tabula

	Modulis	12 metru segments (16 moduļi)	1km (84 segmenti)
Spoles	180	2880	241920
Serde	780	12480	1048320
Elektronika	600	9600	806400
Konstrukciju materiāli	160	2560	215040
Kopā	1720	27520	2311680



5.4. att. Autoceļa segmenta iespējamā konstrukcija ar iebūvētu uzlādes sistēmu kustībā

SECINĀJUMI

Darba sākumā tika formulētas šādas hipotēzes:

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

Balstoties uz pētījuma rezultātu, var izdarīt šādus secinājumus:

1. Pētījuma 2. nodaļā 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 SAF starojumu un induktīvās rezonances paņēmieni. Trolejvada sistēmām ir nopietnas mehāniskā kontakta nepilnības un strāvas pārraides atklāto daļu nolietojums, jutīgums pret piesārņojumiem un unifikācijas problēma dažādiem transportlīdzekļiem. SAF enerģijas pārraide šobrīd ir iespējama tikai teorētiski, jo trūkst nepieciešamās jaudas un gabarītu uztverošā taisngriežjantena (rectenna). Tāpēc šobrīd vienīgā praksē īstenotā enerģijas pārraides sistēma transportam kustībā ir induktīvās rezonances paņēmieni. Šajā darbā tas tika pierādīts praksē, īstenojot bezvadu ceļa segmentu bezvadu uzlādi transportam kustībā. Veicot 4.7. nodaļā aprakstītos eksperimentus, uz kustīgo transportlīdzekli tika pārraidīta aptuveni 600 vatu jauda.
2. Lai apstiprinātu otro hipotēzi, tika veikts pētījums, kas aprakstīts 3. nodaļā, tā pilnībā tika apstiprināta. Eksperimentāli tika pētītas rezonances 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 rezonances transformatora 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. Enerģijas bezvadu pārraides efektivitātes pētījums, izmantojot pārraides kontūra ierosmes metodi Nr. 1.
- h. Salīdzinošā jaudas novērtēšana, kas tiek nodota no dažādas konstrukcijas spoļu vienas laukuma vienības (īpatnējā pārraides jauda).
- i. Enerģijas bezvadu pārraides maksimālās efektivitātes stabilizācijas metodes izpēte, regulējot izejas spriegumu.

Grafikos 3.58., 3.59., 3.60. attēlā, var skaidri redzēt ekstrēmus, kas atbilst maksimālajai pārraides jaudai un maksimālajai lietderībai atkarībā no sekundārā kontūra slodzes parametriem. Tāpat ar eksperimentālās ierīces palīdzību tika apstiprināta iespēja regulēt rezonanses transformatora darbības režīmus, palielinot barošanas ģenerators spriegumu un sekundārā kontūra slodzes parametrus, kas detalizēti aprakstīts 3.5. nodaļā. Eksperimentos, izmantojot neliela izmēra prototipu, kas aprakstīts 4.4. nodaļā, uzskatāmi ir parādīta enerģijas bezvadu pārraides iestatījumu pieskaņošana automātiskajā režīmā.

3. Hipotēze pilnībā tika apstiprināta. No AFR grafika 3.19. attēlā var secināt, ka ja frekvences sānu nobīde ir 1 kHz, tad sistēma kļūst darba nespējīga. 4.2. nodaļā 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. Grafikos 3.58., 3.59., 3.60. attēlā 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 atainoti 4.29.b attēlā, tad pārraides jauda atšķiras divas reizes, strādājot ar parametru pieskaņošanu vai bez tās.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS UN CITU INFORMĀCIJAS AVOTU SARAKSTS

1. U.S. Department of Energy, (2010), "Alternative Fuels Used in Transportation", p.p: 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 e buses & 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-pryamo-seychas.html>)
8. Tsport100, (2013), "ABB unveil wireless electric bus with 15 sec Flash charging", from:
<http://www.electric-vehiclenews.com/2013/05/abb-unveils-wireless-electric-bus-with.html>
9. Herman K, (2012), "Siemens Plans to Clean Up Trucking With a Trolley Line", from:
<http://www.greentechmedia.com/articles/read/Siemens-Plans-to-Clean-Up-Trucking-with-a-Trolley-Line>
10. Ванке В. и др, (1977), "Проблемы солнечных космических электростанций", Успехи физических наук, т. 123, с. 633
11. О.Г. Вендик, И.А. Пахомов, (2005), "Напряженность электрического и магнитного полей в зоне Френеля микроизлучателя, составленного из электрического и магнитного диполей", Журнал технической физики, 2005, том 75, вып 11.
12. В.Ю. Смирнов, О.Р. Никитин, (2008), "Линейные Фазированные Антенные Решетки, Сфокусированные В Ближней Зоне", ISSN 1995-4565. Вестник РГРТУ. № Рязань, 2008
13. Technology & Maintenance Council's (TMC), (2013), "S.1 Electrical Study Group Information Report: 2013-2", from:

- http://www.truckline.com/ATA%20Docs/About/Organization/TMC/Documents/Position%20Papers/Study%20Group%20Information%20Reports/TMC_IR2013_2.pdf
14. J. Schneider T. Chair, (2013), "Wireless Charging of Electric and Plug-in Hybrid Vehicles", from:
http://bioage.typepad.com/files/SAE%20J2954%20Wireless%20Charging%20Dec%20%202010_2.pdf
 15. HEMIS,(2012), "ELECTRICAL POWERTRAIN HEALTH MONITORING FOR INCREASED SAFETY OF FEVs", from: http://www.hemis-eu.org/HEMIS_314609_D5-1_v2.pdf
 16. NPE, (2013), "Übersicht der Normen, Spezifikationen und Normungsgremien zur Elektromobilität", from: http://www.dke.de/de/std/e-mobility/Documents/NPE-Normungroadmap_DE_2.0a_Anhang%20D_%C3%9Cbersicht%20Normen.pdf
 17. 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
 18. Ahn, S. 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
 19. K. Takei, (2012), "Mid-range Wireless Power Transmission System Using Real-time Complex Impedance Control", PIERS Proceedings, Moscow, Russia, August 19 – 23, 2012
 20. Григорьев А.Д. (1990), "Электродинамика и техника СВЧ", М.: Высшая школа, 1990
 21. 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, Pages: 640 – 645
 22. 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, Pages: 2969 – 2978
 23. Маниктала С., (2008), "Импульсные источники питания от А до Z" Пер. с англ. К.: "МК-Пресс", СПб.: "КОРОНА-БЕК", 2008. 256с
 24. Семенов. Б. Ю. (2005), "Силовая электроника: от простого к сложному", М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 420с.
 25. Лабунцов В. А. (1987), "Энергетическая электроника: Справочное пособие", М.: Энергоатомиздат, 1987. 464с
 26. Гоноровский И.С. (1971), "Радиотехнические цепи и сигналы", М.: Советское радио, 1971

27. 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, Pages 33-60
28. 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
29. S. Aldhaher, 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, Pages: 5975 – 5982
30. Лысь В., и др, (2003), “Российский операционный усилитель КМОП с архитектурой rail-to-rail”, *Компоненты и технологии*, 2003, №8
31. FTA Report No. 0060, U. S. Department of Transportation, Federal Transit Administration. Review and Evaluation of Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Transit Applications. AUGUST 2014. <http://www.fta.dot.gov/research>
32. Introducing true electric mobility for a sustainable future. Bombardier Transportation, <http://primove.bombardier.com/media/publications.html>
33. Pieter Vorenkamp, Reinier Van Der Lee, Insun Van Loo “Increasing efficiency of wireless power transfer” U.S. patent number 8816638, issued in August 2014. <http://www.google.com/patents/US8816638>
34. Villa Gazulla et al. “AUTOMATIC METHOD FOR CONTROLLING A HIGH-FREQUENCY INDUCTIVE COUPLING POWER TRANSFER SYSTEM” U.S. patent number 20110074348, Pub. Date: Mar. 31, 2011. <http://www.google.com/patents/US20110074348>
35. Christoph Saalfeld, “E-Mobility – Vehicle2Grid interface”, 5. Vector-Kongress 2010, Daimler AG, Stuttgart, 01.-02.12.2010.
36. ISO TC22 and IEC TC69: ISO/IEC 15118 Road vehicles — Vehicle-to-Grid Communication Interface.
37. Texas Instruments Incorporated. CC13xx, CC26xx SimpleLink™ Wireless MCU. Technical Reference Manual
38. Texas Instruments Incorporated. Application Note AN098. *Layout Review Techniques for Low Power RF Designs*.
39. Audun Andersen. Design Note DN0007. 2.4 GHz Inverted F Antenna.
40. Texas Instruments Incorporated. SimpleLink™ Bluetooth® low energy CC2640 wireless MCU Software Developer’s Guide.

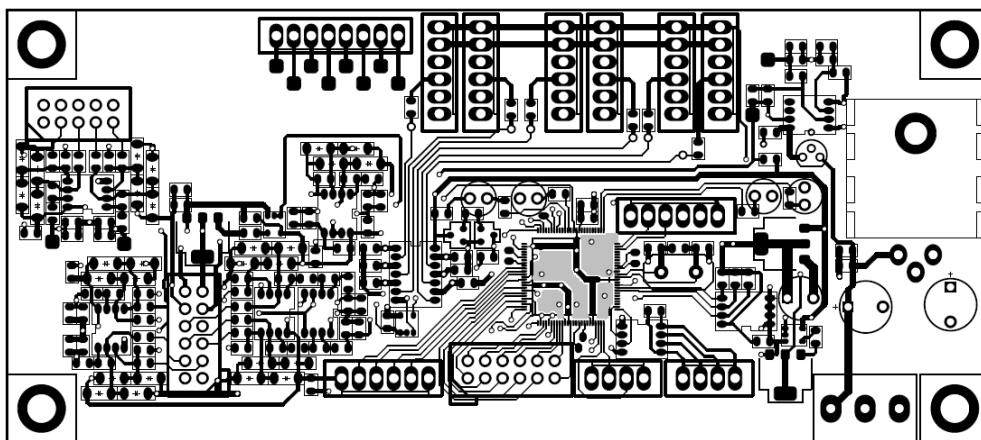
41. Buja, Giuseppe; Rim, Chun-Task; Mi, Chunting C. “Dynamic Charging of Electric Vehicles by Wireless Power Transfer” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS
Volume: 63 Issue: 10 Pages: 6530-6532 Published: OCT 2016
42. Debbou, Mustapha; Colet, Francois “Inductive Wireless Power Transfer for Electric 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
43. Комлик В.В. (1978), “Радиотехника и измерения”, Изд-во ‘Вища школа’, Киев, 1978

Vadības bloka shēma, kas izveidota uz mikrokontroliera dsPIC33FJ64GS610 bāzes.

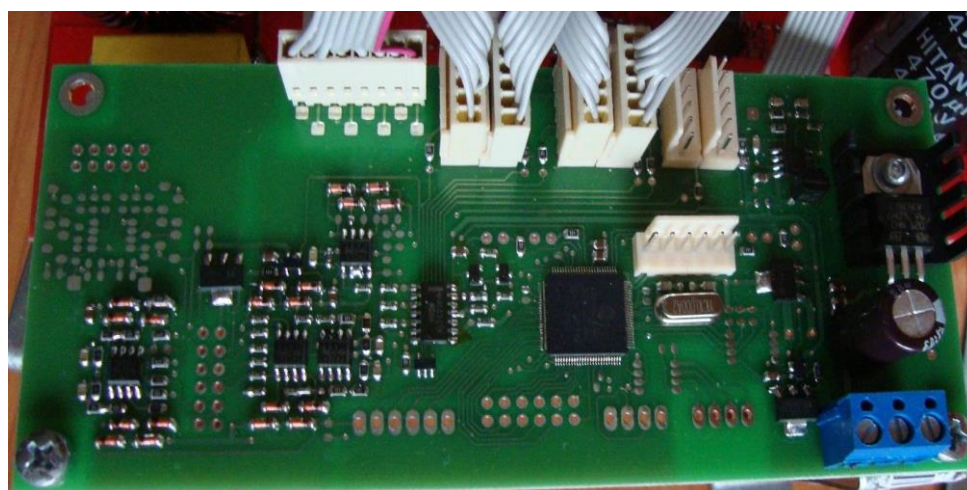


Pielikums 2

Vadības bloka spiesta plate (a) un kopskats (b).



(a)



(b)

Komunikācija bloka shēma, kas izveidota uz mikrokontroliera CC2650 bāzes.

