

Jānis Eidaks

AUTONOMO BEZVADU SENSORU TĪKLU MEZGLU *RF* BAROŠANA

Promocijas darba kopsavilkums

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Radioelektronikas institūts

Jānis Eidaks

Studiju programmas “Elektronika” doktorants

AUTONOMO BEZVADU SENSORU TĪKLU MEZGLU *RF* BAROŠANA

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:
asociētais profesors *Dr. sc. ing.*
DMITRIJS PIKUĻINS
asociētā profesore *Dr. sc. ing.*
ANNA LITVIŅENKO

RTU Izdevniecība

Rīga 2022

Eidaks J. Autonomo bezvadu sensoru tīklu mezglu *RF* barošana.
Promocijas darba kopsavilkums. –
Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. – 50 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU
P-08” 04.03.2022. lēmumu, protokols Nr. 9.



Pētījums veikts Eiropas Sociālā fonda projektā “Rīgas Tehniskās universitātes akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās”, vienošanās Nr. 8.2.2.0/18/A/017.

<https://doi.org/10.7250/9789934227851>
ISBN 978-9934-22-785-1(pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 10. jūnijā Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Vjačeslavs Bobrovs,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr.-Ing. habil.* *Andreas Ahrens*,
Vismāras Lietišķo zinātņu augstskola, Vācija

Profesors *Dr. sc. ing.* *Andrius Katkevičius*,
Viļņas Ģedimina Tehniskā universitāte, Lietuva

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.

Jānis Eidaks (paraksts)

Datums:.....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, nobeigums, literatūras saraksts, 63 attēli, 10 tabulu, trīs pielikumi, kopā 85 lappuses, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 91 nosaukums.

Anotācija

Promocijas darbs veltīts autonomo bezvadu sensoru tīkla mezglu *RF* barošanas eksperimentālajai izpētei. Darbā pētīta barošanas signāla īpašību ietekme uz *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu un bezvadu jaudas pārvades (*WPT*) veikspēju. Pētīta vidējā ieejas jaudas līmeņa, maksimālās un vidējās jaudas attiecības (*PAPR*) līmeņa, dažādu modulācijas veidu, signālu spektrālo īpašību, apakšnesēju skaita un joslas platuma ietekme. Darbā plašāk izmantotās *RF-DC* pārveidotāju topoloģijas, kā arī tirgū esošie risinājumi ir atlasīti pētījuma veikšanai perspektīvā GHz frekvenču apakšdiapazonā. Pētījuma rezultātu sasniegšanai izmantota: *WPT* tehnoloģijas teorētiskā analīze; *RF-DC* pārveidotāja prototipēšana; eksperimentāls pētījums par *RF-DC* jaudas pārveidošanas efektivitāti, eksperimentāls pētījums par *WPT* veikspēju. Darba rezultāti sasniegti pētniecības projektos “Radiofrekvenču jaudas pārraide bezvadu sensoru tīkla lietošanai” un “Advancētas tehnoloģijas bezvadu enerģijas pārvadei” un publicēti 13 zinātniskajos rakstos.

Saturs

Saīsinājumu saraksts	7
Ievads	8
1. <i>WPT</i> tehnoloģijas teorētiskā analīze	13
1.1. <i>WPT</i> metodes.....	14
1.2. <i>RF WPT</i> pētījumu pārskats.....	15
1.3. Secinājumi par <i>WPT</i> tehnoloģijas teorētisko analīzi.....	18
2. <i>RF-DC</i> shēmas prototipēšana.....	18
2.1. Modeļu sastādīšana un simulēšana.....	18
2.2. Modelēšana.....	20
2.3. Taisngriežu ieejas pretestības mērījumi	22
2.4. Secinājumi par <i>RF-DC</i> shēmas prototipēšanu	24
3. <i>RF-DC</i> pārveidošanas efektivitātes pētījums	24
3.1. Signāla formas ietekme uz sprieguma pārveidošanas efektivitāti.....	27
3.1.1. Mērķis.....	27
3.1.2. Uzdevumi	27
3.1.3. Mērījumu konfigurācija un eksperimenti	27
3.1.4. Eksperimentu rezultāti.....	28
3.1.5. Kopsavilkums par signāla formas ietekmi uz sprieguma pārveidošanas efektivitāti.....	31
3.2. Daudztoņu signāla apakšnesēju skaita ietekme uz sprieguma pārveidošanas efektivitāti.....	31
3.2.1. Mērķis.....	31
3.2.2. Uzdevumi	31
3.2.3. Mērījumu konfigurācija.....	31
3.2.4. Eksperimentālie rezultāti.....	32
3.2.5. Kopsavilkums par daudztoņu signāla apakšnesēju skaita ietekmi uz sprieguma pārveidošanas efektivitāti	36
3.3. Salāgojošās ķēdes ietekme uz <i>RF-DC</i> pārveidošanas efektivitāti.....	36
3.3.1. Mērķis.....	36
3.3.2. Uzdevumi	36
3.3.3. Mērījumu konfigurācija un eksperimenti.....	36

3.3.4. Eksperimentālie rezultāti.....	37
3.3.5. Kopsavilkums par salāgojošās ķēdes ietekmi uz <i>RF-DC</i> pārveidošanas efektivitāti.....	38
3.4. Secinājumi par <i>RF-DC</i> pārveidošanas efektivitātes pētījumu.....	38
4. Eksperimentāls pētījums par <i>WPT</i> veikspēju.....	39
4.1. Mērījumu konfigurācija.....	39
4.2. <i>WPT</i> veikspējas ietekmējošo faktoru izpēte.....	40
4.2.1. Signāla frekvences ietekme uz <i>WPT</i> veikspēju.....	40
4.2.2. Signāla formas ietekme uz <i>WPT</i> veikspēju.....	41
4.2.3. Konstantas apliecējas signāla formas ietekme uz <i>WPT</i> veikspēju.....	43
4.3. Secinājumi par <i>WPT</i> veikspējas eksperimentālo pētījumu	44
Secinājumi.....	45
Literatūras avoti.....	46

Saīsinājumu saraksts

Saīsinājums	Angļu val.	Latviešu val.
<i>ADS</i>	advanced design system	advancētā dizaina sistēma
<i>CHIRP</i>	sweep signal with periodic linearly increasing frequency	signāls ar periodisku lineāri augošu frekvenci
<i>DC</i>	direct current	līdzstrāva
<i>EH</i>	energy harvesting	enerģijas savākšana
<i>EM</i>	electromagnetic	elektromagnētisks
<i>EOL</i>	end-of-life	lietošanas beigas
<i>FM</i>	frequency modulation	frekvences modulācija
<i>HBM</i>	harmonic balance method	harmoniskā balansa metode
<i>HPAPR</i>	high PAPR	augsts <i>PAPR</i>
<i>IFFT</i>	inverse fast Fourier transform	apgrieztā ātrā Furjē transformācija
<i>IoT</i>	Internet of Things	lietu internets
<i>LPAPR</i>	low PAPR	zems <i>PAPR</i>
<i>NB-IoT</i>	narrow-band Internet of Things	šaurjoslas lietu internets
<i>PAPR</i>	peak-to-average power ratio	maksimālās un vidējās jaudas attiecība
<i>PCB</i>	printed circuit board	iespiedplate
<i>PCE</i>	power source measure unit	jaudas pārveidošanas koeficients
<i>PSMU</i>	Power supply measurement unit	barošanas avota mēriekārta
<i>RF</i>	radio-frequency	radiofrekvenču
<i>RPAPR</i>	random PAPR	gadījuma <i>PAPR</i>
<i>SDR</i>	software-defined radio	programmvadāmais radio
<i>SN</i>	sensor node	sensoru mezgls
<i>USB</i>	universal serial bus	universālā seriālā kopne
<i>USRP</i>	universal software radio peripheral	universāla programmējamā radio perifērija
<i>VNA</i>	vector network analyzer	vektoru tīkla analizators
<i>WPT</i>	wireless power transfer	bezvadu enerģijas pārraide
<i>WSN</i>	wireless sensor network	bezvadu sensoru tīkls

Ievads

Tēmas aktualitāte

Pēdējos 10 gados ir izstrādātas elektroniskās balss palīgierīces, kam tiek dots uzdevums ar balsi kontrolēt sadzīves ierīces. Mūsdienās tiek plaši izmantotas šādas un citas līdzīgas ierīces. Dažas no tām darbojas ar bezvadu informācijas pārsūtīšanas protokolu un veido bezvadu sensoru tīklu (*WSN*). Ierīces, kas veido šādus tīklus, sauc par *WSN* ierīcēm. *WSN* ierīču barošana atšķiras. Dažas no šīm ierīcēm, kas kalpo kā vārtejas, patērē daudz enerģijas, turpretim citas ierīces – ļoti maz. Ierīces laiku pa laikam “pamostas”, lai veiktu uzdevumus vai nosūtītu datus, pārējā laikā atrodoties “dziļā miega” stāvoklī. Tāpēc darbību no primārajiem barošanas avotiem, akumulatoriem, var uzturēt ilgu laiku. Šādu ierīču skaits strauji pieaug, lai arī tās patērē maz enerģijas, tāpēc aktuāls kļūst jautājums par barošanas avota nomaiņu, kad enerģija beidzas. Akumulatora nomaiņa var kļūt apgrūtināta vai pat neiespējama, ja ierīce ir novietota grūti sasniedzamā vietā vai iebūvēta ēkā un ir kļuvusi par tās neatņemamu daļu. *WSN* ierīču ikdienas lietošanas apjoms pieaug ar katru dienu, un šo ierīču sniegtās ērtības ir nenoliedzamas. Tādēļ viena no problēmām ir šādu ierīču ilgtspējīgs energoapgādes risinājums un darbības laika paildzināšana bez dārgām un laikietilpīgām bateriju maiņas darbībām, jo ir paredzams, ka šādu ierīču skaits tikai pieaugs [1].

Viena no vadāma un kontrolējama enerģijas avota iespējām ir izmantot bezvadu jaudas pārvadi. Bezvadu jaudas pārvade tiek iedalīta vairākos apakštipos: elektromagnētiskā (EM) starojuma; magnētiskās rezonanses; elektriskās rezonanses vai elektromagnētiskās indukcijas metodes [2], [3]. No iepriekšminētajām metodēm vislielāko *WPT* attālumu var nodrošināt elektromagnētiskā starojuma metode. Par dažādu signāla parametru ietekmi uz *WPT* veikspēju ir veikti eksperimenti, un pētījumi apkopoti publikācijās. Tomēr vairāki pieejamie mērījumi un no tiem izrietošie secinājumi ir pretrunīgi. Tie aptver tikai daļu signāla parametru ietekmes uz *RF-DC* jaudas pārveidi un pārveidoto jaudu no *WPT*. Tādēļ signāla parametru un formas ietekmes uz *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu izpēte joprojām ir aktuāla. Ir iespējams definēt optimālus signāla parametrus, kas nodrošinās augstāku jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu ar norādīto *RF-DC* pārveidotāja topoloģiju un *WPT* eksperimentos noteiktos apstākļos. Promocijas darbs veltīts signāla parametru ietekmes uz *RF-DC* jaudas pārveidi un ar *WPT* iegūto un pārveidoto jaudu izpētei. Lielākā daļa pētījumu veltīta *RF-DC* jaudas pārveidošanas izpētei ar divu diožu taisngriežu topoloģiju, tāpēc šajā pētījumā izmantota galvenokārt arī šī topoloģija.

Darba mērķi un uzdevumi

Promocijas darba galvenais mērķis ir izpētīt *RF* signāla parametru ietekmi uz *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu un bezvadu jaudas pārvades veikspēju.

Lai sasniegtu definēto mērķi, noteikti vairāki uzdevumi.

1. Izstrādāt *RF-DC* taisngriežu modeļus, veikt enerģijas pārvades pētījumu analīzi un modeļa parametru optimizāciju.
2. Izstrādāt prototipus dažādiem taisngriešanas risinājumiem.

3. Eksperimentāli izpētīt izstrādāto taisngriežu *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficienta atkarību no barošanas signāla parametriem.

4. Eksperimentāli izpētīt izstrādāto taisngriežu bezvadu jaudas pārraides veiktspējas atkarību no barošanas signāla parametriem.

5. Eksperimentāli izpētīt bezvadu pārraides kanāla ietekmi uz bezvadu jaudas pārvades veiktspēju dažādiem *RF-DC* pārveidotājiem.

Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

1. Izstrādāti optimizēti *RF-DC* pārveidotāju modeļi *Advanced Design Simulation (ADS)* programmatūrā.
2. Pārbaudīta datu pārraidē izmantojamo signālu lietojamība bezvadu jaudas pārvadei un *RF-DC* pārveidošanai.
3. Izstrādāti *RF-DC* pārveidotāju prototipi (sprieguma divkāršotājs ar atbilstošu salāgojošo ķēdi, sprieguma divkāršotājs bez salāgojošās ķēdes, *RF-DC* pārveidotājs uz *Powercast P2110B* moduļa bāzes).
4. *MATLAB/SIMULINK* vidē izveidots modelis programmvadāmā radio *RF* signālu ģenerēšanai. Tika izvēlēti šādi signāli:
 - *FM* tonāli modulēts signāls;
 - *CHIRP* (*FM* modulēts signāls ar lineāri pieaugošu frekvenci noteiktā diapazonā);
 - daudztoņu signāli ar augstu *PAPR* līmeni (vienādas apakšnesēju amplitūdas un fāzes);
 - daudztoņu signāli ar zemu *PAPR* līmeni (vienādas apakšnesēju amplitūdas, bet speciāli izvēlētas fāzes);
 - daudztoņu signāli ar gadījumveida *PAPR* līmeni (apakšnesēju amplitūdas un fāzes tiek nejauši izvēlētas ar vienu un to pašu izlases ģenerators iestatījumu).
5. Izveidoti *MATLAB/SIMULINK* skripti automatizētu mērījumu veikšanai (signāla parametru iestatīšana un ģenerēšana, ieejas signāla vidējās jaudas, sprieguma mērīšana), izmantojot šādas mēriekārtas:
 - programmvadāms radio *Ettus USRP B210*;
 - signāla ģenerators *Rohde & Schwarz R&S®SMC100A*;
 - ciparu osciloskops *Tektronix 72004C*;
 - universāla barošanas un mērījumu iekārta *Keysight B2901A*.
6. Zinātniskās pētniecības projekti: “Radiofrekvenču bezvadu jaudas pārraide bezvadu sensoru tīkla lietojumam”, “Advancētas tehnoloģijas bezvadu enerģijas pārvadei”.

Aizstāvamās tēzes

Promocijas darbā definētas un aizstāvēšanai izvirzītas vairākas tēzes.

1. Sprieguma divkāršotāja izejas pretestības nominālo vērtību salāgošana atbilstoši signāla apakšnesēju skaitam ļauj palielināt *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu gadījumā, kad barošanai tiek izmantots sinfāzi summēts vienādas amplitūdas daudztoņu

signāls ar vienmērīgi sadalītiem 32–256 apakšnesējiem *ISM* 863–870 MHz frekvenču diapazonā.

2. Salāgojošās ķēdes elementu izslēgšana no sprieguma divkāršotāja shēmas palielina *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu līdz pat divām reizēm gadījumā, kad tiek izmantots sinfāzi summēts vienādas amplitūdas daudztoņu signāls ar vienmērīgi sadalītiem 32–256 apakšnesējiem *ISM* 863–870 MHz frekvenču diapazonā.
3. *ISM* 863–870 MHz frekvenču diapazonā *CHIRP* signāli, tonāli frekvenču modulēti signāli un 4–256 apakšnesēju amplitūdas modulēti signāli ar *PAPR* līmeni zem 10 dB nodrošina vienādu *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu ar vidējo kvadrātisko novirzi pārveidotajam spriegumam līdz 2,5 % sprieguma divkāršotāja gadījumā.
4. Tiešās redzamības apstākļos 1,7–8,7 viļņa garuma attālumā *ISM* 863–870 MHz frekvenču diapazonā *CHIRP* signāli, tonāli frekvenču modulēti signāli un 4–256 toņu amplitūdas modulēti signāli ar *PAPR* līmeni zem 10 dB nodrošina tikpat lielu savāktu un *RF-DC* sprieguma divkāršotāja pārveidoto jaudu kā klasiski lietojamais sinusoidālais signāls ar vidējo kvadrātisko novirzi pārveidotajam spriegumam līdz 4,5 %.

Pētījuma metodoloģija

Promocijas darba mērķu sasniegšanai izvēlētas šādas pētniecības metodes: jaunāko sasniegumu autonomo bezvadu sensoru tīklu mezglu *RF* barošanā analīze; modelēšana *ADS* vidē; *RF-DC* pārveidotāju izstrāde; *RF-DC* pārveidošanas efektivitātes mērījumi pie dažādiem signāla parametriem.

Literatūras analīzē apskatīti četri *RF-DC* pārveidošanas efektivitātes izpētes virzieni.

- *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficienta atkarība no signāla frekvences.
- *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficienta atkarība no signāla formas un apliecējās tipa.
- *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficienta atkarība no ieejas signāla vidējās jaudas līmeņa.
- dažādas *RF-DC* jaudas pārveidotāju topoloģijas.

Mērījumi ietver dažādu signāla parametru (vidējās ieejas jaudas līmeņa, joslas platuma, apakšnesēju skaita, signāla formas) ietekmes izpēti uz jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu izstrādātam *RF-DC* jaudas pārveidotājam un rūpnieciski ražotam *RF-DC* jaudas pārveidošanas modulim.

Pētījuma objekti

Pētījuma objekti šajā promocijas darbā ir *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficients un *WPT* veikspēja pie dažādām *RF-DC* jaudas pārveidotāju implementācijām.

Darba rezultātu praktiskais lietojums

Eksperimentos iegūtie rezultāti parāda dažādu signāla parametru korelāciju ar *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu un palīdz izvēlēties signāla parametrus maksimālas efektivitātes sasniegšanai, kā arī veikt pārvadītās enerģijas novērtējumu, izmantojot izvēlētos *RF-DC* jaudas pārveidotājus.

Mērījumu rezultāti ir iekļauti priekšizpētē un zinātniskajos projektos “Radiofrekvenču jaudas pārraide bezvadu sensoru tīkliem” un “Advancētas tehnoloģijas bezvadu enerģijas pārvadei”.

Aprobācija

Promocijas darba rezultāti atspoguļoti 13 zinātniskajās publikācijās konferenču rakstu krājumos un žurnālos:

1. Litvinenko, J. Eidaks and A. Aboltins, “Usage of Signals with a High PAPR Level for Efficient Wireless Power Transfer,” 2018 IEEE 6th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 2018, pp. 1–5, doi: 10.1109/AIEEE.2018.8592043.
2. Litvinenko, J. Eidaks, S. Tjukovs, D. Pikulins and A. Aboltins, “Experimental Study of the Impact of Waveforms on the Efficiency of RF-to-DC Conversion Using a Classical Voltage Doubler Circuit,” 2018 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), 2018, pp. 257–262, doi: 10.1109/RTUWO.2018.8587907.
3. S. Tjukovs, J. Eidaks and D. Pikulins, “Experimental Verification of Wireless Power Transfer Ability to Sustain the Operation of LoRaWAN Based Wireless Sensor Node,” 2018 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), 2018, pp. 83–88, doi: 10.1109/RTUWO.2018.8587790.
4. J. Eidaks, A. Litvinenko, A. Aboltins. and D. Pikulins. (2019). Waveform Impact on Wireless Power transfer performance using Low-Power Harvesting Devices. Electrical, Control and Communication Engineering, 15 (2) 96–103. <https://doi.org/10.2478/ecce-2019-0013>.
5. J. Eidaks, A. Litvinenko, D. Pikulins and S. Tjukovs, “The Impact of PAPR on the Wireless Power Transfer in IoT Applications,” 2019 29th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/RADIOELEK.2019.8733534.
6. J. Eidaks, A. Litvinenko, J. P. Chiriyankandath, M. A. Varghese, D. D. Shah and Y. K. T. Prathakota, “Impact of signal waveform on RF-harvesting device performance in wireless sensor network,” 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982294.
7. J. Eidaks, A. Litvinenko, A. Aboltins and D. Pikulins, “Signal Waveform Impact on Efficiency of Low Power Harvesting Devices in WSN,” 2019 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW), 2019, pp. 57–61, doi: 10.1109/MTTW.2019.8897262.

8. S. Tjukovs, A. Litvinenko, D. Pikulins, A. Aboltins and J. Eidaks, "Waveforms Impact on Performance of Prefabricated Energy Harvesting Device," 2019 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW), 2019, pp. 62–67, doi: 10.1109/MTTW.2019.8897230.
9. J. Eidaks, J. Sadovskis, A. Litvinenko and D. Pikulins, "Experimental Analysis of LoRa Signals Employment for RF Energy Harvesting," 2020 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW), 2020, pp. 201–205, doi: 10.1109/MTTW51045.2020.9245073.
10. A. Litvinenko, R. Kusnins, A. Aboltins, J. Eidaks, D. Laksis and J. Sadovskis, "About Simultaneous Information and Power Transfer in WSN using Frequency Modulation," 2020 IEEE 8th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 2021, pp. 1–6, doi: 10.1109/AIEEE51419.2021.9435778.
11. Eidaks, J., Kušņins, R., Laksis, D., Babajans, R., Litviņenko, A. "Signal Waveform Impact on RF-DC Conversion Efficiency for Different Energy Harvesting Circuits". 2021 IEEE Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW 2021): Conference Proceedings, Latvia, Riga, 7–8 October, 2021. Piscataway: IEEE, 2021, pp. 1–6. ISBN 978-1-6654-2470-7. e-ISBN 978-1-6654-2469-1. Available from: doi:10.1109/MTTW53539.2021.9607090.
12. Eidaks, J., Kušņins, R., Babajans, R., Čirjuļina, D., Semeņako, J., Litviņenko, A. "Fast and Accurate Approach to RF-DC Conversion Efficiency Estimation for Multi-Tone Signals". Sensors, 2022, Vol. 22, No. 3, Article number 787. ISSN 1424-8220. Available from: doi:10.3390/s22030787.
13. Kušņins, R., Babajans, R., Eidaks, J., Čirjuļina, D., Litviņenko, "Performance Estimation for RF Wireless Power Transfer Under Real-Life Scenario" 2022 IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON). Iesniegts.

Pētījuma autors ar pētījuma rezultātiem uzstājies septiņās zinātniskajās konferencēs.

1. International scientific conference: 2018 IEEE 6th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), Lithuania, Vilnius, 2018, 8–10. november.
2. RTU scientific conference: Riga Technical University 60th International Scientific conference (Section electronics), Latvia, Riga, 2019, 26 April.
3. International scientific conference: 29th International Conference Radioelektronika 2019, Czech Republic, Pardubice, 2019, 16–18. April.
4. International scientific conference: MTTW 2019 : IEEE Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications 2019, Latvia, Riga, 2019, 1–2. October.
5. RTU International scientific conference: 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Latvia, Riga, 2019, 7–9. October.

6. International scientific conference: MTTW 2020 : IEEE Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications 2020, Latvia, Riga, 2020, 1–2. October.
7. International scientific conference: 2021 IEEE 6th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), Lithuania, Vilnius, 2021, 22–24. April.

Darba struktūra

Promocijas darbā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi un trīs pielikumi, kopējais lappušu skaits – 104 lpp.

Ievadā definēti uzdevumi promocijas darba mērķa sasniegšanai, izvirzītas tēzes un aprakstīts sasniegto rezultātu iespējamais praktiskais lietojums.

Pirmā nodaļa veltīta *WPT* tehnoloģijas īsam teorētiskajam pārskatam.

Otrā nodaļa veltīta *RF-DC* pārveidotāju parametru modelēšanai un pārveidotāju optimālo parametru noteikšanai, lai sasniegtu maksimālo jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu, kas ir atkarīgs no pārveidotāja komponentu nominālu vērtībām.

Trešā nodaļa veltīta dažādu barošanas signāla parametru ietekmes uz *RF-DC* pārveidotāja veiktspēju izpētei, kas sadalīta vairākās apakštēmās:

- signāla formas ietekme uz jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu;
- daudztoņu signāla apakšnesēju skaita ietekme uz jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu;
- salāgojošo elementu ietekme uz *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu;
- signāla formas ietekme uz *WPT* veiktspēju.

Ceturtajā nodaļā aprakstīta sakaru kanāla un dažādas formas barošanas signālu ietekme uz bezvadu enerģijas pārvades veiktspēju. Šajā pētījumā tiek izmantoti dažādi taisngriežu risinājumi un analizēta *WPT* procesā saņemtā barošanas signāla vidējā jauda un *DC* pārveidots spriegums.

Secinājumu nodaļā apkopoti *RF-DC* un *WPT* veiktspējas rezultāti un eksperimentos konstatēto sakarību analīze.

1. *WPT* tehnoloģijas teorētiskā analīze

Bezvadu jaudas pārraide (*WPT*) ir viens no risinājumiem, kā attālināti nodrošināt enerģijas padevi *WSN* mezgliem dažādos vides apstākļos. Šis risinājums ļauj nodrošināt *WSN* mezglus ar stabilu enerģijas padevi un izvairīties no akumulatoru izmantošanas, tādējādi izvairoties arī no bateriju pārstrādes. Atkarībā no apstākļiem un *WSN* mezglu izvietojuma noteiktos lietojuma scenārijos *WSN* mezgls uzkrāj arī apkārtējās vides *RF* signālus enerģiju.

1.1. WPT metodes

RF enerģijas vākšanai elektromagnētiskā starojuma veidā izmantojamais signāla frekvenču diapazons ir 3 kHz–300 GHz [4]. RF enerģijas pārvadi un uzkrāšanu var iedalīt vairākās grupās atkarībā no īpašībām, t. i., to var raksturot atkarībā no lauka zonas:

- 1) tuvā lauka zona, kur sistēmas slodzes impedances uztvērēja pusē ietekmē raidītāja puses slodzes pretestību [3], ko var iedalīt divās grupās:
 - a) induktīvā jaudas pārvade un magnētiski saistītā rezonanse, kur enerģija tiek pārnesta, izmantojot magnētisko lauku, kas rodas no strāvas, kas plūst caur raidītāja spoli uz uztvērēja spoli [5];
 - b) kapacitatīvā jaudas pārvade, kur enerģiju pārvada, izmantojot tā saukto nobīdes strāvu caur kondensatoriem [3], [5];
- 2) tālā lauka zona, kur sistēmas uztvērēja impedances neietekmē raidītāja slodzes pretestību [3], elektromagnētisko starojumu.

Tuvā lauka WPT sistēmu efektivitāte var sasniegt vairāk nekā 90 %, nodrošinot enerģijas pārvadi, ja attālums starp raidītāju un uztvērēju ir no dažiem milimetriem līdz dažiem centimetriem [5]. Tālā lauka WPT sistēmas nodrošina daudz zemāku enerģijas pārraides efektivitāti un ir atkarīgas no attāluma, antenas pastiprinājuma un raidītāja jaudas līmeņa. Tuvā lauka WPT sistēmas var izmantot tikai ierobežotā attālumā starp raidītāju un uztvērēju, tāpēc šīs sistēmas turpmāk netiks apskatītas. Promocijas darbā apskatīta WPT sistēma, kas enerģijas pārvadei izmanto elektromagnētisko starojumu. WPT sistēmas blokshēma redzama 1.1. attēlā.



1.1. att. WPT sistēmas blokshēma.

WPT sistēmu veido trīs dažādas jaudas pārveidošanas apakšsistēmas: enerģijas raidītājs; bezvadu kanāls; enerģijas uztvērējs. Šajā sistēmā jaudas pārveidošana tiek īstenota šādi:

- līdzsprieguma jauda tiek pārveidota RF signāla jaudā, kur pārveidošanas lietderības koeficients ir definēta kā η_1 ;
- RF jauda tālāk tiek pārnesta uz bezvadu kanālu un saņemta enerģijas uztvērējā; šo pārveidošanas lietderības koeficientu apzīmē kā η_2 ;
- visbeidzot, saņemtā RF jauda tiek pārveidota no RF signāla uz līdzsprieguma jaudu, ko raksturo cits pārveidošanas lietderības koeficients η_3 .

$$\eta_{\text{II}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \quad (1.1)$$

WPT kopējo lietderības koeficientu var izteikt ar šo triju galveno komponentu lietderības koeficientiem:

$$\eta_1 = \frac{\overline{P}_{RF}^{Tx}}{\overline{P}_{DC}^{Tx}}, \eta_2 = \frac{\overline{P}_{RF}^{Rx}}{\overline{P}_{RF}^{Tx}}, \eta_3 = \frac{\overline{P}_{DC}^{Rx}}{\overline{P}_{RF}^{Rx}}, \quad (1.2)$$

kur: η_{II} – *WPT* sistēmas kopējais lietderības koeficients; η_1 – raidītāja lietderības koeficients; η_2 – bezvadu kanāla lietderības koeficients; η_3 – uztvērēja lietderības koeficients. 1.1. un 1.2. vienādojums, kā arī 1.1. attēls parāda, ka kopējā lietderības koeficienta η_{II} palielināšanai ir nepieciešams palielināt η_1 , η_2 un η_3 lietderības koeficientu kombināciju.

1.2. *RF WPT* pētījumu pārskats

WPT un enerģijas savākšanai viena no vissvarīgākajām sastāvdaļām ir taisngriezis kopā ar antenu, ko sauc arī par rektenu. Rektennas izmanto *RF* jaudas signāla pārveidošanai līdzspriegumā, lai nodrošinātu barošanu mazjaudas sensoriem un/vai *DC/DC* pārveidotājiem. Attālums starp raidītāju un rektenu un pašas rektenas veiktspēja ietekmēs arī pārveidotās jaudas līmeni un ierīces darbību. Lai nodrošinātu efektīvu enerģijas pārvadi vai izveidotu precīzu rektennas *WPT* modeli, ir jāņem vērā vairāki apsvērumi:

- *RF-DC* pārveidotāja topoloģija;
- signāla frekvence;
- signāla parametri;
- ieejas jaudas līmenis.

Apskatīto rektenu galvenās īpašības, sakārtotas pēc frekvencēm un ievades jaudām, kā arī topoloģijas, barošanas signāliem un iegūtajiem pārveidošanas lietderības koeficientiem (PCE), apkopotas 1.1. tabulā [6]. Vairāki *RF-DC* rektennas mērījumi ar norādīto topoloģiju uzrāda ļoti augstu jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu – vairāk nekā 70 % – ar salīdzinoši augstu ieejas signāla jaudas līmeni, sākot no 15 dBm [8]–[12], [22]–[16]. Lai sasniegtu šādu ieejas jaudas līmeni *RF-DC* taisngrieža ieejā, raidītājam būs jāģenerē simts vai tūkstoš reižu lielāks jaudas līmenis, un, ja attālums tiks palielināts, tas pārsniegs pieļaujamo noteikto ekvivalento izotropiski izstaroto jaudu (*EIRP*).

Dažas no *RF-DC* topoloģijām [8], [11] ar *GaAs* taingrieža diodēm ir optimizētas darbam ar augstu ieejas jaudas līmeni, jo šī veida taisngriežu diodes ļauj sasniegt jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu, kas pārsniedz 90 %. Tomēr norādītais ieejas jaudas līmenis nav piemērots lietošanai *WSN* mezglos, jo raidītāja izstarotais jaudas līmenis pārsniegs atļauto *EIRP* izstarotās jaudas robežu.

Ieejas jaudas līmeņa lietojums diapazonā ap 0 dBm nozīmē gan *SN*, gan mazjaudas tehnoloģiju, piemēram, *RFID* un *E-ink*, izmantošanu [23], [24]. Šis ieejas *RF* jaudas diapazons literatūrā aplūkots retāk nekā augsts un zems (<−15 dBm) jaudas diapazons. Salīdzinot rektennas pēc frekvencēm, 1.1. tabulā ir parādīts, ka rektennas galvenokārt izstrādātas 2,45 GHz *ISM* frekvenču joslai. Augstas frekvences izmantošana ierobežo arī efektīvu attālumu starp raidītāju un *SN*. Frekvenču diapazoni zem 1 GHz, piemēram, 433 MHz (*ISM*) un 860 MHz (*GSM-850*), ļauj pārvadīt jaudu lielākos attālos.

Lielākajā daļā apskatīto pētījumu kā *RF-DC* taisngriežu ieejas signāls tiek izmantots sinusoīdas signāls. Tomēr dažos no apskatītajiem pētījumiem, piemēram, [22], [17], [21], [25], [26], [27], [28], [29], atklājās, ka jaudas pārvade ar daudztoņu signālu nodrošina augstāku lietderības koeficientu nekā ar sinusoīdas signālu.

Dažādu *RF-DC* taisngriežu topoloģiju salīdzinājums [6]

Ref.	Pamatne	<i>RF-DC</i>		RF ieejas jauda, dBm	Signāla forma	PCE, %
		Topoloģija	Frekvence, GHz			
[7]	–	1 diode	24	27	Viens tonis ¹	43,6
				16		42,9
[8]	Pielāgots ³	4 diodes	5,8	30	Viens tonis	92,8
[9]	FR4	2 diodes	5,76	20	Viens tonis	84
[10]	RT/Duroid 5870	1 diode	5,8	16,9	Viens tonis	82,7
			2,45	19,5		84,4
[11]	Pielāgots ⁴	1 diode	2,45	37	Viens tonis	91
[12]	FR4	2 diodes	2,45	24,7	Viens tonis	78
[13]	RO4003C	1 diode	2,45	3	Vairāku toņu ²	54,5
[14]	FR4	4 diodes	2,4	27	Vairāku toņu	75
[15]	PTFE	4 diodes	2,4	26,2	Viens tonis	80
[16]	FR4	2 diodes	2,4	22	Viens tonis	82,3
[14]	RO4003C	1 diode	2,4	10	Viens tonis	60
[17]	–	1 diode	2,4	–10	Vairāku toņu	42
[18]	FR4	4 diodes	2,15	0	Viens tonis	70
[19]	Arlon A25N	1 diode	0,915	0	Vairāku toņu	67,8
[20]	RT/Duroid 5880	2 diodes	0,86	–4	Viens tonis	60
[21]	–	1 diode	0,433	–10	Vairāku toņu	55

¹ Visi viena toņa gadījumi attiecas uz nemodulētu nesēju. ² Visi vairāku toņu gadījumi attiecas uz vairāku apakšnesēju summu. ³ Relatīvā dielektriskā caurlaidība $\epsilon_r = 3,4$, dielektriskie zudumi $\tan\delta = 0,0015$. ⁴ Relatīvā dielektriskā caurlaidība $\epsilon_r = 2,55$, dielektriskie zudumi tangensa $\tan\delta = 0,0018$ [6].

RF-DC shēmas topoloģija ir vēl viens būtisks rektennas projektēšanas parametrs. Pārskatot zinātnisko darbu publikācijas, atklājās, ka visbiežāk izmantotās topoloģijas balstās: uz vienas diodes topoloģijas (pusviļņa taisngriezis); uz divu diožu topoloģijas (sprieguma divkāršotājs); uz četrus diožu topoloģijas (diodes tilta taisngriezis). Šīs topoloģijas ar nelielām izmaiņām izmantotas 1.1. tabulā minētajos pētījumos. Pārskatot 1.1. tabulā redzamo taisngriežu jaudas pārveidošanas lietderības koeficientus, var secināt, ka rektenna, kuras pamatā ir sprieguma divkāršotāja topoloģija, *RF-DC* pārveidotāju, kas darbojas zem 1 GHz frekvences, izmantojot daudztoņu signālus, izmaksu un efektivitātes ziņā ir vislīdzsvarotākais risinājums *RF WPT*, kas ir paredzētas *SN* un mazjaudas elektronikas barošanai [6].

Pārskatītie pētījumi galvenokārt vērsti uz rektennu veiktspējas uzlabošanu, eksperimentāli pārbaudot rezultātus, lai izstrādātu stabilus teorētiskos modeļus *WPT* un *RF-DC* pārveidotājiem. Ir izstrādāti dažādi teorētiskie modeļi *AC-DC* [30] un *DC-DC* [31], [32] pārveidotāju jomā. Precīzu *RF-DC* shēmu simulācijām ir izstrādātas arī vairākas modelēšanas pieejas. Precīza simulācijas modeļa izstrāde ir realizējama alternatīva *RF-DC* jaudas pārveidotāju eksperimentālajiem pētījumiem, piedāvājot ērtāku un izmaksu ziņā ekonomiskāku metodoloģiju, kas neprasa fizisku prototipu izgatavošanu, īpaši, ja ir nepieciešama shēmas konstrukcijas pilnveidošana.

Visaptveroša nelineāro shēmu analīze, kas nav pakļauta linearizācijai, parasti ir ļoti laikietilpīgs un sarežģīts uzdevums, neskatoties uz neseniem sasniegumiem šajā jomā. Sarežģītu ieejas signālu izmantošana šo problēmu padara vēl izteiktāku. Pārveidotājiem raksturīgo ilgo pārejas procesu dēļ viena no efektīvākām shēmu analīzes metodēm – pārejas procesu analīze (*TA*) [33] – ir nepiemērojama nesamērīgi ilgā simulācijas laika dēļ [34]. Turklāt šaurjoslas signāliem ar periodisku apliecēju ir nepieciešams liels iterāciju skaits, jo simulācijas solim ir jābūt daudz īsākam, salīdzinot ar nesēja viļņa periodu. Neskatoties uz pētījuma rezultātiem par *TA* paātrināšanu [35], minētais simulācijas mazākā soļa ierobežojums būtiski ierobežo metodes veiktspēju. Volteras (*Volterra*) rindu metode [36] ir vēl viena plaši izmantota nelineāro shēmu analīzes metodika. Metodes galvenais trūkums ir ilga konverģences sasniegšana shēmām ar ļoti izteiktu nelinearitāti. Harmoniskā līdzsvara (*HB*) metode sākotnēji tika piedāvāta, lai [37] atrisinātu mehāniskas problēmas. Pēc tam tā tika pielāgota, lai risinātu uzdevumus dažādās nelineārās shēmās sinusoidālas ierosmes apstākļos [38]. *HB* metode ļauj tieši aprēķināt līdzsvara reakciju, risinot nelineāru vienādojumu sistēmu [39], tādējādi izvairoties no ilgstošu pārejas procesu problēmām. Cita pieeja balstās sākotnējās sistēmas provizoriskā sadalīšanā lineārās un nelineārās daļās [40]. Iegūtos nelineāros vienādojumus var atrisināt, piemēram, izmantojot Ņūtona metodi (*NM*) [41] vai iterācijas relaksācijas metodi (*IRM*) [42], [43]. Ir pierādīts, ka Jakobi (*Jacobi*) matricas *NM* aprēķinu var ievērojami paātrināt, izmantojot *FFT* algoritmus [44]. Turpinājuma metodes [45] izmantošana ļauj iegūt konverģenci pie lieliem ieejas jaudas līmeņiem. Daudztoņu ievades signālus var apstrādāt, izmantojot pārveidotu *HB* [46], [47] metodi. Tomēr tiek novērots ievērojams skaitļošanas slodzes pieaugums, jo ir jāveic lielu Jakobi matricu aprēķini.

Neskatoties uz metožu precizitāti, to lietošana joprojām ir liels resursu un laika ietilpīgs process. Tā rezultātā tika izstrādāti uz tuvinātu slēgtu formu vienādojumu balstīti modeļi, ko izmanto, lai analizētu rektennas, kam ir kopīga slodze [48], vienas diodes taisngriežus [49],

[50] un F klases taisngriežu pārveidotājus. *SPICE* modeļa simulācijas, kuru pamatā ir parametri, kas iegūti no eksperimentāliem datiem, izmantojot līkņu interpolāciju, demonstrēja lietderības koeficientu līdz 90 % ieejas jaudas diapazonam 30–35 dBm pie 2,4 GHz [11]. Salīdzinoši labi rezultāti ir iegūti [51] ar vienu diodes taisngriezi, izmantojot analītisko modeli. Aptuvenus modelis tika izmantots [52], lai atrastu lietderības koeficientu daudztoņu signāla ierosmei ar vienmērīgi izvietotām frekvencēm. Ir pierādīts, ka lielākā daļa analītisko modeļu, neņemot vērā diožu nelinearitāti un *PCB* iespējamo ietekmi, sniedz ļoti neprecīzus rezultātus, kas nav pietiekami precīzai novērtēšanai un ķēdes optimizācijai [53].

Ņemot vērā nepieciešamos skaitļošanas resursus un sarežģītās metodes teorētiskā modeļa izveidei pareizai *RF-DC* pārveidošanas lietderības koeficienta un *WPT* veiktspējas novērtēšanai, pašreizējais darbs balstās eksperimentālos pētījumos.

1.3. Secinājumi par *WPT* tehnoloģijas teorētisko analīzi

Šajā nodaļā apkopotas un analizētas dažādas *WPT* metodes tuvā lauka un tālā lauka zonās. Elektromagnētiskais starojums tika izvēlēts kā vispiemērotākais variants autonomo sensoru mezglu barošanai.

RF WPT pētījumu teorētiskā analīze ļauj apkopot secinājumus:

- populāra un perspektīva taisngrieža topoloģija, balstoties uz pārveidošanas lietderības koeficientu, ir sprieguma divkāršotājs;
- autonomo bezvadu sensoru mezglu barošana, izmantojot *RF WPT* metodi, nodrošina pietiekami zemu ieejas jaudas līmeni, tādēļ enerģijas vācēja shēmas ir jāpielāgo zemiem ieejas jaudas līmeņiem – aptuveni 0 dBm vai zemāk;
- *WPT* izmantotie zemākie frekvenču diapazoni autonomo sensoru mezglu barošanai spēj nodrošināt lielāku jaudas pārraides attālumu vai augstāku vidējās ieejas jaudas līmeni;
- enerģiju nesošo signālu īpašību ietekme uz *WPT* veiktspēju vēl nav pietiekami izpētīta;
- pētniecības pieeja, kas balstīta tikai teorētiskā analīzē, nedod pietiekami precīzus rezultātus, un skaitļošanas resursu taupīšana neattaisnojas.

2. *RF-DC* shēmas prototipēšana

Šī nodaļa veltīta taisngriežu projektēšanai – sprieguma divkāršotājam un tirgū pieejamam *Powercast P2110B* enerģijas vākšanas modulim. Prototipa izstrādes procesā ir veikta taisngrieža komponentu ietekmes modelēšana uz jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu, *RF-DC* pārveidotāju prototipēšana, salīdzinājums modelētai un eksperimentāli nomērītai taisngrieža veiktspējai. Taisngriežu parametri ir optimizēti *ISM* 863–870 MHz frekvenču diapazonam ar ieejas jaudas līmeni ap un zem 0 dBm un ieejas impedanci 50 Ω.

2.1. Modeļu sastādīšana un simulēšana

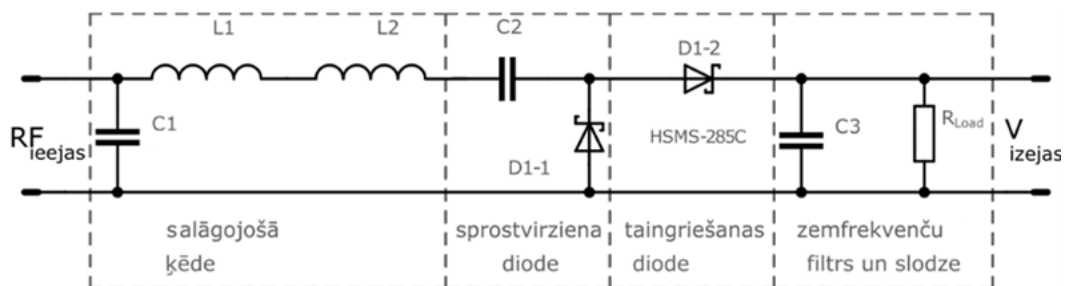
Viens no taisngrieža komponentu izvēles kritērijiem bija cena, otrs – komponentu un materiālu pieejamība. Tādēļ, vadoties no šiem kritērijiem, atbilstošākais *PCB* materiāls ir *FR-*

4, kura veiktspēja GHz frekvenču diapazonā ir pietiekama. *PCB* materiāla ietekme uz *RF-DC* pārveidošanas lietderības koeficientu apkopota 1.1. tabulā. Šajā frekvenču diapazonā *FR-4* materiāla dielektriskie zudumi ir lielāki nekā keramikas substrātam *Rogers RO4350B*; tomēr pētījumam tie ir pieņemami [54], [55].

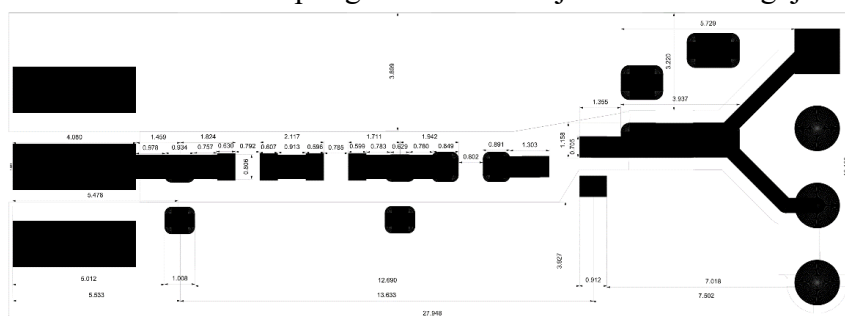
RF-DC jaudas pārveidei frekvenču diapazonā zem 1 GHz ir pieejams plašs diožu klāsts ar līdzīgiem parametriem, piemēram, *Infineon BAT 63-02V* [56], *Skyworks SMS7630* [57], *HSMS-2850/285C* [58]. Teorētiskie aprēķini avotā [3] liecina, ka, lai palielinātu *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu, ir jāizvēlas diode ar zemu diodes kapacitāti C_{j0} un zemu virknes pretestību R_s .

Tādēļ, ņemot vērā iepriekš noteiktos kritērijus un izteiktos apsvērumus, modeļa izstrādei ir izvēlēts divu slāņu *FR-4 PCB* materiāls ar dielektriķa dielektrisko konstanti 4,2 un attālumu starp vara pārklājumiem 1,6 mm. *PCB* platē ir izveidoti celiņi ar mazu izmēru un garumu. Attālums starp komponentiem ir izvēlēts minimāli īss ērtai komponentu izvietojšanai un lodēšanai. Simulācijā esošie *PCB* celiņi tiek aizstāti ar pārraides līniju segmentiem un atbilstošu modeli, diožu modelis tiek ņemts no iebūvētās bibliotēkas. Taisngriežu komponentu vērtības tika simulētas plašā diapazonā, lai novērtētu komponentu ietekmes tendences uz taisngriešanas efektivitāti un tādējādi noteiktu optimālās vērtības augstākas jaudas pārveidošanas lietderības koeficienta sasniegšanai. Simulācijas komponentu vērtību diapazons tika izvēlēts pietiekami plašs, lai atrastu komponentu vērtības, kas nodrošinās maksimālu taisngrieža veiktspēju.

RF-DC pārveidotāja shēma ar salāgojošo ķēdi redzama 2.1. attēlā. Ietver salāgojošās ķēdes, diodes, zemfrekvenču filtru un slodzes pretestību. Vara augšējā slāņa *PCB* celiņu izvietojums redzams 2.2. attēlā.



2.1. att. Sprieguma divkāršotāja shēma ar salāgojošo ķēdi.



2.2. att. Sprieguma divkāršotāja *PCB* izkārtojums ar salāgojošo ķēdi.

Savukārt *Powercast P2110B* moduļa simulācija netiek veikta, jo nav pieejama moduļa shēma, līdz ar to nav iespējams izstrādāt simulācijas modeli.

2.2. Modelēšana

RF-DC pārveidotāja modelēšana tika veikta *ADS* programmatūrā, izmantojot *RF* modelēšanas pakotni ar harmoniskā balansa metodes (*HBM*) risinātāju. Shēmas salāgojošajai ķēdei tika pievienoti papildu komponenti, lai izstrādātajam prototipam nodrošinātu vairāk pieskaņošanas iespēju.

2.1. tabula

Modelēšanas parametri *RF-DC* sprieguma divkāršotājam ar salāgojošo ķēdi

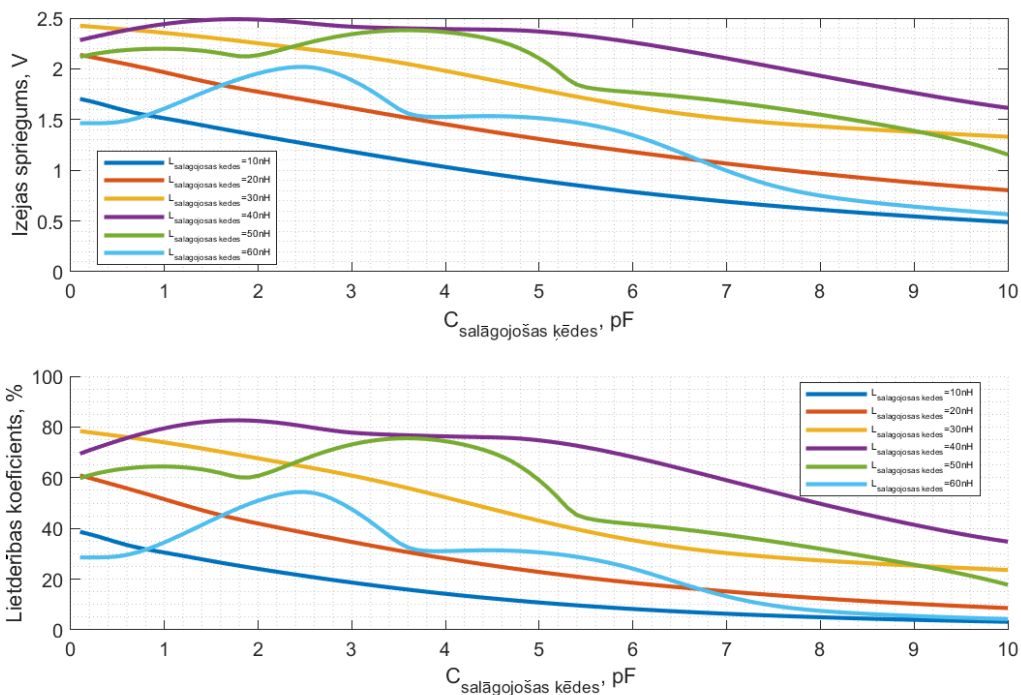
Ieejas jaudas līmenis, dBm	-20 līdz +2
Frekvenču diapazons, MHz	863–870
C_2 , pF	1–40
C_3 , μ F	0,01–10
L ($L_1 + L_2$) salāgojošās induktivitātes vērtība pie izvēlētajām C (C_1) salāgojošās kapacitātes vērtībām = 0,1–10 pF; nH	10, 20, 30, 40, 50, 60
C (C_1) salāgojošā kapacitātes vērtība pie izvēlētajām L ($L_1 + L_2$) salāgojošās induktivitātes vērtībām = 1–120 nH; pF	0,5, 1, 2, 3, 4, 5
R slodzes pretestība, $k\Omega$	0,01–40

Modelēšanā taisngrieža komponentu vērtības tika mainītas plašā diapazonā, lai noteiktu kombināciju, kas nodrošinātu optimālu pārveidošanas lietderības koeficientu, komponentu vērtību diapazons apkopots 2.1. tabulā.

Pēc vairākām iteratīvās parametriskās modelēšanas sērijām tika izvēlētas šādas komponentu vērtības: salāgojošās spoles vērtības diapazons bija 10-60nH ar 10 nH soli. Salāgojošā kondensatora vērtība tika variēta diapazonā 0,1-10 pF.

Taisngriešanas sprieguma un jaudas pārveidošanas lietderības koeficienta parametriskā modelēšana ar salāgojošām kapacitātes vērtībām pie norādītajām sešām salāgojošās induktivitātes vērtībām redzama 2.3. attēlā. Plaši izvēlētas salāgojošās ķēdes induktivitātes vērtības rāda, ka induktivitātes vērtības, piemēram, 10 nH, 20 nH vai 30 nH, nav optimālās vērtības un maksimālo taisngrieztu spriegumu nevar sasniegt, mainot salāgojošās ķēdes kapacitātes vērtību, turklāt ar šīm induktivitātes vērtībām salāgojošās ķēdes kapacitātes pieaugums samazinās taisngrieztu spriegumu.

Augstākais taisngrieztais spriegums redzams 2.3. attēlā, šajā parametriskajā modelēšanā tas tiek sasniegts ar induktivitātes vērtību 40 nH un salāgojošo kondensatora vērtību aptuveni 1,8 pF. 2.3. attēla grafikā redzams izteikts sprieguma maksimums. Induktivitātes vērtībām, kas ir daudz augstākas par 40 nH, tiek novēroti vairāki lokāli taisngrieztā sprieguma maksimumi ar zemākām sprieguma vērtībām. Tādēļ optimālā salāgojošā induktivitātes vērtība ir 40 nH. Taisngrieža lietderības koeficientu aprēķina, dalot rezistora jaudu ar vidējo signāla ieejas jaudas līmeni taisngrieža ieejā un pārrēķinot procentos. Simulācijā lielākais jaudas pārveidošanas koeficients ar optimāli izvēlētiem parametriem sasniedza 82,5 %.



2.3. att. Salāgota $RF-DC$ sprieguma divkāršotāja izejas spriegums un pārveidošanas lietderības koeficients atkarībā no salāgojošā kondensatora vērtības pie dažādām salāgojošā kondensatora vērtībām, $C_2 = 8,2\text{pF}$, $C_3 = 1\mu\text{F}$, $R_{\text{load}} = 7,5\text{ k}\Omega$, frekvence = 865,5 MHz.

Turpmākās modelēšanas sērijas iekļauj parametrisku modelēšanu, kur salāgojošās ķēdes kapacitāte ir nemainīga kur salāgojošās ķēdes induktivitāte tiek mainīta noteiktajā diapazonā. Šādi modelējot, salāgojošās ķēdes induktivitāte tiek mainīta diapazonā 1–120 nH pie nemainīgām salāgojošās ķēdes kapacitātes vērtībām: 0,5 pF, 1 pF, 2 pF, 3 pF, 4 pF, 5 pF.

Taisngrieztā sprieguma atkarība no izvēlētās salāgojošās ķēdes induktivitātes vērtībām ir nozīmīgāka kā salāgojošās ķēdes kapacitāte, un var secināt, ka salāgojošās ķēdes kapacitātei ir daudz mazāka ietekme uz taisngrieztā sprieguma līmeni. Ar visām pārbaudītajām salāgojošās ķēdes kapacitātes vērtībām taisngrieztā sprieguma maksimumu var iegūt ar daudzām salāgojošās ķēdes kondensatora un induktivitātes kombinācijām. Tomēr lielākais taisngrieztais spriegums tiek iegūts, izmantojot salāgojošās ķēdes kapacitāti 3 pF un induktivitāti 41 nH, kur sprieguma līmenis sasniedz 2,5 V, lietderības koeficients ir 83 %, tāpēc šīs vērtības tiek izmantotas turpmākajās simulācijās.

Pēc salāgojošās ķēdes optimālo parametru iegūšanas tika analizēta pārējo taisngrieža shēmas komponentu vērtību ietekme. Tika novērtēta kondensatora C_2 ietekme uz taisngrieztā sprieguma līmeni, mainot tā vērtību robežās 1–40 pF. Modelēšana parāda, ka šī kondensatora vērtība minimāli ietekmē taisngrieztā līdzsprieguma līmeni modelētajā kapacitātes diapazonā.

Palielinoties slodzes pretestībai, palielinās arī taisngrieža izejas spriegums, sākot no 0 V ar ļoti zemu pretestību, līdz 3,6 V pie 40 k Ω slodzes pretestības. Tomēr augstākais jaudas pārveidošanas koeficients tiek iegūts ar 8,5 k Ω slodzes pretestību.

2.3. Taisngriežu ieejas pretestības mērījumi

RF-DC pārveidotāja shēmas prototips tika izgatavots, izmantojot frēzmašīnu *LPKF ProtoMat S103*. Shēmas komponentes tika izvietotas un pielodētas uz *PCB* (*FR-4* ar dielektrisko konstanti 4,3 un biezumu 1,6 mm) augšējā slāņā.

RF-DC taisngriežim ar salāgojošo ķēdi ir jābūt ar $50\ \Omega$ ieejas impedanci, jo taisngriežis mērījumos tiks izmantots ar mēraparatūru un antenām, kam ieejas impedance ir $50\ \Omega$, lai sasniegtu augstāku lietderības koeficientu.

Pēc sākotnējās modelēšanas un *RF-DC* taisngrieža prototipa izveides ar modelētajām vērtībām prototipa veiktspējas rādītāji neatbilda simulācijas rezultātiem.

Līdz ar to bija nepieciešams veikt salāgojošās ķēdes komponentu pieskaņošanu, lai iegūtu augstāku lietderības koeficientu.

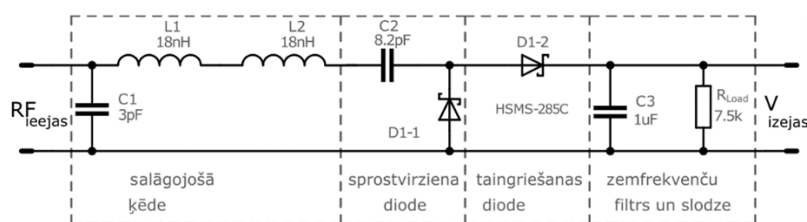
Prototipa ieejas impedances vērtības novērtējums tika veikts ar vektora tīkla analizatoru (*VNA*), un vērtējuma parametrs ir S_{11} – ieejas impedances parametrs, kas parāda, cik daudz signāla jaudas tiks atstarots atpakaļ uz antenu vai mēriekārtu.

RF-DC sprieguma divkāršotāja prototipa ar salāgojošo ķēdi pieskaņošanas laikā optimālākie salāgojošie ķēdes parametri, kas nodrošināja augstāko lietderības koeficientu, bija 36 nH induktivitāte un 3 pF kapacitāte, kas atšķīrās no simulētajiem vislabāk salāgotās ķēdes parametriem. Izvēlētie ķēdes parametri redzami 2.4. attēlā. Prototipa pēdējās izvēlētas nominālu vērtības ir: $C_1 = 3\ \text{pF}$, $C_2 = 8,2\ \text{pF}$, $C_3 = 1\ \mu\text{F}$, $R_1 = 7,5\ \text{k}\Omega$, $L_1 = L_2 = 18\ \text{nF}$.

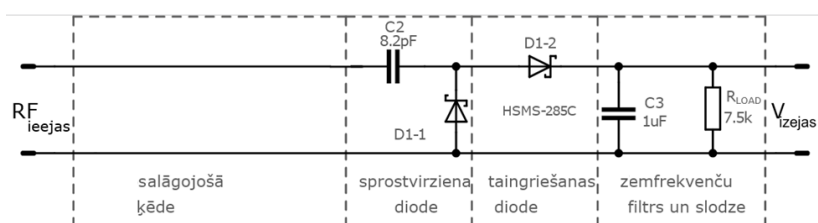
Shēma tika pieslēgta, izmantojot koaksiālo kabeli ar impedances pretestību $50\ \Omega$. $50\ \Omega$ impedances vērtība tika izvēlēta, lai tā atbilstu pieejamo antenas un mēriekārtu ieejas impedances. Prototipa diodēm D1 un D2 tika izvēlēta Šotkī diode *HSMS-285C*.

Lai izpētītu salāgojošās ķēdes ietekmi uz jaudas pārveidošanas efektivitāti, tika izveidots vēl viens *RF-DC* taisngrieža prototips bez salāgojošās ķēdes atbilstoši 2.5. attēlā redzamajai principiālajai shēmai.

Salīdzināšanai tika izmantots rūpnieciski ražotais, komerciāli pieejamais *Powercast P2110B* modulis.

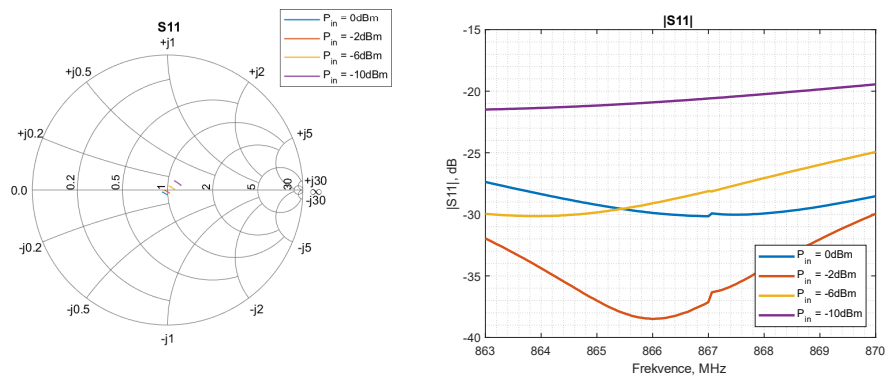


2.4. att. Salāgota *RF-DC* sprieguma divkāršotāja shēma ar salāgojošās ķēdes komponentu nomināliem.

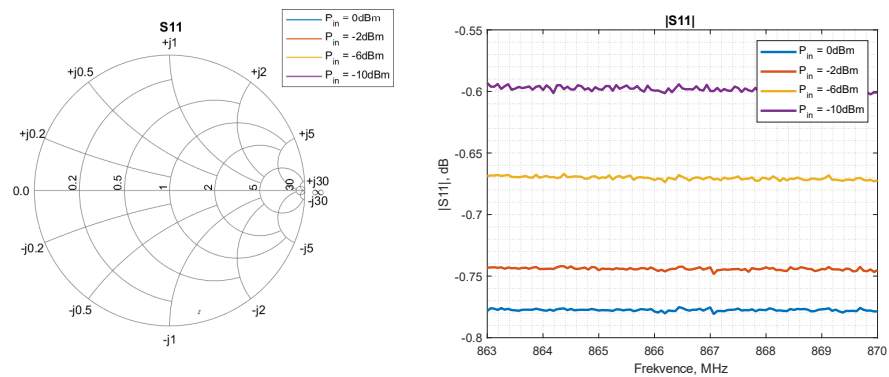


2.5. att. *RF-DC* sprieguma divkāršotāja shēma bez salāgojošās ķēdes.

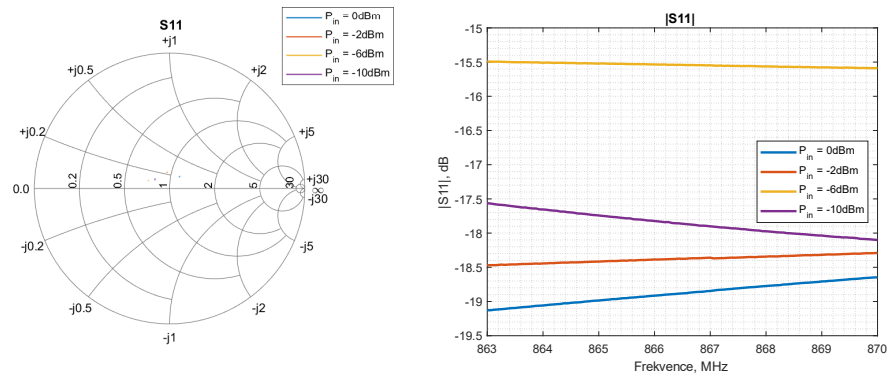
Salāgošanu uzskata par pieņemamu ja $|S_{11}|$ izkliedēšanas parametrs ir mazāks par -10 dB. Smita diagrammas S_{11} ieejas pretestības un $|S_{11}|$ parametrs sprieguma divkāršotājam ar salāgojošo ķēdi redzams 2.6. attēlā, sprieguma divkāršotājam bez salāgojošās ķēdes – 2.7. attēlā, *Powercast P2110B* modulim – 2.8. attēlā. Sprieguma divkāršotāja ieejas impedances parametri ar salāgojošo ķēdi pie dažādiem ieejas jaudas līmeņiem uzrāda labu salāgojumu frekvenču diapazonā 863–870 MHz. Sprieguma divkāršotāja $|S_{11}|$ taisngrieža mērījumu rezultāti bez salāgojošās ķēdes uzrāda sliktu salāgojumu, $|S_{11}|$ nepārsniedz $-0,78$ dB visos pārbaudītajos ieejas jaudas līmeņos. Tie paši ieejas impedances mērījumi tika veikti arī *Powercast P2110B* modulim, kur izmērītais $|S_{11}|$ parametrs rādīja labu salāgojumu.



2.6. att. Sprieguma divkāršotāja taisngrieža ar salāgojošo ķēdi S_{11} Smita diagrammu un $|S_{11}|$ frekvenču raksturlīkne un pie dažādiem jaudas līmeņiem.



2.7. att. Sprieguma divkāršotāja taisngrieža bez salāgojošās ķēdes S_{11} Smita diagramma un frekvenču raksturlīkne un pie dažādiem jaudas līmeņiem.



2.8. att. *Powercast P2110B* moduļa S11 Smita diagramma un frekvenču raksturlīkne pie dažādiem jaudas līmeņiem.

2.4. Secinājumi par *RF-DC* shēmas prototipēšanu

Šajā nodaļā ir aprakstīta taisngriežu – sprieguma divkāršotāja ar salāgojošo ķēdi, sprieguma divkāršotāja bez salāgojošās ķēdes – modelēšana, abu sprieguma divkāršotāju un *Powercast* moduļa prototipēšana *ISM* 863–870 MHz frekvenču diapazonā ieejas jaudas līmenim zem 0 dBm un ieejas impedancesi 50 Ω. Salīdzināta izgatavoto taisngriežu veiktspēja.

Modelēšanas rezultāti un izstrādātā prototipa mērījumi uzrāda līdzīgu veiktspēju sprieguma divkāršotājam ar salāgojošo ķēdi.

Prototipā izmantoto salāgojošās ķēdes komponentu nominālu vērtības neatšķiras no modelētām vērtībām vairāk par 10 %.

Smita diagramma un attiecīgi S11 moduļa frekvenču raksturlīknes parāda, ka sprieguma divkāršotājam ar salāgojošo ķēdi un *Powercast* modulim ieejas pretestība ir salāgota ar 50 Ω un mērīšanas iekārtu ieejām. Līdz ar to barošanas signāla frekvencei *ISM* 863–870 MHz joslā būs maza ietekme uz *RF-DC* pārveidošanas veiktspēju.

3. *RF-DC* pārveidošanas efektivitātes pētījums

Šis pētījums veltīts signāla parametru ietekmes izpētei uz *RF-DC* jaudas pārveidojuma efektivitāti. Pētījumā apskatīti vairāki *RF-DC* pārveidotāji. Pētāmo barošanas signālu parametri ir šādi:

- signāla vidējais ieejas jaudas līmenis;
- signāla frekvence;
- signāla joslas platums;
- daudztoņu signālu apakšnesēju skaits.

Pētījumā apskatītas plaši lietotās modulētu signālu formas, piemēram, sinusoida, *FM* tonāli modulētu signālu, *CHIRP* un mainīgas apliecējas signāla formas, piemēram, daudztoņu signāli ar dažādiem *PAPR* līmeņiem (3.1. tab.).

3.1. tabula

Izmantotie signāla raksturlielumi

Signāla apliecēja	Signāla forma
Konstanta apliecēja	Sinuss
	<i>FM</i> tonālie modulētie signāli
	<i>CHIRP</i> (lineāri pieaugoša frekvence izvēlētajā frekvenču diapazonā)
Mainīga apliecēja	daudztoņu signāli ar augstu <i>PAPR</i> līmeni (<i>HPAPR</i>)
	daudztoņu signāli ar zemu <i>PAPR</i> līmeni (<i>LPAPR</i>)
	daudztoņu signālu apakšnesēji, kas ģenerēti ar gadījuma ģeneratoru (ar konstantu ģenerācijas koeficientu) (<i>RPAPR</i>)

Pētījums veikts ar sprieguma divkāršotāju un *Powercast* RF-DC pārveidotājiem.

Dažādu signāla parametru ietekmes izpēte uz jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu ir iedalīta trīs atšķirīgos pētniecības virzienos:

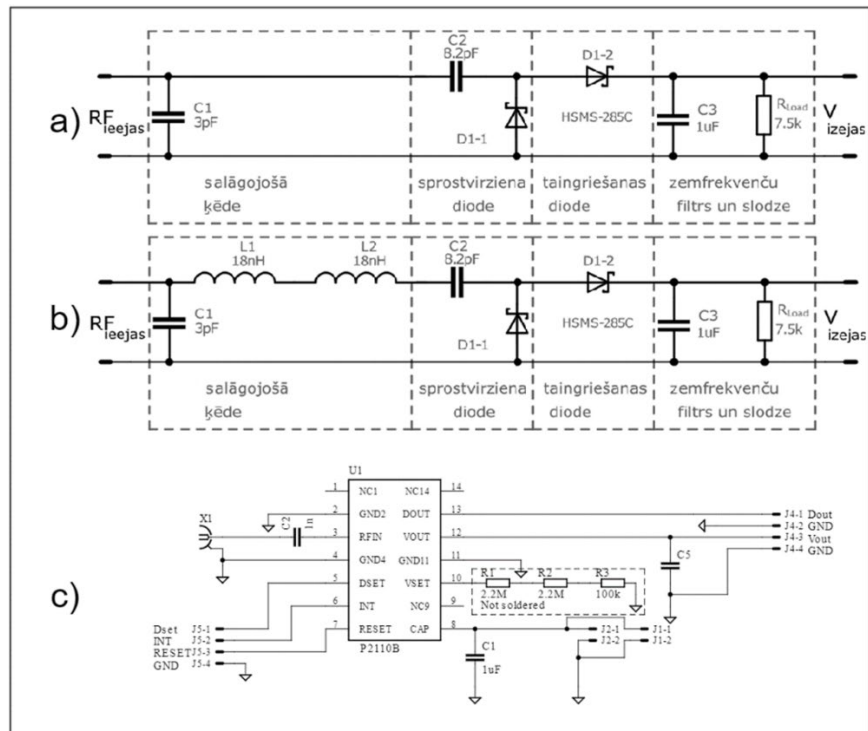
- 1) signāla formas ietekme uz pārveidošanas lietderības koeficientu;
- 2) daudztoņu signāla apakšnesēju skaita ietekme uz pārveidošanas lietderības koeficientu;
- 3) salāgojošās ķēdes ietekme uz pārveidošanas lietderības koeficientu.

RF-DC taisngrieža elementu nominālas vērtības sprieguma divkāršotājam ar salāgojošo ķēdi un bez salāgojošās ķēdes apkopotas 3.2. tabulā, taisngrieža prototipu vispārīgā shēma redzama 3.1 attēlā. Izgatavoto *RF-DC* pārveidotāju prototipi – 3.2 attēlā: a) sprieguma divkāršotājs ar salāgojošo ķēdi; b) sprieguma divkāršotājs bez salāgojošās ķēdes; c) *Powercast* modulis *P2110B*.

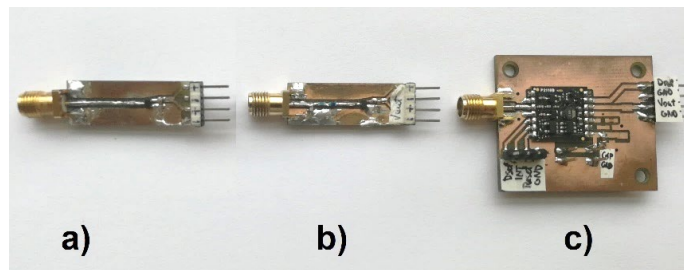
3.2. tabula

Eksperimentālie *RF-DC* taisngriežu parametri

<i>Taisngriezis</i>	<i>Komponenti</i>					
	<i>C</i> ₁ , pF	<i>L</i> ₁ , nH	<i>L</i> ₂ , nH	<i>D</i> ₁ , <i>D</i> ₂	<i>C</i> ₃ , μF	<i>R</i> ₁ , kΩ
<i>RF-DC</i> sprieguma divkāršotāja taisngriezis bez salāgojošās ķēdes	–	–	–	<i>HSMS-285C</i>	1 ± 10 %	7,5 ± 0,1 %
<i>RF-DC</i> sprieguma divkāršotāja taisngriezis ar salāgojošo ķēdi	3.0 ± 0,1	18 ± 5 %	18 ± 5 %	<i>HSMS-285C</i>	1 ± 10 %	7,5 ± 0,1 %



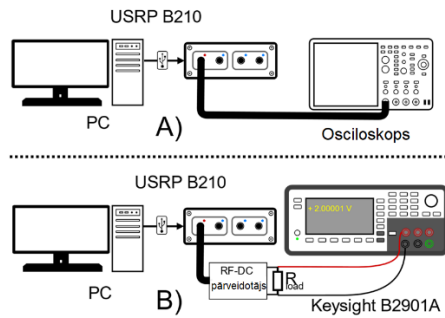
3.1. att. *RF-DC* taisngriežu shēmas: a) *RF-DC* sprieguma divkāršotājs bez salāgojošās ķēdes; b) *RF-DC* sprieguma divkāršotājs ar salāgojošo ķēdi; c) Powercast P2110B modulis.



3.2. att. *RF* taisngriežu prototipi: a) *RF-DC* sprieguma divkāršotājs bez salāgojošās ķēdes; b) *RF-DC* sprieguma divkāršotājs ar salāgojošo ķēdi; c) Powercast P2110B modulis.

Signālu ģenerēšana tiek veikta, izmantojot programmvadāmā radio (*software-defined radio* – *SDR*) ierīci *USRP B210*.

RF-DC mērījumu slēguma shēma redzama 3.3 attēlā, tai ir divas daļas: A daļa, kurā tiek aprēķināts vidējais ieejas jaudas līmenis; B daļa kurā tiek veikti *RF-DC* mērījumi un līdzspriegumu mēra uz taisngrieža slodzes pretestības. Mērījumos izmantotās ierīces veido dators ar *MATLAB/Simulink* programmatūru, *USRP SDR B210*, ciparu osciloskops *Tektronix DPO-72004C* un *PSMU* bloks *Keysight B2901A*. *RF-DC* taisngrieža vidējo izejas jaudu aprēķina, reizinot kvadrātā pārveidoto līdzspriegumu un dalot ar slodzes pretestību. Mērījumi ar *Keysight PSMU* veikti automatizētā veidā, izmantojot autora izstrādātos *MATLAB* skriptus.



3.3. att. *RF-DC* mērījumu slēguma shēma.

3.1. Signāla formas ietekme uz sprieguma pārveidošanas efektivitāti

3.1.1. Mērķis

Šīs apakšnodaļas mērķis ir izpētīt signāla formas ietekmi uz *RF-DC* sprieguma pārveidošanas efektivitāti. Šajā pētījumā apskatīta arī signāla joslas platuma un apakšnesēju skaita ietekme uz *RF-DC* pārveidošanas lietderības koeficientu.

3.1.2. Uzdevumi

Lai novērtētu signāla formas ietekmi uz *RF-DC* pārveidošanas efektivitāti, tika veiktas mērījumu sērijas ar norādītajiem signālu veidiem. Sīkāka informācija par izmantotajiem signālu parametriem apkopota 3.3. tabulā.

3.3. tabula

RF signālu parametri

Signāla forma	Sinuss	<i>HPAPR</i>	<i>LPAPR</i>	<i>RPAPR</i>	<i>FM</i>	<i>CHIRP</i>
Vidējais jaudas līmenis	-25 dBm līdz 2 dBm					
Signāla joslas platums	–	50 kHz, 500 kHz, 5 MHz			5 MHz	150 kHz
Apakšnesēju skaits	1	8			Modulācijas indekss 4,8, 48	–
<i>PAPR</i> līmenis, dB	3	10–33	6–7,5	7,6–12	3	3

3.1.3. Mērījumu konfigurācija un eksperimenti

Mērījumi iedalīti divās daļās: 1) visiem šajā eksperimentā izmantotajiem signāliem tiek mērīts signāla vidējais ieejas jaudas līmenis; 2) signāls tiek padots uz taisngriezi un atbilstošajam ieejas signāla jaudas līmenim tiek mērīts taisngrieztas sprieguma līmenis.

Mērījumi tika veikti ar *RF-DC* sprieguma divkārsotāju ar salāgojošo ķēdi. Eksperimentā izmantotie signālu parametri apkopoti 3.4. tabulā.

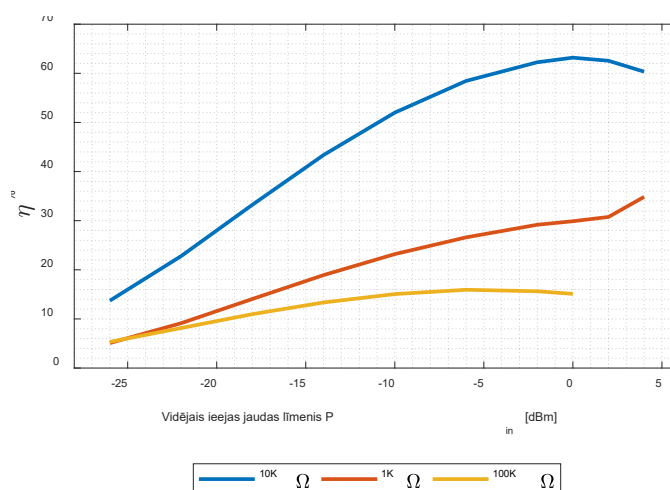
RF-DC taisngriežu frekvenču īpašību raksturojošie parametri

Ieejas jauda, dBm	-10, -6, -2, 0, 2
Frekvence, MHz	863–870
Slodzes rezistors, k Ω	1, 10, 100

3.1.4. Eksperimentu rezultāti

Šajā apakšnodaļā parādīta *RF-DC* sprieguma divkāršotāja ar salāgojošo ķēdi veikspēja ar dažādām signālu formām, signāla joslas platumiem, ieejas jaudas līmeņiem un trim dažādām slodzes rezistoru vērtībām.

Sprieguma pārveidošanas efektivitātes mērījumi veikti ar trim dažādām slodzes rezistoru vērtībām, izmantojot *RF-DC* sprieguma divkāršotāju ar salāgojošo ķēdi, rezultāti redzami 3.4. attēlā. Augstākais jaudas pārveidošanas lietderības koeficients 62 % tika sasniegts ar slodzes pretestību 10 k Ω .

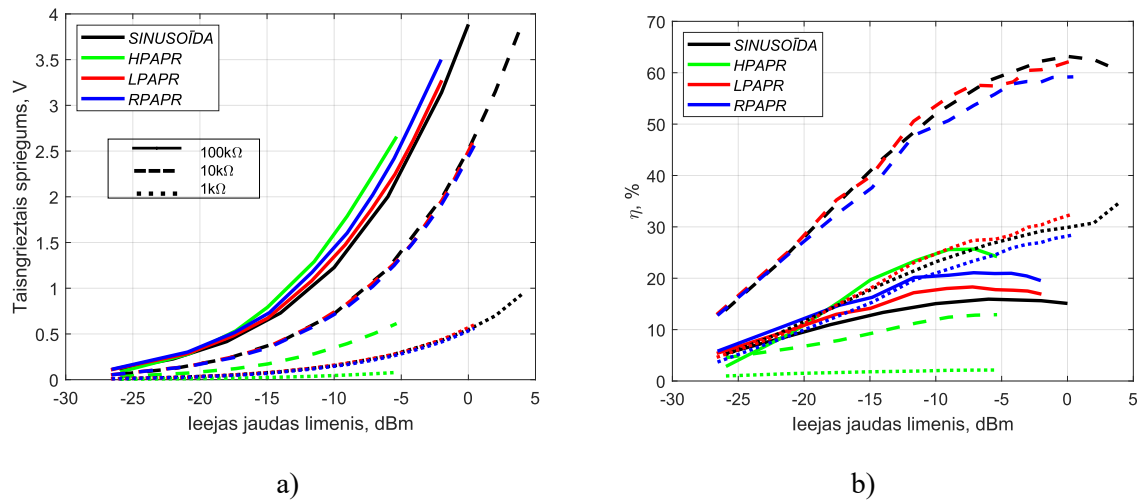


3.4. att. Salāgota *RF-DC* sprieguma divkāršotāja pārveidošanas efektivitāte atkarībā no slodzes pretestības pie dažādiem ieejas jaudas līmeņiem [25].

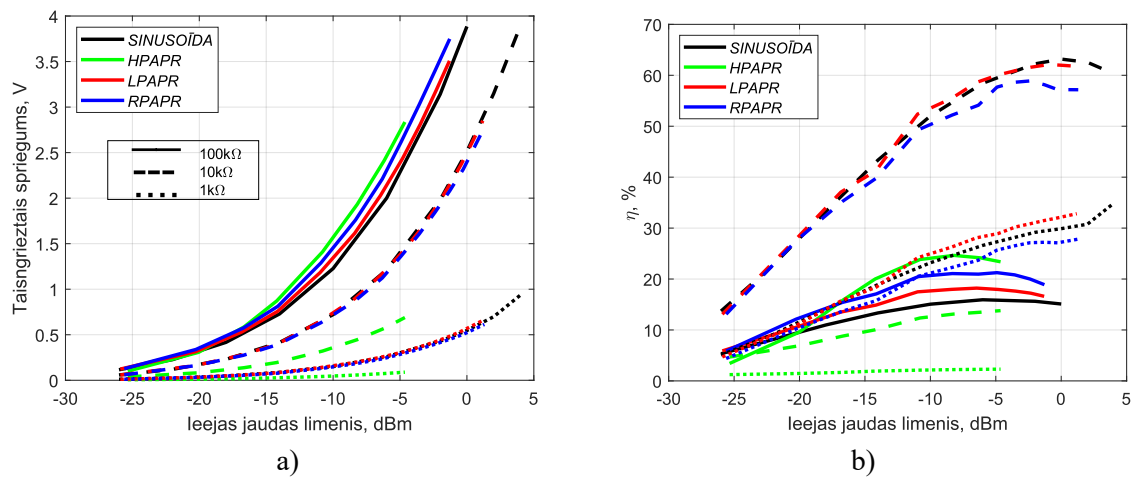
Mērījumi taisngrieža veikspējas noteikšanai atkarībā no ieejas signāla frekvences tika veikti ar 10 k Ω slodzes pretestību. Mērījumā tika izmantots sinusoīdas signāls, kura frekvence tiek mainīta diapazonā 863–870 MHz pie sešiem dažādiem jaudas līmeņiem: -10 dBm; -6 dBm; -2 dBm; 0 dBm; 2 dBm, kas parādīja vienmērīgu veikspēju frekvenču diapazonā 863–870 MHz un attiecīgos efektivitātes līmeņus – 50 %, 57 %, 61 %, 63 %, 63 %, 63 %.

Tika veikta vēl viena mērījumu sērija, kurā izmantoti trīs daudztoņu signāli ar trīs dažādiem joslas platumiem. Šajos mērījumos tika izmantots *HPAPR* – daudztoņu signāls ar augstu *PAPR* līmeni, *LAPR* – daudztoņu signāls ar zemu *PAPR* līmeni un *RPAPR* – daudztoņu signāls ar trim dažādiem joslas platumiem: 50 kHz, 500 kHz, 5 MHz ar astoņiem apakšnesējiem. Iegūtais līdzspriegums un jaudas pārveidošanas lietderības koeficients ar daudztoņu signāla joslas platumiem 5 MHz, 500 kHz, un 50 kHz pie trim slodzes rezistoru vērtībām redzami 3.5.–3.7. attēlā. Salīdzinājumam tika pievienoti arī viena toņa sinusoīdas signāla mērījumu rezultāti. No iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka izvēlētie joslas platumi

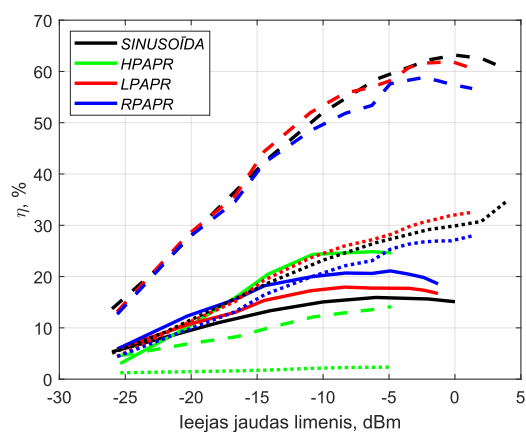
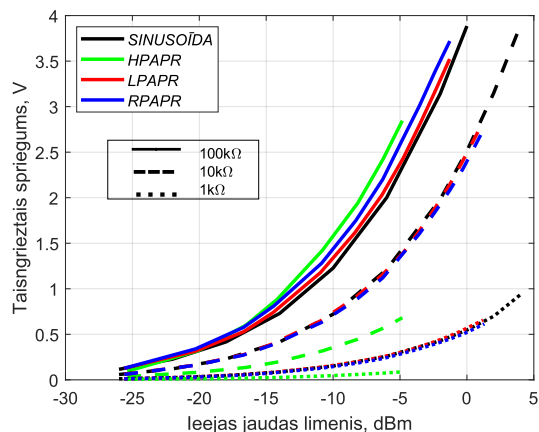
neietekmē pārveidošanas efektivitāti. Visaugstākā efektivitāte tiek iegūta 10 k Ω slodzes gadījumā, savukārt augstākais pārveidotais spriegums – 100 k Ω gadījumā. Zemāka pārveidošanas veiktspēja tiek iegūta ar *HPAPR* signāliem ar attiecīgi 1 k Ω un 10 k Ω slodzi.



3.5. att. Salāgota *RF-DC* sprieguma divkāršotāja veiktspēja atkarībā no signāla formas ar 5 MHz joslas platumu un ieejas jaudas līmeņa. Taisngrieztais spriegums parādīts a) daļā, pārveidošanas lietderības koeficients b) daļā [25].



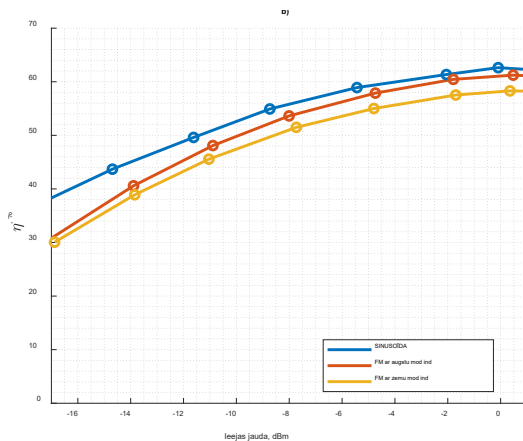
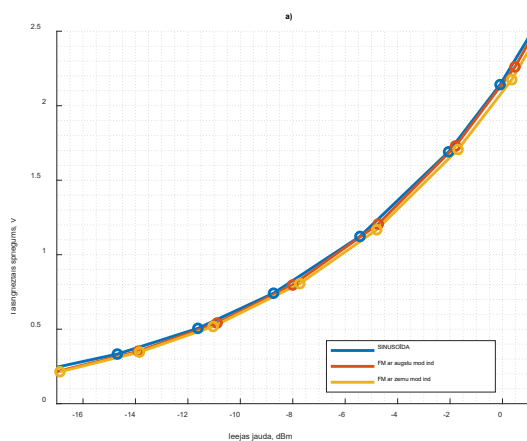
3.6. att. Salāgota *RF-DC* sprieguma divkāršotāja veiktspēja atkarībā no signāla formas ar 500 kHz joslas platumu un ieejas jaudas līmeņa. Taisngrieztais spriegums parādīts a) daļā, pārveidošanas lietderības koeficients b) daļā [25].



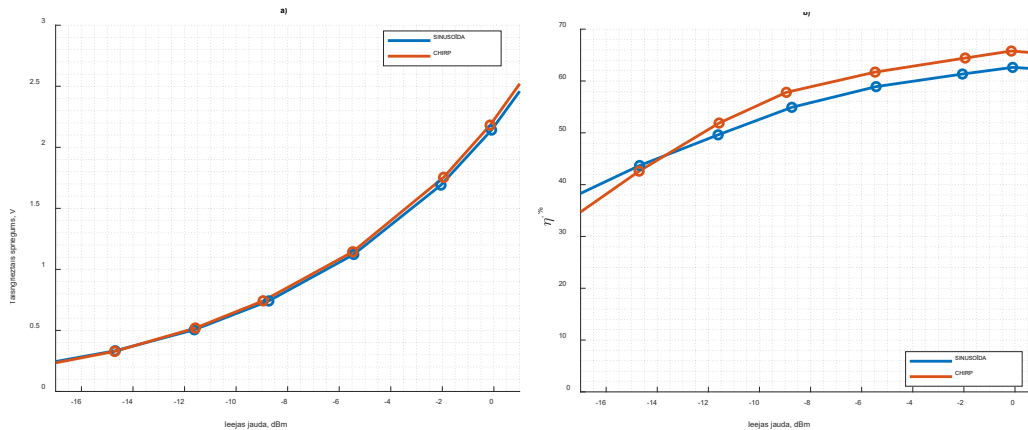
a) b)

3.7. att. Salāgota RF - DC sprieguma divkāršotāja veiktspēja atkarībā no signāla formas ar 50 kHz joslas platumu un ieejas jaudas līmeņa. Taisngrieztais spriegums parādīts a) daļā, pārveidošanas lietderības koeficients b) daļā [25].

Konstantās apliecējas RF signāla sprieguma pārveidošana rāda līdzīgu sprieguma pārveidošanas lietderības koeficientu kā sinusoidālā signāla forma. Rezultāti redzami 3.8. un 3.9. attēlā.



3.8. att. Salāgota RF - DC sprieguma divkāršotāja veiktspēja atkarībā no ieejas jaudas līmeņa ar FM tonāli modulēto signālu ar augstu modulācijas indeksu un zemu modulācijas indeksu. Taisngrieztais spriegums parādīts a) daļā, pārveidošanas lietderības koeficients b) daļā.



3.9. att. Salāgota *RF-DC* sprieguma divkāršotāja veiktspēja atkarībā no čirksts signāla jaudas līmeņa. Taisngrieztais spriegums parādīts a) daļā, pārveidošanas lietderības koeficients b) daļā.

3.1.5. Kopsavilkums par signāla formas ietekmi uz sprieguma pārveidošanas efektivitāti

Apskatītās signālu formas *RF-DC* pārveidē ar sprieguma divkāršotāju ar salāgojošo ķēdi parāda, ka konstantas apliecējas signāli, *LPAPR* un *RPAPR* daudztoņu signālu formas nodrošina līdzīgu sprieguma pārveidošanas lietderības koeficientu kā sinusoīdas signāls ar sprieguma divkāršotāja taisngriezi ar salāgojošo ķēdi. Daudztoņu signāla joslas platuma ietekme uz taisngriezi ir minimāla un nodrošina līdzīgu sprieguma pārveidošanas lietderības koeficientu ar 50 kHz, 500 kHz vai 5 MHz joslas platumu.

3.2. Daudztoņu signāla apakšnesēju skaita ietekme uz sprieguma pārveidošanas efektivitāti

3.2.1. Mērķis

Apakšnodaļa veltīta apakšnesēju skaita ietekmes uz pārveidošanas lietderības koeficientu izpētei ar *RF-DC* sprieguma divkāršotāja taisngriezi ar salāgojošo ķēdi, kā arī *Powercast P2110B* moduli. Šajā nodaļā apskatīti daudztoņu signāli ar trim dažādām signāla formām un apakšnesēju skaitu diapazonā 4–256. *RF-DC* pārveidošanas slodzes pretestības ietekme sīkāk novērtēta ar dažādām signālu formām un dažādu apakšnesēju skaitu.

3.2.2. Uzdevumi

Lai izpētītu apakšnesēju skaita ietekmi uz pārveidošanas lietderības koeficientu, veikta *RF-DC* mērījumu sērija ar trīs veidu signāla formām: *HPAPR*, *LPPAR* un *RPAPR* ar apakšnesēju skaitu diapazonā 4–256.

3.2.3. Mērījumu konfigurācija

RF-DC sprieguma pārveidošanas mērījumu sērija veikta ar trim daudztoņu signāliem. Mērījumu shēma un signālu ģenerēšanas algoritmi aprakstīti 3. nodaļas sākumā. Signāla parametru kopsavilkums apkopots 3.5. tabulā.

RF signālu parametri

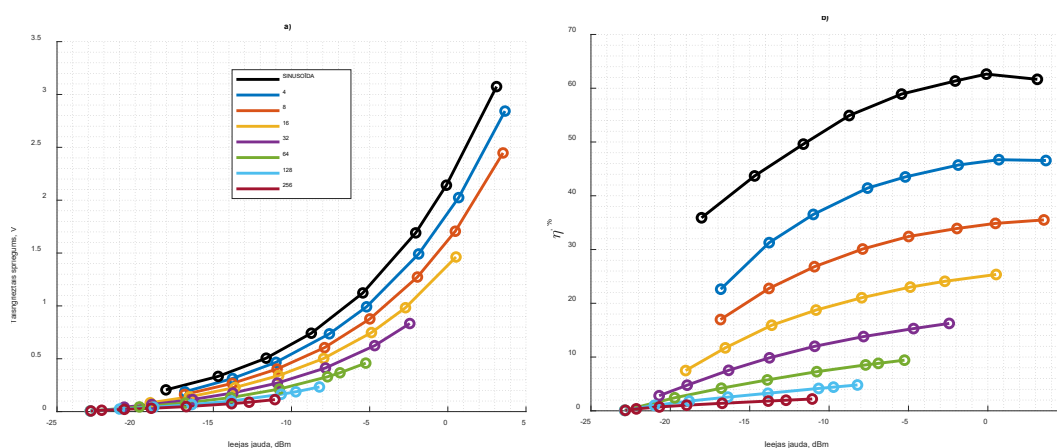
Signāla forma	Sinusoīda	HPAPR	LPAPR	RPAPR
Vidējais jaudas līmenis	-17 dBm līdz 0 dBm			
Signāla joslas platums	–	5 MHz		
Apakšnesēju skaits	1	4–256		
PAPR līmenis, dB	3	10–33	6–7,5	7,6–12

3.2.4. Eksperimentālie rezultāti

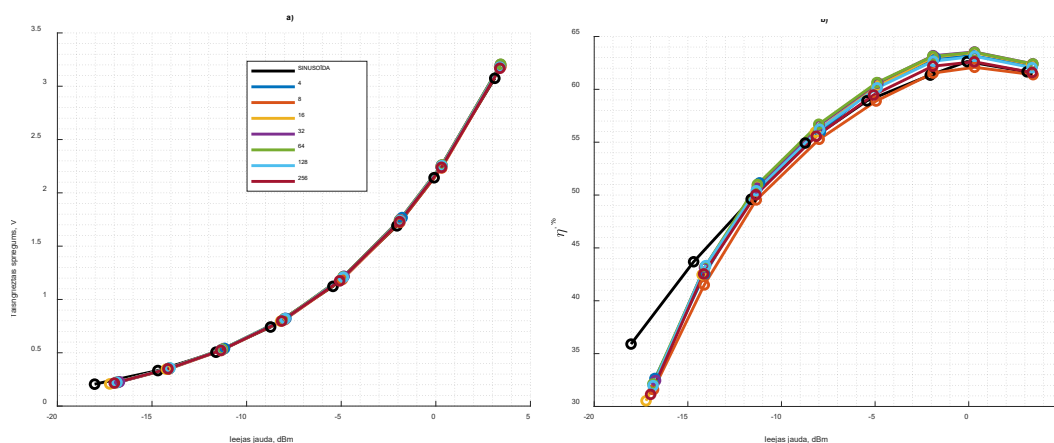
Šajos eksperimentos daudztoņu signāla apakšnesēju skaita ietekme uz *RF-DC* pārveidošanas lietderības koeficientu novērtēta ar trim dažādām signāla formām: *HPAPR*, *LPAPR* un *RPAPR*.

RF-DC sprieguma divkāršotāja taisngrieža veiktspēja ar salāgojošo ķēdi redzama 3.10.–3.12. attēlā, taisngrieztais līdzspriegums uz slodzes pretestības norādīts a) grafikā, sprieguma pārveidošanas lietderības koeficients – b) grafikā.

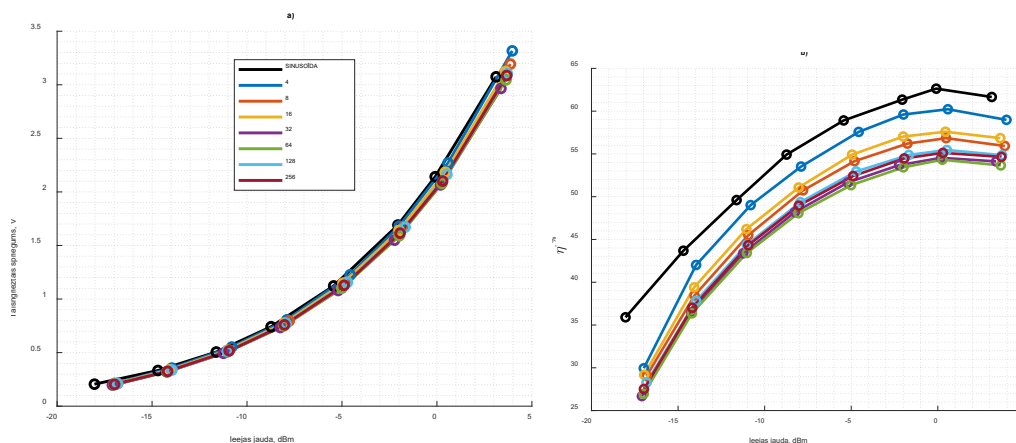
Prototipa *RF-DC* taisngrieža veiktspēja ar salāgojošo ķēdi, kas izmanto *HPAPR* daudztoņu signālu ar dažādu apakšnesēju skaitu, redzama 3.10. attēlā. Jaudas pārveidošanas veiktspēja ir atkarīga ne tikai no signāla formas, bet arī no apakšnesēju skaita. Apakšnesēju skaita pieaugums samazina pārveidoto izejas spriegumu slodzes pretestībā, un sprieguma pārveidošanas lietderības koeficients kopumā ir zemāks nekā tad, ja tiek izmantots sinusoīdas signāls. Jaudas pārveidošanas veiktspēja *LPAPR* un *RPAPR* signālu gadījumā ir diezgan līdzīga sinusoidālajam signālam, kā redzams 3.11. un 3.12. attēlā.



3.10. att. Salāgota *RF-DC* sprieguma divkāršotāja veiktspēja atkarībā no *HPAPR* daudztoņu signāla ar apakšnesēju skaita (4–256) un signāla jaudas līmeņa. Taisngrieztais spriegums parādīts a) daļā, pārveidošanas lietderības koeficients b) daļā.

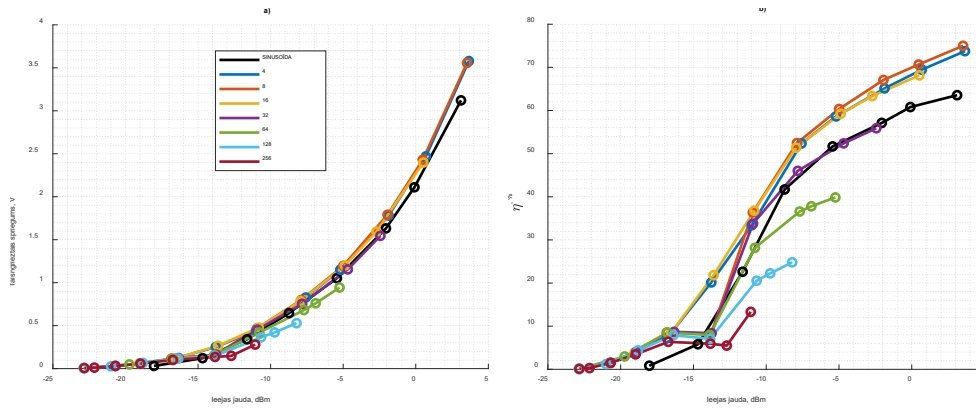


3.11. att. Salāgota *RF-DC* sprieguma divkāršotāja veiktspēja atkarībā no *LPAPR* daudztoņu signāla ar apakšnesēju skaita (4–256) un signāla jaudas līmeņa. Taisngrieztais spriegums parādīts a) daļā, pārveidošanas lietderības koeficients b) daļā.

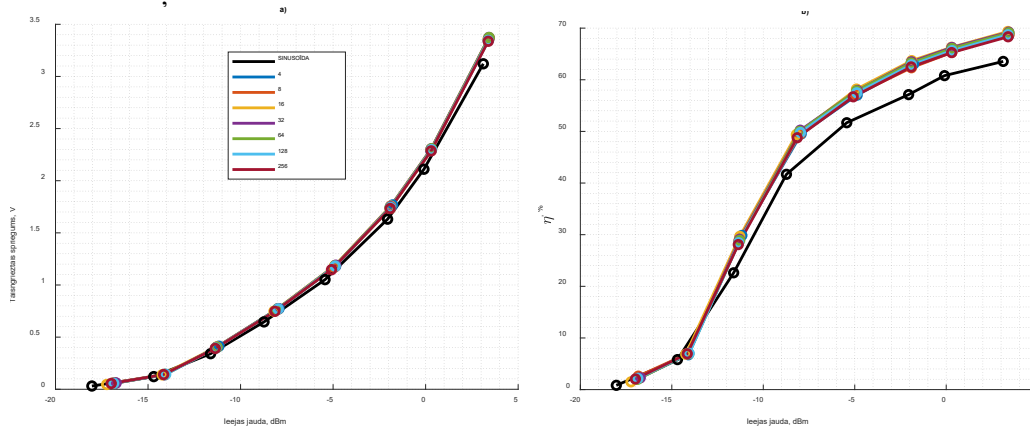


3.12. att. Salāgota *RF-DC* sprieguma divkāršotāja veiktspēja atkarībā no *RPAPR* daudztoņu signāla ar apakšnesēju skaita (4–256) un signāla jaudas līmeņa. Taisngrieztais spriegums parādīts a) daļā, pārveidošanas lietderības koeficients b) daļā.

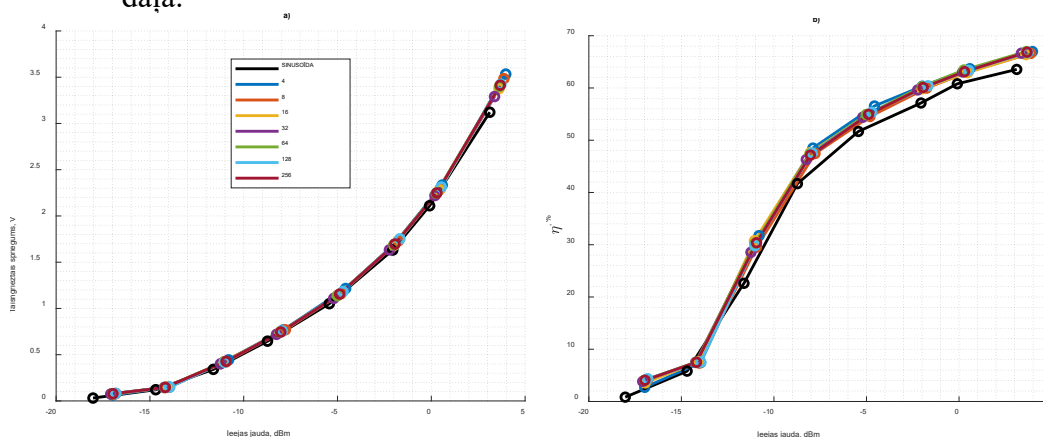
Komerčiāli pieejamā *Powercast P2110 RF-DC* pārveidotāja moduļa veiktspēja redzama 3.13. attēlā. Attēla a) daļā ir parādīts taisngrieztais spriegums, b) daļā sprieguma pārveidošanas lietderības koeficients atkarībā no *HPAPR* daudztoņu ieejas signāla vidējā jaudas līmeņa un apakšnesēju skaita. Kopumā *Powercast* pārveidotāja veiktspēja ar *HPAPR* daudztoņu signāla formu uzrāda līdzīgu tendenci kā *RF-DC* sprieguma divkāršotāja pārveidotājam ar salāgojošo ķēdi: palielinot apakšnesēju skaitu, sprieguma pārveidošanas lietderības koeficients samazinās pie tāda paša ieejas jaudas līmeņa, tomēr lietderības koeficienta samazinājums ar *Powercast* moduli ir mazāk straujš, salīdzinot ar sprieguma divkāršotāja pārveidotāju ar salāgojošo ķēdi.



3.13. att. RF-DC pārveidotāja moduļa Powercast P2110B veiktspēja atkarībā no HPAPR daudztoņu signāla ar apakšnesēju skaita (4–256) un signāla jaudas līmeņa. Taisngrieztais spriegums parādīts a) daļā, pārveidošanas lietderības koeficients b) daļā.



3.14. att. RF-DC pārveidotāja moduļa Powercast P2110B veiktspēja atkarībā no LPAPR daudztoņu signāla ar apakšnesēju skaita (4–256) un signāla jaudas līmeņa. Taisngrieztais spriegums parādīts a) daļā, pārveidošanas lietderības koeficients b) daļā.

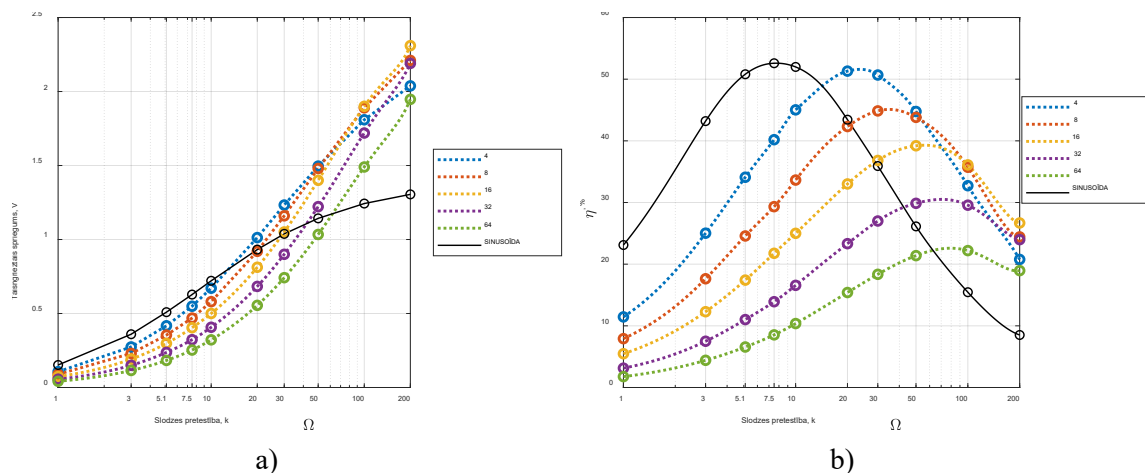


3.15. att. RF-DC pārveidotāja moduļa Powercast P2110B veiktspēja atkarībā no RPAPR daudztoņu signāla ar apakšnesēju skaita (4–256) un signāla jaudas līmeņa. Taisngrieztais spriegums parādīts a) daļā, pārveidošanas lietderības koeficients b) daļā.

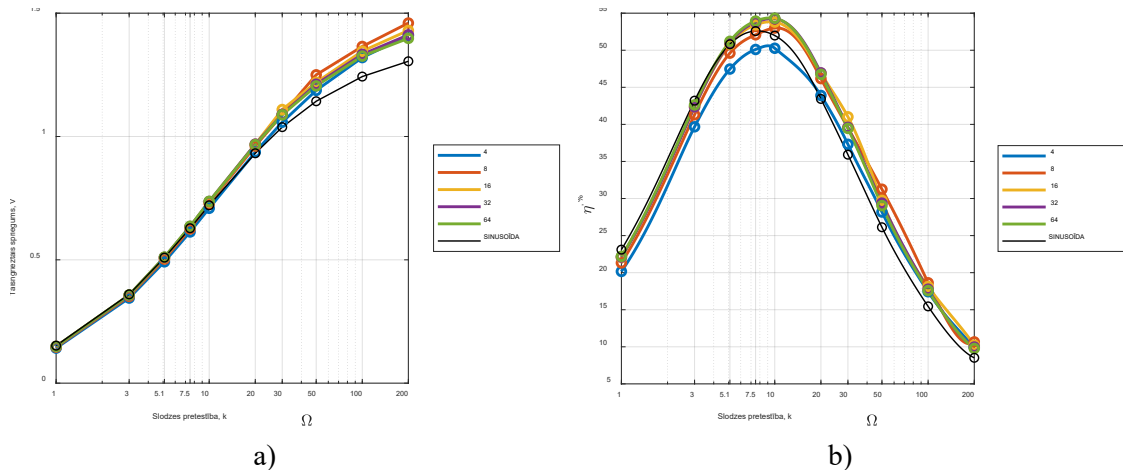
Powercast moduļa *RF-DC* jaudas pārveide, izmantojot *LPAPR* un *RPAPR* daudztoņu signālus, uzrāda līdzīgu tendenci kā *RF-DC* sprieguma divkāršotāja taisngriezis ar salāgojošo ķēdi. Apakšnesēju skaits *LPAPR* un *RPAPR* daudztoņu signāliem minimāli ietekmē pārveidošanas lietderības koeficientu *Powercast* modulim. *Powercast* pārveidotājs uzrāda tādu pašu jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu neatkarīgi no apakšnesēju skaita, kā parādīts 3.14. un 3.15. attēlā.

Iepriekšējie eksperimentālie dati liecina, ka jaudas pārveidošanas lietderības koeficients ir atkarīgs no signāla formas, ieejas jaudas līmeņa un slodzes pretestības. Tiek izvirzīta hipotēze, ka sprieguma pārveidošana ar dažādas formas signāliem būs atkarīga arī no ieejas jaudas līmeņa un slodzes pretestības. *RF-DC* pārveide ir atkarīga arī no frekvences. Tomēr veiktie mērījumi liecina, ka sprieguma divkāršotāja ar salāgojošo ķēdi var uzskatīt par neatkarīgu no frekvences norādītajā *ISM* frekvenču diapazonā 863–870 MHz. Tāpēc tika veikti papildu *RF-DC* sprieguma pārveidošanas eksperimenti, kuros slodzes pretestības vērtība tika mainīta diapazonā 1–200 kΩ, izmantojot sprieguma divkāršotāja pārveidotāju ar salāgojošo ķēdi. Ar šo pašu *RF-DC* pārveidotāju tika veikta vēl viena mērījumu sērija, izmantojot dažāda līmeņa daudztoņu signālus ar apakšnesēju skaitu 4–64.

LPAPR daudztoņu signālam ir līdzīgs *PAPR* līmenis kā *RPAPR* daudztoņu signālam, tāpēc tika pētīta tikai *HPAPR* un *LPAPR* daudztoņu signāla jaudas pārveidošanas lietderības koeficienta atkarība no slodzes pretestības vērtības, kā redzams 3.16. un 3.17. attēlā, kur taisngrieztais līdzspriegums ir parādīts a) daļā, sprieguma pārveidošanas lietderības koeficients ir parādīts b) daļā. Rezultāti liecina, ka, izmantojot *HPAPR* daudztoņu signālu, pretestības vērtība, pie kuras tiek sasniegta vislielākā efektivitāte, mainās atkarībā no apakšnesēju skaita. Piemēram, izmantojot *HPAPR* daudztoņu signālu ar četriem apakšnesējiem, optimālākā slodzes pretestības vērtība ir 23 kΩ, ar astoņu apakšnesēju daudztoņu signālu – 35 kΩ utt. Turklāt, pieaugot apakšnesēju skaitam, samazinās maksimālais sasniedzamais lietderības koeficients.



3.16. att. *RF-DC* sprieguma divkāršotāja ar salāgojošo ķēdi veiktspēja atkarībā no *HPAPR* daudztoņu signāla ar apakšnesēju skaita (4–64) un slodzes pretestības pie –10 dBm ieejas jaudas līmeņa. Taisngrieztais spriegums parādīts a) daļā, pārveidošanas lietderības koeficients b) daļā.



3.17. att. *RF-DC* sprieguma divkāršotāja ar salāgojošo ķēdi veiktspēja atkarībā no *LPAPR* daudztoņu signāla ar apakšnesēju skaita (4–64) un slodzes pretestības pie -10 dBm ieejas jaudas līmeņa. Taisngrieztais spriegums parādīts a) daļā, pārveidošanas lietderības koeficients b) daļā.

3.2.5. Kopsavilkums par daudztoņu signāla apakšnesēju skaita ietekmi uz sprieguma pārveidošanas efektivitāti

FM modulētā, *CHIRP*, *LPAPR* un *RPAPR* daudztoņu signāla izmantošana jaudas pārveidošanā ar *RF-DC* sprieguma divkāršotāja taisngriezi ar salāgojošo ķēdi dod līdzīgus rezultātus kā sinusoidālā signāla izmantošanas gadījumā. Lai gan mērījumi ar sprieguma divkāršotāju ar salāgojošo ķēdi, izmantojot *HPAPR* daudztoņu signālus, liecina, ka slodzes pretestības vērtība ir atbilstoši jāpielāgo apakšnesēju skaitam, lai sasniegtu maksimālo jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu.

3.3. Salāgojošās ķēdes ietekme uz *RF-DC* pārveidošanas efektivitāti

3.3.1. Mērķis

Šī eksperimentu sērija veltīta salāgojošās ķēdes ietekmes uz *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficienta izpētei. Šajā apakšnodalā tiek pētīts sprieguma divkāršotājs ar un bez salāgojošās ķēdes ar *HPAPR* daudztoņu signālu.

3.3.2. Uzdevumi

Šī pētniecības virziena mērķis ir novērtēt salāgojošās ķēdes ietekmi uz jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu, tādēļ tika izveidots viens un tas pats taisngriezis ar un bez salāgojošās ķēdes.

3.3.3. Mērījumu konfigurācija un eksperimenti

Mērījumi ir iedalīti divās daļās: 1) visiem eksperimentā izmantotajiem signāliem tiek mērīts signāla vidējais ieejas jaudas līmenis; 2) signāls tiek padots uz taisngriezi, un atbilstošajam ieejas jaudas līmenim tiek mērīts taisngrieztais sprieguma līmenis; signāla parametri apkopoti 3.6. tabulā.

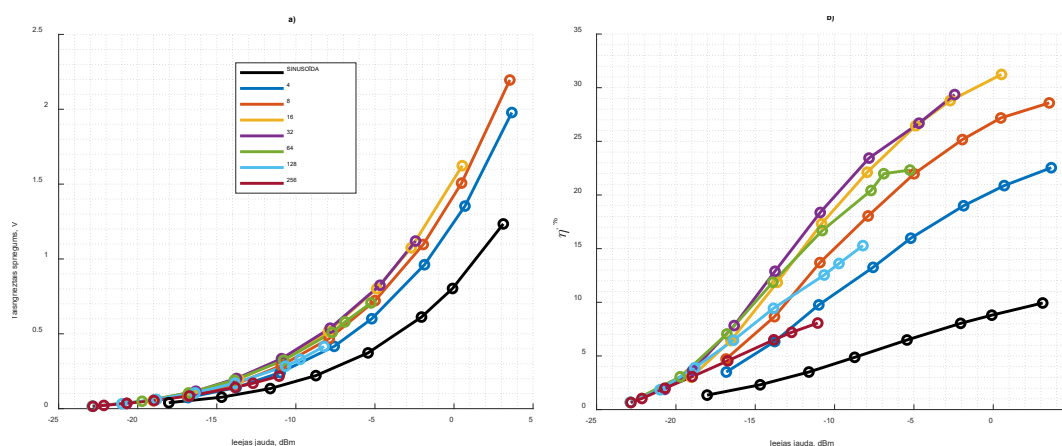
RF signāla parametri

Signāla forma	Sinuss	HPAPR	LPAPR	RPAPR	FM	CHIRP
Vidējais jaudas līmenis	-17 dBm līdz 0 dBm					
Signāla joslas platums	–	5 MHz			5 MHz	150 KHz
Apakšnesēju skaits	1	4–256			Modulācijas indekss 4,8, 48	–
PAPR līmenis, dB	3	10–33	6–7,5	7,6–12	3	3

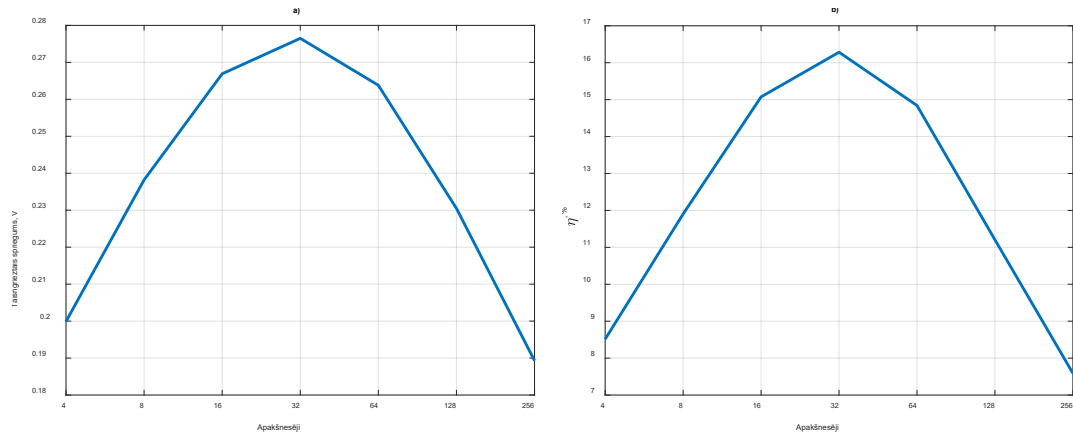
3.3.4. Eksperimentālie rezultāti

Jaudas pārveidošanas mērījumi tika veikti *RF-DC* taisngriežim ar salāgojošo ķēdi un bez salāgojošās ķēdes ar sprieguma divkāršotāja topoloģiju. Tika iegūti jaudas pārveides mērījumi ar dažādām signāla formām, ieskaitot konstantu apliecēju un dažādus mainīgas apliecējas signālu formas.

Mērījumi tika veikti ar daudztoņu signālu ar augstu *PAPR* līmeni, izmantojot taisngriezi bez salāgojošās ķēdes. 3.18. attēlā redzams a) taisngrieztais līdzspriegums un jaudas pārveidošanas lietderības koeficients b) *RF-DC* sprieguma divkāršotājam bez salāgojošās ķēdes ar augsta *PAPR* līmeņa daudztoņu signāliem. Taisngrieztais līdzsprieguma līmenis ir atkarīgs no apakšnesēju skaita, kā parādīts 3.19. attēlā.



3.18. att. *RF-DC* sprieguma divkāršotāja bez salāgojošās ķēdes veiktspēja atkarībā no *HPAPR* daudztoņu signāla ar apakšnesēju skaitu 4–64 un signāla jaudas līmeņa. Taisngrieztais līdzspriegums parādīts a) daļā, pārveidošanas lietderības koeficients b) daļā.



3.19. att. *RF-DC* sprieguma divkāršotāja bez salāgojošās ķēdes pārveidošanas veiktspēja atkarībā no *HPAPR* daudztoņu signāla apakšnesēju skaita 4–256 ar ieejas signāla jaudas līmeni –12 dBm. Taisngrieztais spriegums parādīts a) daļā, pārveidošanas lietderības koeficients b) daļā.

Pārveidotāja veiktspēja ar *LPAPR* un *RPAPR* daudztoņu signāliem, kā arī *FM* tonāli modulētiem un *CHIRP* signāliem ir salīdzinoši zema un līdzīga veiktspējai, kas novērota ar sinusoīdas signālu.

3.3.5. Kopsavilkums par salāgojošās ķēdes ietekmi uz *RF-DC* pārveidošanas efektivitāti

Novērtēta salāgojošās ķēdes ietekme uz sprieguma divkāršotāja topoloģiju ar dažādām signāla formām. Jaudas pārveidei, izmantojot *LPAPR* daudztoņu signālus ar taisngriezi bez salāgojošās ķēdes, ir līdzīga veiktspēja, kā tad, ja tiek izmantoti sinusoīdu un *RPAPR* daudztoņu signāli. Daudztoņu signāla apakšnesēju skaita ietekme ar *LPAPR* un *RPAPR* signāliem ir ierobežota, ja jaudas pārveidošanas koeficients attiecīgi svārstās mazāk nekā 2 % un 4 % toņu skaitam diapazonā 4–256. Situācija ir atšķirīga ar augsta *PAPR* līmeņa daudztoņu signāliem. Taisngrieža jaudas pārveidošanas tendence ar salāgojošo ķēdi liecina, ka apakšnesēju skaita pieaugums radīs sprieguma pārveidošanas efektivitātes samazināšanos. *RF-DC* pārveidotājam bez salāgojošās ķēdes situācija ir līdzīga. Tomēr ir atbilstoša apakšnesēju vērtība, kur apakšnesēju pieaugums dos augstāku jaudas pārveidošanas koeficientu nekā pārveidotājs ar salāgojošo ķēdi. Arī *CHIRP* signāla izmantošana jaudas pārveidošanā uzrāda līdzīgu jaudas pārveidojuma lietderības koeficientu kā sinusoīdas signāla izmantošana, jo šim signālam ir tāds pats *PAPR* līmenis kā sinusoīdas signālam.

3.4. Secinājumi par *RF-DC* pārveidošanas efektivitātes pētījumu

Šajā nodaļā izpētīta *RF* signālu īpašību ietekme uz *RF-DC* pārveidošanas efektivitāti prototipētiem taisngriežiem – sprieguma divkāršotājam ar un bez salāgojošās ķēdes. Eksperimentālais pētījums veikts *ISM* 863–870 MHz frekvenču diapazonā. Analizētajiem signāliem ir dažādi apliecējas formas, vidējās jaudas līmeņi, joslas platumi, apakšnesēju skaits, un *PAPR* līmeni.

Pētījuma galvenie secinājumi

- Konstantas apliecējas signāli (sinuss, *FM* modulēts, *CHIRP*), *LPAPR* un *RPAPR* daudztoņu signāli nodrošina tādu pašu pārveidošanas lietderības koeficientu sprieguma divkāršotāja gadījumā ar salāgojošo ķēdi.
- Daudztoņu signāla joslas platuma ietekme uz taisngrieža veiktspēju ir minimāla visos apskatītos gadījumos (50 kHz, 500 kHz, 5 MHz).
- Slodzes pretestības pielāgošana *HPAPR* apakšnesēju skaitam palielina *RF-DC* pārveidošanas lietderības koeficientu divkāršotājam ar salāgojošo ķēdi.
- Daudztoņu *LPAPR* un *RPAPR* signālu apakšnesēju skaits būtiski neietekmē *RF-DC* pārveidošanas efektivitāti sprieguma divkāršotāja gadījumā bez salāgojošā ķēdes.
- *HPAPR* apakšnesēju skaita pieaugums samazina sprieguma pārveidošanas lietderības koeficientu sprieguma divkāršotāja gadījumā ar salāgojošo ķēdi.

4. Eksperimentāls pētījums par *WPT* veiktspēju

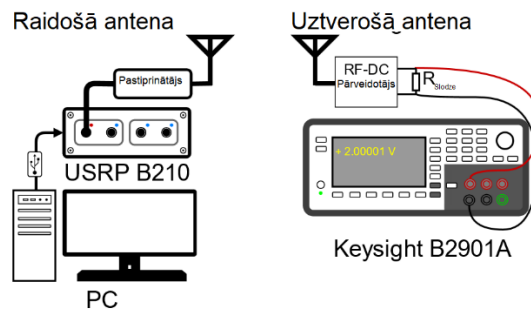
Bezvadu kanālu modelēšana *WPT* procesa izpētē balstās kompromisā starp modeļa precizitāti, ko nosaka elektromagnētisko viļņu izplatīšanas fizisko efektu definēšana, iekļaujot materiālu īpašības, un skaitļošanas laiku un resursiem. Lai gan ir vēlams visprecīzākais modelis, skaitļošanas resursi ir stingri ierobežojošais faktors, tas nozīmē, ka saprātīgi vienkāršotiem modeļiem var būt plašāks lietojums. Taču rezultāti dažādās vidēs var radīt nesakrītības, ko nevar paredzēt ar simulācijām. Eksperimentālais pētījums par *WPT* veiktspēju dod iespēju turpmāk izstrādāt teorētisko modeli, sašaurinot kanāla modelēto fizisko īpašību kopu līdz nozīmīgākajām.

Šī iemesla dēļ tika veikti eksperimentāli *WPT* veiktspējas pētījumi laboratorijā. Eksperimentālajos pētījumos galvenā uzmanība tika pievērsta būtisko pārvades parametru noteikšanai pēc to ietekmes uz iegūtās enerģijas daudzumu, izmantojot *RF-DC* pārveidotājus. Šajā pētījumā apskatīti šādi *WPT* ietekmējošie interesējošie parametri:

- attālums starp raidošajām un uztverošajām antenām;
- antenas tipa ietekme iekštelpās;
- signāla frekvences ietekme;
- signāla formas ietekme.

4.1. Mērījumu konfigurācija

Šajā apakšnodaļā aprakstīta mērījumu shēma, kas tika izmantota, lai veiktu eksperimentālos *WPT* veiktspējas pētījumus. Mērījumi tika veikti, izmantojot 4.1 attēlā redzamo shēmu. Signāls tiek ģenerēts reālā laikā, izmantojot MATLAB/SIMULINK programmatūru, un pārsūtīts uz programmvadāmo radio (SDR) USRP B210. SDR ģenerētie signāli tiek pastiprināti, izmantojot ārēju pastiprinātāju, kura pamatā ir MMG3006NT1 un MW7IC008N integrālās shēmas. Uztvērējā antenas izeja ir savienota ar *RF-DC* pārveidotāju, un *RF-DC* pārveidotāja izejas jauda tiek mērīta, izmantojot Keysight PSMU B2910A ierīci.



4.1. att. *WPT* mērījumu slēguma shēma [59].

4.2. *WPT* veiktspējas ietekmējošo faktoru izpēte

Pirmā pētījuma mērķis bija noteikt, kā jaudas signāla frekvence ietekmē saņemtās jaudas līmeni. Mērījumi tika veikti vairākām signālu frekvencēm un attālumiem starp abām antenām. Pastiprinātāja izejā tika iestatīts jaudas līmenis – 22,3 dBm. Eksperimenta laikā signāla frekvence tika mainīta no 863 MHz līdz 870 MHz (*ISM* josla), attālums starp antenām tika mainīts diapazonā no 0,6 m līdz 3 m (no 1,73 līdz 8,6 viļņu garuma), mērot uztverošās antenas vidējo izejas jaudu pie 50 Ω slodzes. Antenas tika novietotas 1 m augstumā. Mērījumiem izmantoti divi dažādi antenu pāri: *LP0410* virziendarbības antenas ar pastiprinājumu 6 dBi katra, *VERT900* dipola antenu ar pastiprinājumu 3 dBi katra.

Otrā pētījuma mērķis bija izpētīt, kā dažādas enerģiju nesošās signāla formas un apakšnesēju skaits ietekmē *WPT* uztverto jaudu un taisngriezto spriegumu. Šis eksperiments tika veikts sprieguma divkāršotāja prototipam ar salāgojošo ķēdi un komerciāli pieejamajam *Powercast P2110B* modulim.

Trešajā pētījumā tika noteikts, kā frekvences modulētais (*FM*) jaudas nesošais signāls ar dažādiem modulācijas indeksiem ietekmē *WPT* pievadīto spriegumu. Šādas signāla formas pētījumu pamatā iespējama lietojums ir vienlaikus bezvadu informācijas un jaudas pārvade (*SWIPT*).

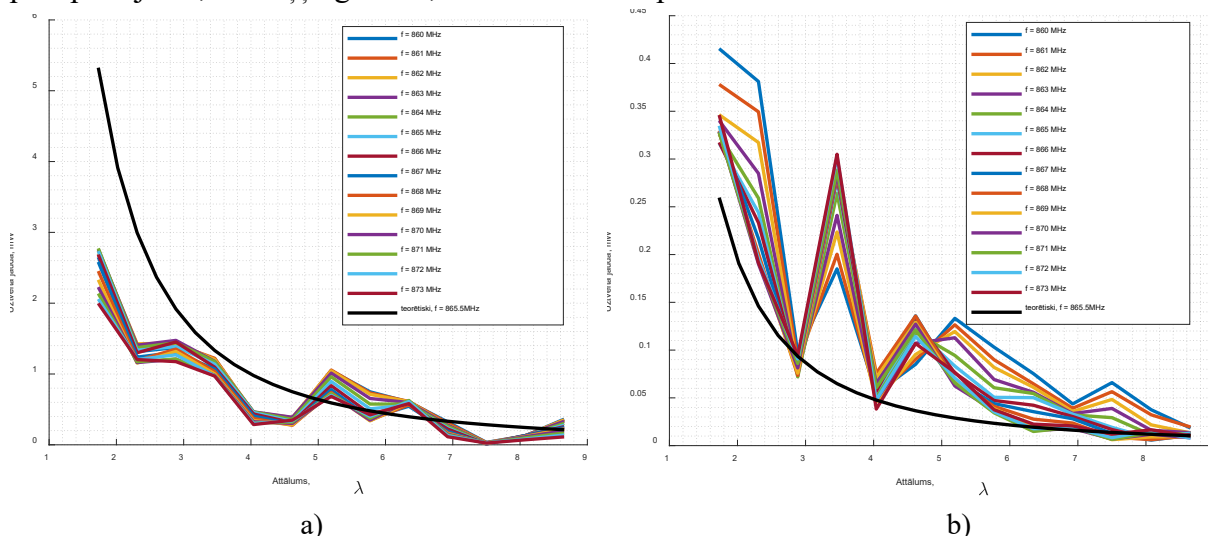
4.2.1. Signāla frekvences ietekme uz *WPT* veiktspēju

Šajā apakšnodalā pētīta *WPT* mērījumu un taisngrieztā sprieguma līmeņa atkarība no signāla formas, attāluma starp raidošās un uztverošās antenas. Grafiki ar virziendarbības antenu *LP0410* redzami 4.2. a attēlā kopā ar dipola antenu *VERT900* (4.2. att. b). Šajos attēlos esošās līknes parāda uztvērēja antenas izejas jaudu minētajos attālumos starp antenām, kas izteiktas ar garumu katrai *WPT* signāla frekvencei.

Teorētiskais jaudas līmenis, ko varētu iegūt brīvā telpā ar izvēlētajām antenām, ir parādīts 865,5 MHz frekvencē. Šis teorētiskās aplēses pamatā ir Frīsa (*Friis*) pārvades formula, kas redzama 4.1. vienādojumā:

$$P_r = P_t + D_t + D_r + 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right), \quad (4.1)$$

kur: P_r – uztverošās antenas jauda; P_t – raidošās antenas jauda; D_t un D_r – attiecīgo antenu pastiprinājums; λ – viļņa garums; d – attālums starp antenām.



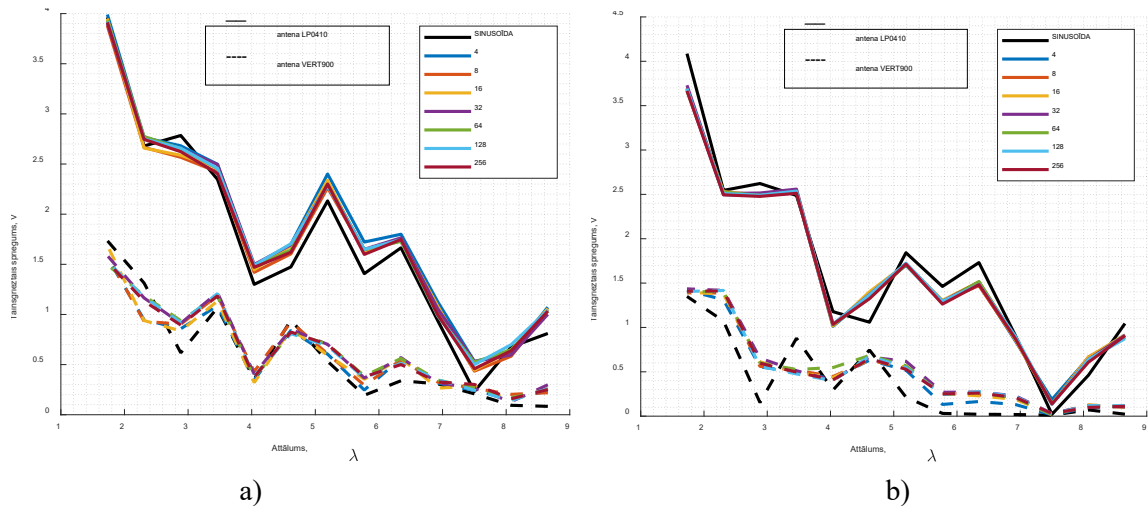
4.2. att. *WPT* saņemtās jaudas līmenis atkarībā no centrālās frekvences, izmantojot a) virziendarbības antenas *LP0410* un b) dipola antenas *VERT900*.

Šī pētījuma rezultāti liecina, ka *WPT* sistēmas modelis ir sarežģītāks un to nevar precīzi novērtēt tikai ar Frīsa pārraides vienādojumu, jo saņemtā jauda mainās atkarībā no antenu izvietojuma.

4.2.2. Signāla formas ietekme uz *WPT* veikspēju

Šī apakšnodaļa veltīta signāla formas ietekmes uz *WPT* izpētei, izmantojot to dažādiem signāliem, piemēram, daudztoņu signāliem, tonāli modulētiem *FM* signāliem, *CHIRP* un sinusoidālu signālu kā references signālu.

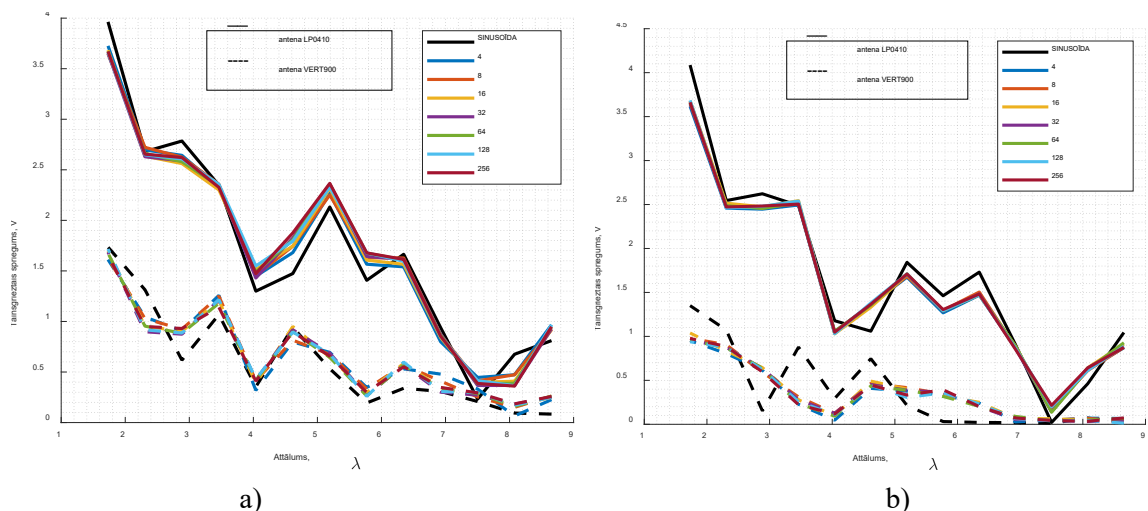
Otrā pētījuma rezultāti redzami 4.3.–4.5. attēlā. 4.3. attēls parāda: a) *RF-DC* pārveidotāja sprieguma divkāršotāja; b) *Powercast* pārveidotāja taisngrieztu izejas sprieguma mērījumus ar vienvirziena *LP0410* un dipola *VERT900* antenām, izmantojot *LPAPR* jaudas nesošo signālu ar dažādu apakšnesēju skaitu. Attālumi starp antenām ir tādi paši kā iepriekšējā pētījumā. Iegūtie rezultāti salīdzināti ar sinusoidas signāla rezultātiem ar tādu pašu nesēja frekvenci un vidējo jaudas līmeni.



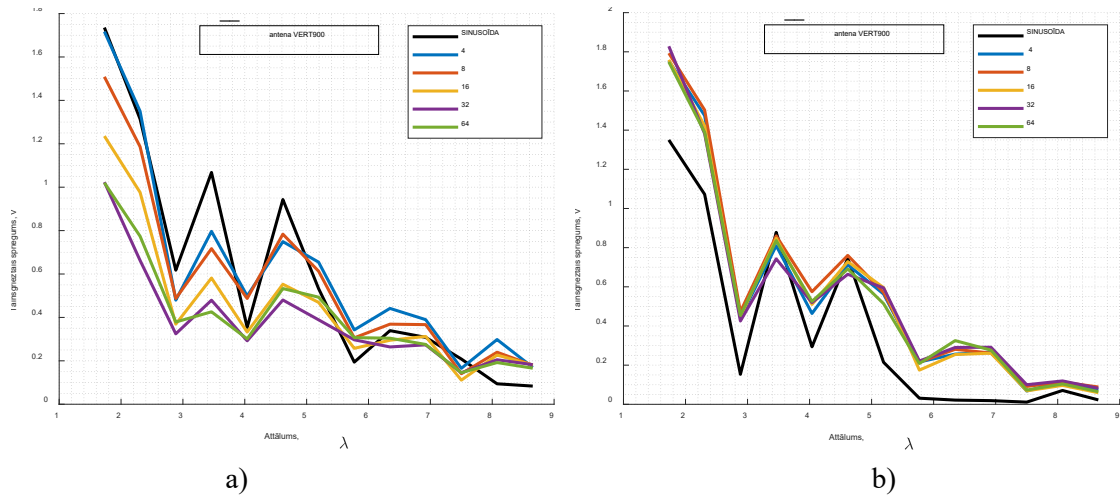
4.3. att. *RF-DC* pārveidotāju: a) sprieguma divkāršotāja pārveidotāja ar salāgojošo ķēdi un b) *Powercast P2110B* moduļa savāktais sprieguma līmenis dažādam *LPAPR* apakšnesēju skaitam.

Pētījumi ar dažādiem formas signāliem neliecina par būtiskām atšķirībām enerģijas vācēju savāktajā spriegumā attālumos $< 2,2$ viļņa garuma. Gadījumos, kad attālums pārsniedz četrus viļņa garumus, *LPAPR* signāli uzrāda lielāku savākto spriegumu nekā sinusoidālais signāls. Attālums, kas mazāks par četriem garumiem, apakšnesēju skaitam ir maza ietekme uz savākto spriegumu. Izmantojot virziendarbības antenas, kur attālums starp antenām ir lielāks nekā četri viļņa garumi, *LPAPR* signālam ar četriem apakšnesējiem ir lielāks savāktais spriegums nekā signāliem ar citu apakšnesēju skaitu (taču tikai nedaudz lielāks). Dipola antenas gadījumā signāla forma, kas dod vislielāko savāktā sprieguma daudzumu, ir atšķirīga atkarībā no antenu novietojuma.

4.4. attēlā redzami mērījumu rezultāti a) sprieguma divkāršotājam un b) *Powercast*, modulim, izmantojot *RPAPR* signāla formu ar dažādu apakšnesēju skaitu. Lielākos attālumos (vairāk nekā četri viļņa garumi) uz sprieguma divkāršotāja balstītais *RF-DC* pārveidotājs darbojas labāk nekā *Powercast P2110B* modulis.



4.4. att. *RF-DC* pārveidotāju: a) sprieguma divkāršotāja pārveidotāja ar salāgojošo ķēdi un b) *Powercast P2110B* moduļa savāktais sprieguma līmenis dažādam *RPAPR* apakšnesēju skaitam.

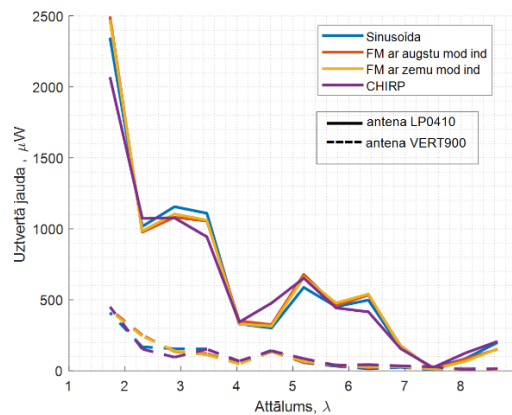


4.5. att. *RF-DC* pārveidotāju: a) sprieguma divkārtotāja ar salāgojošo ķēdi un b) *Powercast P2110B* moduļa savāktais sprieguma līmenis dažādiem *HPAPR* apakšnesēju skaitiem.

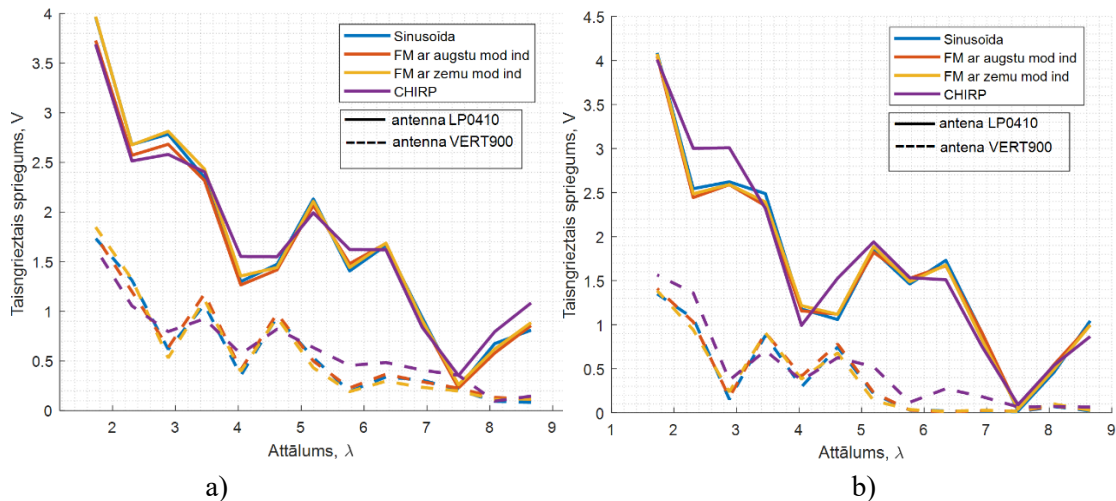
4.2.3. Konstantas apliecējas signāla formas ietekme uz *WPT* veiktspēju

Šī apakšnodaļa veltīta pārveidotā sprieguma līmeņa izpētei *WPT* sistēmā atkarībā no dažādām signāla modulācijām ar vienādu *PAPR* līmeni un nemainīgu apliecēju, piemēram, tonāli modulētajiem *FM* signāliem, *CHIRP* un sinusoīdas signālam.

Trešā pētījuma rezultāti apkopoti 4.6.–4.7. attēlā. 4.6. attēls grafiks parāda diezgan līdzīgus saņemtos vidējos jaudas līmeņus visiem novērotajiem signāliem. 4.7. attēlā salīdzināta *WPT* veiktspēja uz a) sprieguma divkārtotāja balstīto un b) *Powercast* moduļa pārveidotājiem, izmantojot virziendarbības un dipola antenas. 4.7. attēlā redzami rezultāti apstiprina, ka *FM* modulētos signālus var izmantot *WPT* ar tādu pašu efektivitāti kā sinusoīdas signālu, kas dod papildu iespēju īstenot vienlaikus gan informācijas, gan jaudas pārraidi (*SWIPT*) ar vienu signālu.



4.6. att. Saņemtās vidējās jaudas līmenis antenu izejā atkarībā no *WPT* attāluma [60].



4.7. att. *WPT* attāluma ietekme uz *RF-DC* pārveidoto spriegumu ar a) *RF-DC* sprieguma divkāršotāja pārveidotāja ar salāgojošo ķēdi un b) *Powercast P2110B* moduli, izmantojot pastāvīgas apliecējas signālus [60].

4.3. Secinājumi par *WPT* veikspējas eksperimentālo pētījumu

Šajā nodaļā aprakstīto eksperimentālo pētījumu mērķis ir bezvadu enerģijas pārvades izpēte tiešas redzamības gadījumā, ņemot vērā dažādus signālu parametrus, dažāda veida antenas un attālumu starp tām. Pētījumam tika izmantoti izgatavotie taisngriežu prototipi – sprieguma divkāršotājs ar salāgojošo ķēdi un *Powercast P2110B* modulis *ISM* 863–870 MHz frekvenču diapazonā ar virziendarbības un dipola antenām.

Veiktais pētījums parādīja, ka:

- sarežģītāku formu izmantošanai *WPT* ir zināmas priekšrocības – daudztoņu signālu izmantošana ļauj efektīvāk savākt enerģiju, savukārt *FM* signālu izmantošana paver iespējas informācijas un enerģijas vienlaikus pārraidei;
- uztvertās vidējās jaudas līmenis enerģijas vācējam ir atkarīgs no signāla frekvences, kas skaidrojams ar vairākceļu izplatīšanas izraisītām atšķirību novērotajām frekvencēm *ISM* 863–870 MHz diapazonā slēgtā telpā;
- uz sprieguma divkāršotāja topoloģijas balstīts *RF-DC* pārveidotāja lietderības koeficients atbilst un pat pārsniedz komerciāli pieejamā *Powercast P2110B RF-DC* pārveidošanas lietderības koeficientu;
- Frīsa vienādojums nenodrošina pietiekamu tuvinājumu slēgtā telpā, lai novērtētu vidējo saņemto jaudu uztvērēja ieejā un novērtētu *WPT* veikspēju;
- pastāvīgas apliecējas signāli ar vienādu jaudas līmeni dod vienādu pārveidoto sprieguma līmeni, tāpēc šos signālus var izmantot *SWIPT* sistēmām. Vienlaikus var pārraidīt datus un enerģiju atbilstoši ierīcei (sensors mezglam).

Secinājumi

Promocijas darbs ir eksperimentāla *RF* signāla parametru ietekmes uz *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu un bezvadu enerģijas pārvades (*WPT*) veikspēju izpēte. Galvenais pētījuma objekts ir sprieguma divkāršotāja izmantošana bezvadu enerģijas pārraidei *ISM* 863–870 MHz frekvenču diapazonā ar dažāda veida barošanas signāliem.

Lai sasniegtu mērķi, ir izpildīti vairāki uzdevumi.

- Veikta taisngrieža teorētiskā analīze, ieskaitot modeļu izstrādi un parametru optimizāciju.
- Izstrādāti prototipi dažādiem *RF-DC* pārveidotāju risinājumiem.
- Eksperimentāli izpētīta izstrādāto *RF-DC* pārveidotāja moduļu *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficienta atkarība no *RF* signāla parametriem.
- Eksperimentāli izpētīta izstrādāto *RF-DC* pārveidotāju moduļu bezvadu enerģijas pārvades veikspējas atkarība no *RF* signāla parametriem un antenu veida.

Darba rezultātā izpētītas *RF-DC* pārveidošanas efektivitātes optimizācijas iespējas:

- sprieguma divkāršotāja slodzes pretestības pieskaņošana dažādam apakšnesēju skaitam, kad barošanai izmanto sinfāzo daudztoņu signālu ar vienmērīgi sadalītiem apakšnesējiem, palielina *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu;
- Sprieguma divkāršotāja salāgojošas ķēdes izslēgšana, kad barošanai izmanto sinfāzes daudztoņu signālus ar vienmērīgi sadalītiem apakšnesējiem, palielina *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu;
- *CHIRP* signāli, tonāli modulēta *FM* un amplitūdas modulētie signāli ar *PAPR* līmeni zem 10 dB nodrošina vienādu *RF-DC* jaudas pārveidošanas lietderības koeficientu.

Tika veikta dažādu *WPT* signālu lietojuma efektivitātes analīze, un rezultāti rāda, ka *CHIRP*, *FM* tonāli modulēta un amplitūdas modulēto signālu ar *PAPR* līmeni zem 10 dB izmantošana tiešās redzamības gadījumā nodrošina tādu pašu *WPT* veikspēju kā sinusoidālais signāls.

Iegūtās zināšanas tiks izmantotas autonomo sensoru mezglu izvietojuma uzdevumiem, pārveidotāju ķēžu topoloģijas optimizācijai, kā arī *WPT* sistēmas efektivitātes novērtēšanai, izmantojot dažādas formas barošanas signālu iekštelpās.

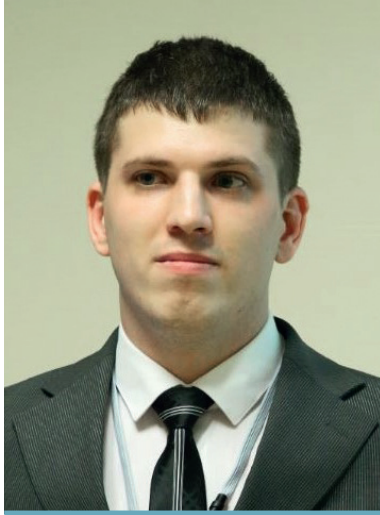
Literatūras avoti

- [1] “Ericsson Mobility Report 2021,” 2021. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/492615/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/emr-quarterly2021-update.pdf>.
- [2] D. Pradeep Kumar Reddy and J. Mohana, *Wireless power transfer: Between Distance and Efficiency*, vol. 8, no. 4. 2016.
- [3] The Institution of Engineering and Technology, *Wireless Power Transfer: Theory, technology, and applications*. Institution of Engineering and Technology, 2018.
- [4] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, “Wireless networks with rf energy harvesting: A contemporary survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 757–789, 2015.
- [5] M. A. Houran, X. Yang, and W. Chen, “Magnetically coupled resonance wpt: Review of compensation topologies, resonator structures with misalignment, and emi diagnostics,” *Electron.*, vol. 7, no. 11, 2018.
- [6] J. Eidaks, R. Kusnins, R. Babajans, D. Cirjulina, J. Semenjak, and A. Litvinenko, “Fast and Accurate Approach to RF-DC Conversion Efficiency Estimation for Multi-Tone Signals,” *Sensors*, vol. 22, no. 3, p. 787, Jan. 2022.
- [7] N. Shinohara, K. Nishikawa, T. Seki, and K. Hiraga, “Development of 24 GHz rectennas for fixed wireless access,” *2011 30th URSI Gen. Assem. Sci. Symp. URSIGASS 2011*, pp. 3–6, 2011.
- [8] W. S. High-impedance, “A 5 . 8-GHz Band Highly Efficient 1-W Rectenna,” vol. 69, no. 7, pp. 3558–3566, 2021.
- [9] N. Singh, B. K. Kanaujia, M. T. Beg, Mainuddin, T. Khan, and S. Kumar, “A dual polarized multiband rectenna for RF energy harvesting,” *AEU – Int. J. Electron. Commun.*, vol. 93, no. February, pp. 123–131, 2018.
- [10] Young-Ho Suh and Kai Chang, “A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45- and 5.8-GHz wireless power transmission,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 7, pp. 1784–1789, Jul. 2002.
- [11] C. Wang, B. Yang, and N. Shinohara, “Study and Design of a 2.45-GHz Rectifier Achieving 91 % Efficiency at 5-W Input Power,” *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 31, no. 1, pp. 76–79, 2021.
- [12] T. C. Yo, C. M. Lee, C. M. Hsu, and C. H. Luo, “Compact circularly polarized rectenna with unbalanced circular slots,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 3, pp. 882–886, 2008.
- [13] Y. T. Chang, S. Claessens, S. Pollin, and D. Schreurs, “A Wideband Efficient Rectifier Design for SWIPT,” *2019 IEEE Wirel. Power Transf. Conf. WPTC 2019*, pp. 26–29, 2019.
- [14] D. Wang and R. Negra, “Design of a dual-band rectifier for wireless power transmission,” *2013 IEEE Wirel. Power Transf. WPT 2013*, pp. 127–130, 2013.
- [15] M. Ito *et al.*, “High efficient bridge rectifiers in 100MHz and 2.4GHz bands,” *IEEE Wirel. Power Transf. Conf. 2014, IEEE WPTC 2014*, pp. 64–67, 2014.
- [16] J. H. Chou, D. B. Lin, K. L. Weng, and H. J. Li, “All polarization receiving rectenna with harmonic rejection property for wireless power transmission,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 10, pp. 5242–5249, 2014.
- [17] M. H. Ouda, P. Mitcheson, and B. Clerckx, “Robust Wireless Power Receiver for Multi-Tone Waveforms,” *2019 49th Eur. Microw. Conf. EuMC 2019*, pp. 101–104, 2019.
- [18] C. Song, Y. Huang, J. Zhou, J. Zhang, S. Yuan, and P. Carter, “A high-efficiency broadband rectenna for ambient wireless energy harvesting,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 8, pp. 3486–3495, 2015.

- [19] F. Bolos, J. Blanco, A. Collado, and A. Georgiadis, "RF Energy Harvesting from Multi-Tone and Digitally Modulated Signals," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 64, no. 6, pp. 1918–1927, Jun. 2016.
- [20] A. Quddious, M. A. Antoniadis, P. Vryonides, and S. Nikolaou, "Voltage-Doubler RF-to-DC Rectifiers for Ambient RF Energy Harvesting and Wireless Power Transfer Systems," *Recent Wirel. Power Transf. Technol.*, pp. 1–19, 2020.
- [21] A. Collado and A. Georgiadis, "Optimal waveforms for efficient wireless power transmission," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 24, no. 5, pp. 354–356, 2014.
- [22] S. A. Rotenberg, S. K. Podilchak, P. D. H. Re, C. Mateo-Segura, G. Goussetis, and J. Lee, "Efficient Rectifier for Wireless Power Transmission Systems," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 68, no. 5, pp. 1921–1932, 2020.
- [23] M. Terauds, L. Malbranque, and V. Smolaninovs, "Application of LoRaWAN for Interactive E-ink Based Schedule Board," in *2020 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*, 2020, pp. 222–226.
- [24] A. Collado and A. Georgiadis, "Improving wireless power transmission efficiency using chaotic waveforms," *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1–3, 2012.
- [25] A. Litvinenko, J. Eidaks, S. Tjukovs, D. Pikulins, and A. Aboltins, "Experimental Study of the Impact of Waveforms on the Efficiency of RF-to-DC Conversion Using a Classical Voltage Doubler Circuit," in *2018 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*, 2018, pp. 257–262.
- [26] A. Litvinenko, J. Eidaks, and A. Aboltins, "Usage of signals with a high PAPR level for efficient wireless power transfer," *2018 IEEE 6th Work. Adv. Information, Electron. Electr. Eng. AIEEE 2018 – Proc.*, pp. 5–9, 2018.
- [27] J. Eidaks, A. Litvinenko, A. Aboltins, and D. Pikulins, "Signal Waveform Impact on Efficiency of Low Power Harvesting Devices in WSN," *Proc. 2019 IEEE Microw. Theory Tech. Wirel. Commun. MTTW 2019*, vol. 1, pp. 57–61, 2019.
- [28] J. Eidaks, A. Litvinenko, J. P. Chiriyankandath, M. A. Varghese, D. D. Shah, and Y. K. T. Prathakota, "Impact of signal waveform on RF-harvesting device performance in wireless sensor network," *2019 IEEE 60th Annu. Int. Sci. Conf. Power Electr. Eng. Riga Tech. Univ. RTUCON 2019 – Proc.*, 2019.
- [29] J. Eidaks, A. Litvinenko, A. Aboltins, and D. Pikulins, "Waveform Impact on Wireless Power Transfer Efficiency using Low-Power Harvesting Devices," *Electr. Control Commun. Eng.*, vol. 15, no. 2, pp. 96–103, 2019.
- [30] K. Mitani, Y. Kawamura, W. Kitagawa, and T. Takeshita, "Circuit modeling for common mode noise on AC/DC converter using sic device," *2019 21st Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2019 ECCE Eur.*, pp. 1–10, 2019.
- [31] D. Pikulin, "Complete bifurcation analysis of DC-DC converters under current mode control," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 482, no. 1, 2014.
- [32] D. Pikulins, "Exploring types of instabilities in switching power converters: The complete bifurcation analysis," *Elektron. ir Elektrotechnika*, vol. 20, no. 5, pp. 76–79, 2014.
- [33] D. O. Pederson, "A historical review of circuit simulation," *IEEE Solid-State Circuits Mag.*, vol. 3, no. 2, pp. 43–54, 2011.
- [34] H. Liu and N. Wong, "Autonomous volterra algorithm for steady-state analysis of nonlinear circuits," *IEEE Trans. Comput. Des. Integr. Circuits Syst.*, vol. 32, no. 6, pp. 858–868, 2013.
- [35] G. De Luca, P. Bolcato, and W. H. A. Schilders, "Proper initial solution to start periodic steady-state-based methods," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 66, no. 3, pp. 1104–1115, 2019.
- [36] X. Y. Z. Xiong, L. J. Jiang, J. E. Schutt-Aine, and W. C. Chew, "Volterra Series-Based

- Time-Domain Macromodeling of Nonlinear Circuits,” *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 39–49, 2017.
- [37] N. N. Krylov, N.N.B.; Krylov, N.N.; Bogoliubov, *Introduction to Nonlinear Mechanics*. NJ, USA: Princeton University Press: Princeton, 1995.
- [38] E. M. Baily, *Steady-State Harmonic Analysis of Non-Linear Networks*. Stanford, CA, USA: Stanford University: , USA, 1968.
- [39] Q.-J. Zhang, E. Gad, B. Nouri, W. Na, and M. Nakhla, “Simulation and Automated Modeling of Microwave Circuits: State-of-the-Art and Emerging Trends,” *IEEE J. Microwaves*, vol. 1, no. 1, pp. 494–507, 2021.
- [40] M. S. Nakhla and J. Vlach, “A Piecewise Harmonic Balance Technique for Determination of Periodic Response of Nonlinear Systems,” *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 85–91, 1976.
- [41] S. Egami, “Nonlinear, Linear Analysis and Computer-Aided Design of Resistive Mixers,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 22, no. 3, pp. 270–275, 1974.
- [42] A. R. Kerr, “A Technique for Determining the Local Oscillator Waveforms in a Microwave Mixer,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 23, no. 10, pp. 828–831, 1975.
- [43] R. G. Hicks and P. J. Khan, “Numerical Analysis of Nonlinear Solid-State Device Excitation in Microwave Circuits,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 30, no. 3, pp. 251–259, 1982.
- [44] F. Filicori, M. R. Scalas, and C. Naldi, “Nonlinear circuit analysis through periodic spline approximation,” *Electron. Lett.*, vol. 15, no. 19, p. 597, 1979.
- [45] P. D. Cooley, J.W.; Lewis, P.A.W.; Welch, *The Fast Fourier Transform and Its Applications*. IEEE Trans. Educ., 1969.
- [46] M. B. Gilmore’, R.J.; Steer2, *Nonlinear Circuit Analysis Using the Method of Harmonic Balance-A Review of the Art. Part I. Introductory Concepts*. Int. J. Microw. Millim. Wave Comput. Aided Eng., 1991.
- [47] V. Rizzoli, A. Lipparini, and E. Marazzi, “A General-Purpose Program for Nonlinear Microwave Circuit Design,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 31, no. 9, pp. 762–770, 1983.
- [48] R. J. Gutmann and J. M. Borrego, “Power Combining in an Array of Microwave Power Rectifiers,” in *MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 79, pp. 453–455.
- [49] Jiapin Guo and Xinen Zhu, “An improved analytical model for RF-DC conversion efficiency in microwave rectifiers,” in *2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2012, pp. 1–3.
- [50] J. Guo, H. Zhang, and X. Zhu, “Theoretical Analysis of RF-DC Conversion Efficiency for Class-F Rectifiers,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 62, no. 4, pp. 977–985, Apr. 2014.
- [51] T. Hirakawa and N. Shinohara, “Theoretical Analysis and Novel Simulation for Single Shunt Rectifiers,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 16615–16622, 2021.
- [52] N. Pan, D. Belo, M. Rajabi, D. Schreurs, N. B. Carvalho, and S. Pollin, “Bandwidth Analysis of RF-DC Converters Under Multisine Excitation,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 66, no. 2, pp. 791–802, Feb. 2018.
- [53] T. Ohira, “Power efficiency and optimum load formulas on RF rectifiers featuring flow-angle equations,” *IEICE Electron. Express*, vol. 10, no. 11, pp. 20130230–20130230, 2013.
- [54] S. Hageman, “What PCB material do I need to use for RF?,” *What PCB material do I need to use for RF?* [Online]. Available: <https://www.edn.com/what-pcb-material-do-i-need-to-use-for-rf/>.
- [55] ROGERS CORPORATION, “RO4000 Series High Frequency Circuit Materials,” 2018.

- [Online]. Available: <https://rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-electronics-solutions/english/data-sheets/ro4000-laminates-ro4003c-and-ro4350b---data-sheet.pdf>.
- [56] “Silicon Schottky Diode: BAT63,” 2003. [Online]. Available: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BAT63SERIES-DS-v01_01-en.pdf?fileId=db3a304314dca38901151817843c0df4.
- [57] Skyworks Solutions, “Surface Mount Mixer and Detector Schottky Diodes,” *Datasheet*, 2018. [Online]. Available: <https://www.skyworksinc.com/Products/Diodes/SMS7621-Series>.
- [58] “HSMS-285x Series Datasheet,” *HSMS-285x Series Datasheet*. [Online]. Available: <https://www.broadcom.com/products/wireless/diodes/schottky/hsms-285c>. [Accessed: 30-Aug-2018].
- [59] A. Litvinenko, R. Kusnins, A. Aboltins, J. Eidaks, D. Laksis, and J. Sadovksis, “About Simultaneous Information and Power Transfer in WSN using Frequency Modulation,” in *2020 IEEE 8th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, AIEEE 2020 – Proceedings*, 2021.
- [60] A. Litvinenko, R. Kusnins, A. Aboltins, J. Eidaks, D. Laksis, and J. Sadovksis, “About Simultaneous Information and Power Transfer in WSN using Frequency Modulation,” *2020 IEEE 8th Work. Adv. Information, Electron. Electr. Eng. AIEEE 2020 – Proc.*, 2021.



Jānis Eidaks dzimis 1993. gadā Balvos. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis inženierzinātņu bakalaura grādu elektrozinātnē (2015) un maģistra grādu elektronikā (2017). No 2016. līdz 2018. gadam strādājis SIA "LEXEL FABRIKA" Kvalitātes departamentā. Kopš 2017. gada ir RTU Elektronikas un telekomunikāciju fakultātes asistents un zinātniskais asistents, kopš 2022. gada ir *HPC* centra informācijas tehnoloģiju administrators. Zinātniskās intereses saistītas ar bezvadu enerģijas barošanas risinājumu izstrādi un zemas enerģijas sensoru tīklu mezgliem.