

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

Oļegs TETERVENOKS

Doktora studiju programmas «Elektrotehnoģiju datorvadība» doktorants

**TIEŠĀ STRĀVAS REGULĒŠANA
UN NELINEARITĀTES KOMPENSĒŠANA
LED GAISMĒKĻU KVALITĀTES RĀDĪTĀJU UZLABOŠANAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
I. GALKINS

**RTU Izdevniecība
Rīga 2015**

Tetervenoks O. **Tiešā strāvas regulēšana un nelinearitātes kompensēšana *LED* gaismekļu kvalitātes rādītāju uzlabošanai.** Promocijas darba kopsavilkums. — R.: RTU Izdevniecība, 2015. 29 lpp.

Iespiests saskaņā ar IEE institūta padomes sēdes 2014. gada 19. jūnija lēmumu, protokols Nr. 81

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».



ISBN 978-9934-10-683-5

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. gada 13. maijā Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 212. telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* **Oskars Krievs**
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors inženierzinātņu doktors *Enrique Romero — Cadaval*
Estremaduras Universitāte, Spānija

Vadošais pētnieks inženierzinātņu doktors *Eino Tetri*
Alto Universitāte, Somija

APSTIPRINĀJUMS

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

Oļegs Tetervenoks

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir 5 nodaļas, ieskaitot ievadu, secinājumus, literatūras sarakstu, 17 pielikumus, 85 zīmējumus un ilustrācijas, 11 tabulas, kopā — 135 lappuses. Literatūras sarakstā ir 139 nosaukumi.

1. IEVADS

MOTIVĀCIJA

Mūsdienās saistībā ar tehnoloģiju un industrializācijas nepārtrauktu attīstību vērojams pakāpenisks enerģijas resursu patēriņa pieaugums. Palielinās arī kaitīgo izmešu apjoms, tas atstāj spēcīgu negatīvu ietekmi uz apkārtējo vidi (siltumnīcas efekts) un izraisa globālās klimata izmaiņas. Turklāt tuvā nākotnē tiek paredzēta primāro enerģijas avotu (ogles, nafta, dabasgāze) izsīkšana un intensīvā atjaunojamo enerģijas avotu apgūšana [1]. Šādā situācijā elektroenerģijas cenas turpinās augt. Tas motivē zinātniekus veikt pētījumus visu veidu elektrisko iekārtu un mašīnu lietderības paaugstināšanai. Mākslīgā apgaismojuma sistēmas nav izņēmums.

LED (light-emitting diode) apgaismojums mūsdienās jau guvis lielu popularitāti — tas arvien biežāk sastopams dažāda lietojuma apgaismojuma iekārtās un sistēmās. To var izskaidrot ar daudzajām *LED* priekšrocībām, salīdzinot ar citām mākslīgās gaismas iegūšanas tehnoloģijām [3]. Turklāt saskaņā ar vairāku valstu izstrādātajām direktīvām un normām [4], [5] tradicionālo kvēldiega spuldžu ražošana un tirgošana ir aizliegta (ar dažiem izņēmumiem), bet halogēna spuldzes tiks aizliegtas tuvākajā laikā.

Galvenās *LED* priekšrocības ir augsta lietderība, drošums un ilgs kalpošanas laiks, ērtas apgaismojuma līmeņa regulēšanas iespējas (piemērotas viedām apgaismojuma sistēmām), kā arī cieta struktūra (korpuss), kas uzlabo izturību pret mehānisko iedarbību (piemēram, vibrācijām). Taču, lai iegūtu visas šīs tehnoloģijas priekšrocības, ļoti svarīgi ir pareizi darbināt gaismas diodes. Īpaši svarīga ir *LED* barošana un termiskā režīma aprēķins, kā arī rūpīga optiskās sistēmas izstrāde. Visi šie aspekti vairāk vai mazāk apskatīti šajā darbā, jo tie ir cieši saistīti un vairumā gadījumu — nedalāmi. Galvenā uzmanība pievērsta *LED* lampas daļai, kas atbild par pareizu *LED* barošanu un gaismas plūsmas regulēšanu — *LED* draiverim.

Draiveris ir arī vājākais lampas mezgls, tāpēc tas lielā mērā nosaka visas apgaismojuma iekārtas drošumu, kalpošanas laiku, kā arī apgaismojuma kvalitāti, kas atkarīga arī no izvēlētajās apgaismojuma regulēšanas metodes.

Saskaņā ar [6]–[10] *LED* ir jaudīgs instruments apgaismojuma iekārtu lietderības un gaismas kvalitātes uzlabošanai, kā arī izmantošanai viedās apgaismojuma sistēmās.

GALVENĀS HIPOTĒZES UN MĒRĶI

Hipotēzes

1. Gaismas plūsmas regulēšanas precizitāti (plūstošai apgaismojuma līmeņa regulēšanas metodei) ir iespējams uzlabot, kompensējot *LED* raksturlīkņu nelinearitātes ar pārveidotāja nelinearitāti.
2. Tiešo strāvas regulēšanu ir iespējams realizēt uz neinvertējošā pazeminošipaaugstinošā pārveidotāja bāzes.

Mērķi

1. Izvēlēties *LED* slodzes nelinearitātes kompensēšanai piemēroto pārveidotāja topoloģiju un/vai pārveidotāja darbības režīmu.
2. Novērtēt izstrādāto pārveidotāju vadāmības parametrus un lietderību.
3. Atrast risinājumu, kā praktiski realizēt strāvas tiešās regulēšanas pārveidotāju.
4. Izstrādāt spēka shēmu pārveidotājam ar strāvas tiešo regulēšanu.
5. Izstrādāt vadības sistēmu pārveidotājam ar strāvas tiešo regulēšanu.

PĒTNIECĪBAS LĪDZEKĻI UN METODES

Teorētisko aprēķinu vienkāršošanai un iegūto rezultātu grafiskai atspoguļošanai tika izmantotas *Mathcad* un *Excel* datorprogrammas. Papildus elektrisko ķēžu modelēšanai tika izmantota *PSIM* un *LTspice* programmatūra.

Iegūto teorētisko rezultātu pārbaude tika veikta ar eksperimentu palīdzību speciāli šim nolūkam uzbūvētā laboratorijas stendā. Stends ir vienkārši pārkonfigurējams atbilstoši nepieciešamo mērījumu veikšanai, bet galvenie stenda elementi ir regulējams līdzstrāvas barošanas avots ar strāvas ierobežošanas funkciju vai autotransformators, funkciju ģenerators, kas spēj dot vadības signālu ar dažādu frekvenci un aizpildījuma koeficientu, jaudas analizators, viens vai vairāki osciloskopi, termografiskā kamera, luksmetrs un pārkonfigurējama *LED* slodze (biežāk izmantojamā konfigurācija — 7 virknē saslēgtās jaudīgās gaismas diodes). Eksperimentos iegūto datu grafiskai atspoguļošanai tika izmantota lineārā vai polinomā interpolācija.

MSP430 saimes mikrokontrolleru programmēšanai un atklūdošanai tika izmantota *IAR Embedded Workbench* programmatūra. Spiesto plašu projektēšanai un izstrādei tika izmantota *OrCAD* programmnodrošinājuma pakete.

ZINĀTNISKĀS NOVITĀTES

1. Pazeminošais pārveidotājs ar sadalīta tinuma droseli pirmo reizi lietots *LED* slodzes nelinearitātes kompensēšanai, kas ļauj uzlabot draivera vadāmības parametrus.
2. Pārveidotāja pārtrauktās strāvas režīms pirmo reizi lietots *LED* slodzes nelinearitātes kompensēšanai, kas ļauj uzlabot draivera vadāmības parametrus.
3. Neinvertējošais pazeminoši-paaugstinošs pārveidotājs pirmo reizi lietots strāvas tiešās regulēšanas režīmā, kas ļauj palielināt draivera regulēšanas izšķirtspēju.
4. Izstrādāts jauns vadības algoritms neinvertējošam pazeminoši-paaugstinošam pārveidotājam, kas ļauj iegūt strāvas tiešās regulēšanas īpašības un vienkāršot vadības sistēmu.

PRAKTISKĀS NOVITĀTES

1. Izstrādāta pielāgojoši-pazeminošā pārveidotāja ar sadalīta tinuma droseļi versija *LED* slodzes nelinearitātes kompensēšanai un vadāmības parametru uzlabošanai. Izpētītas šā pārveidotāja īpašības un atrasta droseļes optimālā tinumu vijumu skaita attiecība.
2. Izstrādāts energoefektīvs strāvas mērīšanas paņēmieni pielāgojoši-pazeminošam pārveidotājam ar sadalīta tinuma droseļi.
3. Noformulētas frekvences, aizpildījuma koeficienta un droseļes induktivitātes vērtības pazeminošam pārveidotājam, kas darbojas pārtrauktas strāvas režīmā, *LED* slodzes nelinearitātes kompensēšanai.
4. Izstrādāta vadības sistēma uz mikrokontrolera bāzēs neinvertējošam pazeminoši-paaugstinošam pārveidotājam, kas ļauj panākt strāvas tiešo regulēšanu.

DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

Darbā pētīto pārveidotāju (ar sadalīta tinuma droseļi un neinvertējošā paaugstinoši-pazeminošā ar strāvas tiešo regulēšanu) prototipi ir vienkārši papildināmi un pārstrādājami gatavā produktā — *LED* gaismmainī, aprīkojot tos ar piemērotu komunikācijas modeli.

Mainšprieguma tīklam paredzētajā draiverī vispārīgā gadījumā jāiekļauj arī standarta pārveidotāju bloki: taisngriezis ar ieejas filtru, jaudas koeficienta korektors, līdzstrāvas pārveidotājs. Standarta lietojums šāda tipa balastiem varētu būt vidējās un lielās jaudas *LED* lampas, tādas kā ielu un parku apgaismojuma lampas un prožektoru. Ar zemsprieguma līdzstrāvas tīklu (nākotnes mājāsaimniecību lokālais tīkls [11]) šāda tipa *LED* gaismmainiņus var izmantot nepastarpināti.

DARBA APROBĀCIJA

Kopā ir 34 publikācijas un 1 patents. Promocijas darbā izklāstītas 11 publikācijas, no tām 1 patents:

1. **O. Tetervenoks**, «Reduction of Power Losses in Measurement Subsystem for Tapped — Inductor Based LED Driver, » in *Proceedings of the 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2013)*, 2013, pp. 1–9.
2. I. Galkin and **O. Tetervenoks**, «Tapped-Inductor Converter for Dimmable Light-Emitting Diode Driver, » in *Proceedings of 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG 2013)*, 2013, pp. 1307–1311.
3. **O. Tetervenoks**, «Choice of Power and Control Coupling Elements for Dimmable LED Driver for Smart Lighting Networks,» in *Proceedings of the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2013)*, 2013, pp. 5940–5944.

4. I. Galkin and **O. Tetervenoks**, «Validation of direct current control in LED lamp with non-inverting buck-boost converter,» in *39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2013)*, 2013, pp. 6021–6026.
5. **O. Tetervenoks** and I. Milashevski, «Dimmable LED Drivers Operating in Discontinuous Conduction Mode,» *Electr. Control Commun. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 27–33, 2013.
6. **O. Tetervenoks** and I. Galkin, «Assessment of Switch Mode Current Sources for Current Fed LED Drivers,» in *Technological Innovation for Collective Awareness System: 5th IFIP WG 5.5/SOCOLNET Doctoral Conference on Computing Electrical and Industrial Systems*, L. M. Camarinha-Matos, N. S. Barrento, and R. M. (Editor), Eds. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2014, p. 621.
7. **O. Tetervenoks** and I. Galkin, «Assessment of Light Fluctuations of LED Lamp at Different Pulse Mode Regulation Methods,» *Elektron. ir Elektrotehnika*, vol. 20, no. 6, pp. 42–45, 2014.
8. I. Galkin and **O. Tetervenoks**, «Efficiency considerations for non-inverting buck-boost converter operating with direct current control,» in *2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2014, pp. 1–8.
9. **O. Tetervenoks** and I. Galkin, «Considerations on Practical Implementation of Control System for Switch Mode Current Regulator,» in *Proceedings of 14th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2014)*, 2014, pp. 225–228.
10. **O. Tetervenoks** and I. Galkin, «Evaluation of Stability of Several LED Drivers in Smart Lighting Applications,» in *Proceedings of 55th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON2014)*, 2014, pp. 48–51.
11. I. Galkins, **O. Tetervenoks**. Vadāms elektronisks strāvas avots ar divpakāpju strāvas stabilizāciju. Latvijas patents Nr. LV14796 B. Patenta publikācijas datums: 20.04.2014.

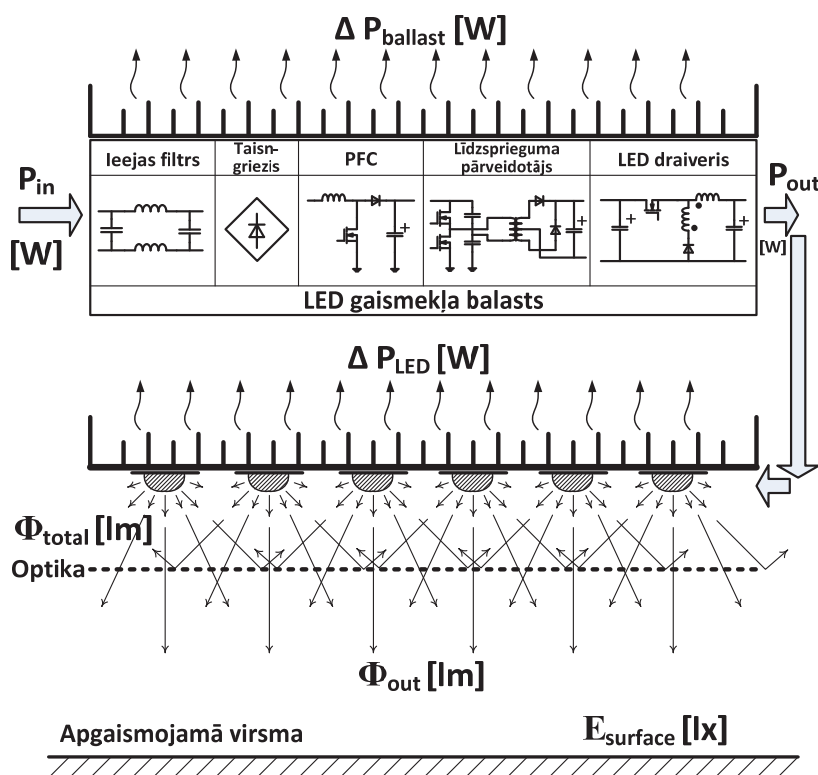
DARBA SATURS

1. Ievads
2. LED apgaismojuma tehnoloģijas
3. LED nelinearitātes kompensēšana
4. Strāvas tiešā regulēšana
5. Secinājumi
 - Publikāciju saraksts
 - Pielikumi
 - Literatūra

2. LED APGAISMOJUMA TEHNOLOĢIJAS

Gaismas diožu ražošana iekļauj ļoti sarežģītus tehnoloģiskus procesus, tāpēc pat vienas partijas gaismas diodēm ir nedaudz atšķirīgi parametri (voltampēru raksturlīkne, krāsu temperatūra, gaismas atdeve utt.). Turklāt šie parametri ir stipri atkarīgi no temperatūras. Ar voltampēru raksturlīknes atšķirībām atsevišķām gaismas diodēm rodas zināmi ierobežojumi *LED* slēguma izvēlē. Gaismas diožu virknes slēgums ir piemērotākais slēgums šīs problēmas risināšanai. Virknē slēgtām gaismas diodēm saražotas gaismas daudzums ir gandrīz proporcionāls strāvai, kas plūst caur diodēm. Strāvas amplitūdas maiņa ir viens no *LED* apgaismojuma regulēšanas paņēmieniem. Darbā tiek apkopoti arī citi vairāk vai mazāk viegli realizējami *LED* apgaismojuma regulēšanas paņēmieni. Tādējādi *LED* apgaismojums ir piemērotākā tehnoloģija izmantošanai sadalīta un vieda apgaismojuma sistēmās, kur apgaismojuma regulēšana ir neatņemamā funkcija [12], [13].

Pastāv dažādas apgaismojuma līmeņa regulējamo *LED* lampu balastu konfigurācijas. Tradicionālā no maiņsprieguma tīkla barojama balasta konfigurācija vispārīgā gadījumā iekļauj vairākas pakāpes: taisngriezi ar filtru, jaudas koeficienta korektoru, līdzsprieguma pārveidotāju un *LED* draiveri jeb gaismmaini. Katrai pārveidojuma pakāpei ir sava lietderība un zudumi, tāpēc līdz ar pārveidojuma pakāpju skaita palielināšanos kopējā balasta lietderība samazinās (2.1. att.).

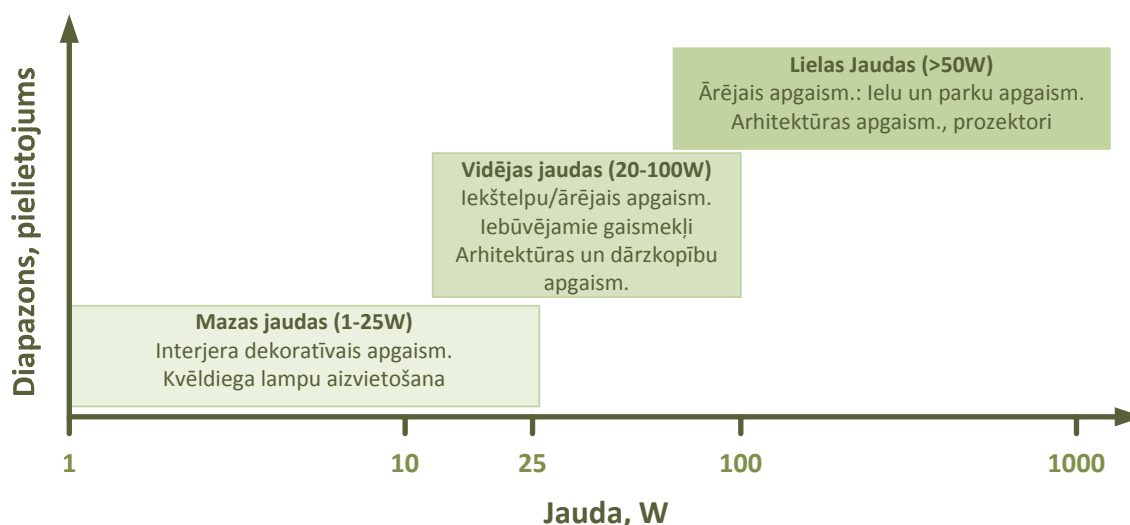


2.1. att. Tradicionālā no maiņsprieguma tīkla barojamā lielas jaudas *LED* gaismekļa un balasta konfigurācija, kas iekļauj vairākas pakāpes, kā arī to zudumus.

Mūsdienās populārs paņēmiens balasta lietderības uzlabošanai ir vairāku pakāpju funkciju apvienošana vienā [14]–[26]. Tomēr — tad jāreķinās ar šāda tipa balastu galveno trūkumu: gaismas regulēšanas funkciju realizēt ir grūtāk (parasti

izmanto simistora gaismmaiņus vai impulsu režīma apgaismojuma regulēšanu), un lietderības ziņā izdevīgāka amplitūdas režīma apgaismojuma regulēšanas metode parasti netiek izmantota [27]. Tik sarežģīta pārveidotāja uzbūve (vairāku pakāpju gadījumā) vai darbība (apvienoto pakāpju gadījumā) ir nepieciešama, lai atbilstu esošā maiņsprieguma tīkla prasībām.

Balastus ar apvienoto funkciju pakāpēm parasti izmanto mazas un vidējas jaudas lietošanas jomās (iekštelpu un ofisu apgaismojums). Lielu jaudu diapazonā (ielu un parku apgaismojums, prožektoru) vairāku pakāpju konfigurācija vēl joprojām ir aktuāla (klasifikācija pēc jaudu diapazona un to raksturīgās lietošanas jomas ir dotas 2.2. att.).



2.2. att. LED gaismekļu klasifikācija pēc jaudu diapazona un to raksturīgās lietošanas jomas [28].

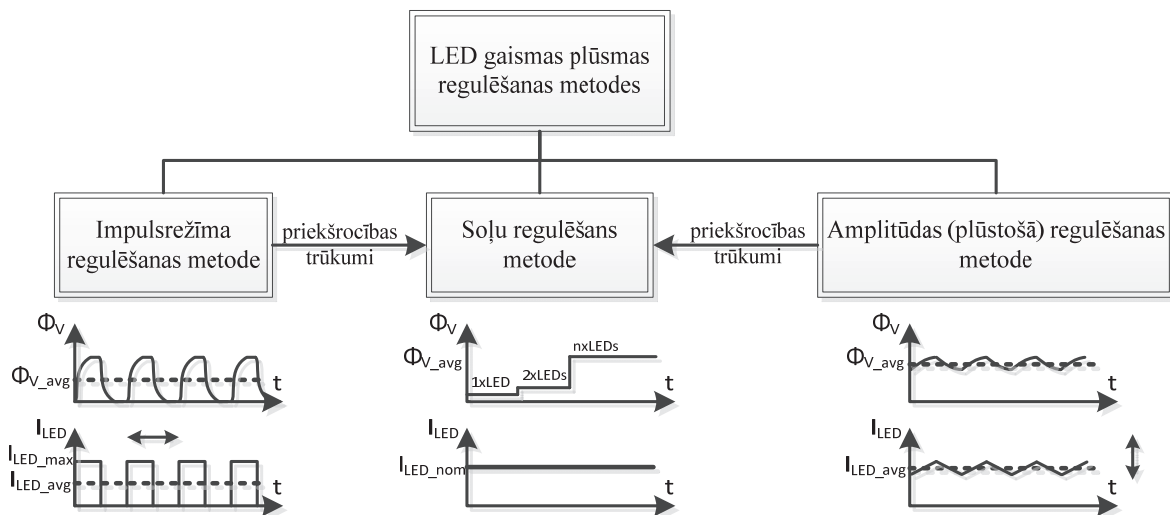
Ir arī citas specifiskas lietošanas jomas, kur vairāku pakāpju balastu izmantošana ir ērtāka (piemēram, dārzkopība vai ēku dekoratīvais krāsainais apgaismojums u. c.). Turklāt arvien lielāku popularitāti gūst viedo tīklu ideja. Saskaņā ar šo koncepciju daži zinātnieki un pētnieki piedāvā būvēt mājsaimniecību elektroapgādes sistēmas kā zema sprieguma līdzstrāvas tīklu [11] un izmantot viedās apgaismojuma sistēmas [13]. Līdz ar to pētījumi tradicionālo līdzsprieguma LED draiveru un gaismmaiņu jomā vēl joprojām ir aktuāli.

LED lampas draivera izstrādes laikā ir svarīgi panākt nepieciešamo funkcionalitāti (apgaismojuma regulēšana, strāvas kontrole, dažādas aizsardzības funkcijas utt.) un vienlaikus nodrošināt labu apgaismojuma kvalitāti.

Apgaismojuma kvalitātes rādītāji lielā mērā ir atkarīgi no izvēlētās apgaismojuma regulēšanas metodes, tādējādi izstrādes laikā ir rūpīgi jāizvērtē balasta ietekme uz šiem rādītājiem.

Darbā apskatītās LED gaismas plūsmas regulēšanas metodes ir apkopotas 2.3. att. To priekšrocības un trūkumi ir uzskaitīti 2.1. tabulā. Impulsrežīma gaismas plūsmas regulēšana ir vispiemērotākā augstas veiktspējas iekārtās, kur svarīgs parametrs ir gaismas krāsas stabilitāte visā gaismas plūsmas regulēšanas diapazonā (LCD paneļu, displeju pagaismošana) [30], [31]. Šīs metodes galvenais trūkums ir

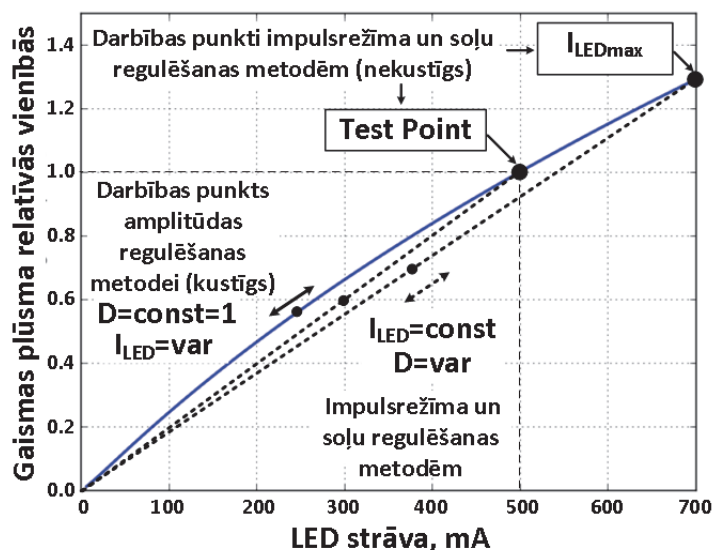
stoboskopiskais efekts (jo gaismas plūsma pulsē gandrīz proporcionāli pulsējošai strāvai), kas ir ļoti nevēlama parādība vispārīgajā apgaismojumā. Stoboskopiskais efekts ir īpaši bīstams ražotnēs, kur rotējošie vai cikliskās kustības mehānismi noteiktos apgaismojuma apstākļos var izskatīties nekustīgi. Šā iemesla dēļ amplitūdas (plūstošā) un soļu regulēšanas metodes ir piemērotākās vispārīgajam apgaismojumam, bet amplitūdas regulēšanas metode ļauj lietderīgāk izmantot gaismas diodes (aptuveni par 7 %, ja uzregulētā vērtība ir 50 % no maksimālās gaismas plūsmas) [32]. Rekomendācijas gaismas pulsāciju un stoboskopiskā efekta novērtēšanai ir dotas [29].



2.3. att. LED gaismas plūsmas regulēšanas metodes.

Ampērlūmenu raksturlīkne tipveida jaudīgai gaismas diodei ir dota 2.4. att. Impulsrežīma un soļu režīma regulēšanas gadījumā gaismas diodei ir tikai divi fiksētie darba punkti: darbība maksimālās vai nominālās gaismas plūsmas punktā un darbība nulles plūsmas punktā. Šāda maksimālā (vai nominālā) strāva tiek pievadīta gaismas diodei periodiski ar augstu frekvenci, bet LED vidējā gaismas plūsma šajā gadījumā ir vienāda ar impulsu aizpildījuma koeficientu D (attiecība: laiks, kad strāva tiek pievadīta gaismas diodei, pret visu perioda laiku). Gaismas plūsmas regulēšanu ar impulsrežīma metodi ampērlūmenu grafikā var iedomāties kā taisnu līniju, kas savieno reālus darba punktus (maksimālās strāvas un nulles strāvas punkti), bet iedomāto darba punktu, kas atbilst aizpildījuma koeficientam (kā arī vidējai gaismas plūsmas un strāvas vērtībai), kuras pa šo taisni (pārtrauktas taisnas līnijas 2.4. att.).

Amplitūdas (plūstošās) gaismas plūsmas regulēšanas gadījumā LED darba punkts kustās pa ampērlūmenu raksturlīkni (nepārtraukta zilā līnija 2.4. att.), tādējādi tiek panākta labāka lietderība, it īpaši-apakšējā un vidējā regulēšanas diapazonā. Pateicoties šādai īpašībai, amplitūdas regulēšana ir piemērotāka vispārējos apgaismojuma lietojumos.



2.4. att. Tipveida LED ampērlūmenu raksturlīkne.

2.1. tabula

LED gaismas plūsmas regulēšanas paņēmieni priekšrocības un trūkumi.

Impulsrežīma regulēšana	Soļu regulēšana	Amplitūdas (plūstošā) regulēšana
+ augsta precizitāte un izšķirtspēja	+ bez stroboskopiska efekta	+ lietderīgāka LED izmantošana
+ stabila krāsu temperatūra	+ stabila krāsu temperatūra	+ bez stroboskopiska efekta
+ vienkārša vadības sistēma	+ vienkārša vadības sistēma	+ ilgāks kalpošanas laiks
– iespējams stroboskopiskais efekts	– īsāks kalpošanas laiks	– relatīvi sarežģīta vadības sistēma
– īsāks kalpošanas laiks	– sliktāka izšķirtspēja (mazāks regulēšanas soļu skaits)	– peldošā krāsu temperatūra
– mazāk lietderīgā LED izmantošana	– mazāk lietderīgā LED izmantošana	– precizitāte un izšķirtspēja ir atkarīgi no vadības sistēmas sarežģītības pakāpes

Darbā novērtējamie vadāmības parametri bija aprakstīti [6]:

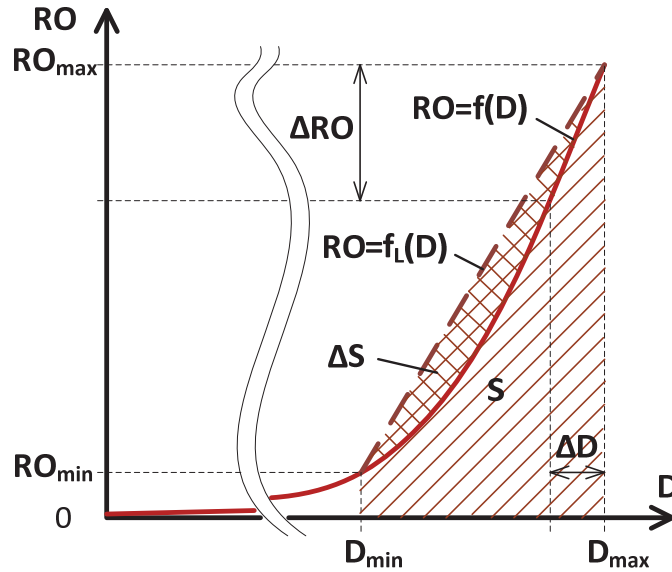
1. Regulēšanas nelinearitāte NL :

$$NL = (\Delta S/S) \cdot 100\% , \quad (2.1.)$$

kur ΔS ir vidējā kvadrātiskā vērtība laukumam starp novērtējamo raksturlīkni $RO(D)$ un taisnu līniju $RO_L(D)$, kas savieno maksimuma (D_{max}, RO_{max}) un minimuma (D_{min}, RO_{min}) punktus uz raksturlīknes 2.5. att. (šeit RO ir izejas parametra relatīvā vērtība):

$$\Delta S = \sqrt{\frac{1}{D_{max} - D_{min}} \int_{D_{min}}^{D_{max}} [RO(D) - RO_L(D)]^2 dD} , \quad (2.2.)$$

bet S ir vidējā kvadrātiskā vērtība laukumam zem novērtējamās raksturlīknes $RO(D)$



2.5. att. Vadāmības parametru aprēķins.

$$S = \sqrt{\frac{1}{D_{\max} - D_{\min}} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} RO(D)^2 dD} . \quad (2.3.)$$

2. Lietderīgi izmantojamais aizpildījuma koeficients G_a :

$$G_a = \frac{RO_{\max} - RO_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \cdot 100\% . \quad (2.4.)$$

3. Pastiprinājuma dinamiskais apgabals RG :

$$RG = \frac{G_{\max}}{G_{\min}} , \quad (2.5.)$$

kur G_{\max} un G_{\min} ir pastiprinājuma maksimālā un minimālā vērtības attiecīgi, bet pats pastiprinājums G_{LED} ir aprēķināms kā

$$G(D) = \frac{dRO}{dD} \approx \frac{\Delta RO_k}{\Delta D_k} , \quad (2.6.)$$

kur ΔRO_k un ΔD_k ir starpības starp pēc iespējas biežāk uzņemtiem (aprēķinātiem) raksturlīknes punktiem.

Papildus tam šajā darba nodaļā tiek apskatīti arī vispārīgie jautājumi par apgaismojuma tehnoloģijām, *LED* uzbūvi un konstruktīvām īpašībām, elektriskajām un optiskajām īpašībām, gaismas kvalitātes rādītājiem, kā arī aprakstīti iespējamie un plašāk izmantojamie *LED* slēgumi. Tiek pievērsta uzmanība pareizai *LED* darbināšanai.

Dalvenais darba mērķis ir *LED* lampas augstas pakāpes integrētā vadības sistēma uz mikrokontrollera bāzes ar reducētu sarežģītības pakāpi, tāpēc nākamās darba nodaļas veltītas pārveidotājiem, kas ļauj realizēt gaismas plūsmas amplitūdas regulēšanu un sasniegt vairāk vai mazāk lineāru sakarību starp ieejas un izejas signāliem šiem slēgta vadības kontūra blokiem (pārveidotājs + *LED* slodze un sakarība starp aizpildījuma koeficientu un *LED* strāvu).

3. LED NELINEARITĀTES KOMPENSĒŠANA

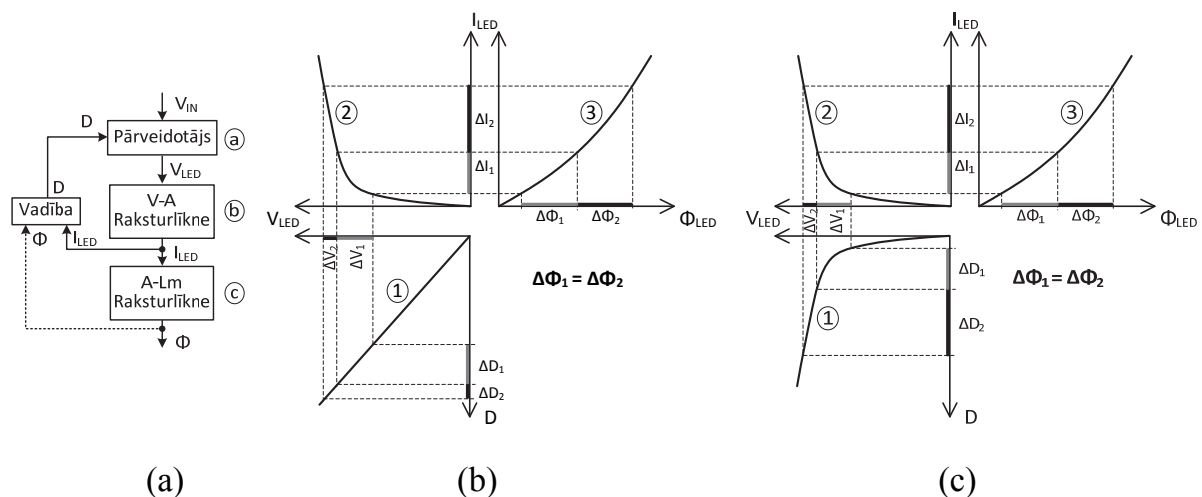
Viens no paņēmieniem, kā vienkāršot *LED* gaismmaiņa (līdz ar to — arī visa gaismekļa) vadības sistēmu, ir izvairīšanās no blokiem ar nelineāro pārvades funkciju vai arī to kompensēšana slēgtajā vadības kontūrā (3.1. att. (a)). *LED* slodze ir šī slēgtā vadības kontūra bloks ar nelineāro pārvades funkciju, tādējādi viena no iespējām ir mēģināt kompensēt to ar cita bloka nelinearitāti, piemēram, sprieguma regulatoru (pārveidotāju), kā parādīts 3.1. att. (b) un (c).

Lai pārbaudītu šo hipotēzi, bija nepieciešams atrast pārveidotāju ar piemērotu sakarību starp aizpildījuma koeficientu un izejas spriegumu (pastiprinājumu). Tradicionālie pazeminošie, paaugstinošie un pazeminoši-paaugstinošie pārveidotāji (sakarības ir parādītas 3.2. att. a ar nepārtrauktām līnijām) nav piemēroti šim uzdevumam. Nepieciešamā sakarība parādīta 3.2. att. (a) ar pārtrauktu līniju. Tāpēc tika pētīti pārveidotāji ar sadalīta tinuma drošeli nolūkā rast piemērotu risinājumu. Jāpiemin, ka arī citi autori iepriekš apskatījuši šos pārveidotājus — *LED* draiverus [33], [34], ir arī tirgū pieejamie risinājumi [35], [36]. Tomēr iepriekš pārveidotāji ar sadalīta tinuma drošeli tika apskatīti no cita aspekta, un to izmantošana *LED* slodzes voltampēru raksturlīknes kompensēšanai nebija pētīta.

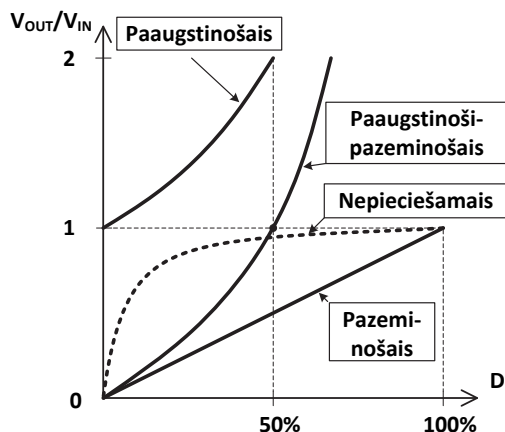
Labs pārveidotāju ar sadalīta tinuma drošeli apkopojums ir dots [33]. Līdzīgi kā tradicionālus sprieguma regulatorus, tos var iedalīt pazeminošos, paaugstinošos un pazeminoši-paaugstinošos. Visu šo pārveidotāju analīzes vienkāršošanai ieviests parametrs λ [37]:

$$\lambda = N1/N2, \quad (3.1.)$$

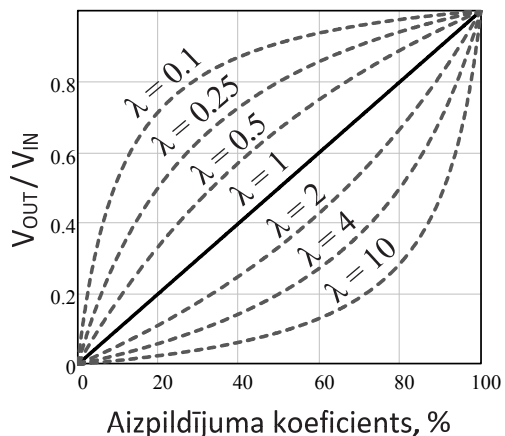
kur $N1$ un $N2$ ir sadalīta tinuma drošeli tinumu vijumu skaits. Tika konstatēts, ka no visas saimes definētā uzdevuma veikšanai ir piemērots pazeminošais pārveidotājs ar sadalīta tinuma drošeli (raksturlīknes ir dotas 3.2. att. (b)). Ir divu veidu pazeminošie pārveidotāji ar sadalīta tinuma drošeli: pielāgojoši-pazeminošs ($0 < \lambda < 1$) un pazeminoši-pazeminošs ($\lambda > 1$). Principiālās shēmas ir dotas 3.3. att.



3.1. att. Nelinearitātes kompensēšana slēgtajā vadības kontūrā: a) vienkāršotā vadības kontūras blokshēma; b) raksturlīknes nekompensētai sistēmai (ir nepieciešamas stipri atšķirīgas vadības parametra D izmaiņas atsevišķos regulēšanas diapazonos, lai iegūtu vienādas regulējama parametra Φ izmaiņas); c) raksturlīknes kompensētajai sistēmai.



(a)



(b)

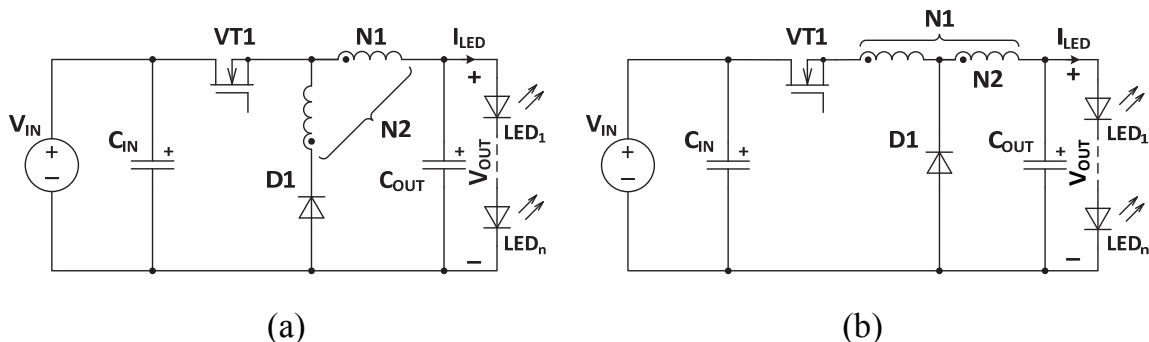
3.2. att. *LED* voltampēru raksturlīknes kompensēšanai nepieciešamā sakarība: a) tradicionālo pārveidotāju sakarības starp pārveidotāja pastiprinājumu un aizpildījuma koeficientu, kā arī kompensēšanai nepieciešamā sakarība; b) pazeminošā pārveidotāja ar sadalīta tinuma drošeli pastiprinājuma sakarības pie dažādām λ vērtībām.

Pazeminoša pārveidotāja ar sadalīta tinuma drošeli izejas sprieguma atkarību no aizpildījuma koeficienta apraksta izteiksme [33]:

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{D}{D + (1 - D) \cdot \lambda}, \quad (3.2)$$

kur V_{OUT} ir pārveidotāja izejas spriegums, D ir aizpildījuma koeficients, V_{IN} ir pārveidotāja ieejas spriegums.

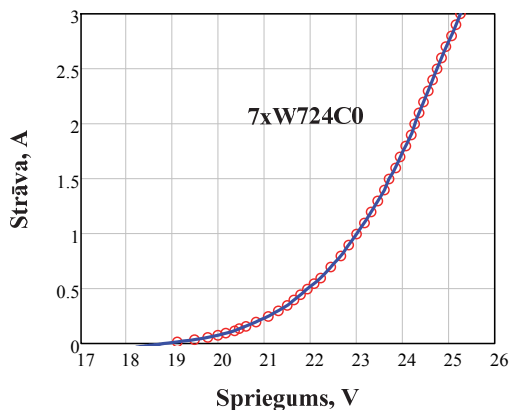
Pārveidotājam pieslēgtā slodze lielā mērā ietekmē paša pārveidotāja stabilu darbību. Pētījumu veikšanas brīdī laboratorijā bija pieejama šāda *LED* slodze: 7 virknē saslēgtas *Seoul Semiconductor W724C0* gaismas diodes. Šīs slodzes voltampēru raksturlīkne bija uzņemta eksperimentālā ceļā ar mērījumu intervālu no 50 mA līdz 600 mA slodzes strāvas vērtības, un ar 100 mA intervālu pēc 600 mA slodzes strāvas vērtības. Eksperimentu rezultāti apkopoti 3.4. att. (a).



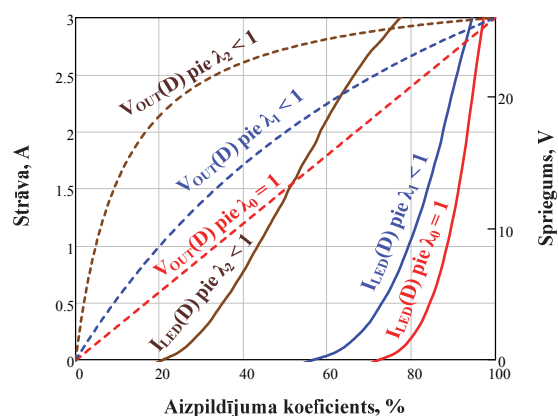
(a)

(b)

3.3. att. Pazeminošo pārveidotāju ar sadalīta tinuma drošeli principiālās shēmas: a) pielāgojoši-pazeminošs ($0 < \lambda < 1$); b) pazeminoši-pazeminošs ($\lambda > 1$).



(a)



(b)

3.4. att. Slogotā pārveidotāja analīze: a) *LED* slodzes voltampēru raksturlīkne; b) slogotā pārveidotāja izejas sprieguma un strāvas analītiskās raksturlīknes.

Aprēķiniem izmantota slodzes voltampēru raksturlīknes eksperimentāli iegūto punktu lineārā interpolācija. Sakarību starp aizpildījuma koeficientu un slodzes strāvu var atrast kombinētā izteiksmē:

$$I_{LED}(D) = I_{LED1} + \frac{V_{IN} \cdot D}{D + (1-D) \cdot \lambda} - V_{LED1} \cdot \frac{I_{LED2} - I_{LED1}}{V_{LED2} - V_{LED1}}, \quad (3.3)$$

kur I_{LED} ir *LED* slodzes strāva, kas atbilst aizpildījuma koeficientam D , I_{LED1} un V_{LED1} ir slodzes voltampēru raksturlīknes eksperimentāli iegūtā zemāk stāvošā punkta koordinātes, I_{LED2} un V_{LED2} ir augstāk stāvošā punkta koordinātes. Aprēķinu piemēri (aprēķinātas raksturlīknes) ir doti 3.4. att. (b).

Iegūtās raksturlīknes analizētas no vadāmības parametru viedokļa, izmantojot izteiksmes (1.1)–(1.6). Iepriekšminētās slodzes un pazeminošā pārveidotāja ar sadalīta tinuma drošeli kombinācijas vadāmības parametru aprēķinu rezultāti pie dažāda ieejas sprieguma atspoguļoti grafiski 3.5. att.

Optimālo parametra λ vērtību var iegūt no raksturlīknēm (3.5. att.). No tām ir redzams, ka pazeminošam pārveidotājam ar sadalīta tinuma drošeli vadāmības parametru labākās vērtības tiek sasniegtas pie $\lambda \approx 0,1$ vērtības, kad pārveidotāja ieejas spriegums ir par 5...10 % lielāks par maksimālo izejas (*LED* slodzes) spriegumu.

Līdzīga analīze veikta arī pārējiem saimes pārveidotājiem ar sadalīta tinuma drošeli: paaugstinošām un paaugstinoši-pazeminošām (analīze ir dota darbā). Tomēr šiem saimes pārstāvjiem vadāmības parametri nesniedz labāku rezultātu par tradicionāliem pārveidotājiem.

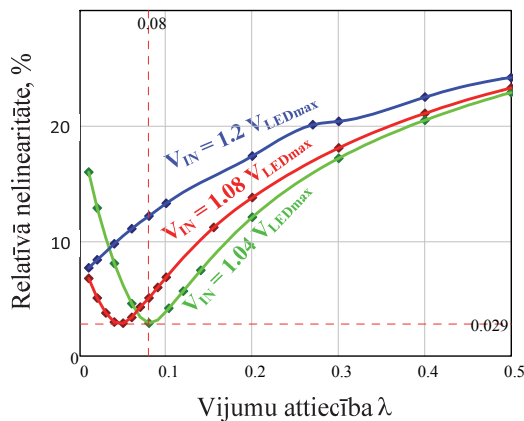
Iegūtā analītiskā rezultātā pārbaudei tika uzbūvēts pielāgojoši-pazeminoša pārveidotāja ar sadalīta tinuma drošeli prototips pēc shēmas, kas dota 3.3. att. (a).

Eksperimentu rezultāti apkopoti 3.6. att. grafikos.

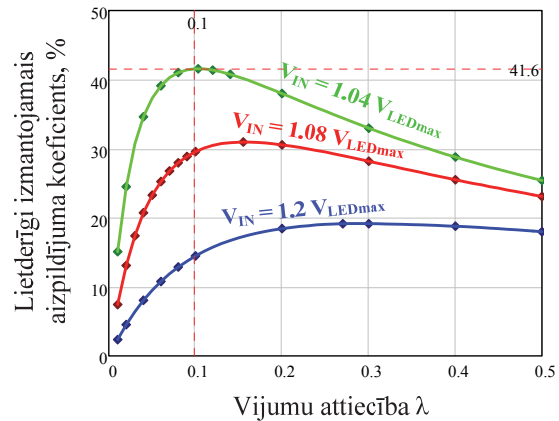
Pārveidotāju vadības sistēmas, kur kā atgriezeniskā saite tiek izmantota droseles strāva nevis izejas strāva, ir stabilākās vadības sistēmas [38]. Pielāgojoši-pazeminošam pārveidotājam ar sadalīta tinuma droseļi tipiskas droseles strāvas formas nepārtrauktajam strāvas režīmam ir dotas 3.7. att. Droseles strāvas mērīšanai strāvas mērpārveidotājs jānovieto virknē ar tinumu L1. Tomēr arī pēc tinuma L2` plūstošās strāvas var spriest par tinuma L1 strāvu. Analizējot droseles strāvas formas (izmantojot mazu pulsāciju tuvinājumu [40]), var iegūt šādu izteiksmi:

$$I_{OUT} = I_{off} \cdot \left(\frac{D}{\lambda} + 1 - D\right), \text{ vai } I_{OUT} = I_{off} \cdot (9 \cdot D + 1), \text{ ja } \lambda = 0.1. \quad (3.4.)$$

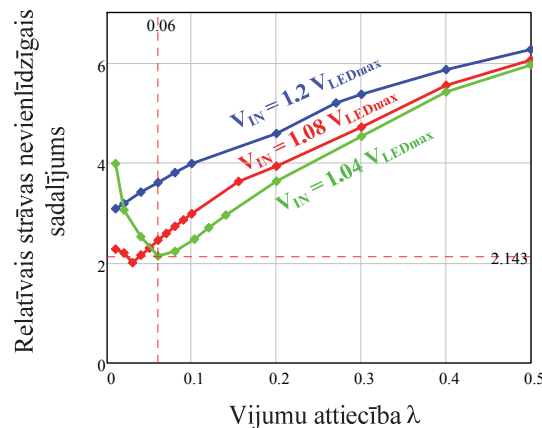
No (3.4.) izriet, ka izejas strāvas mērīšanai var izmantot mērpārveidotāju, kas novietots virknē ar tinumu L2`, ja ir zināma droseles tinumu vijumu attiecība



(a)

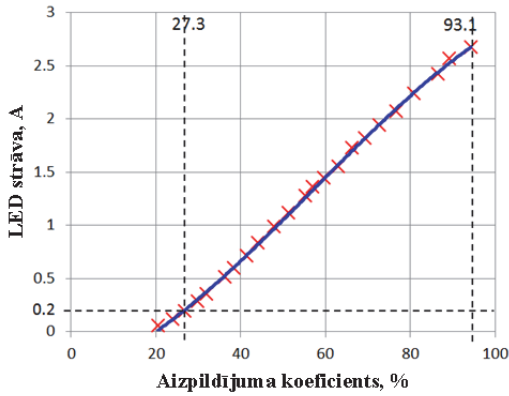


(b)

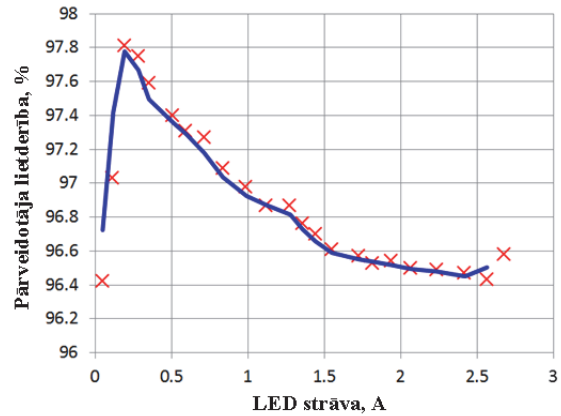


(c)

3.5. att. Vadāmības parametri pazeminošajam pārveidotājam ar sadalīta tinuma droseļi pie dažādām ieejas sprieguma un parametra λ vērtībām: a) nelinearitāte NL ; b) derīga aizpildījuma koeficienta diapazons G_a ; c) strāvas nevienmērīgais sadalījums RG .

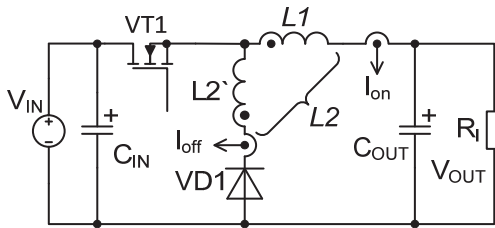


(a)

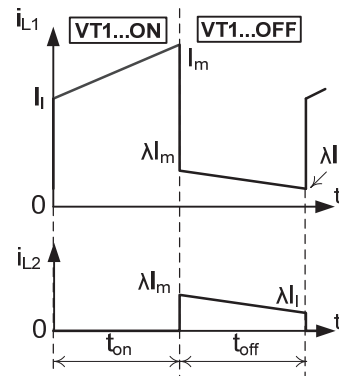


(b)

3.6. att. Pielāgojoši-pazeminoša pārveidotāja ar sadalīta tinuma droseļi prototipa testu rezultāti: a) likumsakarība starp izejas strāvu un aizpildījuma koeficientu; b) lietderība visā regulēšanas diapazonā.



(a)



(b)

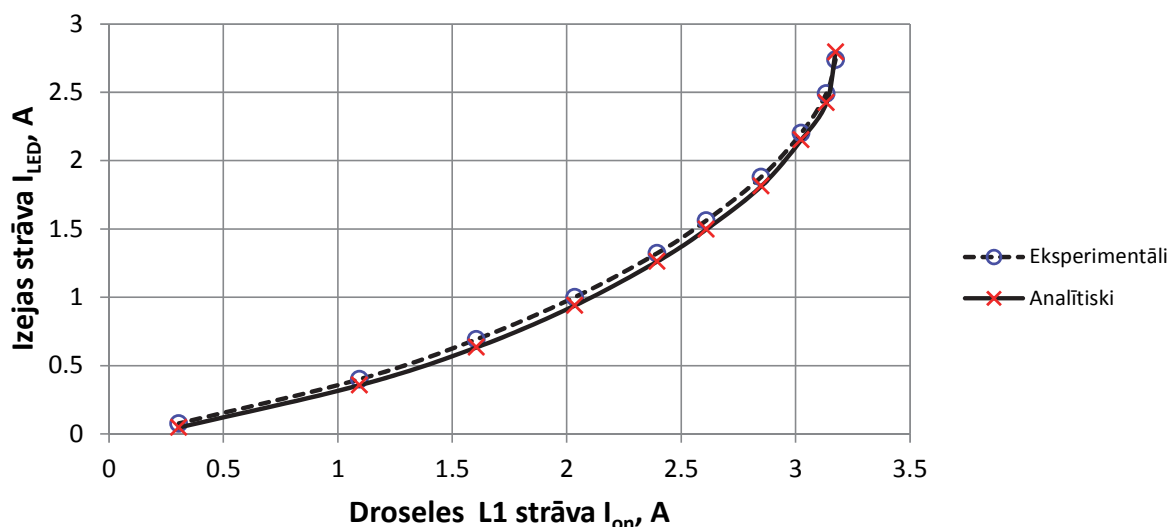
3.7. att. Droseles strāvas mērīšanas paņēmieni zudumu samazināšanai: a) mērpārveidotāju iespējamā izvietošana; b) droseles strāvas tipiskās formas.

(parametrs λ) un spēka slēdža VT1 aizpildījuma koeficients D . Galvenā priekšrocība: mazāki zudumi mērpārveidotājā. Ja parametra λ vērtība ir vienāda ar 0,1 (iepriekš noteikta sistēmas optimālā vērtība), strāvas amplitūdas vērtība tinumā $L2'$ būs 10 reizes mazākā nekā tinumā $L1$. Tomēr jāņem vērā arī galvenais trūkums: paņēmieni realizējami ar ciparu vadības sistēmu un patērē noteiktus procesora resursus.

Iegūtā analītiskā rezultāta (4.4.) pārbaudei tika veikti papildu eksperimenti droseles un izejas strāvas likumsakarības noteikšanai. Šeit I_{on} ir vidēja strāva tinumā $L1$ tranzistora VT1 zemomīga stāvokļa laikā, bet I_{off} ir vidēja strāva tinumos $L1$ un $L2'$ tranzistora VT1 augstomīga stāvokļa laikā (3.7. att. b):

$$I_{on} = \left(\frac{I_l + I_m}{2} \right) \text{ un } I_{off} = \left(\frac{\lambda \cdot I_l + \lambda \cdot I_m}{2} \right) = \lambda \cdot I_{on}. \quad (3.5.)$$

Eksperimentu laikā tika iegūti šādi lielumi: izejas strāva I_{OUT} , droseles tinuma $L1$ strāvas oscilogrammas un droseles tinuma $L2'$ strāvas oscilogrammas. No oscilogrammām bija iegūtas lielumu I_{on} un I_{off} vērtības, un rezultāti apkopoti 3.8. att.



3.8. att. Pārveidotāja droseles strāvas un izejas strāvas likumsakarība: pārtrauktā līnija — eksperimentāli uzņemtā raksturlīkne; nepārtrauktā līnija — aprēķinātā raksturlīkne.

3.8. att. parādītās raksturlīknēs ir redzama laba sakritība starp eksperimentos uzņemtām un analītiski aprēķinātām (izmantojot sakarību (4.4.)) izejas strāvas vērtībām, kas liecina par aprakstītas strāvas mērīšanas metodes korektu darbību. Ir vērts pieminēt, ka pārejas procesos aprēķins būs nekorekts, tomēr pārejas procesā izejas strāva tiecas uz aprēķināto vērtību, un pēc noteikta laika to sasniedz. Izmantojot šo strāvas mērīšanas paņēmieni slēgtajā vadības kontūrā, pārejas process var palēnināties (atkarīgs no izejas kondensatora), toties pārregulējums samazinās.

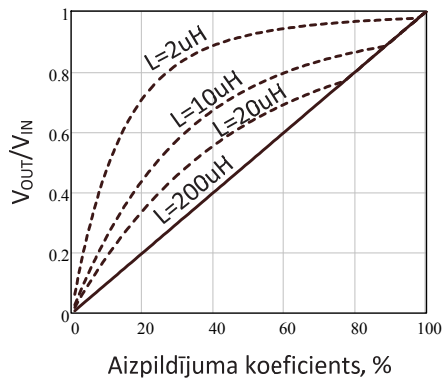
LED nelinearitātes kompensēšanai ir iespējams izmantot arī droseles pārtrauktas strāvas režīmu [39].

Pārveidotājs darbojas pārtrauktas strāvas režīmā pie mazām slodzēm (mazas slodzes strāvas). Pazeminošām pārveidotājam ieejas/izejas sprieguma attiecību rezistīvas slodzes gadījumā, ņemot vērā pārtrauktas strāvas režīma iespējamību, var aprakstīt ar šādu izteiksmi:

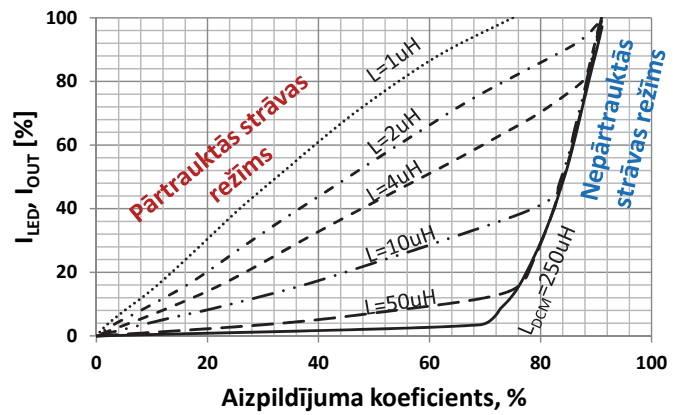
$$\frac{V_{out}}{V_{IN}} = \begin{cases} D & \text{if } \frac{2L \cdot f_{sw}}{R} < (1 - D) \\ \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{8L \cdot f_{sw}}{R}\right) / D^2}} & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3.6.)$$

kur L ir pazeminošā pārveidotāja droseles induktivitāte, f_{sw} ir tranzistora komutācijas frekvence, bet R ir rezistīvas slodzes pretestība [40]. Analītiskas raksturlīknes pie dažādām induktivitātes L vērtībām, kas iegūtas ar šīs izteiksmes palīdzību rezistīvai slodzei R , apkopotas 3.9. att. (a). No šīm raksturlīknēm ir redzams, ka pie noteiktas induktivitātes vērtības iespējams iegūt nelineāru ieejas/izejas sprieguma attiecības raksturlīkni, kas ir piemērota *LED* nelinearitātes kompensēšanai.

Eksperimentālās raksturlīknes gan pārveidotājiem ar sadalītā tinuma droseļi, gan pazeminošām pārveidotājam, kas darbojas pārtrauktas strāvas režīmā, tika analizētas arī no vadāmības parametru viedokļa un salīdzinātas ar analītiski iegūtiem rezultātiem. Salīdzinājums ir dots 3.1. tabulā.



(a)



(b)

3.9. att. Pazeminošā pārveidotāja darbība nepārtrauktas un pārtrauktas strāvas režīmos: a) ar rezistīvu slodzi (raksturlīknes iegūtas analītiski); b) ar LED slodzi (raksturlīknes iegūtas eksperimentāli).

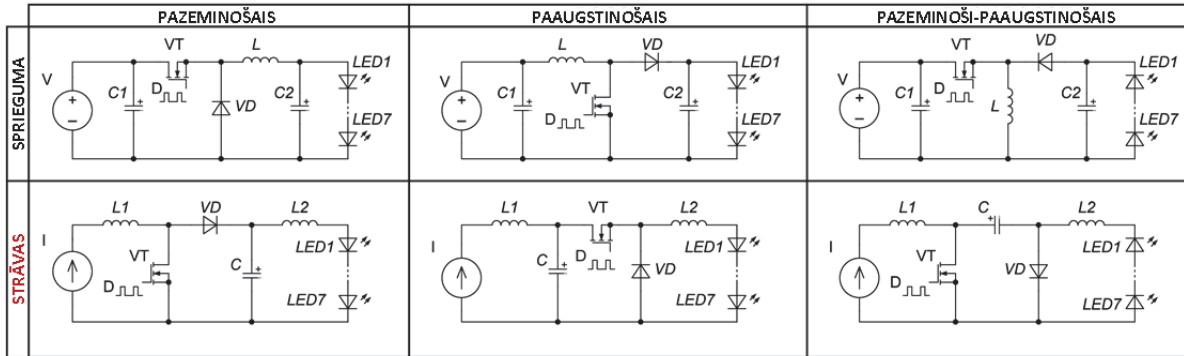
3.1. tabula

Analītisko un eksperimentālo rezultātu salīdzinājums

	Topoloģija	NL, %	G _a , %	RG
Analītiski	Pazeminošs	29	16	5.9
	Pielāgojoši — pazeminošs ($\lambda = 0,1$)	4	42	2.5
	Pārtrauktas strāvas režīms	13	62	3.0
Eksperimentāli	Pazeminošs	20	18	3.6
	Pielāgojoši — pazeminošs ($\lambda = 0,1$)	2	67	1.9
	Pārtrauktas strāvas režīms	2	69	1.4

4. STRĀVAS TIEŠĀ REGULĒŠANA

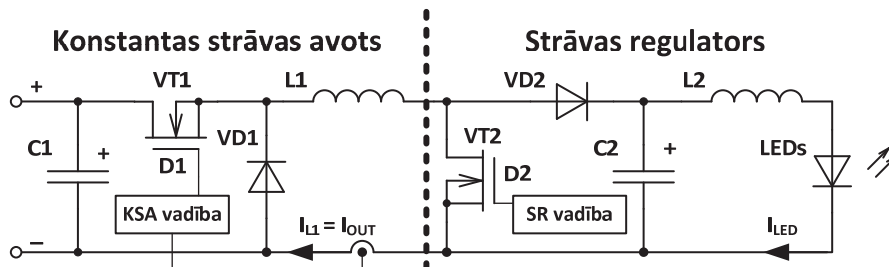
Iepriekšējos pētījumos bija izvirzīta un apstiprināta hipotēze par to, ka strāvas regulatori (SR) ir piemērotāki *LED* slodzes darbināšanai, jo tad *LED* strāva tiek regulēta tiešā veidā [6], [41], [42]. Tika atvasinātas arī trīs strāvas regulatoru pamata topoloģijas [6], [42]. Plaša lietojuma sprieguma regulatoru topoloģijas un to strāvas regulatoru atvasinājumi apkopoti 4.1. att.



4.1. att. Plašāka lietojuma sprieguma regulatoru topoloģijas un šo topoloģiju strāvas regulatoru atvasinājumi.

Konstatēts arī viens no galvenajiem trūkumiem: strāvas regulatoram ieejā ir nepieciešams konstants strāvas avots (KSA). Viens no šīs problēmas risinājumiem tika piedāvāts [43]. Šajā rakstā neinvertējošais pazeminoši-paaugstinošs pārveidotājs ir apskatīts kā konstantas strāvas avota un strāvas regulatora kombinācija (4.2. att.).

Tirgū ir pieejamas specializētas mikroshēmas, kas paredzētas šīs topoloģijas pārveidotāju vadības sistēmas uzbūvei, piemēram, [44]. Pēdējā laikā veikti arī vairāki pētījumi, kā arī patentēti izgudrojumi, kas veltīti šīs topoloģijas dažādu parametru uzlabošanai. Piemēram, [45] apkopotais pētījums ir veltīts strāvas mērīšanas paņēmiena precizitātes un lietderības uzlabošanai šāda tipa mikroshēmām, bet [46] ir aprakstīta vispārējās lietošanas pārveidotāja darbības optimizācija. Tomēr visos minētajos risinājumos neinvertējošais pazeminoši-paaugstinošs pārveidotājs tiek apskatīts kā sprieguma regulators.



4.2. att. Elektriskā principiālā shēma neinvertējošam pazeminoši-paaugstinošam pārveidotājam, kas apskatīts kā konstanta strāvas avota (KSA) un strāvas regulatora (SR) kombinācija.

Kā jau iepriekš minēts, šajā darbā apskatīta cita pieeja, un pārveidotājs tiek analizēts kā KSA un SR kombinācija. Tas var ietekmēt kondensatoru un droseliņu

parametru vērtības, to izmērus un svaru, kā arī pārveidotāja lietderību. Tomēr galvenā pētījuma hipotēze nosaka, ka, izmantojot šo paņēmieni, var panākt lineāru *LED* slodzes vadāmības raksturlīkni ar mazāku vidējo pastiprinājumu, kas savukārt uzlabo regulēšanas izšķirtspēju (precizitāti) un uzlabo stabilitāti regulatoram ar atgriezenisko saiti.

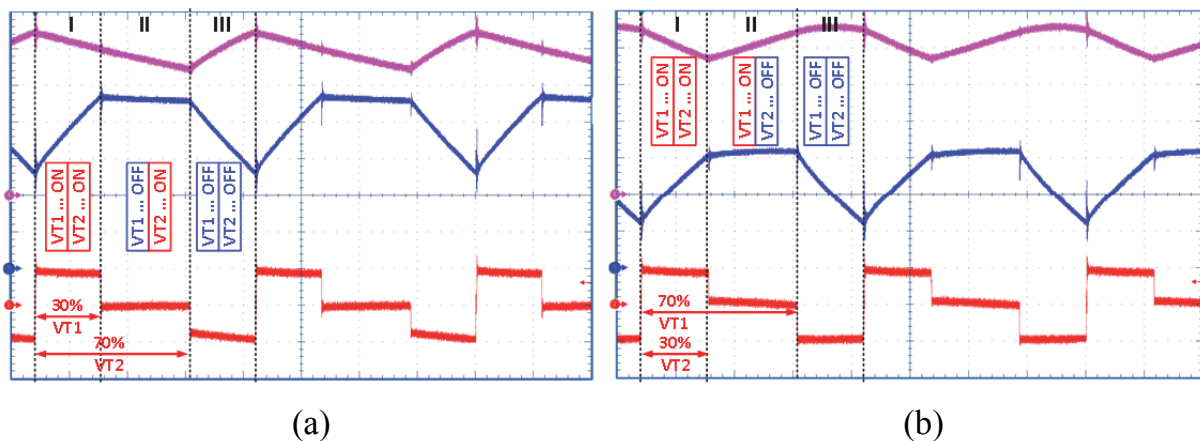
Saskaņā ar [43] tranzistoram VT1 jāstrādā tā, ka vidēja droseles L1 strāva ir nemainīga (pielāgojot to ar mainīgo VT1 aizpildījuma koeficientu), bet tranzistors VT2 darbojas ar nemainīgu aizpildījuma koeficientu, kas nosaka izejas strāvu. Tranzistori var strādāt gan neatkarīgi, gan sinhroni saskaņoti. Vienkāršākajā gadījumā iespējams izveidot vadības sistēmu ar vienu atgriezenisko saiti tikai KSA posmā, kā parādīts 4.2. att.

Vairākas vadības sistēmas konfigurācijas neinvertējošam pazeminoši-paaugstinošām pārveidotājam ar vienu atgriezenisko saiti pie tranzistoru VT1 un VT2 neatkarīgas un sinhronas saskaņotas darbības tika apskatītas šajā darbā.

Lai nodrošinātu droseles enerģētisko bilanci (kā parādīts 4.3. att.), apskatāmā pārveidotāja spēka slēdžus VT1 un VT2 jāvada ar komplementāriem vadības signāliem pēc likuma:

$$D_1 + D_2 \approx 100\% \quad (4.1.)$$

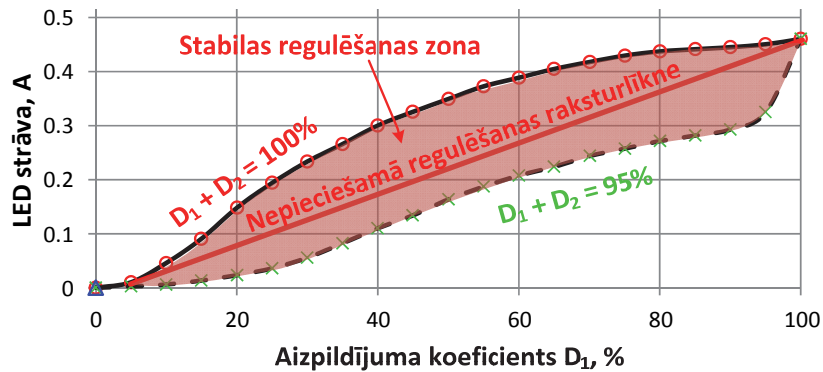
Iepriekš aprakstītais pārveidotājs un vadības likums (4.1.) tika pārbaudīti arī eksperimentāli. Iegūtās vadāmības raksturlīknes parādītas 4.4. att. Paredzētā izejas strāvas regulēšana vispārīgā gadījumā tiek panākta, ja tiek ievērots vadības likums (4.1). KSA posma strāva ir pietiekami stabila plašā diapazonā (40...100 %), tas redzams 4.4. att.



4.3. att. KSA droseles L1 strāva (zilā krāsā), spriegums (sarkanā krāsā) un kondensatora spriegums (violetā krāsā): a) pie VT1 aizpildījuma koeficienta $D_1 = 30\%$; b) pie VT1 aizpildījuma koeficienta $D_2 = 70\%$ (laika mērogs $5 \mu\text{s}/\text{ied.}$, droseles sprieguma mērogs $50 \text{ V}/\text{ied.}$, kondensatora sprieguma mērogs $10 \text{ V}/\text{ied.}$, strāvas mērogs $0,2 \text{ A}/\text{ied.}$)

Droseles enerģijas uzkrāšanas posmam jābūt sabalansētam ar enerģijas atdošanas posmu, ko var panākt, ja izpildās vadības likums (4.1.), tāpēc pārveidotājs ir ļoti jutīgs pret droseles enerģijas uzkrāšanas/atdošanas disbalansu; ja $D_1 + D_2 > 1$, tad izejas strāva un jauda strauji pieaug un pastāv liels pārveidotāja bojāšanas risks; ja

$D_1 + D_2 < 1$, tad pārveidotājs nespēj nodrošināt nepieciešamo strāvu KSA un SR posmiem. Iepriekš aprakstītais bilances likums padara vadības sistēmas izstrādi sarežģītāku; tomēr ir tāds aizpildījumu koeficientu diapazons (laukums sārtā krāsā 4.4. att.), kas dod iespēju iegūt lineāru vadāmības raksturlīkni; aizpildījuma koeficients (D_1 vai D_2) ir galvenais regulēšanas parametrs, savukārt bilance $D_1 + D_2$ dot papildu pieregulēšanas iespēju.



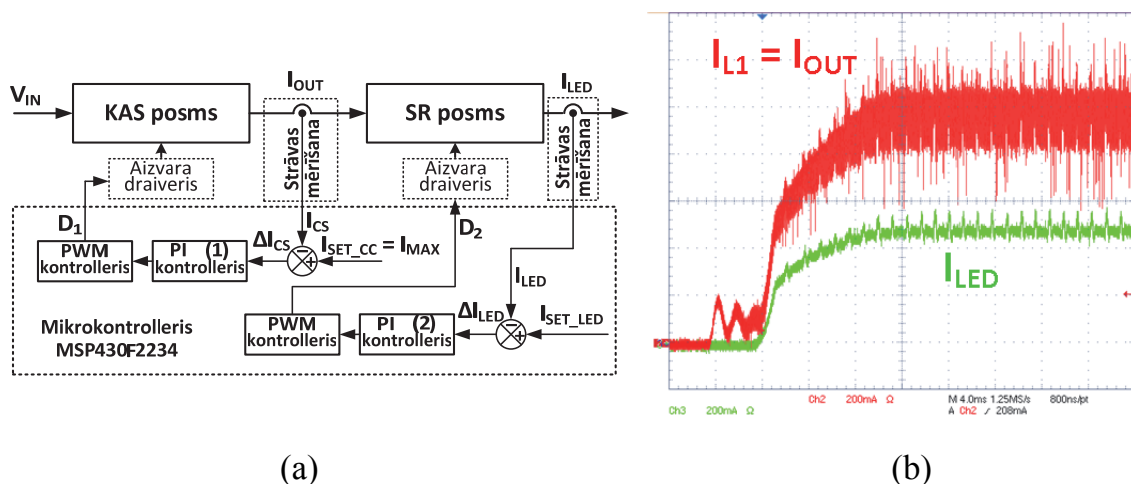
4.4. att. Iespējamais neinvertējoši pazeminoši-paaugstinoša pārveidotāja (kas apskatīts kā KSA un SR posmu kombinācija) regulēšanas apgabals.

Realizējot vadības sistēmu uz mikrokontrollera pamata, viena slēdža aizpildījuma koeficientu nosaka nepieciešamā izejas strāvā I_{SET_LED} , kuras vērtību nosaka lietotājs, piemēram D_2 :

$$D_2 = 1 - I_{SET_LED} / I_{SET_CC} \quad (4.2.)$$

kur I_{SET_CC} ir KSA posma noteiktā strāva, kura vienāda ar maksimālo izejas (LED) strāvu. Saskaņā ar (4.1.) un (4.2.) otram tranzistoram aizpildījuma koeficientu D_1 var atrast no:

$$D_1 \approx I_{SET_LED} / I_{SET_CC} \quad (4.3.)$$



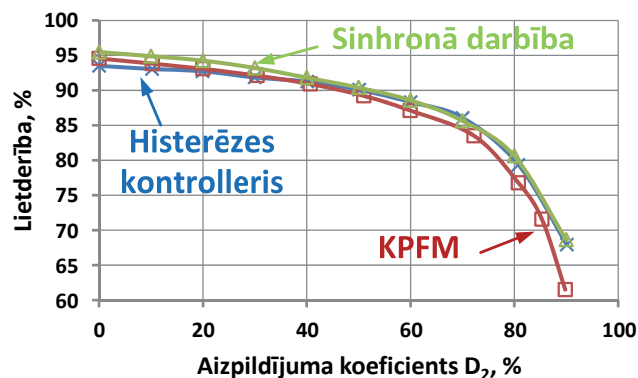
4.5. att. Neinvertējošā pazeminoši-paaugstinoša pārveidotāja tranzistoru VT1 un VT1 sinhrona vadība uz mikrokontrollera pamata: a) vadības sistēmas blokhēma; b) testu rezultāts — pārveidotāja palaišana un turpmākā darbība pie puses no maksimālās LED strāvas.

Tādējādi tranzistoru VT1 un VT2 aizpildījuma koeficientu sākumvērtības var aprēķināt no (4.2) un (4.3), un slēgto vadības kontūru var ieviest tikai vienam pārveidotāja posmam (šeit atgriezeniskā saite pēc KSA posma strāvas, kas ir kritiski pārveidotāja darbībai), kā parādīts 4.5. att. (a).

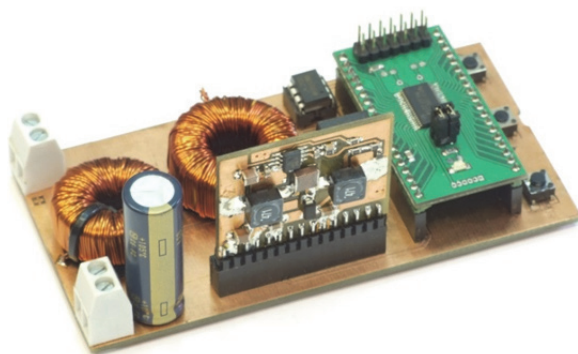
Visi eksperimenti veikti vienādos apstākļos: ieejas spriegums $V_{IN} = 35\text{ V}$, LED slodze no 8 virknē slēgtam *Seoul Semiconductor W724C0* gaismas diodēm. Tika veikti salīdzinājuma testi, lai pārbaudītu atbilstību vadības likumam (4.1) un uzņemta pārveidotāja lietderība, izmantojot dažādus vadības paņēmienus plašā regulēšanas diapazonā (eksperimentu dati apkopoti 4.6. att.).

Saskaņā ar iegūtiem rezultātiem (4.6. att.) visas apskatītās vadības sistēmas ir piemērotas tiešas strāvas regulēšanas ieviešanai. Tomēr histerēzes kontroleris bija parādījis labākus rezultātus pie asinhronas darbības gadījumā, bet sinhronās vadības (uz mikrokontrolera pamata) paņēmiens ļauj sasniegt augstāku lietderību un izvairīties no specializēto vadības mikroshēmu izmantošanas, kas savukārt ļauj samazināt sistēmas sākotnējās izmaksas.

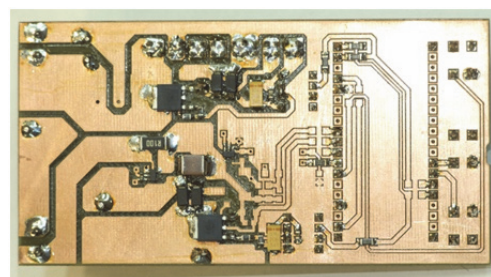
Viens no uzbūvētiem prototipiem ir parādīts 4.7. att.



4.6. att. Neinvertējošā pazeminoši-paaugstinoša pārveidotāja lietderība sinhronas KSA un SR posmu darbības gadījumā un asinhronas (KSA histerēzes un konstantas pauzes frekvenču modulācijas) darbības gadījumā.



(a)



(b)

4.7. att. Viens no uzbūvētiem pārveidotāja prototipiem: a) skats no augšas: ir redzama vadības plate ar mikrokontroleri un vadības sistēmas palīgbarošanas plate, kā arī galvenā drosele L1 un filtrējoša drosele L2; b) skats no apakšas: redzami virsmas montāžas izpildījuma spēka slēdži (tranzistori un diodes) un SR kondensators.

5. SECINĀJUMI

Šajā darbā tika izvirzītas divas galvenās hipotēzes:

1. Gaismas plūsmas regulēšanas precizitāti (plūstošai apgaismojuma līmeņa regulēšanas metodei) ir iespējams uzlabot, kompensējot *LED* nelinearitātes ar pārveidotāja nelinearitāti.
2. Tiešo strāvas regulēšanu ir iespējams realizēt uz neinvertējošā pazeminoši-paaugstinoša pārveidotājā bāzes.

1. Darbā apskatītas dažādas pārveidotāju topoloģijas un dažādi līdzsprieguma pārveidotāju darbības režīmi, lai apstiprinātu/noraidītu pirmo hipotēzi.

Šo pētījumu gaitā konstatēts, ka pielāgojoši-pazeminošs pārveidotājs ar sadalīta tinuma droseļi var nodrošināt nepieciešamo nelineāro ieejas-izejas pārvades funkcijas raksturlīkni, kas spēj kompensēt *LED* raksturlīkņu nelinearitāti. Šo pārvades funkciju var pielāgot ar sadalīta tinuma droseles tinumu vijumu skaita attiecību $\lambda = N1/N2$. Vijumu attiecības λ optimālā vērtība atrasta analītiski, novērtējot vadāmības parametrus: nelinearitāti, pastiprinājumu, lietderīgi izmantojamo aizpildījuma koeficientu, vadības signāla dinamisko apgabalu u. c. Vadāmības parametri iegūst optimālās vērtības, kad pārveidotāja ieejas spriegums ir nedaudz (par 5...10 %) lielāks par izejas spriegumu (maksimālo *LED* slodzes spriegumu pilnas jaudas gadījumā) un sadalīta tinuma droseles tinumu vijumu skaita attiecība ir vienāda ar $\lambda \approx 0,1$.

Analītiskie rezultāti tika apstiprināti arī eksperimentāli, veicot testus ar uzbūvēto pielāgojoši-pazeminoša pārveidotāja prototipu: plūstošās gaismas regulēšanas precizitāte uzlabojās, jo regulēšanas izšķirtspēja palielinājās vismaz 4 reizes, salīdzinot ar tradicionālam pārveidotāju topoloģijām. Turklāt šī pārveidotāja lietderība ir līdzvērtīga vai pat labāka par tradicionālajiem pārveidotājiem. Pielāgojoši-pazeminoša pārveidotāja lietderību var uzlabot arī praktiskajos lietojumos, kur slēgta vadības kontūras ieviešanai ir nepieciešami izejas strāvas vai droseles strāvas mērījumi. Ir iespējams realizēt energoefektīvo strāvas mērīšanas paņēmieni, ieliekot strāvas mērpārveidotāju sekundārajā droseles tinumā, kur plūst aptuveni 10 reizes mazāka vidējā strāva nekā primārajā tinumā.

Tika konstatēts arī, ka līdzstrāvas pārveidotājs, kas darbojas pārtrauktas strāvas režīmā, arī ir spējīgs kompensēt *LED* slodzes nelinearitāti. Šeit iespējams arī vismaz 4 reizes palielināt regulēšanas izšķirtspēju. Rezultāti ir apstiprināti gan analītiski, gan praktiski. Tomēr pārveidotāju, kas darbojas pārtrauktas strāvas režīmā, lietderība ir nedaudz zemāka par tradicionālo pārveidotāju lietderību, un tas ir saistīts ar lielākām *pīķa-pret-vidējo* strāvas attiecībām un lielākiem zudumiem droseles serdē. Lietderību un darbības stabilitāti iespējams uzlabot, rūpīgi izvelējoties piemēroto droseles serdes materiālu.

Tādējādi pirmā izvirzītā hipotēzē darba gaitā tika pilnībā apstiprināta. Apskatītā pieeja ļauj ne tikai uzlabot apgaismojuma regulēšanas precizitāti, bet arī dod iespēju uzlabot lietderību.

2. Otras hipotēzes apstiprināšanai tika apskatīts neinvertējošais pazeminoši-paaugstinošais pārveidotājs. Saskaņā ar [6] korektai strāvas pārveidotāja darbībai ieejā nepieciešams pieslēgt konstantas strāvas avotu. Konstatēts, ka vienkāršākais un lietderības ziņā izdevīgākais konstantās strāvas avota iegūšanas veids ir konstantās strāvas formēšana droseļē ar vadāmo slēdzi. Tāpēc neinvertējošo pazeminoši-

paaugstinošo pārveidotāju var uzskatīt par vienkāršāko konstantās strāvas avota un pazeminošā strāvas pārveidotāja kombināciju.

Darbā ir definēts galvenais vadības algoritms ($D1 + D2 \approx 100\%$). Konstatēts, ka neinvertējošais pazeminoši-paaugstinošs pārveidotājs ar pareizi organizēto vadības sistēmu (realizēto saskaņā ar galveno vadības likumu) ļauj realizēt tiešo strāvas regulēšanu, tādējādi palielinot regulēšanas izšķirtspēju vismaz 5 reizes, salīdzinot ar tradicionālajiem pārveidotājiem. Šāda tipa pārveidotājam lietderība ir nedaudz sliktāka nekā tradicionāliem pārveidotājiem. Tomēr šo lietderības atšķirību var samazināt, pareizi izvēloties pārveidotāja spēka daļas konfigurāciju atbilstoši apgaismojuma regulēšanas profilam.

Tādējādi arī otrā hipotēze ir pilnībā apstiprinājusies.

Turpmākā darbība ir saistīta ar viedo apgaismojuma sistēmu izstrādi. Šajā darbā apskatīti energoefektīvie *LED draiveri* ar ērtu apgaismojuma regulēšanas funkciju. Tomēr šie *draiveri* tiešā veidā spēj darboties tikai ar līdzspriegumu (portatīvās iekārtās, lietošanai automobiļos vai nākotnes mājsaimniecību zemsprieguma līdzstrāvas tīklos). Tai pašā laikā šobrīd maiņsprieguma tīkli ir izplatītākās elektroenerģijas pārvades sistēmas, arī mājsaimniecībās. Tāpēc šobrīd ir aktuālā arī tāda *LED draivera* izstrāde, kas apvieno primāro vienpakāpes maiņsprieguma-līdzsprieguma pārveidotāju ar vienu no darbā piedāvātiem pārveidotājiem.

Viedās apgaismojuma sistēmas sirds ir galvenais vadības kontrolleris, un sistēmā iesaistītās lampas mijiedarbojas ar šo kontrolleri. Līdz ar to turpmākā darbība tuvākajā laikā būs saistīta arī ar piemēroto komunikāciju moduļu un sensoru izvēli un *draiveru* aprīkošana ar tiem.

LITERATŪRA

- [1]. IEA, «World Energy Outlook 2011,» *Outlook*, 2011.
- [2]. L. Ribickis un A. Avotiņš, *Apgaismošanas tehnoloģijas*. Rīga: RTU, 2007.
- [3]. Cree, «LED Lighting Catalog,» 2014. [Online]. Available: [http://www.cree.com/Lighting/Document — Library](http://www.cree.com/Lighting/Document—Library). [Accessed: 02-Feb-2014].
- [4]. European Commission, «Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products,» *Off. J. Eur. Union*, pp. 10–35, 2009.
- [5]. U. S. Government Printing Office, «Energy Independence and Security Act of 2007,» *Security*, vol. Public Law, pp. 1–311, 2007.
- [6]. I. Milashevski, *Research and Development of Electronic Ballasts for Smart Lighting Systems with Light Emitting Diodes, Thesis on Power Engineering*. Tallinn: TUT Press, 2012.
- [7]. A. Suzdalenko, I. Milashevski, and I. Galkin, «Comparative study of smart lighting grids with LEDs operated with concentrated, localized or distributed control,» in *SPEEDAM 2012 — 21st International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2012, pp. 1437–1441.
- [8]. A. Suzdalenko and I. Galkin, «Choice of power and control hardware for smart LED luminary,» in *BEC 2010 — 2010 12th Biennial Baltic Electronics Conference, Proceedings of the 12th Biennial Baltic Electronics Conference*, 2010, pp. 331–334.
- [9]. A. Suzdalenko and I. Galkin, «Investigation of power supply methods for intelligent LED luminary,» in *Proceedings of EPE-PEMC 2010 — 14th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2010.
- [10]. S. Bhardwaj, T. Özçelebi, and J. Lukkien, «Smart lighting using LED luminaries,» in *2010 8th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, PERCOM Workshops 2010*, 2010, pp. 654–659.
- [11]. M. C. Kinn, «Proposed components for the design of a smart nano-rid for a domestic electrical system that operates at below 50V DC,» in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*, 2011.
- [12]. D. Caicedo and A. Pandharipande, «Distributed illumination control with local sensing and actuation in networked lighting systems,» *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 3, pp. 1092–1104, 2013.
- [13]. L. H. Koh, Y. K. Tan, Z. Z. Wang, and K. J. Tseng, «An energy — efficient low voltage DC grid powered smart LED lighting system,» in *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2011, pp. 2883–2888.
- [14]. H. J. Chiu, Y. K. Lo, J. T. Chen, S. J. Cheng, C. Y. Lin, and S. C. Mou, «A high-efficiency dimmable LED driver for low-power lighting applications,» in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, vol. 57, no. 2, pp. 735–743.
- [15]. P. Athalye, M. Harris, and G. Negley, «A two-stage LED driver for high-performance high-voltage LED fixtures,» in *Conference Proceedings — IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition — APEC*, 2012, pp. 2385–2391.
- [16]. D. Gacio, J. M. Alonso, A. J. Calleja, J. García, and M. Rico — Secades, «A universal-input single-stage high-power-factor power supply for HB — LEDs

- based on integrated buckflyback converter,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 2, pp. 589–599, 2011.
- [17]. J. M. Alonso, J. Viña, D. G. Vaquero, G. Martínez, and R. Osorio, «Analysis and design of the integrated double buck-boost converter as a high-power-factor driver for power-led lamps,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 4, pp. 1689–1697, 2012.
- [18]. Y. X. Qin, H. S. H. Chung, D. Y. Lin, and S. Y. R. Hui, «Current source ballast for high power lighting emitting diodes without electrolytic capacitor,» in *Proceedings — 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2008*, 2008, pp. 1968–1973.
- [19]. Arias, M.; Lamar, D. G.; Linera, F. F.; Balocco, D.; Diallo, A. A.; Sebastián, J., «Design of a Soft-Switching Asymmetrical Half — Bridge Converter as Second Stage of an LED Driver for Street Lighting Application,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 27, no. 3, pp. Power Electronics, IEEE Transactions on , vol. 27, no. 3, pp. 1608–1621, 2012.
- [20]. L. G. L. Gu, X. R. X. Ruan, M. X. M. Xu, and K. Y. K. Yao, «Means of Eliminating Electrolytic Capacitor in AC/DC Power Supplies for LED Lightings,» *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, 2009.
- [21]. H. Ma, W. Yu, C. Zheng, J. S. Lai, Q. Feng, and B. Y. Chen, «A universal-input high-power-factor PFC pre-regulator without electrolytic capacitor for PWM dimming LED lighting application,» in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition: Energy Conversion Innovation for a Clean Energy Future, ECCE 2011, Proceedings*, 2011, pp. 2288–2295.
- [22]. T. Jiang, H. Zeng, J. Zhang, and Z. Qian, «A primary side feedforward control scheme for low power LED driver compatible with triac dimmer,» in *Conference Proceeding — IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition — APEC*, 2012, pp. 963–968.
- [23]. X. Qu, S. C. Wong, and C. K. Tse, «Resonance — assisted buck converter for offline driving of power LED replacement lamps,» *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 2, pp. 532–540, 2011.
- [24]. C. Chun-An, C. Chien-Hsuan, C. Hung-Liang, and C. Tsung-Yuan, «A single-stage high-PF driver for supplying a T8-type LED lamp,» in *2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 ECCE-ASIA)*, 2014, pp. 2523–2528.
- [25]. K. Shu-Kong and D. D.-C. Lu, «A High Step-Down Transformerless Single-Stage Single-Switch AC/DC Converter,» *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 1, pp. 36–45, 2013.
- [26]. T. Pan, H. Chiu, S. Cheng, and S. Chyng, «An improved single-stage flyback PFC converter for high-luminance lighting LED lamps,» in *2007 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI*, 2007, pp. 4212–4215.
- [27]. D. G. Lamar, A. Fernández, M. Arias, M. Rodríguez, J. Sebastián, and M. M. Hernando, «Limitations of the flyback power factor corrector as a one-stage power supply,» in *PESC Record-IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2007, pp. 1343–1348.
- [28]. B. Johanson and J. Lee, «Solutions for Today’s Low-Power LED Lighting Trends,» *Fairchild*, 2011. [Online]. Available: [https://www.fairchildsemi.com/technical — articles/](https://www.fairchildsemi.com/technical—articles/). [Accessed: 12-Oct-2014].

- [29]. Lighting Research Center, «Flicker Parameters for Reducing Stroboscopic Effects from Solid-state Lighting Systems,» *ASSIST Recommends...*, 2012. [Online]. Available: <http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/pdf/AR-Flicker.pdf>. [Accessed: 03-Jul-2014].
- [30]. W. Chen and S. Y. R. Hui, «A dimmable light-emitting diode (LED) driver with mag-amp postregulators for multistring applications,» *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 6, pp. 1714–1722, 2011.
- [31]. C. L. Chiu and K. H. Chen, «A high accuracy current-balanced control technique for LED backlight,» in *PESC Record-IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2008, pp. 4202–4206.
- [32]. M. Schmid, D. Kuebrich, M. Weiland, and T. Duerbaum, «Evaluation on the efficiency of power LEDs driven with currents typical to switch mode power supplies,» in *Conference Record-IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 2007, pp. 1135–1140.
- [33]. M. Rico — Secades, J. Garcia, J. Cardesin, and A. J. Calleja, «Using tapped-inductor converters as LED drivers,» in *Conference Record-IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 2006, vol. 4, pp. 1794–1800.
- [34]. D. G. Lamar, M. Fernandez, M. Arias, M. M. Hernando, and J. Sebastian, «Tapped-inductor buck HB-LED AC-DC driver operating in boundary conduction mode for replacing incandescent bulb lamps,» *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 10, pp. 4329–4337, 2012.
- [35]. F. Cathell, «Offline Buck Converter with Tapped Inductor Offers Improved Performance.» *ON Semiconductor, Application note AND8318/D, rev. 0*, 2008. [Online]. Available: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND8318-D.PDF. [Accessed: 12-Apr-2014].
- [36]. ON Semiconductor, «Self — Supplied Monolithic Switcher for Low Standby-Power Offline SMPS,» *Technical Datasheet NCP1010/D, rev. 22*, 2010. [Online]. Available: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/NCP1010-D.PDF. [Accessed: 12-Apr-2014].
- [37]. M. Rico-secades, J. Uceda, J. Sebastian, and F. Aldana, «Static and Dynamic Modelling of Tapped — Inductor D-to-DC Converters, » in *Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference (IEEE-PESC 1987)*, 1987, pp. 281–288.
- [38]. O. Tetervenoks and I. Galkin, «Evaluation of Stability of Several LED Drivers in Smart Lighting Applications,» in *Proceedings of 55th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTU CON2014)*, 2014, pp. 48–51.
- [39]. O. Tetervenoks and I. Milashevski, «Dimmable LED Drivers Operating in Discontinuous Conduction Mode,» *Electr. Control Commun. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 27–33, 2013.
- [40]. R. W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics, 2nd edition*. Springer, 2001.
- [41]. I. Milashevski, I. Galkin, and O. Tetervenoks, «Assessment of buck converter powered by current or voltage sources for LEDs luminary,» in *13th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2012)*, 2012, pp. 239–242.

- [42]. I. Galkin, O. Tetervjonok, and I. Milashevski, «Comparative study of steady-state performance of voltage and current fed dimmable LED drivers,» in *International Conference — Workshop Compatibility in Power Electronics, CPE*, 2013, pp. 292–297.
- [43]. I. Galkin and O. Tetervenoks, «Validation of direct current control in LED lamp with non-inverting buck-boost converter,» in *39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2013)*, 2013, pp. 6021–6026.
- [44]. Linear Technology, «LTC3454 1A Synchronous Buck — Boost High Current LED Driver,» *Data Sheet No. LT 0309 (Rev. A)*, 2005. [Online]. Available: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3454fa.pdf>. [Accessed: 15-May-2014].
- [45]. S. Rao, Q. Khan, S. Bang, D. Swank, A. Rao, W. McIntyre, and P. K. Hanumolu, «A 1.2-A buck-boost LED driver with on-chip error averaged senseFET-based current sensing technique,» in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2011, vol. 46, no. 12, pp. 2772–2783.
- [46]. H. Jianming, X. Kun, W. Chunhua, «Modulating method for noninverting Buck-Boost power inverter,» Patent Nr. CN102136797A (2011.07.27).