RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Ansis Avotiņš

VIEDO *LED* APGAISMOJUMA SISTĒMU IZPĒTE UN IZSTRĀDE

Promocijas darba kopsavilkums

RTU Izdevniecība
Rīga 2022

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Ansis Avotiņš

Doktora studiju programmas „Elektrotehnoloģiju datorvadība" doktorants

VIEDO *LED* APGAISMOJUMA SISTĒMU IZPĒTE UN IZSTRĀDE

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
akadēmiķis, profesors *Dr. habil. sc. ing.*
LEONĪDS RIBICKIS

RTU Izdevniecība
Rīga 2022

Avotiņš A. Viedo *LED* apgaismojuma sistēmu izpēte un izstrāde. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. 47 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes „P-14" 2022. gada 25. janvāra lēmumu, protokols Nr. 04030-9.12.1/1.

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai".

EIROPAS SOCIĀLAIS FONDS

EIROPAS SAVIENĪBA

https://doi.org/10.7250/9789934227486
ISBN 978-9934-22-748-6 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 11.aprīlī. Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 212. telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asoc. profesors, vadošais pētnieks *Dr. Sc. ing.* Jānis Zaķis,
Rīgas Tehniskā universitāte

Dr. Sc. ing. Jelena Armasa,
SIA „*Enefit Connect*", Igaunija

Profesore *Ph. D.* Valērija Anna Džeikobsa,
Briseles Brīvā universitāte, Beļģija

APSTIPRINĀJUMS

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

Ansis Avotiņš _____ (paraksts)

Datums: _____

Promocijas darbs ir sagatavots kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa. Tajā ir kopsavilkums, 27 publikācijas un viens *WIPO* patents. Publikācijas uzrakstītas angļu valodā, to kopējais apjoms ir 290 lpp.

Pateicības

Vislielākā pateicība promocijas darba vadītājam akadēmiķim, profesoram *Dr. habil. sc. ing.* Leonīdam Ribickim par atbalstu, motivēšanu un veltīto laiku promocijas darba tapšanā.

Liels paldies arī visiem RTU Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūta darbiniekiem par palīdzību zinātniskā darba tapšanā, it sevišķi profesoram Iļjam Galkinam un vadošajam pētniekam Aleksandram Suzdaļenko par palīdzību *LED* barošanas shēmu analīzē, profesoram Pēterim Apsem-Apsītim par atbalstu un palīdzību *LED* gaismekļu un elektroenerģijas patēriņa uzskaites sistēmas izstrādē un testēšanā, vadošajiem pētniekiem Oļegam Tetervenokam un Leslijam Robertam Adrianam par palīdzību kustības sensoru izstrādē, pētniekiem Kristapam Vītolam un Ričardam Poriņam par palīdzību praktisko eksperiemntu veikšanā!

Īpaša pateicība *Zumtobel* grupas kompānijas „*Thorn Lighting*" vadošajam inženierim *Emmanuel Larat* par konsultācijām un tehnisko vadību *LITES* projektā, *Georges Zissis* par kopīgu mērījumu veikšanu *LITES* projektā (Ķīpsalā) un Rīgas pašvaldības aģentūras „Rīgas gaisma" tehniskajam personālam par palīdzību viedās apgaismes sistēmas pilotvietas izveidē Rīgā.

Paldies arī pārējiem universitātes un institūta kolēģiem par konsultācijām, palīdzīgu roku, pozitīvismu, sapratni un uzmundrinājumu visu šo gadu garumā!

Liels paldies arī manai sievai un ģimenei par emocionālo atbalstu dažādos zinātnisko pētījumu veikšanas etapos un promocijas darba tapšanas laikā!

Saturs

Pateicības 4

Promocijas darba vispārējs raksturojums 6

Ievads 11

1. Apgaismojuma kvalitātes novērtēšanas parametru analīze 12

2. *LED* ielu gaismekļu izpēte un izstrāde 15

3. Ielu apgaismojuma sistēmu izpēte 26

4. Jauno izstrādāto apgaismojuma sistēmu eksperimentālā pārbaude un iegūto rezultātu analīze 30

5. Apgaismes sistēmas *LED* gaismekļu adaptīvā vadības algoritma izstrāde 39

Secinājumi 45

Literatūras saraksts 46

Promocijas darba vispārējs raksturojums

Tēmas aktualitāte

Eiropadomes 2007. gada pavasara sanāksmē tika pieņemta ES *20-20-20* direktīva *2012/27/EU* [1]. No 1990. līdz 2018. gadam ES siltumnīcefekta gāzu emisijas samazinājās par 23 % [2], ņemot vērā *Eurostat* datubāzes datus, kopējais gaisa piesārņojums un CO_2 emisijas Eiropas 27 dalībvalstīs no 2010. līdz 2019. gadam ir samazinājušās vidēji par 1,57 % gadā. Lielāks izaicinājums ir 2019. gadā pieņemtais ES Zaļais kurss [2], kas paredz līdz 2030. gadam ES siltumnīcefekta gāzu emisiju samazinājuma mērķrādītāju palielināt līdz 50–55 %, salīdzinot ar 1990. gada līmeni. Latvijā kopš 2012. gada izmanto emisijas kvotu izsolīšanas instrumenta (EKII) līdzekļus ielu apgaismes modernizācijas (23) līdzfinansēšanai, aizvien biežāk ieviešot viedos pilsētvides risinājumus, kas balstās pilnvērtīgākā informācijas un sakaru tehnoloģijas (IST) risinājumu izmantošanā, būtiski palielinot energoefektivitāti, samazinot emisijas un uzlabojot arī satiksmes drošību. *Eurostat* dati liecina, ka Latvijā ielu negadījumos mirušo skaits uz katriem 100000 iedzīvotājiem no 26,8 (2000) samazinājies līdz 7,7 (2018), kas netiešā veidā korelē ar ielu apgaismojuma pieejamības uzlabojumu pilsētās. Latvijā ielu apgaismei 2012. gadā tika patērētas 79 GWh/gadā, kas, elektroenerģijas tarifam pieaugot, bija 11,34 milj. EUR (26).

Eiropas enerģijas tirgus liberalizācijas, vietējo energotīklu skaita pieauguma, atjaunojamo enerģijas resursu integrācijas, koģenerācijas un mikroražošanas izplatības (mikrotīkli, virtuālās elektroenerģijas ražotnes) un jaunu lietotāju pieprasījuma dēļ nepieciešamas modernākas monitoringa un kontroles, kā arī elektroniskas elektroenerģijas tirdzniecības tehnoloģijas, kas ietekmēs arī esošās ielu apgaismojuma sistēmas.

Eiropas Būvniecības tehnoloģiju platformas (*ECTP*) dati liecina, ka 80 % Eiropas iedzīvotāju dzīvo pilsētās [3], kas attiecīgi ir publiskā apgaismojuma sistēmu gala lietotājas. Infrastruktūra pilsētu centros, īpaši Austrumeiropā, ir novecojusi, tādēļ, pārbūvējot šos rajonus, lielāku akcentu būtu jāliek uz efektīvāku enerģijas izmantošanu un iespējamu alternatīvo enerģijas avotu integrāciju [4]. Ielu apgaismojuma nodrošināšanai pilsētā Eiropā vidēji tiek tērēts 6–7 % no kopējā pilsētas elektrības patēriņa, taču atsevišķos gadījumos tas var būt pat 60 % no vietējas pašvaldības kopējā budžeta [5]. Energoefektivitātes palielināšanai gala patērētāja pusē, šajā gadījumā – ielu apgaismojuma sistēmā un *LED* gaismekļos, rada papildu ietaupījumus arī elektroenerģijas ražotāja pusē, jo, kā zināms, elektroenerģijas ražošanā ievērojami zudumi rodas pārvades (2 %) un sadales (8 %) procesā. *LED* gaismekļi šobrīd ir galvenais risinājums ielu apgaismojuma sistēmu efektivitātes paaugstināšanai, un, izmantojot kustības sensorus un efektīvus gaismas regulēšanas algoritmus, viedām ielu apgaismojuma sistēmām ir lielas nākotnes perspektīvas, radot arī jaunas funkcijas un iespējas viedām pilsētām, kas ir arī milzīgi ekonomiskie ieguvumi.

Galvenās hipotēzes un mērķi

Hipotēzes

1. Ar viedām ielu apgaismojuma sistēmām, kas aprīkotas ar *LED* gaismekļiem, ir iespējams ietaupīt līdz 50 % elektroenerģijas.
2. Ar viedām ielu apgaismojuma sistēmām, kas aprīkotas ar *LED* gaismekļiem un kustības sensoriem, ir iespējams papildus ietaupīt 10 % elektroenerģijas.
3. Viedā apgaismojuma vadības sistēma ar dinamisku vadības algoritmu var uzlabot apgaismojuma kvalitāti un satiksmes drošību ielās.

Mērķi

1. Veikt apgaismojuma sistēmu analīzi, izstrādāt to uzbūves struktūru salīdzinājumu.
2. Izstrādāt jaunas viedās *LED* apgaismojuma sistēmas.
3. Eksperimentāli pierādīt viedās *LED* apgaismojuma sistēmas priekšrocības.
4. Optimizēt jauno viedo *LED* apgaismojuma sistēmu vadības metodes.

Pētniecības līdzekļi un metodes

Teorētisko aprēķinu vienkāršošanai un iegūto rezultātu grafiskai atspoguļošanai izmantotas *MatLab* un *Excel* datorprogrammas. Papildu elektrisko ķēžu modelēšanai un izstrādei izmantota *OrCAD* un *LTspice* programmatūras. Apgaismojuma optisko kvalitātes noteikšanai izmantota apgaismojuma aprēķinu programmatūra *DiaLux*. *ZigBee* protokola testiem – *Microchip ZENA 3.0 Network Analyzer* programmatūra un raiduztvērēji.

Iegūto teorētisko rezultātu pārbaude laboratorijas apstākļos veikta ar eksperimentu palīdzību speciāli šim nolūkam pielāgotā laboratorijā un speciāli izveidotā laboratorijas stendā. Stenda izmēri – 2,2 m × 2,2 m × 3 m. Tajā tika ievietoti pētāmie *LED* gaismekļi. Stends tika aizklāts ar melnu aizkara materiālu, tādējādi nodrošinot optiskos mērījumus, ko neietekmē ārējais apgaismojums. Mērījumi tika veikti, izmantojot *Hagner* digitālo luksmetru *EC1*, *LMK MobileAir* apgaismojuma fotokameru un *Avantes VIS-NIR* spektrometru. Elektrisko parametru testēšanai tika izmantots regulējams līdzstrāvas barošanas avots vai autotransformators, funkciju ģenerators (aizpildījuma koeficientam), jaudas analizators, osciloskopi, termogrāfiskā kamera un lāzera temperatūras mērītājs.

Eksperimentu veikšanai āra apstākļos mērījumi tika veikti ar *Hagner* digitālo luksmetru *EC1*, tīkla analizatoru un osciloskopu, kā arī multimetriem un *ABB* elektroenerģijas skaitītājiem.

Zinātniskās novitātes

1. Reālos apstākļos ieviesti jauni bezvadu datu pārraides komunikācijas moduļi uz *ZigBee* un radiosignāla bāzes, kas integrēti katrā vadāmā *LED* gaismeklī, lai noteiktu elektroenerģijas patēriņu esošajā ielu apgaismojuma sistēmā reālā laikā.
2. Pilsētas apgaismojuma sistēmā izstrādāta un integrēta jauna decentralizēta ielu viedā apgaismojuma iekārta, kurā izmantoti regulējami *LED* gaismekļi, kustības sensori un bezvadu datu pārraide, kas testēta reālos apstākļos.
3. Izstrādāta jauna metode ielu apgaismojuma elektroenerģijas patēriņa monitoringam reālā laikā.
4. Izveidots jauns satiksmes intensitātei adaptīvs ielu apgaismojuma sistēmu un to gaismekļu vadības algoritms.

Praktiskās novitātes

1. Izveidots jauns *ZigBee* protokola bezvadu komunikācijas vadības modulis *LED* gaismekļu regulēšanai, kas uzstādīts testēšanas poligonā RTU stāvlaukumā (Meža ielā), nomainot esošos nātrija augstspiediena spuldžu gaismekļus un līdz ar to paaugstinot energoefektivitāti.
2. Uzstādīta jauna viedā *LED* apgaismojuma sistēma gan gājējiem, RTU teritorijā – Ķīpsalā, gan transporta līdzekļu satiksmei Zunda krastmalā, kas ir rezultējies būtiskā elektroenerģijas patēriņa samazinājumā.
3. Izstrādāta jauna sistēma un metode elektroenerģijas patēriņa monitoringam reālā laikā (*WIPO* patents), kas pielāgota *LED* gaismekļu elektroenerģijas patēriņa mērīšanai.

Darba praktiskā nozīme

Darba gaitā iegūtas padziļinātas zināšanas par viedām ielu apgaismojuma sistēmām ar *LED* gaismekļiem, kas ļāva sniegt ekspertīzes pakalpojumus vairākām Latvijas pašvaldībām un Vides aizsardzības un reģionālās ministrijai.

Darba gaitā izstrādāts jauns produkts – regulējams *LED* gaismeklis ar 56 W jaudu.

Izveidots jauns satiksmes intensitātei adaptīvs ielu apgaismojuma un *LED* gaismekļu vadības algoritms maksimālai energoefektivitātei, vienlaikus nodrošinot atbilstošu apgaismojumu un satiksmes drošību no apgaismojuma parametru viedokļa.

Darba gaitā veikti eksperimentālie viedo *LED* apgaismojuma sistēmu testi vairākos poligonos, kas ļauj novērtēt liela skaita gaismekļu elektroenerģijas patēriņa samazinājumu reālā apgaismojuma sistēmā un apgaismojuma kvalitātes parametru atbilstību to reglamentējošām normām un sākotnējiem *Dialux* modelēšanas programmas rezultātiem.

Darba aprobācija

Kopā ir 74 publikācijas un divi patenti. Promocijas darba kopsavilkums aptver 27 publikācijas un vienu patentu.

Publikāciju un patentu saraksts

1. **A. Avotins**, L. R. Adrian, R. Porins, P. Apse-Apsitis, L. Ribickis. Smart City Street Lighting System Quality and Control Issues To Increase Energy Efficiency and Safety. Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2021, Volume 16 Issue 4, p. 28–57.
2. L. R. Adrian, **A. Avotins**, D. Repole, O. Tetervenoks. Development of New Radar and Pyroelectric Sensors for Road Safety Increase in Cloud-Based Multi-Agent Control Application. Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2021 Volume 16 Issue 4, p. 76–107.
3. **A. Avotins**, O. Tetervenoks, L. R. Adrian and A. Severdaks, „Traffic Intensity Adaptive Street Lighting Control," IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2021, pp. 1–6.
4. K. Kviesis, L. R. Adrian, **A. Avotins**, O. Tetervenoks and D. Repole, „MAS Concept for PIR Sensor-Based Lighting System Control Applications," 2020 IEEE 8th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 2021, pp. 1–5.
5. R. Porins, P. Apse-Apsitis and **A. Avotins**, „PIR-Sensor Based Street Lighting System Control," 2020 IEEE 8th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 2021.
6. Apse-Apsitis, P., **Avotins, A.**, Graudone, J., Porins, R. RGB based sensor for semi-spherical light measurements. Engineering for Rural Development, 2020, 19, pp. 1242–1247.
7. Tetervenoks, O., **Avotiņš, A.**, Fedorjana, N., Klūga, A., Krasts, V. Potential Role of Street Lighting System for Safety Enhancement on the Roads in Future. No: 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2019): Conference Proceedings, Latvija, Rīga, 7.–9. oktobris, IEEE, 2019, 349.–353. lpp. e-ISBN 978-1-7281-3942-5.
8. Tetervenoks, O., **Avotiņš, A.**, Apse-Apsītis, P., Adrian, L., Viļums, R. Movement Detection Sensor Application for Traffic Direction Monitoring in Smart Street Lighting Systems. No: 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2018): Conference Proceedings, Latvija, Riga, 12.–13. novembris, 2018. IEEE, 1.–5. lpp. e-ISBN 978-1-5386-6903-7.
9. Šenfelds, A., Apse-Apsītis, P., **Avotiņš, A.**, Ribickis, L., Hauf, D. Industrial DC Microgrid Analysis with Synchronous Multipoint Power Measurement Solution. No: 2017 19th European Conference

on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe): USB Flash Drive Proceedings, Polija, Warsaw, 11.–14. septembris, 2017. Piscataway: IEEE, 2017, 1.–6. lpp. ISBN 978-1-5386-0530-1. e-ISBN 978-90-75815-27-6.

10. Apse-Apsītis, P., Vītols, K., Grīnfogels, E., Šenfelds, A., **Avotiņš, A.** Electricity Meter Sensitivity and Precision Measurements and Research on Influencing Factors for the Meter Measurements. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2018, Vol. 7, No. 2, 48.–52. lpp. ISSN 2162-2264.
11. Pellicciari, M., **Avotiņš, A**., Bengtsson, K., Berselli, G., Bey, N., Lennartson, B., Meike, D. AREUS – Innovative Hardware and Hardware and Software for Sustainable Industrial Robotics. No: 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2015): Automation for a Sustainable Future: Proceedings, Zviedrija, Gothenburg, 24.–28. augusts, 2015. 1325.–1332. lpp. ISSN 2161-8070.
12. Apse-Apsītis, P., Šenfelds, A., **Avotiņš, A.**, Paugurs, A., Priedītis, M. Power Measurement and Data Logger with High-Resolution for Industrial DC-Grid Application. Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), 2017 19th European Conference on, 2015, Vol. 9, 36.–42. lpp. ISSN 2255-9140. e-ISSN 2255-9159.
13. **Avotiņš, A.**, Bicāns, J. Context Application to Improve LED Lighting Control Systems. No: 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON): Proceedings, Latvija, Riga, 14. oktobris, 2015. Riga: Riga Technical University, 135.–138. lpp. e-ISBN 978-1-4673-9752-0.
14. Ribickis, L., Peuteman, J., Zukovski, P., Ion, I., Koltunowicz, T., De Craemer, R., Žiravecka, A., Zabašta, A., **Avotiņš, A.**, Adrian, L., Radoslavlevic, J., Bražis, V., Arsic, N., Kuņicina, N. Energy Saving Technologies. Book. Riga: RTU Press, 2015. 240 lpp. ISBN 978-9934-10605-7.
15. Apse-Apsītis, P., **Avotiņš, A.**, Ribickis, L. Bidirectional DC/AC Energy Flow Measurement. No: 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG): Proceedings, Latvija, Riga, 11.–13. maijs, 2015. Riga: Riga Technical University, 465.–468. lpp. e-ISBN 978-1-4799-9978-1.
16. Ribickis, L., Galkins, I., Tamulaitis, G., Pashayev, A., Tagiyev, B., Allahverdiyev, K., Uteševs, I., Suzdaļenko, A., **Avotiņš, A.**, Tetervenoks, O. Effective Lighting. Book. Riga: RTU Press, 2015. 275 lpp. ISBN 978-9934-10-603-3.
17. **Avotiņš, A.**, Apse-Apsītis, P., Kuņickis, M., Ribickis, L. Intelligent LED Street Lighting System – LITES Project at Riga Technical University. No: Riga Technical University Research. Riga: RTU Press, 2015, 31.–33. lpp. Available at: https://issuu.com/rigastehniskauniversitate/docs/mpt_journal/32.
18. **Avotins, A.**; Apse-Apsitis, P.; Kunickis, M.; Ribickis, L., „Towards smart street LED lighting systems and preliminary energy saving results", 55th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2014), vol., no., pp. 130, 135, 14. Okt. 2014.
19. Apse-Apsītis, P., **Avotiņš, A.**, Ribickis, L. A Different Approach to Electrical Energy Consumption Monitoring. No: Proceedings of the 16th European Conference on Power Electronics and Applications, Somija, Lappeenranta, 26.–28. augusts, 2014.
20. **Avotiņš, A.**, Ribickis, L. Toward Intelligent Lighting Systems with Power LED. The 51st Annual International Scientific Conference of Riga Technical University RTUCON2010, Latvija, Riga, 13.–14. oktobris, 2010.
21. Apse-Apsītis, P., **Avotiņš, A.**, Ribickis, L. Wirelessly Controlled LED Lighting System. No: IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON 2012) – ICT for Energy: Conference Proceedings, Itālija, Florence, 9.–12. septembris, 2012.
22. **Avotiņš, A.**, Suzdaļenko, A., Galkins, I. A Project-Based Learning Approach to Improve Quality of Power Electronic Courses. 2013 7th IEEE International Conference on e-Learning in Industrial Electronics (ICELIE 2013), Austrija, Vienna, 10.–13. novembris, 2013.
23. **Avotiņš, A.**, Ribickis, L. Analysis of GHG Reduction Possibilities in Latvia by Implementing LED

Street Lighting Technologies. Civil Engineering '11: 3rd International Scientific Conference: Proceedings, Latvija, Jelgava, 12.–13. maijs, 2011. Jelgava: LLU, 2011, 209.–214. lpp.
24. Galkins, I., **Avotiņš, A.**, Suzdaļenko, A. LED Dimmer as Versatile Hardware Platform for Practical Exercises in Power Electronics and Control Courses. Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011), Lielbritānija, Birmingham, 30. Aug–1. Sep., 2011.
25. **Avotiņš, A.**, Galkins, I., Ribickis, L. Development Challenges of Intelligent Street Lighting System. 9th International Symposium „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering. Doctoral School of Energy and Geotechnology II", Igaunija, Parnu, 14.–19. jūnijs, 2010.
26. **Avotiņš, A.** City Illumination Development Study. No: 8th International Symposium „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering. Doctoral School of Energy and Geotechnology II", Igaunija, Parnu, 11.–16. janvāris, 2010.
27. Galkins, I., **Avotiņš, A.**, Suzdaļenko, A., Ribickis, L. Comparison and Choice of Supply and Driver Unit for Power LED Luminary. RTU, Enerģētika un elektrotehnika. Nr. 25, 2009, 137.–140. lpp. ISSN 1407-7345.
28. Apse-Apsītis P., **Avotiņš A.**, Ribickis L., System and method for monitoring real power consumption. WIPO patents WO2013/093554 A1, patenta publikācijas datums 27.06.2013.

Ievads

Evolūcijas gaitā cilvēce ir izgudrojusi dažādas mākslīgā apgaismojuma tehnoloģijas, bet, ņemot vērā to, ka mākslīgā apgaismojuma radīšanai ir nepieciešami citi energoresursi, galvenais virzītājspēks apgaismojuma tehnoloģiju [5], [6] attīstībai ir tieši energoresursu taupība [1]–[4]. Šobrīd liela uzmanība pasaulē mākslīgā apgaismojuma radīšanai tiek pievērsta principiāli jaunai gaismas izstarošanas tehnoloģijai – *LED* (angļu val. *Light-Emitting Diode*, gaismu izstarojoša diode). *LED* tehnoloģijas straujā attīstība pēdējos gados devusi tai iesauku „21. gadsimta gaisma". Šīs tehnoloģijas aktualitāti un nozīmīgumu apliecina arī 2014. gadā piešķirtā Nobela prēmija fizikā *Isamu Akasaki*, *Hiroshi Amano* un *Shuji Nakamura* par energoefektīvo un videi draudzīgo gaismas avota – zilās gaismu izstarojošās diodes (*LED*) izgudrošanu [7], [8]. Ar to aizsākās jaudas *LED* (*power LED*), kas ir vairāku mazu *LED* kombinācija (virknē, paralēli vai matricā) vienā integrētā korpusā (turpmāk – čipā), ražošana, ko tagad plaši izmanto ielu apgaismojuma sistēmu gaismekļos.

Pēdējos gados parādās arī tendence izmantot *LED* galveno īpašību – regulējot strāvu ar dažādu barošanas bloku (20) vai dimmeru palīdzību, iespējams regulēt (dimmēt) arī izstarotās gaismas daudzumu robežās 0–100 % un attiecīgi arī *LED* gaismekļa elektroenerģijas patēriņu, ko pilnā diapazonā nebija iespējams veikt gāzizlādes spuldžu gaismekļiem. Tādēļ, izmantojot LED dimmēšanu aizvien biežāk tiek izmantotas arī apgaismojuma vadības sistēmas (14), ļaujot ietaupīt 30–50 % elektroenerģiju, salīdzinot ar augstspiediena gāzizlādes spuldžu gaismekļiem. Perspektīvā, joprojām attīstoties gan *LED* tehnoloģijai, regulējamiem pārveidotājiem, komunikācijas un vadības sistēmām (14), šis elektroenerģijas patēriņš varētu samazināties vēl vairāk, paverot aizvien jaunas iespējas apgaismojuma sistēmu kvalitātes un funkcionālajā attīstībā (21), vēl jo vairāk tādēļ, ka nākotnes elektroapgāde varētu būt decentralizēta un daudz vairāk aprīkota ar Informācijas un Komunikāciju Tehnoloģijām (IKT) dažādos to līmeņos, tādēļ ir ieviests termins „viedie tīkli" (angļu val. *smart grids*). Tas rada nepieciešamību pētījumam, kas ļautu novērtēt šādu viedo tīklu pieeju arī apgaismojuma sistēmās.

Ielu apgaismojums tika ieviests, lai palielinātu drošību uz ceļiem un samazinātu ceļu satiksmes negadījumus, par ko liecina negadījumu analīze dažādās ASV pilsētās [9], kur tumšajā diennakts laikā bojāgājušo skaits ir 3–4 reizes lielāks nekā dabīgā apgaismojuma apstākļos pat tad, ja satiksmes intensitāte samazinās. Tika izstrādāti vairāki kvalitātes standarti [10] mērījumiem un uzturamajām fotometrisko parametru robežām, kas ir pieņemtas daudzās pasaules valstīs, un tie tiek pastāvīgi atjaunināti atbilstoši apgaismes tehnoloģiju attīstībai.

1. Apgaismojuma kvalitātes novērtēšanas parametru analīze

Lai izveidotu normatīvajiem aktiem [10] atbilstošu un energoefektīvu ielu apgaismojuma sistēmu, ir nepieciešams izvēlēties atbilstošu gaismekli katrā konkrētā situācijā, tādēļ vispirms ir jānovērtē katras ielas raksturojošie parametri, kas vispirms ir ģeogrāfiska rakstura, proti – ielas platums, joslu skaits, attālums starp stabiem, stabu augstums, gaismekļa novietojuma leņķis, attālums no brauktuves malas, ceļa seguma atstarošanas koeficients u. c. Pēc būtības pilsētu ielas var iedalīt divās grupās (1.1. att.):

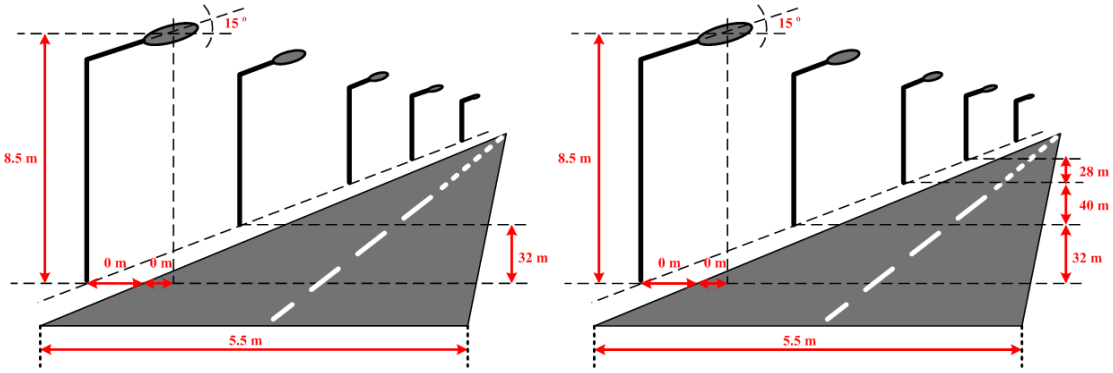
a) ar konstantiem balstu attālumiem (parasti jaunas/rekonstruētas ielas);

b) ar mainīgiem balstu attālumiem (nerekonstruētas ielas).

Nākamais parametrs, kas nosaka prasības pret ielu apgaismojuma līmeni, ir satiksmes dalībnieku veidi un satiksmes intensitāte. Ielu apgaismojuma klases izvēli nosaka apgaismojuma kvalitātes parametru L_{av} (cd/m^2), U_0, U_l, f_{TI}, R_{EI} minimālās vērtības, kas ir aprakstītas LVS tehniskā ziņojuma pirmajā daļā [10], kas ir spēkā arī Eiropas Savienības (ES) dalībvalstīs, ir noteiktas arī četras laika zonas, kas paredzētas dimmēšanai atšķirīgu apgaismojuma līmeņu uzturēšanai.

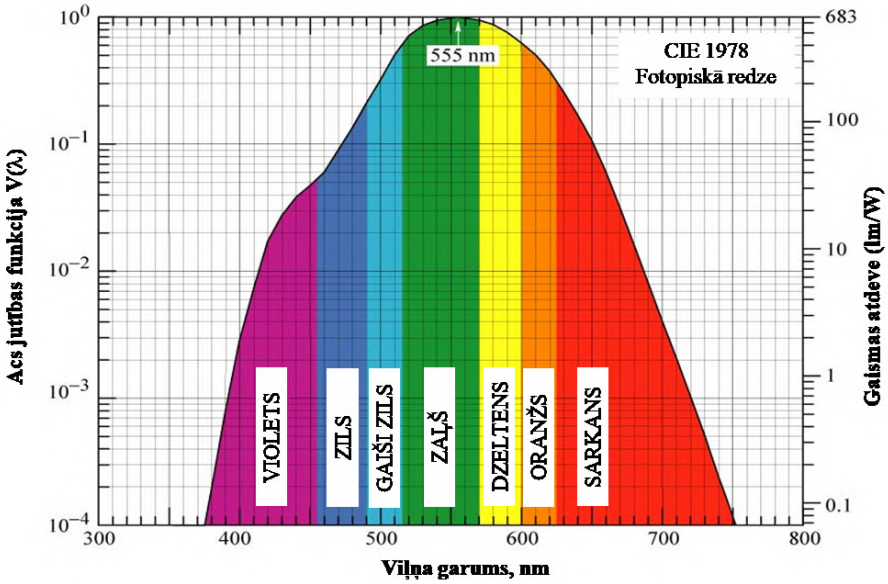
Būtiskākais parametrs dažādu tipu gaismas avotu un arī gaismekļu salīdzinājumam ir tieši gaismekļa kopējā efektivitāte (K, lm/W) [11], citos avotos sastopams arī kā hL, kas tiek izteikta kā attiecība starp gaismekļa kopējo izstaroto gaismas daudzumu (lm, cd·sr) un kopējo patērēto jaudu (P, W). Monohromatiskam starojumam pie frekvences 540 × 10^{12} Hz spektrālā gaismas efektivitāte ir 683 lm/W, $K(\lambda_{555})$ = 683 lm/W, kas vienāds ar 683 cd × sr/W (starojuma viļņa garums λ pie šādas frekvences ir apmēram 555 nm).

Gaismas daudzuma mērīšanai izmanto gan radiometriskus, gan fotometriskus mērījumus (16). Radiometriskie mērījumi uzrāda reālo optisko jaudu, ko nosaka kopējā patērētā enerģija visā gaismas avota spektrā. Ņemot vērā to, ka cilvēka acs uz visiem viļņu garumiem nereaģē vienādi, ir ieviests sadalījums ar zvana formas līkni, ko sauc par spektrālo gaismas efektivitātes funkciju ($V(\lambda)$) (1.2. att.).



a) vienāds balstu attālums; b) mainīgs balstu attālums.

1.1. att. Ielu profils un nepieciešamie dati *Dialux* aprēķiniem.



1.2. att. Fotopiskā krāsu redze un to maksimālās efektivitātes vērtības.

Gaismas atdeves efektivitāti η_L var izteikt kā spektrālās un elektriskās efektivitātes reizinājumu:

$$\eta_L = \eta_S \eta_E, \tag{1.1.}$$

kur η_S – spektrālā lietderība redzamajā spektrā, lm/W;

η_E – elektriskā lietderība (bez mērvienības), izteikta kā izstarotās gaismas jauda pret patērēto elektrisko jaudu.

Ņemot vērā acs jutību, funkciju $\bar{y}(\lambda)$ spektrālo lietderību var izteikt šādi:

$$\eta_S = 683 \int_0^\infty \bar{y}(\lambda) B_\lambda \, \mathrm{d}\lambda \tag{1.2.}$$

Ņemot vērā to, ka saule ir baltās gaismas avots ar virsmas temperatūru 5800 K, to apraksta normalizētā spektrālā funkcija:

$$B_\lambda = 15 \left(\frac{hc}{\pi k T} \right)^4 \lambda^{-5} \left[e^{hc/\lambda k T} - 1 \right]^{-1} m^{-1}, \tag{1.3.}$$

kur λ – viļņa garums, nm;

h – Planka konstante;

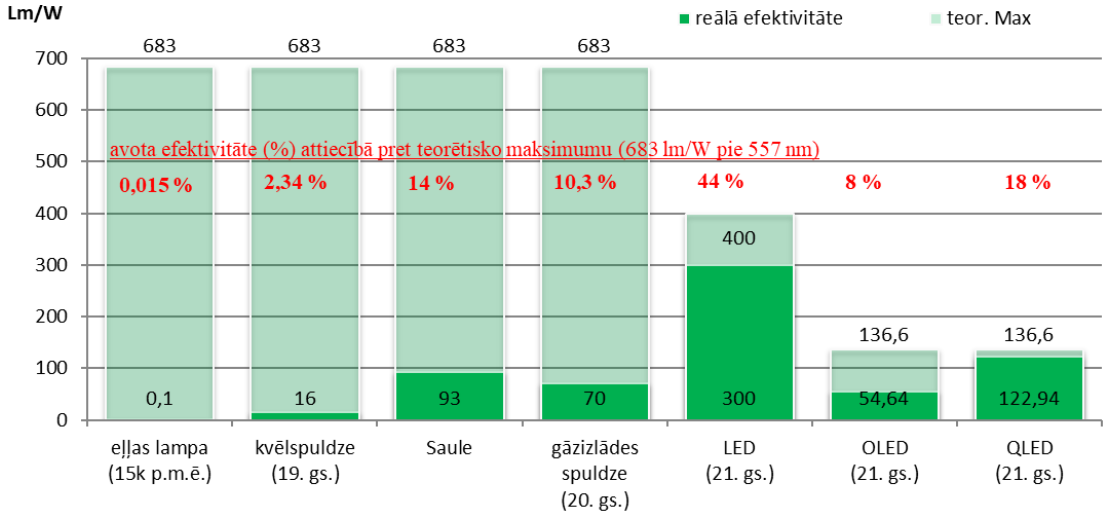
c – gaismas ātrums;

k – Bolcmaņa konstante;

T – absolūti melna ķermeņa temperatūra, K.

Savukārt, ja spektrālā lietderība ir jāizsaka konkrētā viļņu garuma diapazonā, piemēram, ideālās baltās gaismas zonā, kur $\lambda_{zils} = 400$ nm, $\lambda_{sarkans} = 700$ nm, tad spektrālā lietderība tiek aprēķināta pēc šādas izteiksmes:

$$\eta_S = 683 \frac{\int_{\lambda_{zils}}^{\lambda_{sarkans}} \bar{y}(\lambda) B_\lambda \, \mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda_{zils}}^{\lambda_{sarkans}} B_\lambda \, \mathrm{d}\lambda}, \tag{1.4.}$$



1.3. att. Dažādu gaismas avotu gaismas atdeves efektivitātes salīdzinājums.

Ir vairāki *LED* čipu ražotāji ar dažādiem produktiem un kvalitātes parametriem (darba mūžs, efektivitāte u. c.). Lielākie, ņemot vērā pārdošanas apjomu 2018. gadā [12], ir apkopoti 1.1. tabulā. *Nichia* un *Samsung* vairāk orientējas uz iekštelpu gaismekļiem un multimediju sadzīves tehniku, savukārt ielu gaismekļu jomā visbiežāk izmantotie ir *Osram* un *CREE* ražotie *LED* čipi.

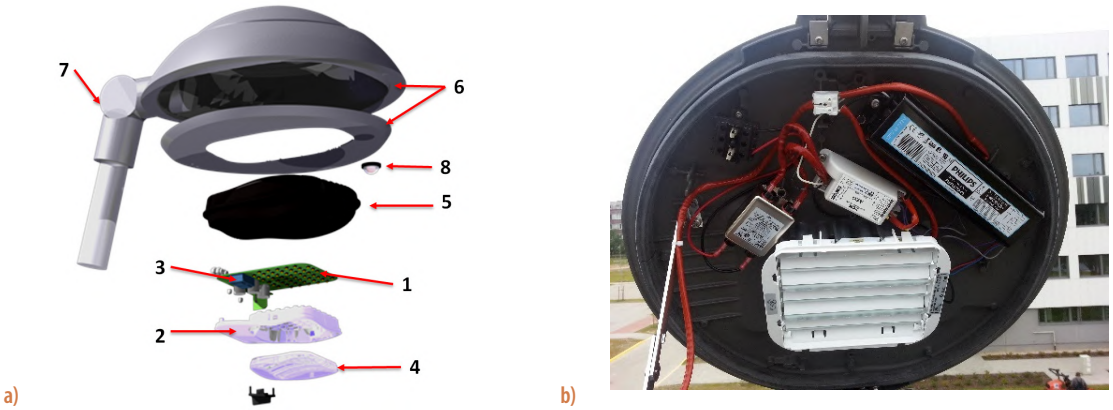
1.1. tabula

TOP 10 *LED* čipu ražotāji pēc 2018. gada pārdošanas apjomiem

Nr.	Ražotājs	Nr.	Ražotājs
1	*Nichia*	6	*Samsung LED*
2	*Osram Opto Semiconductors*	7	*Everlight*
3	*Lumileds*	8	*CREE*
4	*Seoul Semiconductor*	9	*NationStar*
5	*MLS*	10	*Lite-On*

2. *LED* ielu gaismekļu izpēte un izstrāde

LED gaismeklis sastāv no vairākām pamatdaļām – gaismekļa korpusa, balasta un gaismas avota. *LED* gaismeklis (2.1. att.) sastāv no: gaismas avota (*LED* kristāls) (1), reflektora (2), balasta/barošanas avota (3), lēcas (4), radiatora/dzesēšanas sistēmas (5), korpusa (6), stiprinājuma pie apgaismojuma balsta (kronšteina; 7) un dažādiem sensoriem (8).



2.1. att. *LED* gaismeklis un tā sastāvdaļas [15]; a) *LED* gaismekļa pamatelementi, b) uzstādītais *LED* gaismeklis reālā vidē.

Gaismekļa korpuss nosaka temperatūras vadītspējas parametrus (arī *LED* darba mūžu), kā arī tādus mehāniskos parametrus kā *IP* klase (aizsardzība pret putekļiem un mitrumu) un *IK* klase (triecienizturība). Ar L70 un L90 testu palīdzību tiek noteikts teorētiskais *LED* gaismekļa darba mūžs. *LED* gaismekļa dzesēšanas sistēma var būt pasīva vai aktīva (izmantojot ventilatorus, rodas papildu jaudas patēriņš). Pasīvas dzesēšanas gadījumā ir jāizvērtē alumīnija vai līdzvērtīga materiāla temperatūras vadītspējas parametri. Līdzās tam gaismeklim var būt temperatūras kontroles mezgls, kas automātiski samazina *LED* gaismas avota strāvu, lai p-n pāreja maksimālā temperatūra netiktu pārsniegta, piemēram, pie ārējās temperatūras virs 37 °C.

Lai vienkāršoti salīdzinātu dažādu esošo ražotāju *LED* ielu gaismekļus pēc to veiktspējas, jāņem vērā kopējā izstarotā gaismekļa gaismas plūsma (Φ_L, lm) un gaismekļa jauda (P_L, W), tādēļ šo vērtību attiecība ir kopējā gaismas atdeves efektivitāte – raksturlielums ir izstarotie lūmeni pret patērēto vatu (lm/W).

$$\eta_L = \frac{\Phi_L}{P_L}, \tag{2.1.}$$

$$\Phi_L = \Phi_{LED} - \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 - \Phi_4, \tag{2.2.}$$

kur Φ_{LED} – *LED* čipa (gaismas avota) izstarotā gaismas plūsma, kas iekļauj primārās optikas zudumus (kā norāda diožu ražotāji, vidēji ap 6 %);

Φ_1 – gaismas zudumi, kas rodas gaismekļa izveides procesā, *LED* čipu lodējot uz *PCB* plates, lodēšanas iekārtai bojājot *LED* čipa primāro lēcu;

Φ_2 – gaismas zudumi sekundārajā optikā (gaismekļa lēcas, reflektori, difuzori);

Φ_3 – gaismas zudumi gaismekļa korpusa iekšpuses sānos (līdz 2 %);

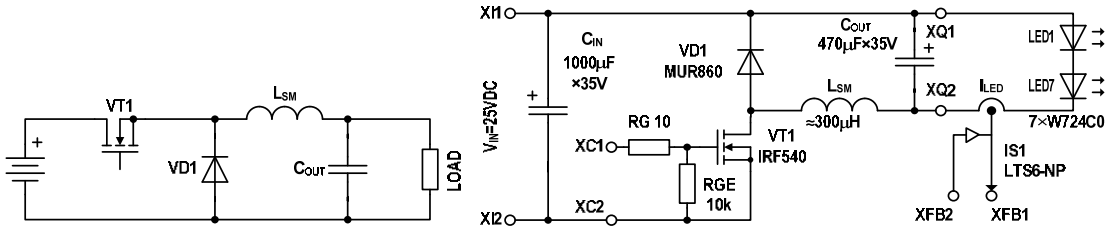
Φ_4 – gaismas zudumi gaismekļa aizsargvākā (akrils, stikls, polikarbonāts vai borsilikāts), kur šie zudumi atkarībā no materiāla ir 2–15 %.

$$P_L = \left(P_{LED\,\text{čipa}} \times n_{\text{čipu skaits}}\right) + P_{\text{balasta}}. \tag{2.3.}$$

Gaismekļa kopējo jaudu (P_L, W) nosaka *n*-skaita *LED* čipu patērētās jaudas un balasta jaudas zudu-

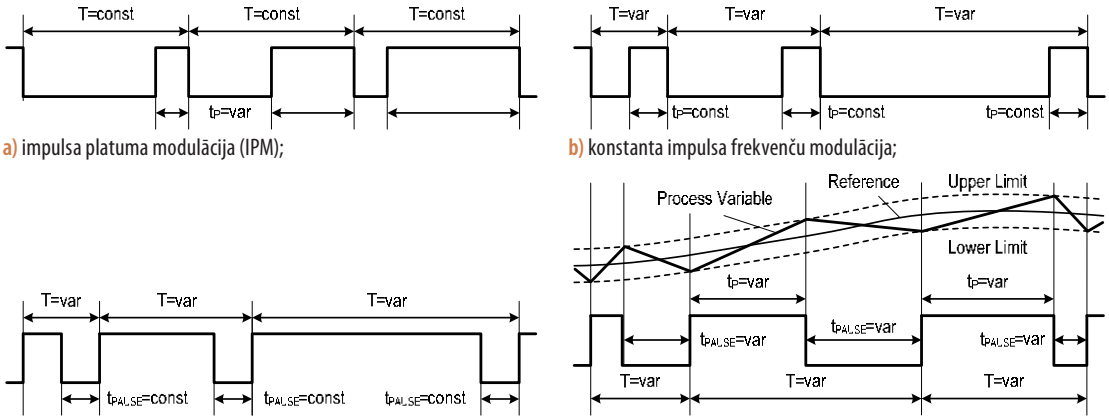
mu summa, ko ietekmē balasta lietderība pie atbilstošās *LED* čipu darba strāvas.

LED izstarotā gaisma ir proporcionāla tajā plūstošajai līdzstrāvai (*DC*), tāpēc izstarotās gaismas līmenis var tikt kontrolēts, plūstoši regulējot strāvu katrā *LED* virknē, kas ir arī efektīvākais veids (28). Iespējams lietot strāvas impulsu platuma modulāciju (*PWM*), taču, ņemot vērā, ka *LED* ļoti jutīgi reaģē uz strāvas izmaiņām, tas izraisa mirgošanu un stroboskopisko efektu.



a) vienkāršota pārveidotāju shēma; b) testēšanas pazeminošā pārveidotāja shēma.

2.2. att. Pazeminošais (*step-down*) pārveidotājs kā gaismas regulators.

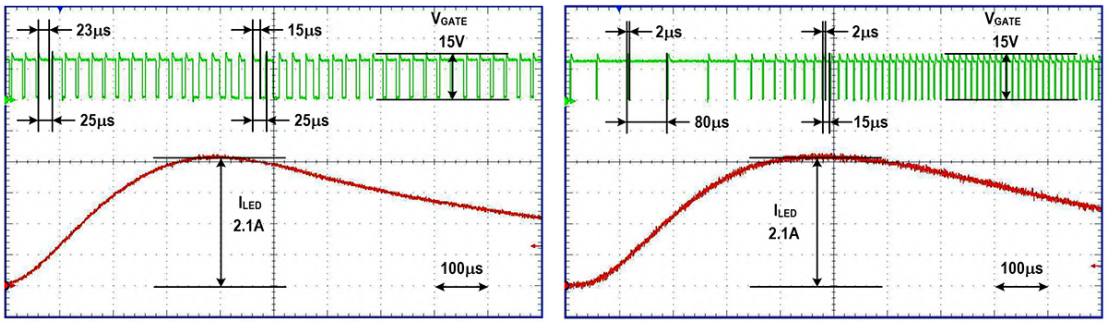


a) impulsa platuma modulācija (IPM); b) konstanta impulsa frekvenču modulācija;

c) nemainīgas pauzes frekvenču modulācija; d) histerēzes vadība.

2.3. att. Vadības signālu ģenerēšanas paņēmieni (24).

LED ir zema līdzsprieguma elements, tāpēc to labāk barot ar nemainīgu un nepārtrauktu strāvu. Tādēļ pārsvarā nepieciešams *DC/DC* posms, jo *LED* gaismeklis tiek barots no maiņsprieguma (turpmāk 230 V *AC*) līnijas. Šī iemesla dēļ dažādas līdzsprieguma pārveidotāju shēmas tiek lietotas kā strāvas regulatori, piemēram, pazeminošais, paaugstinošais, pazeminoši paaugstinošie un pazeminoši paaugstinošie nulles pulsāciju (*Chook*) tipa pārveidotāji. Lai noteiktu efektīvāko risinājumu vadības signālu ģenerēšanai, ir vairāki paņēmieni (2.3. att.) un var izmantot arī 2.2. b attēlā redzamo shēmu, lai izveidotu testēšanas iekārtu gaismas regulēšanai.



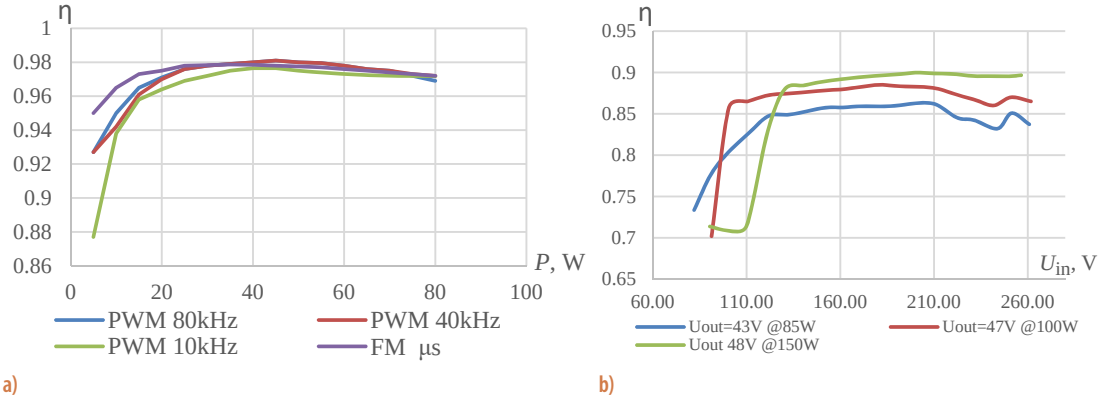
a) PWM (f_{PWM} = 40 kHz); b) FM (t_{PAUSE} = 2 µs).

2.4. att. Modulācijas metožu dinamisks izpildījums (avots: I. Galkins).

Eksperimentu laikā tika noteikti ieejas/izejas spriegumi (U_{IN} un U_{LED}) un strāvas (I_{IN} un I_{LED}), tad aprēķināta ieejas un izejas jauda (P_{IN} un P_{LED}). Balstoties uz jaudām, aprēķināts pārveidotāja lietderības koeficients:

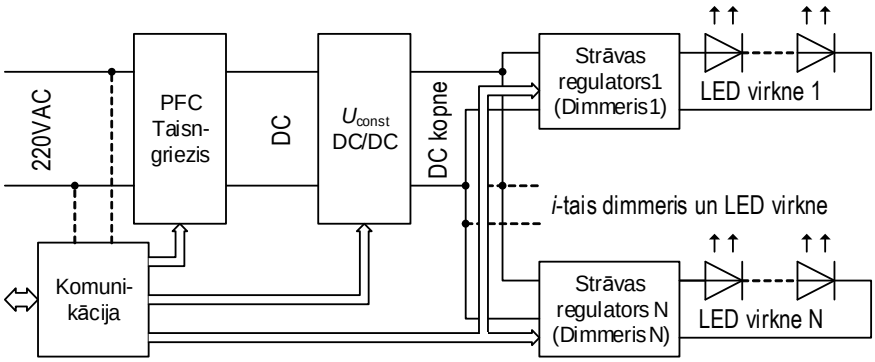
$$\eta(\%) = 100\frac{P_{LED}}{P_{IN}} = 100\frac{U_{LED}I_{LED}}{U_{IN}I_{IN}}. \qquad (2.4.)$$

Šādā veidā aprēķināts gaismas regulatora lietderības koeficients redzams 2.5. attēlā. *PWM* vadības gadījumā šīs līknes izskatās tradicionāli – ar izteiktiem zudumiem līknes galos. Analītiski un eksperimentāli iegūtie dati liecina, ka iepriekš aprakstītā gaismas regulatora lietderība ir augsta ar visām pārbaudītajām vadības metodēm. Ar FM (2μs) noteiktā lietderība ir vienmērīgāka visā jaudu diapazonā, turklāt 7 % mazākus zudumus pie "dimmētā režīma" minimālās jaudas (5 W).



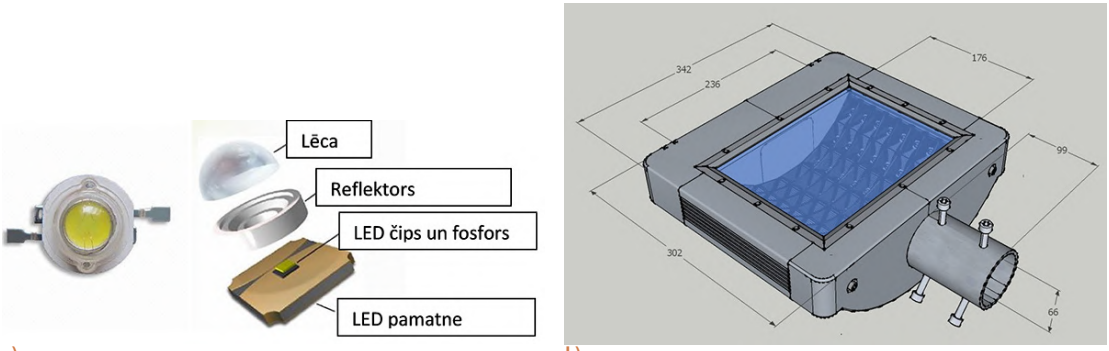
2.5. att. Pazeminošā *LED* dimmera (a) un rezonanses pārveidotāja (*DER212*) un *PFC* shēmas lietderība.

Ļoti bieži gaismekļos ir viena vai vairākas *LED* virtenes, kas ir jākontrolē atsevišķi. No otras puses, ielu gaismekļu balastiem nepieciešams taisngriezis un jaudas koeficienta korektors (*PFC – Power Factor Corrector*) augstākai ieejas strāvas kvalitātei. Tāpēc, lai savienotu mazākus izmērus, masu un izmaksas ar līdzvērtīgu funkcionalitāti, ieteicams izmantot vienu taisngriezi un *PFC* visiem *LED* strāvas regulatoriem (2.6. att.). Realizētā *AC/DC* paaugstinošā rezonanses pustilta pārveidotāja (25; realizēts uz „*Power Integrations*" integrālās mikroshēmas *PLC810PG* tipveida shēmas (*DER212*) lietderība redzama 2.5. b attēlā.



2.6. att. Vairāku paralēlu *LED* virkņu gaismekļa barošanas bloks.

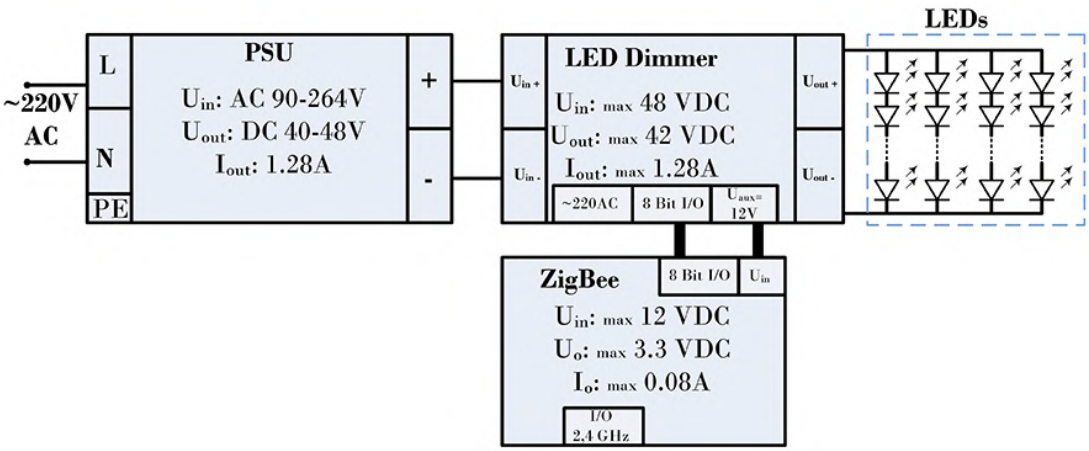
Promocijas darbā izstrādāti vairāki *LED* gaismekļi. **LED1 gaismekļa** (2.7. att.b) uzbūves pamatā ir matricas veida *LED* (2.8. att.) slēgums, kas veidojas no četrām paralēlām virknēm ar 14 *LED* diodēm katrā virknē. Diodes jauda ir 1 W (tonis – „*warm white*"), tātad gaismekļa gaismas avotu plānotā maksimālā jauda ir 56 W.



a) b)

2.7. att. *LED1* gaismeklis; a) gaismas avota (1 W) paraugs un b) *LED1* gaismekļa korpuss.

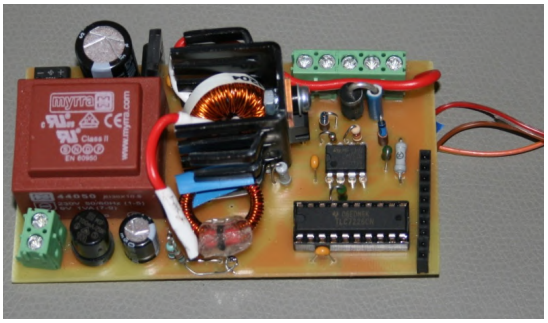
LED gaismekļa galvenā iekšējā uzbūves struktūrshēma, kas redzama 2.8. attēlā, sastāv no četriem galvenajiem blokiem.



2.8. att. *LED1* gaismekļa galvenā iekšējās uzbūves struktūrshēma.

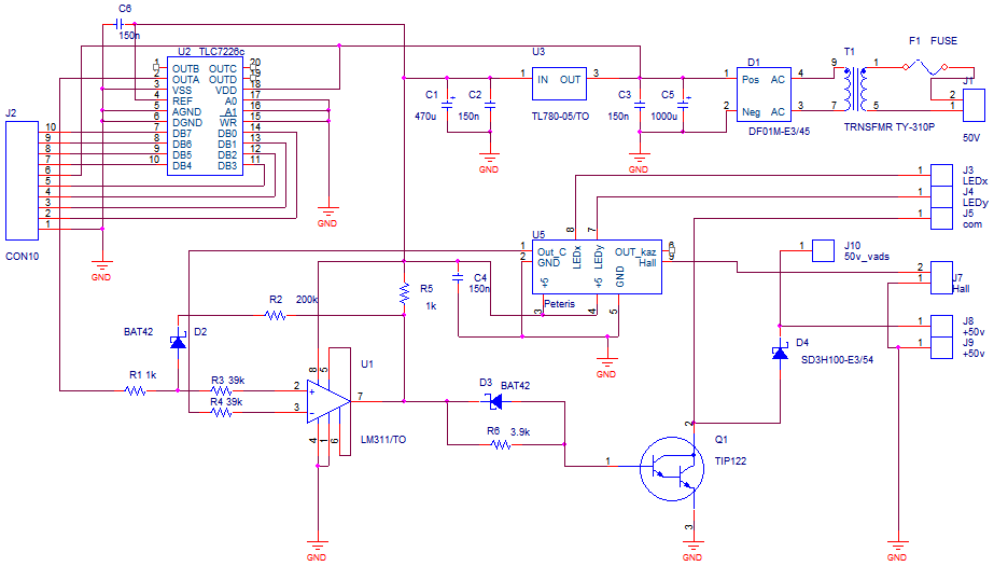
PSU ir tipveida neregulējams konstantas strāvas barošanas bloks, kas pārveido 220 V maiņspriegumu uz 40–48 V līdzspriegumu. Šajā gadījumā eksperimentāli noteiktā (2.9. a att.) maksimālā izejas jauda ir 61,5 W, maksimālā konstantās izejas strāva – 1,28 A.

LED Dimmer ir inteliģentā gaismekļa vadības bloka spēka daļa – shēma (2.9. b un 2.10. att.), kas, saņemot digitālu signālu (piemēram, no *FPGA* (22)), var regulēt izejas strāvu. Strāva ir regulējama 0–100 % diapazonā atbilstoši apgaismojuma līmenim un daudzumam, kas nav tieši proporcionāls strāvas lielumam (tam drīzāk ir eksponenciāls raksturs).

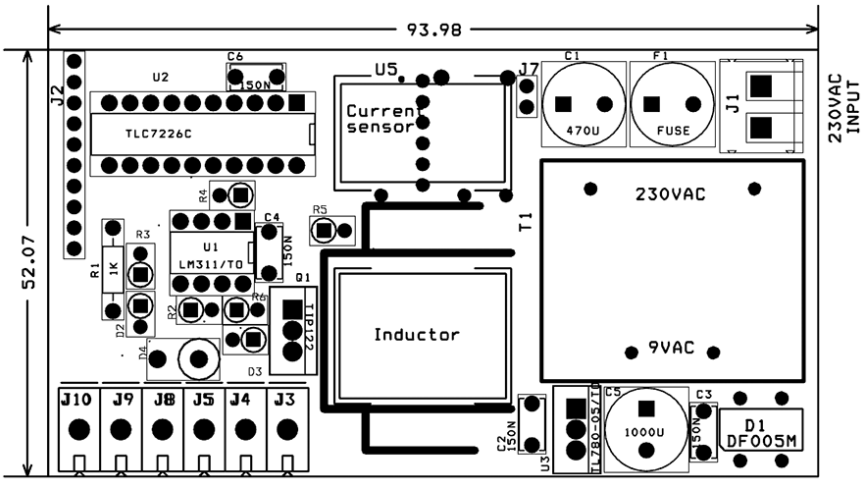


a) gaismekļu testēšanas stends; b) dimmeris ar integrētu vadības mezglu.

2.9. att. *LED1* gaismekļu korpusu testēšana un aprīkošana ar dimmeri un vadības bloku.



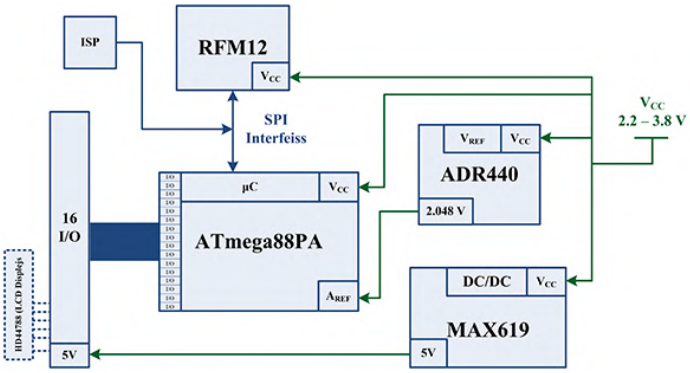
a) principiālā elektriskā shēma;

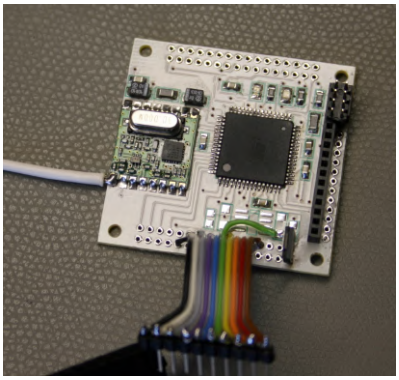


b) PCB plates dizains un elektronikas elementu izvietojums.

2.10. att. *LED1* gaismekļu strāvas regulēšanas ierīces (dimmera) shēma:

ZigBee ir bezvadu komunikācijas un vadības bloka raiduztvērēja daļa, kas uztver ārējo vadības signālu un nosūta to uz *LED* dimmeri, kas attiecīgi regulē strāvu, kas tiek padota uz *LED* diodēm.

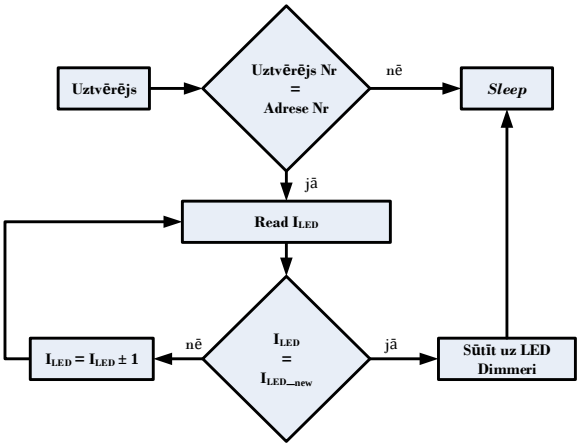




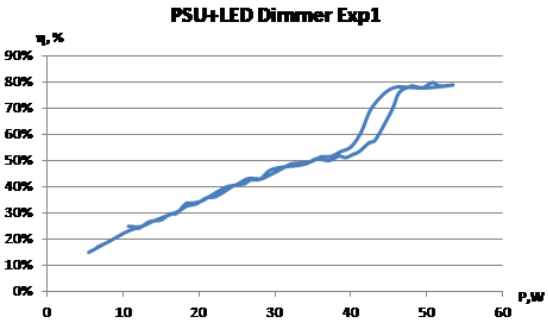
a) komunikāciju moduļa blokshēma; b) izveidotais *PCB* prototips.

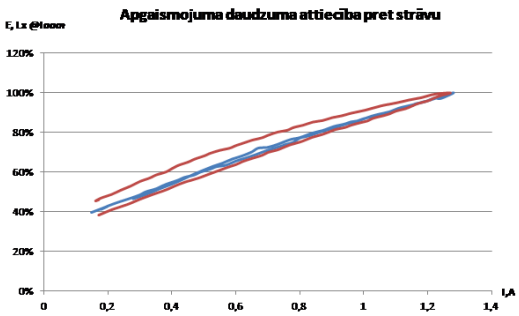
2.11. att. *LED1* gaismekļa *ZigBee* komunikāciju moduļa funkcionālā shēma un iekārta.

Bezvadu komunikāciju modulis (2.11. att.) domāts nelielu datu pakešu pārsūtīšanai ar nelielu datu pārsūtīšanas ātrumu (līdz 115,2 kBps) pusdupleksa režīmā, t. i., vienlaikus nevar raidīt un uztvert informāciju. Raiduztvērējā izmantota fāzes modulācija un komunikāciju sinhronizācija (sk. 2.12. att.) notiek, vadoties no fāzes maiņas, tāpēc pārsūtīto datu pakešu garums ir stipri atkarīgs no datu binārā formā esošo „0" un „1" maiņas, t. i., nesējfrekvences fāzes izmaiņām par 180°. *LED1* gaismekļa testēšanas rezultāti parādīti 2.13. attēlā, kur kopējā lietderība pie nominālās jaudas ir 80 % (barošanas bloka maksimālā lietderība ir 86 %), un, regulējot gaismu pie 40–45 W, veidojas histerēzes veida nobīde par 18 %.



2.12. att. Vienkāršots vadības algoritms.

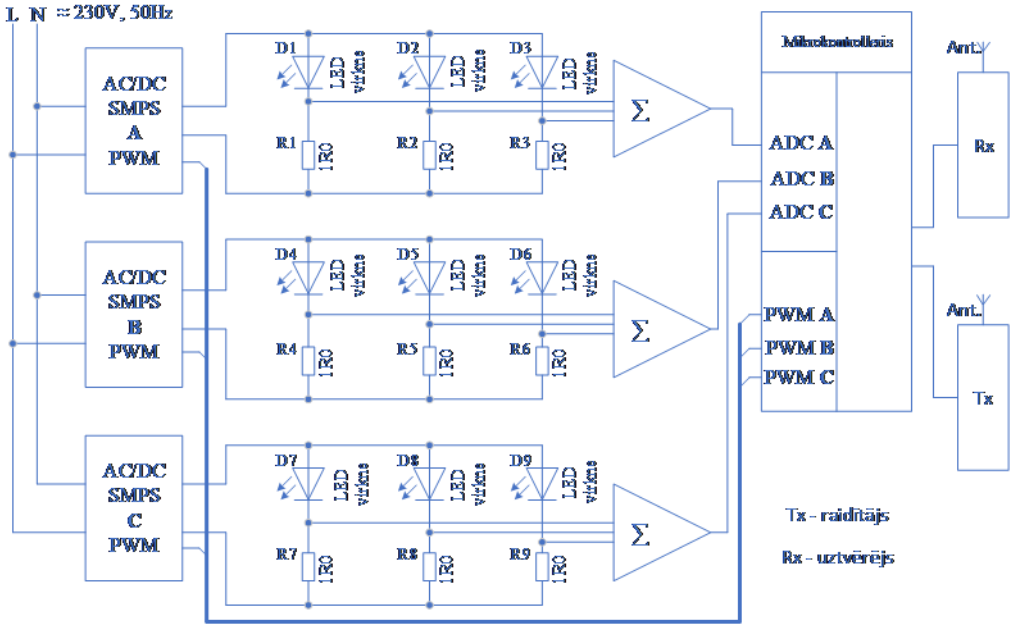




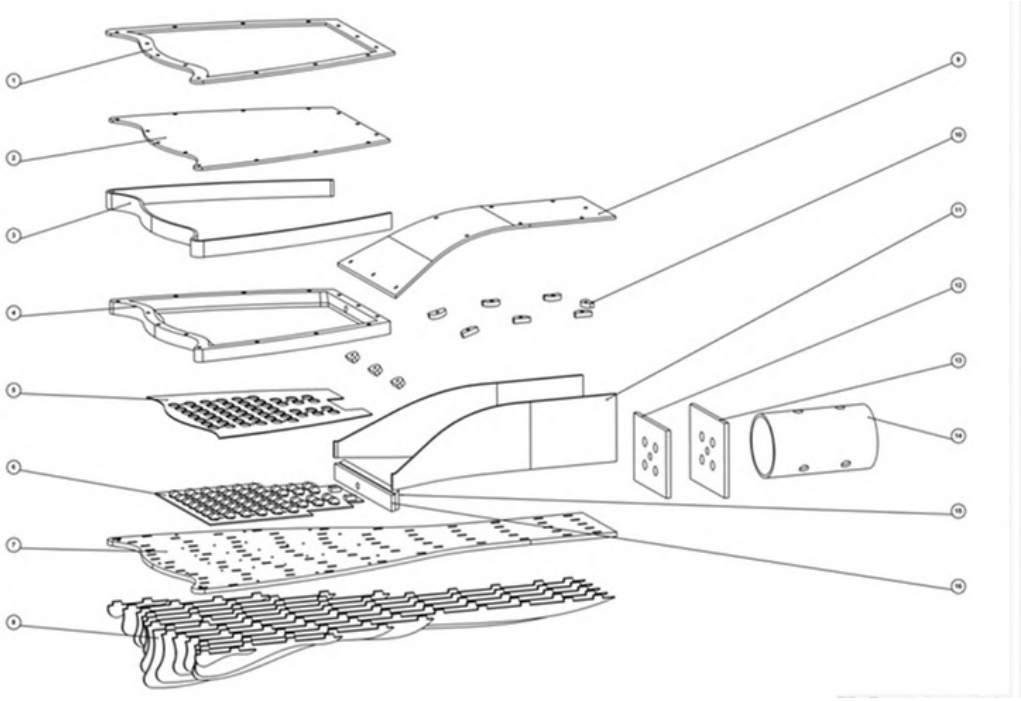
(a) strāvas un apgaismojuma atkarības; (b) mērījumi gaismeklim *LED1*.

2.13. att. Kopējās lietderības raskturlīknes.

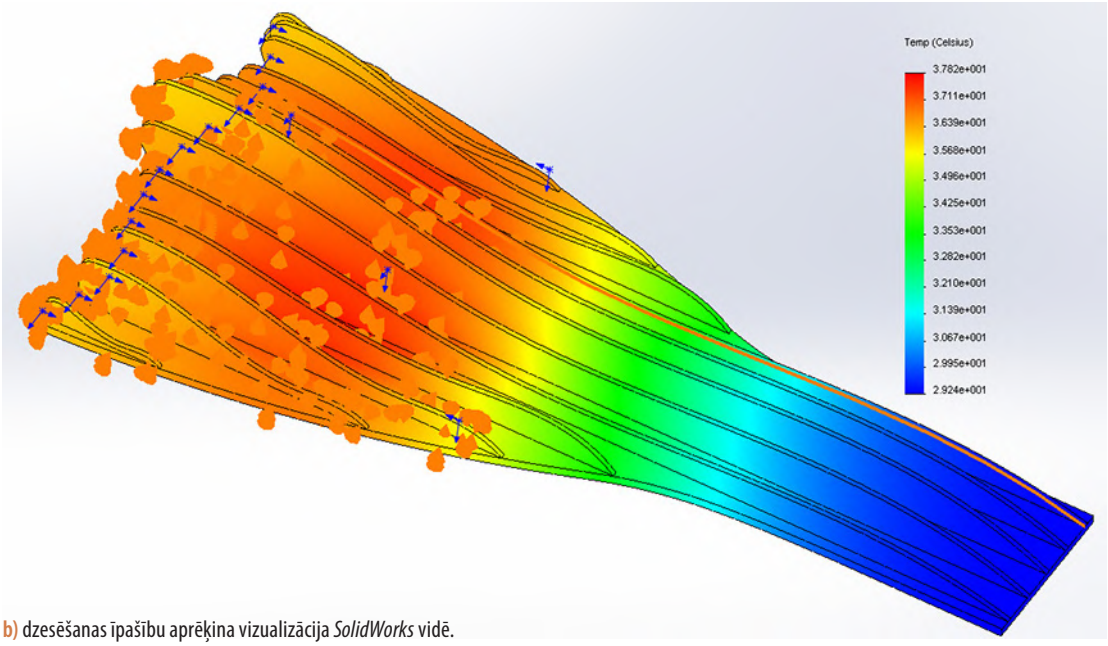
LED2 gaismekļa (jauda regulējama maksimāli līdz 112 W) principiālā shēma redzama 2.14. attēlā. Darbības pamatā ir trīs *LED* grupas, katrā ir trīs paralēlas *LED* diožu (*Cree XPG* 3 W, 4000 K) virknes ar sešām *LED* diodēm katrā, katra grupa (18 diodes) tiek barota no sava atsevišķa barošanas bloka. Tas palielinās gaismekļa darbības drošību, jo, ja viens barošanas bloks iziet no ierindas, tad strādās pārējie divi un tiks nodrošināts ielu apgaismojums, vienlaikus sistēmas operators saņems paziņojumu, ka konkrētais gaismeklis ir bojāts. Gaismekļa bojājuma identificēšanu nodrošina grupas jaudas mērīšanas mezgls, kura vērtība tiek pārveidota digitālajā signālā, un ar mikrokontrollera un raiduztvērēja palīdzību ziņa tiek nodota vadības sistēmai, kā arī otrādi – no tās saņemtas vadības komandas. Barošanas bloks [17] ir izveidots uz *TOP204* bāzes (*SMPS*) shēmas - izejas sprieguma regulēšanai ar *PWM*, strāvas stabilizāciju, mikrokontrollera vadību (“0” – maksimālā jauda, “255” – minimālā jauda) un maza attāluma datu pārraides bezvadu komunikāciju. 2.16. attēlā redzami saņemtie dati no bezvadu komunikācijas, kur *LED2* gaismekļa efektivitāte ir ap 85 %. 2.15. attēlā redzams *LED2* gaismekļa konstruktīvais/montāžas risinājums (a) un temperatūras izmaiņu aprēķina rezultāti (b), uzrādot maksimālo – 37 °C – pie 100 % noslodzes. Izstrādātā forma ir unikāla, jo gaismeklis dzesējas vienādi pie dažādiem vēja virzieniem. *LED2* gaismekļa regulēšanas diapazona (0–100 %) efektivitātes vērtības pie nominālās jaudas redzamas 2.16. attēlā. 2.17. attēlā redzams *LED2* gaismekļa prototips un izveidotā alumīnija *PCB* plate ar divu veidu *LEDIL* lēcām ielas profilam piemērota apgaismojuma starojuma izvēršanai un vienmērīguma iegūšanai.



2.14. att. Trīs *LED2* virkņu barošanas avotu integrēšana vienā gaismeklī. Funkcionālā shēma.

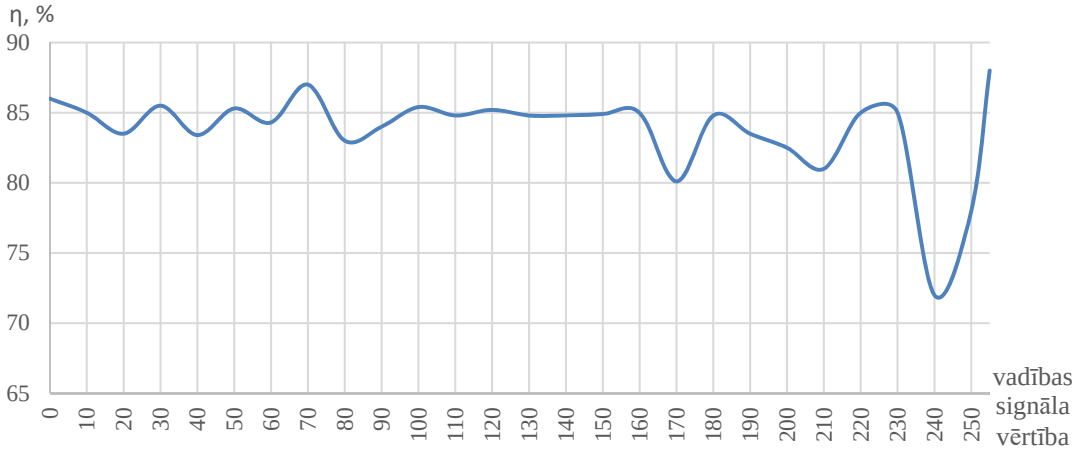


a) konstrukcijas izvērstais skats;

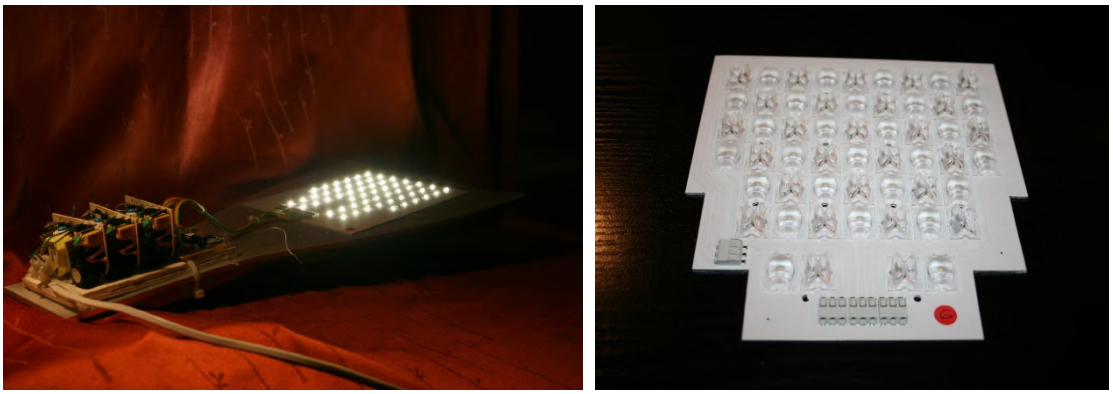


b) dzesēšanas īpašību aprēķina vizualizācija *SolidWorks* vidē.

2.15. att. *LED2* gaismekļa korpuss:



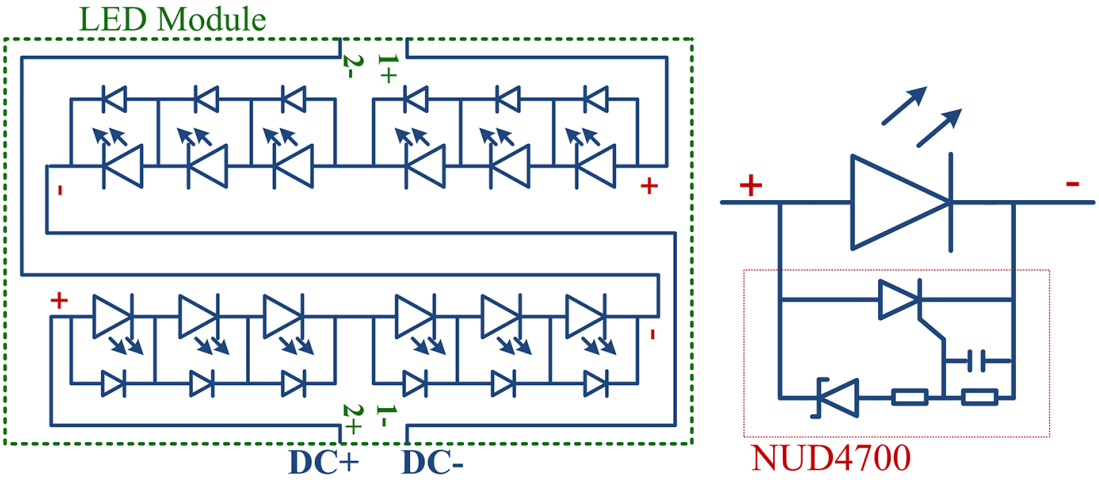
2.16. att. *LED2* gaismekļa efektivitāte pie nominālās jaudas (56 W).



a) prototips; b) *PCB* plate ar divu veidu *LEDIL* lēcām.

2.17. att. *LED2* gaismeklis un tā testēšana.

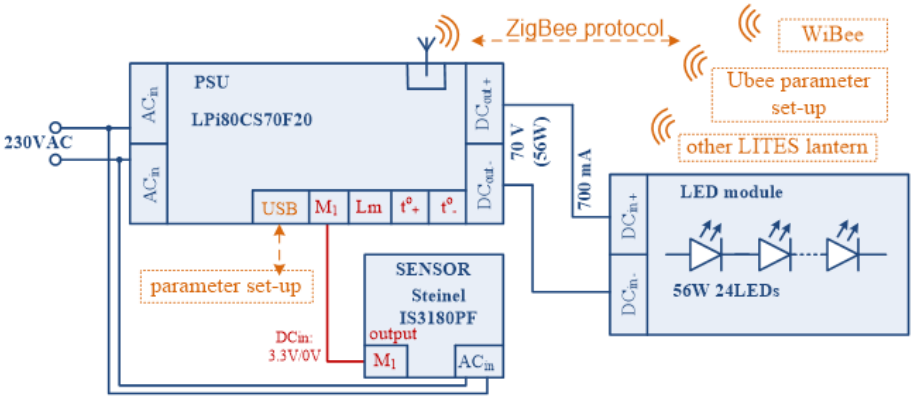
LED3 gaismeklis ir veidots, *LED* diodēm izmantojot tikai virknes slēgumu un konstantas strāvas vadību. 12 *LED* diožu *PCB* moduļveida pieeja ļauj optimizēt ražošanas izmaksas un samazināt *PCB* plašu tipu un jaudu variācijas. *PCB* moduļus var savienot gan virknes, gan paralēlā slēgumā, un *LED* diodes bojājuma gadījumā ir paredzēts paralēli slēgts energoefektīvs aktīvais šunts *NUD4700* (2.18. att.). Tas nomināli ir paredzēts 1 W (350 mA pie 3 V) *LED* diodēm, taču, ja tiek nodrošināta atbilstoša dzesēšana, tas var izturēt līdz 1 A strāvu.



a) *LED PCB* moduļa shēma; b) aktīvais šunts.

2.18. att. Viena *LED PCB* moduļa shēma (a) un aktīvais šunts (b).

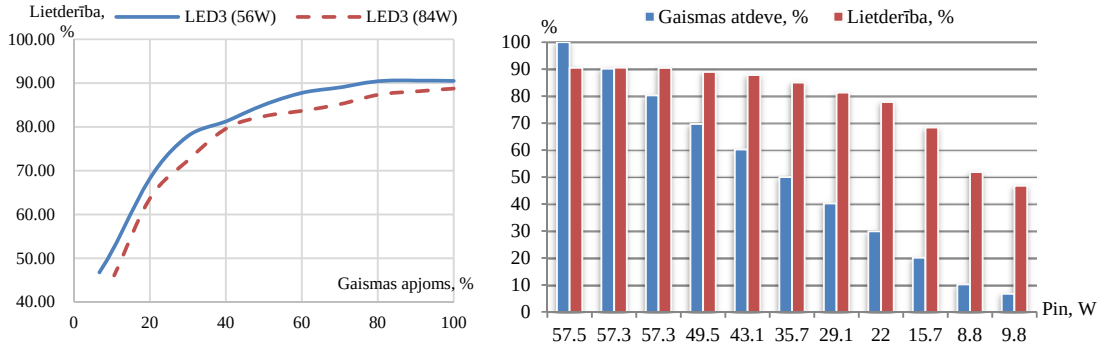
Barošanai tiek izmantots barošanas bloks *LPi80CS70F20* (2.19. att.) ar taisngriezi, *PFC* ķēdi un *DC/DC* pazeminošo pārveidotāju ar vienu izeju, kas nodrošina regulējamu konstantas strāvas vadību *LED* diodēm (2.20. att.).



2.19. att. *LED3* (56 W) gaismekļa sistēmas blokshēma.

2.20. att. *LED3* gaismekļa 28 W *PCB* plates modulis, kur spriegums ir 40 VDC, strāva 700 mA.

Kā redzams 2.21. attēlā, *LED3* 56 W gaismekļa sistēmas kopējā lietderības koeficients ir 90,5 %, šai sistēmai tika veikti arī elektromagnētiskās savietojamības (*EMC*) testi *LEITC* laboratorijā, uzrādot atbilstību reglamentējošām normām, kā detalizēti norādīts atskaitēs [15], [16].



a) lietderība, regulējot gaismu; b) lietderība, regulējot jaudu.

2.21. att. Kopējā *LED3* gaismekļa 56 W sistēmas efektivitātes mērījumu rezultāti.

Vislielākā gaismas atdeve *LED* gaismas avotam matricas slēguma gadījumā ir ar nepārtrauktas strāvas regulēšanas metodi, kas rezultātā izstaro par 19 % vairāk gaismas nekā tad, ja tiek izmantota impulsa platuma modulāciju, un par 25 % vairāk nekā tas ir, izmantojot *LED* gaismas avotu virkņu ieslēgšanas/izslēgšanas metodi.

LED gaismas avota gaismas atdeve ir nelineāra attiecībā pret regulējamās barošanas strāvas vērtību, kur šo īpašību var izmantot *LED* gaismekļa kopējās gaismas atdeves, efektivitātes, krāsu atveides indeksa un darba mūža palielināšanai, izmantojot atbilstošas vadības metodes *LED* gaismas avota draiverī.

Analītiski un eksperimentāli iegūtie dati liecina, ka iepriekš aprakstītā gaismas regulatora lietderība ir augsta ar visām pārbaudītajām vadības signāla tehnikām. *FM* regulācijas metodes eksperimentāli noteiktā lietderība ir nemainīga plašākā jaudu diapazonā, savukārt nemainīgu paužu *FM* metode nodrošina lielāku regulēšanas precizitāti.

Veiktie elektromagnētiskās saderības testi *LEITC* laboratorijā liecina par to, ka *LED* gaismas avotu balasti ar lietderības koeficientu virs 0,92 biežāk izpilda elektromagnētiskās saderības normatīvās prasības vai ir tuvāk to robežvērtībām nekā balasti ar zemāku lietderības koeficientu.

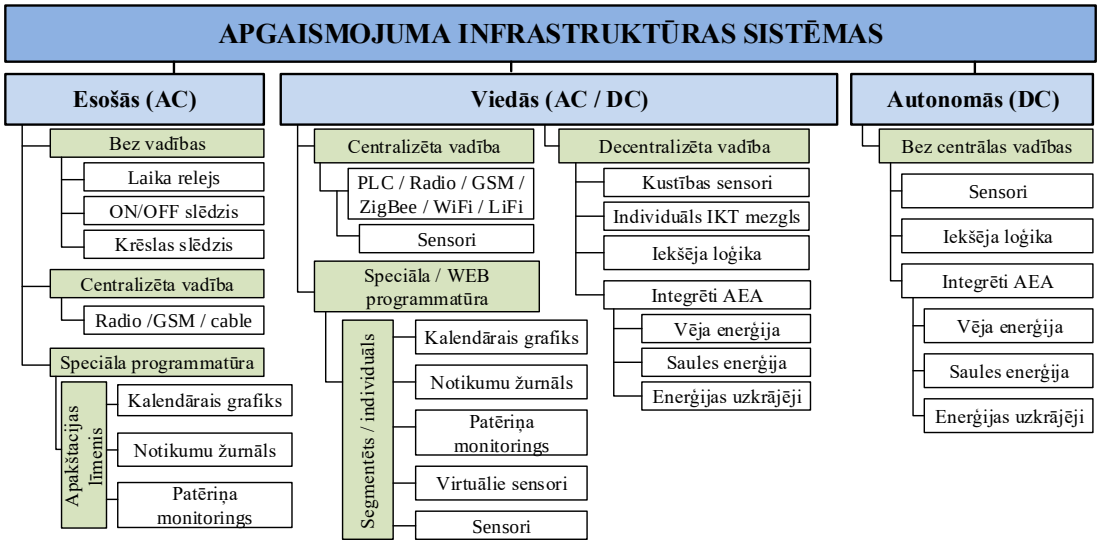
Viedo *LED* gaismas avotu balastu veidojot no atsevišķām elektroiekārtām (barošanas bloks, draiveris, komunikācijas mezgls u. c.), kas individuāli izpilda elektromagnētiskās saderības normatīvās prasības, kopējā slēgumā (gaismekļa korpusā) šīs prasības var vairs nevar izpildīt izstaroto radiotraucējumu mijiedarbības dēļ. Šajā gadījumā to var novērst, uzstādot papildu elektromagnētisko traucējumu filtrus.

Apgaismojuma vadības sistēmās elektroenerģijas patēriņa uzskaites vadības signālu datu pārraidei ir iespējams izmantot dažādus bezvadu komunikācijas veidus, izmantojot pusduplekso un duplekso datu pārraides režīmu. Eksperimentālos testos tika novērots, ka *ZigBee* datu pārraidei nepieciešams stiprāks signāls (antena), lai nosegtu līdz 100 m attālumu, savukārt standarta radiosignālam (*RxTx*) sakaru problēmas netika novērotas. Lai arī bezvadu komunikāciju moduļu ražotāji un praktiski izveidotā raidītāja–uztvērēja testi apliecina datu pārraides attālumu virs 500 m (un pat >1 km) taisnā līnijā, sarežģītāku un lielāku apgaismojuma sistēmu gadījumā (garas ielas, gaismekļu skaits vismaz 25 gb, ielās ir daudz koku) eksperimentāli noteiktais datu pārraides attālums ir ierobežots līdz 100–120 m, kas noklāj 2–3 tuvākos apgaismojuma balstus ar vidējo attālumu 33 m. Tādēļ būtisks ir segmenta kontrollera (piemēram, *ZigBee-WEB* vārteja) ģeogrāfiskais novietojums, lai zvaigznes vai *MESH* shēmā tas atrastos pēc iespējas centrā vai tam ir jāpievieno spēcīgāka signālu uztverošā antena.

3. Ielu apgaismojuma sistēmu izpēte

Pēc būtības un funkcionālā lietojuma var izšķirt trīs galvenos apgaismojuma veidus: iekštelpu apgaismojums; ārtelpu apgaismojums; dekoratīvais apgaismojums. Katram no tiem ir vēl detalizējamāki lietojuma veidi.

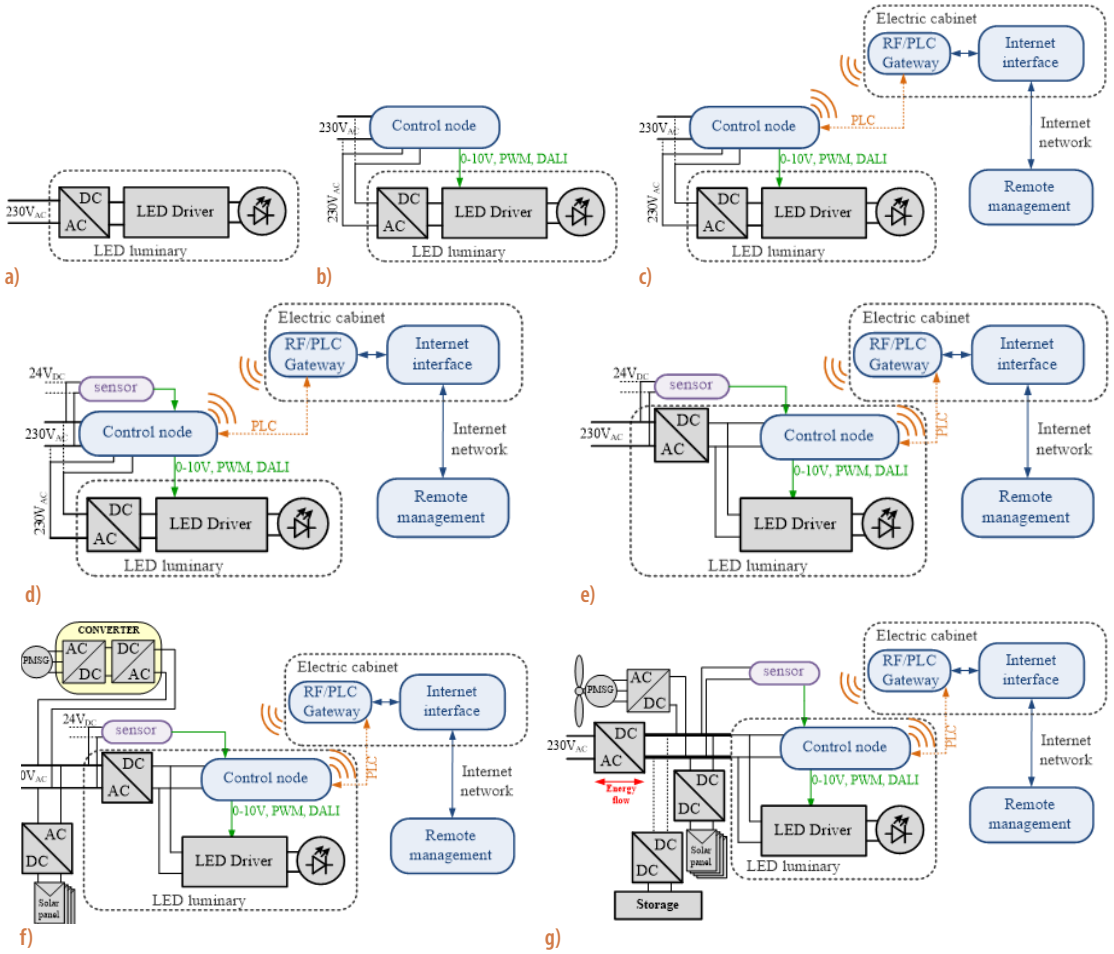
Ielu apgaismojuma sistēmas var iedalīt esošās, viedās un autonomās sistēmās ar dažādām vadības iespējām. Tehnoloģijām attīstoties, apgaismojuma sistēmu tirgū jau ir pieejami par esošajiem gaismas avotiem daudzkārt efektīvākie *LED* gaismas avoti, kas ļauj izmantot arī jaunas funkcijas un īpašības, kas kopā ar informāciju un komunikāciju tehnoloģiju (IKT) attīstību ļauj izveidot apgaismojuma sistēmu klasifikāciju pēc tehnoloģiskā risinājuma (3.1. att.).



3.1. att. Ielu apgaismojuma sistēmu klasifikācija pēc tehnoloģijas veida.

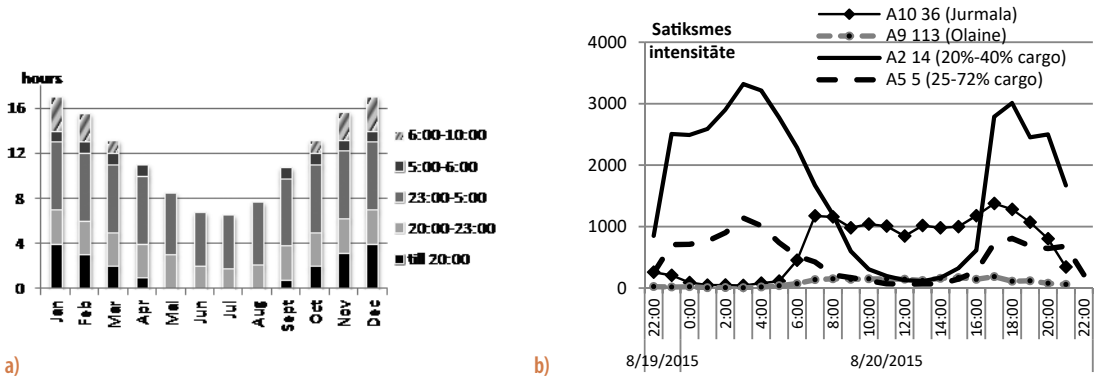
Viedās apgaismojuma sistēmas var izmantot gandrīz jebkurā apgaismojuma lietojuma veidā, jo vienīgais, kas mainīsies, ir paša gaismas avotu konstruktīvais risinājums, bet pārējais tehnoloģiskais risinājums ir izmantojams. Ielu apgaismojuma sektors ir pietiekami energoietilpīgs, un tas tiek finansēts no publiskiem finansējuma avotiem, tāpēc turpmāk promocijas darbā analizēts tieši ielu apgaismojuma sektors.

Var izšķirt dažādus apgaismojuma sistēmu arhitektūras veidus, kā redzams 3.2. attēlā, kur (a) ir vienkārša *LED* gaismekļa shēma un savienojums ar esošo apgaismes tīklu, (b) arhitektūra ar individuāla gaismekļa kalendārā grafika vadības mezglu, (c) ar vadības mezglu un komunikāciju tīklu, (d) viedās *LED* ielu vadības sistēmas ar ārēju vadības mezglu un kustības sensoru, (e) ar iebūvētu vadības mezglu un kustības sensoru, (f) nākotnes arhitektūras ar *AC* tīklā savienotiem atjaunojamiem avotiem un (g) DC mikrotīklā savienotiem atjaunojamiem avotiem. Nomainot *HPS* gaismekļus pret *LED*, šīs arhitektūras (a)–(e) ieguvumus ir iespējams analītiski salīdzināt, kā tas detalizēti atspoguļots rakstos (17, 18).



3.2. att. Apgaismojuma sistēmu arhitektūras veidi.

Saglabājot vienādu 4352 stundu apgaismi gadā un ME4-ME6 kvalitātes un satiksmes drošības prasības Zunda krastmalas ielas posmam ar 30 gb. *HPS* (*Philips Malaga SGS102* 150 W) gaismekļu, *LED* (*Philips Indal BGP623*) gadījumā elektroenerģijas patēriņš samazinās par 47,2 % (a). Iekļaujot vadības mezglu un sensoru pašpatēriņu, par 67,49 % (b), 65,67 % (c), 76,75 % (d) un 77,93 % (e), kas pierāda, ka viedās vadības sistēmas dod papildu 30 % ekonomiju, salīdzinot ar vienkāršu nomaiņu pret *LED* (18). Kustības vai "kontekstveida" (13) sensoru ietaupījumu noteikšanai izmantojam 3.3. attēlā redzamos nakts stundu intervālus un Latvijas Valsts ceļu (LVC) satiksmes intensitātes datus, kā arī elektroenerģijas patēriņu periodā E_{12} pēc 3.1. formulas.



3.3. att. Nakts zonu stundu skaita sadalījums (a) un LVC satiksmes intensitātes dati (b).

$$E_{12} = P_{\min} \times (t_1 + t_2) + \frac{(P_{\max} - P_{\min}) \times (t_1 + t_2)}{2} + P_{\max} \times t_{ON}, \qquad (3.1.)$$

kur $P_{\min}$ – gaismekļa zemākais iestatītais jaudas līmenis,

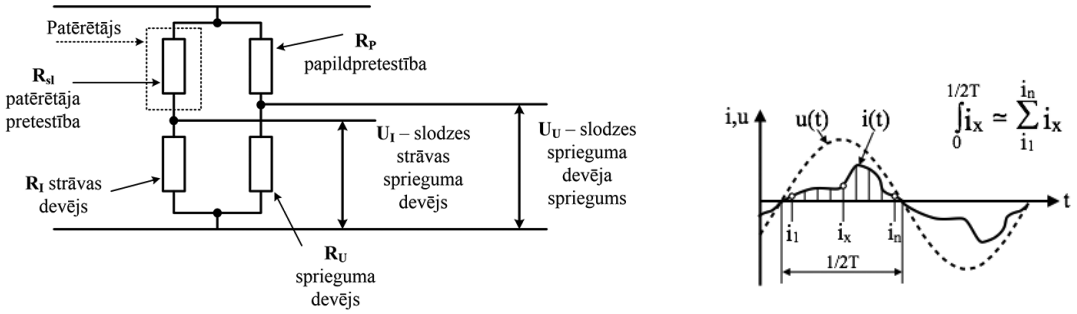
$P_{\max}$ – maksimālais iestatītais jaudas līmenis konkrētajā nakts posmā,

t_1 – iestatītais laiks no sensora nostrādes brīža līdz $P_{\max}$ sasniegšanai,

t_2 – iestatītais dimmēšanas laiks (no $P_{\max}$ līdz $P_{\min}$ sasniegšanas brīdim),

t_{ON} – laiks, cik ilgi gaismeklis darbojas $P_{\max}$ režīmā.

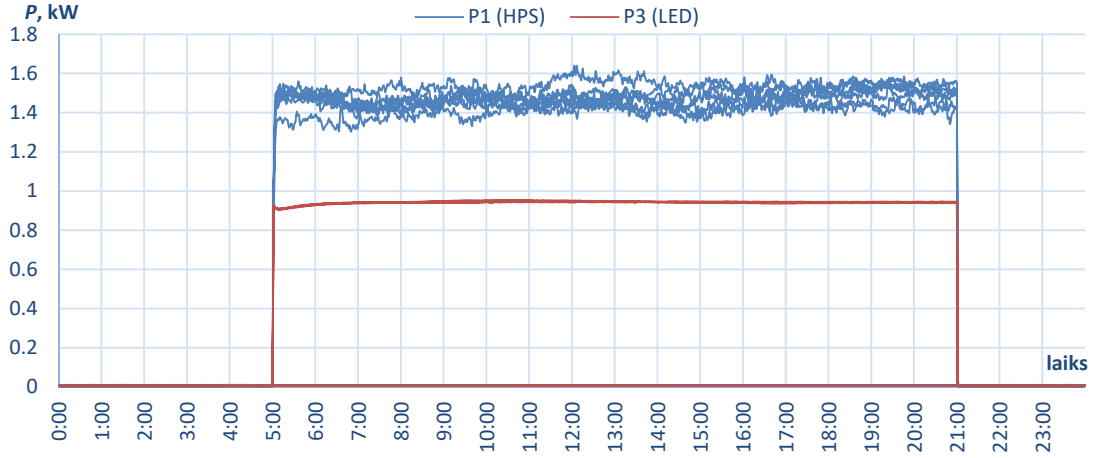
Viens no galvenajiem uzdevumiem viedai apgaismojuma sistēmai ir reālā laikā veikt katra individuālā *LED* gaismekļa elektroenerģijas patēriņa uzskaiti (monitoringu) un ar IKT palīdzību pārsūtīt šos datus uz *WEB* serveri. Tas nozīmē, ka katrā gaismeklī ir jābūt elektroenerģijas patēriņa monitoringa ierīcei, kas spēj mērīt spriegumu un strāvu, tādējādi nosakot momentānās aktīvās jaudas vērtības (3.4. att.) un attiecīgi aprēķinot pilnās un reaktīvās. Var izmantot dažādas mērīšanas metodes, viens no risinājumiem ir redzams 3.4. a attēlā.



a) šunta veida strāvas un sprieguma mērījumu sensors; **b)** iegūto datu apstrādes princips.

3.4. att. Patērētāju strāvas un sprieguma mērīšana. [13], [14].

3.5. attēlā redzams mērījumu datu piemērs vienlaikus veiktiem vienas nedēļas eksperimentālajiem jaudas mērījumiem ($P_{\max}$ gadījumam) trīs 400 W nātrija gaismekļiem (*P1*) un trīs izstarotās gaismas plūsmas ekvivalentiem *LED* gaismekļiem (*P3*), barošanas spriegums un apkārtējās vides parametri abos gadījumos bija vienādi. Var novērot, ka nātrija gaismekļu patērētā jauda ir mainīga gan vienas dienas ietvaros, gan nedēļas griezumā, izmaiņas ir 12,5 %, savukārt *LED* gadījumā patēriņš ir stabils un vienāds nedēļas griezumā. Datu precizitātei – apgaismes vadības sistēmā ir jāizmanto nomērītās jaudas vērtības, nevis analītiski noteiktās, pieņemot, ka patērētā jauda ir laikā konstanta.



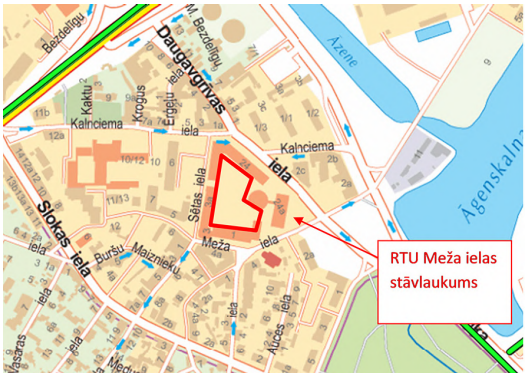
3.5. att. Eksperimentāli iegūtie dati.

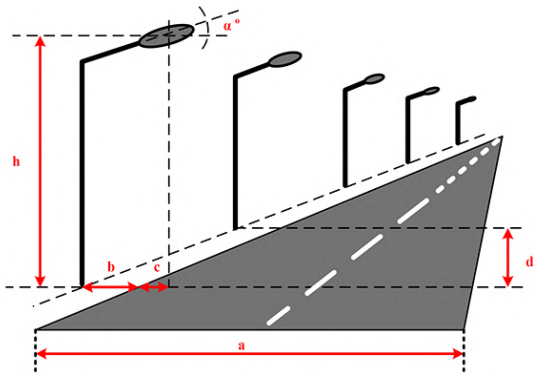
LED gaismekļu elektroenerģijas patēriņa noteikšanai Holla tipa devēji ar izteiktu histerēzes cilpu uzrāda dažādas (duālas) mērījumu rezultatīvās vērtības gaismekļa strāvas palielināšanas un samazināšanas gadījumā, tādēļ šāds risinājums nav precīzs. Testējot vairākus industriāli ražotus viedos elektroenerģijas skaitītājus (9), to vērtību mērījumi pie dažādām tīkla sprieguma vērtībām uzrādīja 0,1 % kļūdu, ar diviem izņēmumiem, kur tā sasniedz 0,7 %. Dažādu tīkla frekvenču gadījumā mērījumu kļūda pieaug līdz 0,5 % vidēji, ar atsevišķiem izņēmumiem (pie 65 Hz) līdz 1,15 %. Apgaismes balstus nākotnē nakts laikā var pieslēgt *AC* tīklam, dienā – *DC* mikrotīklam ar atjaunojamiem energoavotiem un elektroauto vai elektroskūteru uzlādes iespējām, līdz ar to veidojas prasības dinamiskai un divvirzienu elektroenerģijas uzskaitei (9), līdzīgi kā industriālo *DC* mikrotīklu gadījumā (11).

Izveidotais termokompensētais šunts spēj mērīt enerģijas patēriņu abos virzienos (saņem vai atdod tīklam) (15), turklāt gan sinusoidāliem, gan nesinusoidāliem signāliem pie dažādiem impulsa platumiem (12), kur, salīdzinot ar industriālo šunta jaudas analizatoru *Newtons N4L PPA5530*, izstrādātais variants bija vidēji par 0,8–3,22 % precīzāks un pie zemas jaudas slodzes pat par 21,6 % precīzāks (12). Tas ļauj integrēt *LED* gaismekļu elektroenerģijas patēriņa noteikšanas mezglu pašā *PCB* platē, samazinot ražošanas izmaksas, salīdzinot ar piedāvātajiem risinājumiem, kas izmanto dārgāku materiālu ar mazu pretestības temperatūras koeficientu. Risinājuma inovitāti apliecina saņemtais *WIPO* patents (28).

4. Jauno izstrādāto apgaismojuma sistēmu eksperimentālā pārbaude un iegūto rezultātu analīze

Septiņi *LED1* gaismekļi tika uzstādīti Rīgā, Meža ielas apgaismojuma līnijā, kas atrodas RTU iekšpagalma teritorijā (4.1. a att.). Izvēlētā līnija ir izbūvēta salīdzinoši sen, tāpēc mērījumus var ietekmēt veco kabeļu stāvoklis, tādēļ tika izvilkta gaisvadu līnija un attiecīgi aprīkoti vecie balsti. Līnija ir arī pietiekami gara, lai mērījumi būtu tuvu vidējai tipiskai parku, autostāvvietu un līdzīgu laukumu apgaismes līnijai Rīgā. Ielas/laukuma tipa profila piemērotie standarti, ģeometriskie un apgaismojuma klases parametri apkopoti 4.1. tabulā.





a) LED gaismekļu izvietošanas vieta RTU teritorijā, Meža ielā; b) profila shēma

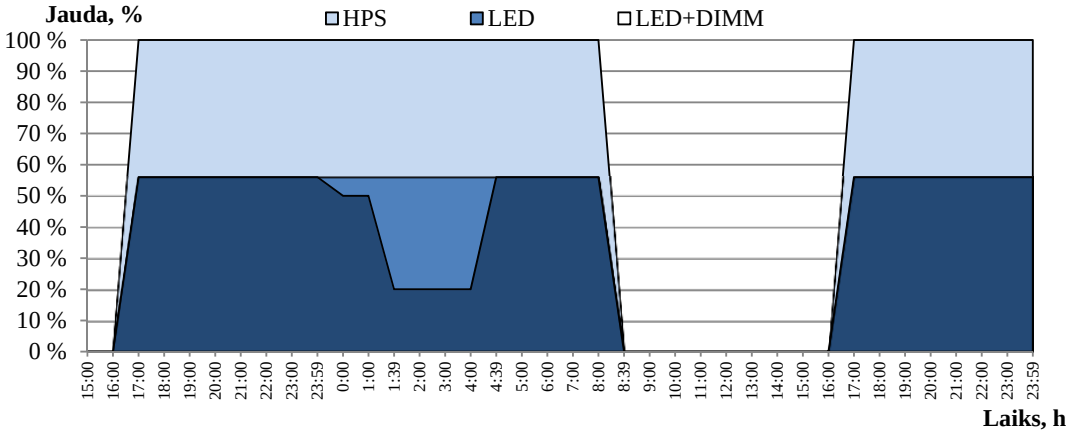
4.1. att. Eksperimentu veikšanas poligons RTU, Meža ielā.

4.1. tabula

Ielas/laukuma tipa profila parametri un dati

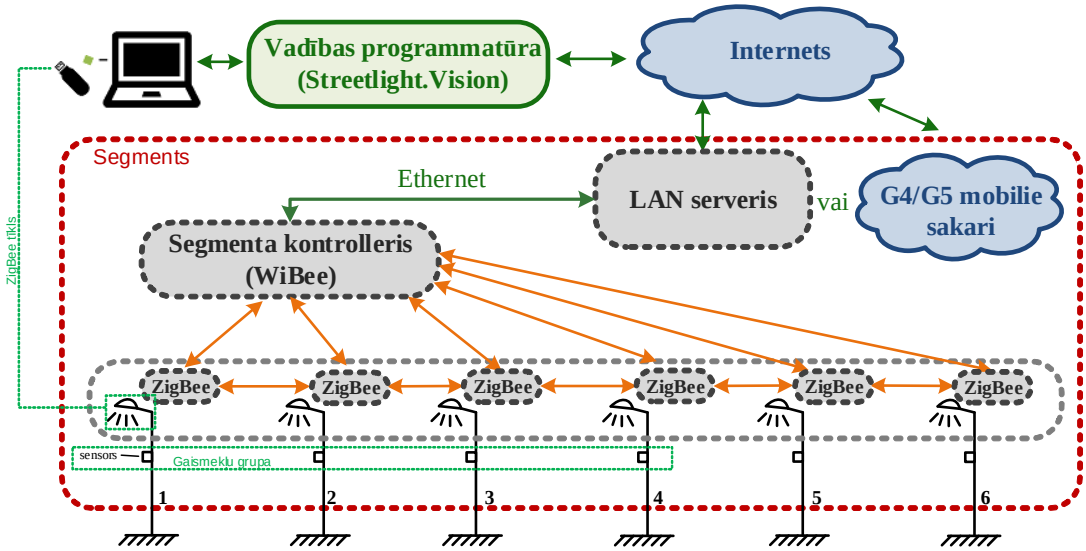
Meža ielas vidējie profila parametri:			Citi parametri:
a =	4/30	m	Apgaismojuma situācijas apraksts *D1* (atbilstoši *CIE 140*)
b =	0,7	m	Esošā apgaismojuma klase: *S4*
c =	1,3	m	Testēšanas klases: *S4*
d =	15/20	m	Nolietojuma koeficients: 0,67 (aptuveni)
h =	8,5	m	Esošais gaismeklis: *Philips Malaga* ar augstspiediena nātrija spuldzi *SON-T* (150 W un 70 W). Attiecīgi tiek aizvietoti ar *LED1* un *LED2* tipa gaismekļiem
α =	15	°	
joslas:	1	gb.	
Ceļa segums:	porains asfalts		

Veicot mērījumus ilgā laika posmā, sistēma bez dimmēšanas režīma (tikai gaismekļu nomaiņa) ietaupīja vidēji 40 % elektroenerģijas, salīdzinot ar nātrija augstspiediena gaismekļu patēriņu, izmantojot kalendāru dimmēšanas režīmu var ietaupīt līdz 60 %. *LED2* gaismekļu gadījumā testēšana tika veikta gan Meža ielā, gan Zunda krastmalā, izmantojot iepriekš iestatītu kalendāro grafiku diennakts stundām (4.2. att.). Rezultātā 22 nātrija gaismekļu (2604 W patēriņš) vietā uzstādot *LED* (1628 W), ietaupījums bez dimmēšanas bija 37 %, ar dimmēšanas režīmu 49 % (ziemā) un 83 % (vasarā), kas saistās ar nakts stundu garumu, kopumā vidēji ietaupot 56 %.



4.2. att. Izmantotie ieslēgšanas/izslēgšanas un dimmēšanas profili dienkats periodā.

Tika izstrādāta viedā apgaismojuma sistēma ar kustības sensoriem (4.3. att.). Kopumā uzstādīti 29 *LED3* tipa gaismekļi Ķīpsalā, 11 (95 W) – Zunda krastmalā un 18 (65 W) – Āzenes ielā. Gaismekļu elektriskā savienojuma shēma redzama 4.4. attēlā, metāla balstos ievietojot arī enerģijas skaitītājus (4.4. c att.), lai salīdzinātu ar datiem no viedās vadības sistēmas. Kustības noteikšanai un gaismekļu vadībai tika izmantoti *Steinel IS3180PF* un *Bosch DS720i TriTech*® sensori (4.5. att.), kur 2020. gadā pievienots arī izstrādātais radara tipa detektēšanas sensors, kas spēj noteikt arī satiksmes kustības virzienu un aptuveno ātrumu (4.6. un 4.7. att.).



4.3. att. Izveidotā viedā ielu apgaismes sistēmas struktūrshēma.

Radara (Doplera efekta) sensoram (2,8) tiek izmantota kompleksā Furjē transformācija (*FFT*), kur nomērītais ātrums ir proporcionāls Doplera nobīdes frekvencei f_{doppler}, kas atbilst 4.1. un 4.2. formulai.

$$f_{\text{doppler}} = bin \times \frac{f_{\text{sample}}}{N_{\text{FFT}}} = bin \times \frac{f_{\text{sample}}}{256}, \qquad (4.1.)$$

$$v = \frac{bin \times f_{\text{sample}}}{256 \times 44{,}7 \times \cos a}, \tag{4.2.}$$

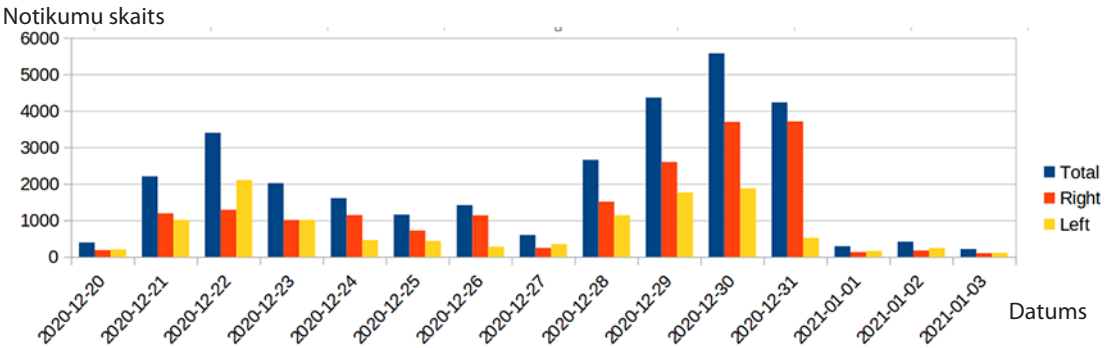
kur *bin* – *FFT* izejas vērtība, kas proporcionāla Doplera frekvencei;
f_{sample} – *FFT* mērījumu/izšķirtspējas frekvence;
N_{FFT} – FFT platums, biti;
v – ātruma vērtība, km/h.

a) cinkotais metāla balsts; b) *LED* gaismekļu izvietojums; c) *ABB C11 110-300*.

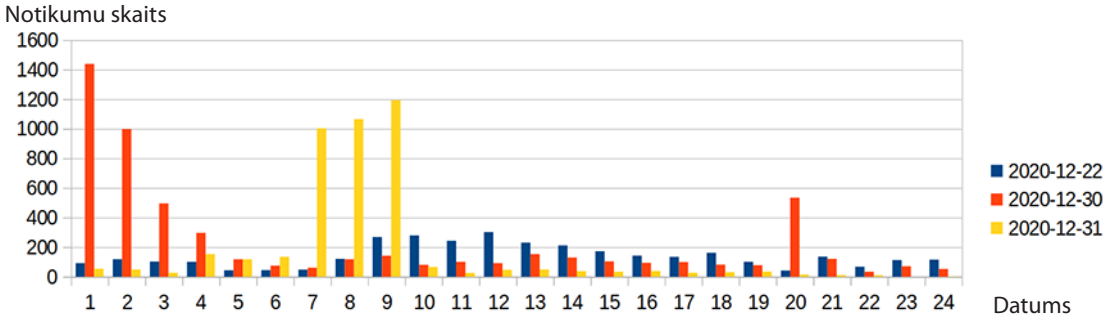
4.4. att. *LED* gaismekļu izvietojums un elektriskais slēgums Ķīpsalas testa vietā.

a) *Steinel IS3180PF*; b) *Bosch DS720i TriTech®*; c) radara sensors.

4.5. att. Ķīpsalas testa vietā izvietotie kustības noteikšanas sensori.



4.6. att. Izstrādātā radara sensora kustības virziena noteikšanas mērījumu piemērs.



4.7. att. Izstrādātā radara sensora satiksmes intensitātes mērījumu piemērs.

Ķīpsalas testa vietā tika nomainīti *Philips SGS* tipa nātrija augstspiediena gaismekļi ar kopējo jaudu 3450 W (18 gb (100 W) un 11 gb (150 W) spuldzes), uzstādot 29 *Thorn Dyana* viedos *LED* gaismekļus (71,22 Lm/W, 4000 K), uzstādītā jauda 2094 W, vienlaikus nodrošinot par 40 % mazāku uzstādīto jaudu, par 20 % labāku vidējo apgaismojumu (E_{AV}, lx) un par 34 % labāku apgaismojuma vienmērību (U_L), (L_{AV} = 0,52 cd^{-1}m^2 un U_0 = 0,62). Apgaismojuma piesārņojums U_{FR} (4.3. vienādojums) ir tiešās augšupejošās gaismas plūsmas (U_{DLF}) attiecība pret no ceļa virsmas atstaroto augšupejošās gaismas plūsmu (U_{RLF}).

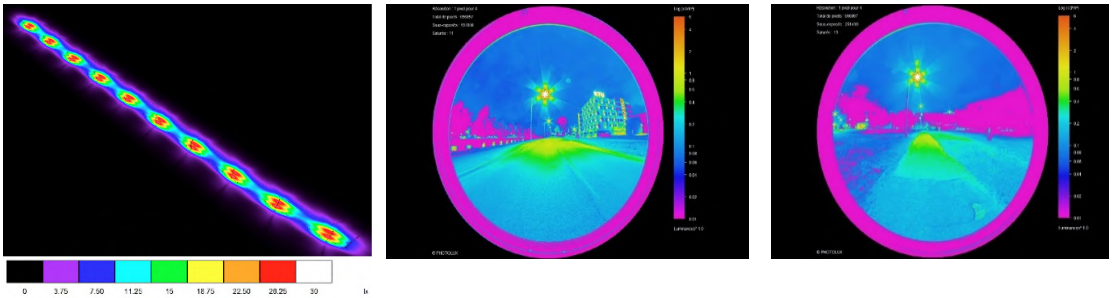
$$U_{FR} = \frac{U_{DLF}}{U_{RLF}}. \tag{4.3.}$$

Ja U_{FR} vērtība ir zem 10, tad tas tiek uzskatīts par ļoti labu, ja $U_{FR} < 1$, tad par ekselentu rezultātu. Veicot *Dialux 4.0* modelēšanas (4.8. a att.) un praktiskos mērījumus (4.8. b un c att.), *Philips SGS* gaismekļu gadījumā U_{FR} = 3,0, *Thorn Dyana LED* gaismekļu gadījumā pie pilnas jaudas U_{FR} = 2,75, U_{FR} = 1,0 pie 20 % dimmēta režīma.

4.2. tabula

Dialux modelēšanas un reālo jaudas/apgaismojuma mērījumu rezultāti dažādos režīmos

Apgaismojums / mērpunkti	E (80 %), lx			E (60 %), lx			E (40 %), lx			E (20 %), lx		
	M1	*M2*	*M3*	*M1*	*M2*	*M3*	*M1*	*M2*	*M3*	*M1*	*M2*	*M3*
$E_{(lx)}$ (mērīts 2020)	25	7	24	20	6	20	14	4	14	8	3	8
Mērīts 2014	28	10,7	17	–	–	–	–	–	–	7,1	3	7
Dialux simulācija 2014	20	8,19	20	10	4,49	10	6,24	2,92	6,24	3,12	1,35	3,12
Novirze, %	+19	–17	+17	+50	+21	+49	+56	+33	+56	+61	+49	+59



a) *Dialux* simulācija (150 W HPS); b) *LED* 100 % jauda; c) *LED* 20 % jauda.

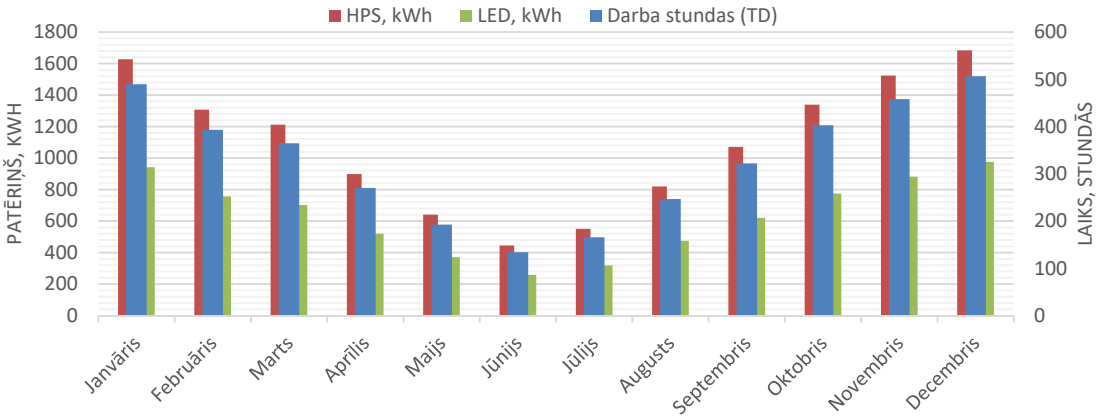
4.8. att. Ķīspalas testa vieta: *Dialux* simulācija (a); 95 W *LED* mērījumi pilnai jaudai (b) un pie 20 % jaudas (c).

Dialux modelis tika salīdzināts arī ar reāliem mērījumiem vairāku gadu garumā, veicot *E*(lx) mērījumus (4.2. tab.) ielas vidū, un *M1* un *M3* ir punkti perpendikulāri gaismekļa balstam, *M2* ir punkts pa vidu *M1* un *M3* balstiem. Salīdzinot *LED* gaismekļu simulācijas (pie *MF* 1,00) 2014. un 2020. gada mērījumus, var secināt, ka reālajā situācijā ir vairāk gaismas, nekā tas ir nepieciešams pēc standarta, tāpēc faktiski var samazināt dimmēšanas jaudu, iegūstot papildu ekonomiju. Tā kā tika uzstādīts viedais apgaismojums, tad, lai noteiktu tikai gaismekļu nomaiņas ietaupījumu efektu, var izmantot analītisku aprēķinu pieeju, zinot pilsētas apgaismojuma ieslēgšanas un izslēgšanas kalendāro grafiku vai aprēķinot pēc 4.4. formulas nakts garumu (T_d, stundās) konkrētai gada dienai (*n*), izmantojot saules kustības vektoru [18] ar deklinācijas leņķi (δ) un konkrētas vietas platuma grādiem (φ).

$$T_d = 24 - \frac{2}{15}\left(acos\left(min\left(max\left(-\tan(\varphi)\tan(\delta),-1\right),1\right)\right)\right), \qquad (4.4.)$$

kur $\delta = 23{,}45 \times \sin\left(\frac{360}{365}(284+n)\right)$.

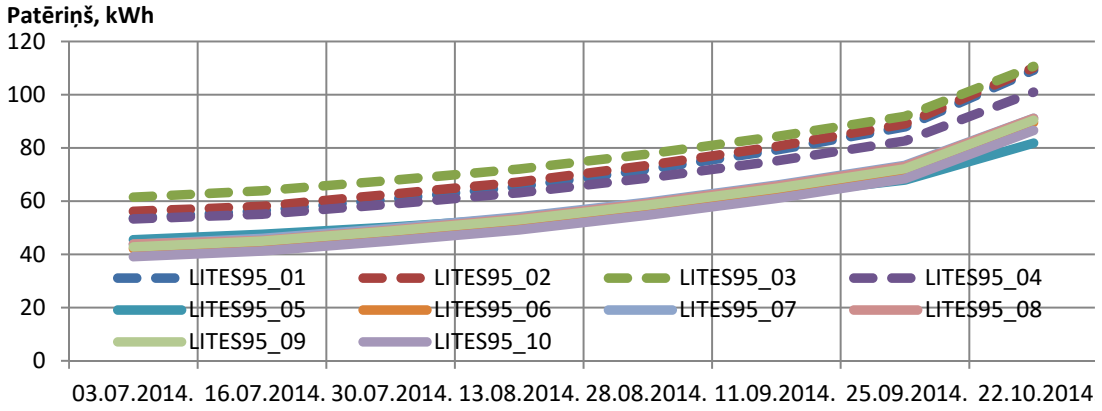
Pēc aprēķinu veikšanas var secināt, ka elektroenerģijas patēriņa samazinājums *LED2* gaismekļa gadījumā būtu 38 %, savukārt viedo *LED* gaismekļu gadījumā tas ir 42 %, kā to parāda patēriņa sadalījums pa mēnešiem (4.9. att.).



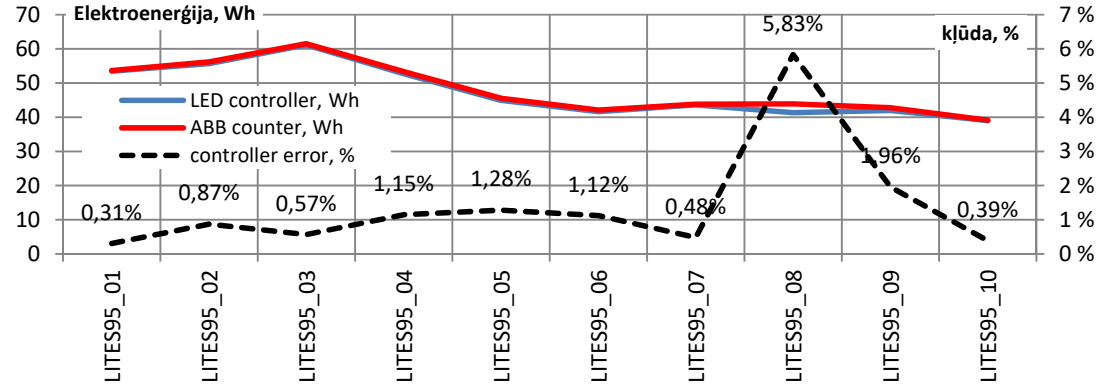
4.9. att. Analītiski aprēķinātais elektroenerģijas patēriņš augstspiediena nātrija (HPS) un viedo LED gaismekļu gadījumā.

Pēc uzstādīto enerģijas skaitītāju datiem (4.10. att.), kas konkrētajā periodā tika nolasīti divreiz mēnesī, var novērot, ka četriem *LED* gaismekļiem (01–04) ir augstāks enerģijas patēriņš nekā pārējiem. Tas skaidrojams ar to, ka gaismeklis ar nosaukumu "*LITES95_01*" ir uzstādīts krustojumā, tā sensors ieslēdz nākamos trīs gaismekļus, attiecīgi radot papildus 88…108 kWh (18 %) patēriņu. Tas liek secināt,

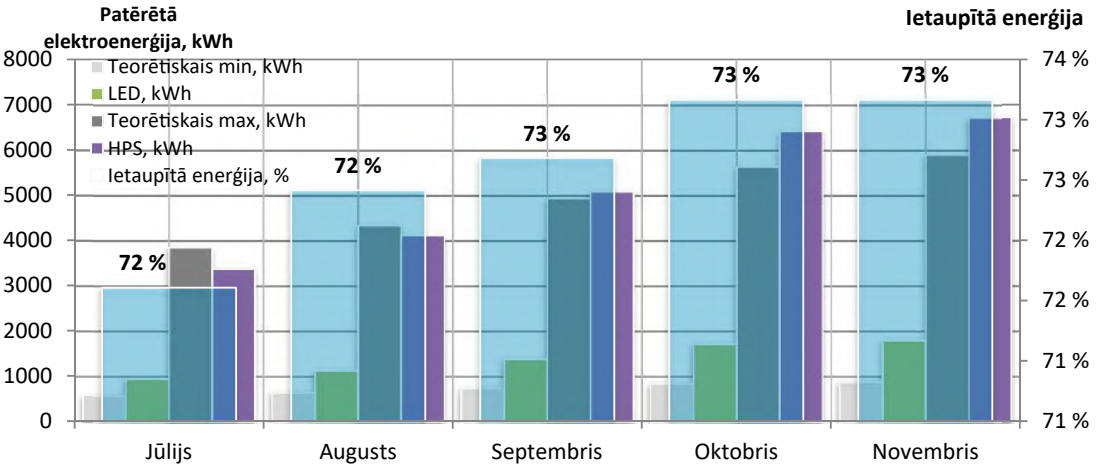
ka nepieciešami kustības sensori vai statistisko datu algoritms, kas spēj identificēt satiksmes kustības virzienu krustojumā, tādējādi samazinot nelietderīgo patēriņu gadījumos, kad satiksme notiek citā virzienā.



4.10. att. Summārais elektroenerģijas skaitītāju rādījums (kWh) katram apgaismes balstam.



4.11. att. 95 W gaismekļu (nr. 1–10) kontrolleru un enerģijas skaitītāju rādījumu salīdzinājums.

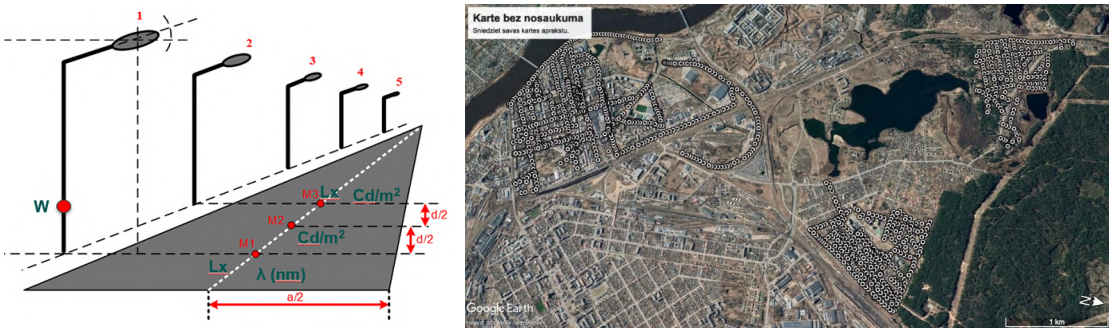


4.12. att. Viedās apgaismes sistēmas reālais enerģijas patēriņš Ķīpsalas testa vietā.

Salīdzinot *LED* gaismekļu kontrolleru sūtītos patēriņa datus segmenta kontrollerim (3.2. e att.), kas nosūta datus uz *WEB* vadības programmu un enerģijas skaitītāju patēriņa rādījumus (4.11. att.), var secināt, ka novirze ir robežās 0,31–5,83 %, kas šajā gadījumā rezultējas ar 1,4 % vidējo kļūdu, un tas kopumā ir labs rādītājs *LED* gaismekļu jaudas mērījumu mezglam.

Uzstādītā viedo gaismekļu (*LED3* tips) apgaismes sistēma kopā ar kustības sensoru regulēšanas režīmu kopumā samazina patēriņu par 73 %, salīdzinot ar iepriekš uzstādītajiem nātrija gaismekļiem vidēji visos mēnešos (4.12. att.). Lai saprastu ielas noslodzi pret satiksmes intensitāti, analītiski tika aprēķināts minimālais patēriņš, ja satiksmes intensitātes nav un *LED* gaismeklis būtu dimmēts pie minimālā līmeņa un maksimālais patēriņš, ja gaismeklis darbotos maksimālā jaudas režīmā atbilstoši ieprogrammētajam gaismekļa regulēšanas profilam (satiksmes intensitāte maksimālā konkrētajai diennakts stundai). Faktiski var secināt, ka tumšajos mēnešos būtu iespējams palielināt energoefektivitāti vai drošību (apgaismojuma daudzumu), ja būtu zināmi satiksmes intensitātes dati konkrētai stundai, tādējādi ļaujot precīzāk piemērot ielas *M* klasi (atbilstoši *LVS 13210* standartam).

Kā neatkarīga sistēma tika analizēta Daugavpilī uzstādītā *Citintely* viedās apgaismes sistēma (līdzīga Ķīpsalas viedajai sistēmai (4.3. att.)), kas izmanto radio (*RxTx*) signāla komunikāciju, un kustības noteikšanai tiek izmantoti radara (*Doppler effect*) tipa sensori. Kopumā sistēma ar 1346 *LED* gaismekļiem tika uzstādīta trīs dažādas satiksmes intensitātes pilsētas rajonos, 65 dažādās ielās, kur 33 ielas bija centra rajonā (*M3/M4/M5* klase), pārējās – *M4/M5* un *M5/M6* klases mikrorajonu ielas. Jaudas, luksu, kandelu un spektrālā sastāva mērījumu mērķis bija noteikt apgaismojuma sistēmas kvalitātes atbilstību *Dialux* aprēķiniem (standarts *LVS CEN/TR 13201-1:2015*) *M* klasēm, kā arī novērtēt *LED* gaismekļu dimmēšanas režīmus reālos apstākļos (1).

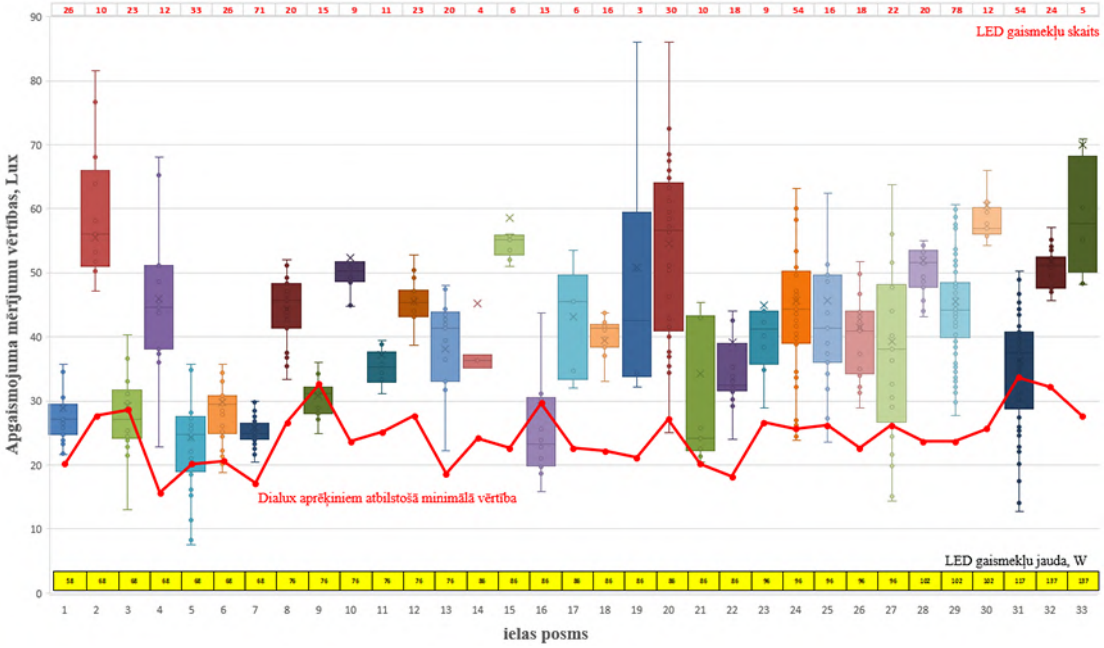


a) viedās apgaismes sistēmas mērījumu plāns; b) GPS koordinātes.

4.13. att. Viedās apgaismes sistēmas mērījumu plāns (a) un GPS koordinātes (b) mikrorajonos.

Katram *LED* gaismeklim tika nomērīts gaismas spektrs (*AvaSpec-2048-USB2-UA* (200–1200 nm)) un apgaismojuma vērtība E_{spot} (luksmetrs *Hagner EC1*) zem gaismekļa – ielas vidū (4.13. att.), un katram *LED* gaismekļu jaudas tipam (37 W–137 W) tika veikti jaudas (*Rohde & Schwarz RTH1004*), ielas apgaismojuma un ceļa virsmas atstarotā apgaismojuma (kandelu – *Konica Minolta LS-110*) mērījumi (kopā 130).

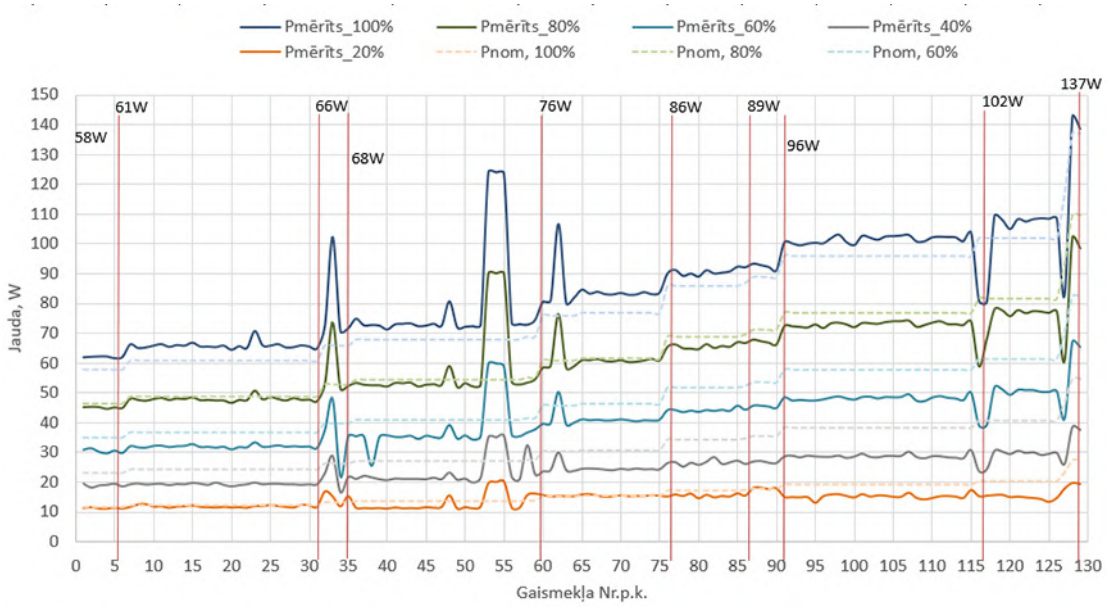
No iegūtajiem mērījumu datiem var secināt, ka gandrīz visos gadījumos faktiskais apgaismojums mērījumu punktā uz ielas ir lielāks, nekā nepieciešams pēc *Dialux* modeļa, lai atbilstu minimālajām prasībām konkrētajai *ME* klasei (4.14. att.). Izņēmumi tika novēroti tikai ielās ar blīvu koku lapojumu vai nepareizi novietotām apgaismes konsolēm. No iegūtajām vērtībām var secināt, ka faktiskais apgaismojums ir vidēji par 63 % lielāks, nekā nepieciešams, kas vienlaikus ir arī enerģijas ietaupījumu potenciāls. Šāda novirze daļēji skaidrojama ar to, ka, veicot *Dialux* aprēķinus, tika izmantots uzturēšanas koeficients (*MF*) ar vērtību 0,8–0,85, vidējais ielas platums un vidējais balstu attālums, kas ne vienmēr sakrīt ar reālo situāciju.



4.14. att. Nomērīto vērtību un *Dialux* aprēķinu vērtību salīdzinājums.

Ņemot vērā to, ka tā ir viedā sistēma, kas regulējas pēc kustības sensora un iepriekš iestatīta dimmēšanas profila, tad interesanti ir aplūkot gaismas balstā esošo iekārtu kopējo reālo patēriņu šādos darba režīmos. *Dialux* aprēķinos tiek izmantota linearizēta (proporcionāla gaismas un jaudas) samazināšanas pieeja, lai noteiktu atbilstību noteiktajai *ME* klasei konkrētai ielai.

4.15. attēlā redzams, ka reālais jaudas samazinājums nav lineāri proporcionāls procentuālajam samazinājumam, tātad tiek izmantota nelineāra pieeja, kas ir raksturīga *LED* diodēm attiecībā pret gaismas atdevi. Pēc grafika redzamas arī atšķirības starp plānoto uzstādīto jaudu (P_{nom}) un reāli nomērīto ($P_{mērīts}$), kas saistās ar izmaiņām montāžas darba gaitā, neveicot izmaiņas darba plānos (projektā). Atšķirībā no "dimmētajiem" režīmiem pie 100 % jaudas redzams, ka *LED* gaismeklis tērē vidēji par 6,7 % vairāk nekā nomināli definēts, kas liecina par to, ka jāuzlabo regulēšanas metode, iekļaujot arī vadības un sensoru ierīču pašpatēriņus, kas atbilstu viedā gaismekļa koncepcijai, un gala lietotājs varētu rēķināties ar konkrētu kopējo patēriņu.



4.15. att. 130 *LED* gaismekļu nomērītās jaudas vērtības regulēšanas režīmā.

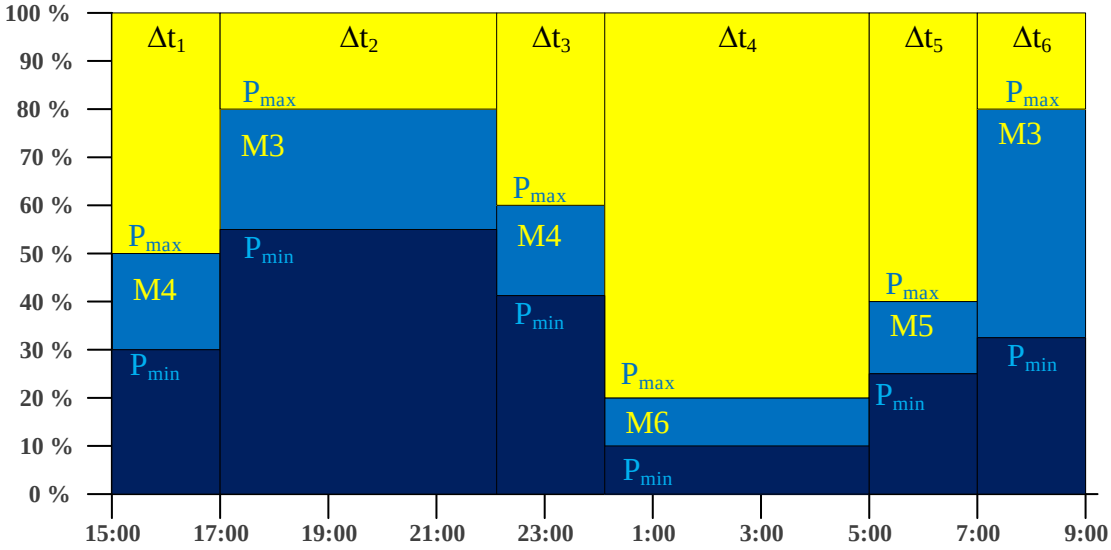
Ar viedām ielu apgaismojuma sistēmām, kas aprīkotas ar *LED* gaismekļiem un kustības sensoriem, elektroenerģijas patēriņu ir iespējams samazināt par 69–73 %, vienlaikus samazinot uzstādīto gaismekļu jaudu par vairāk nekā 50 %, nodrošinot tādus pašus vai uzlabotus apgaismojuma kvalitātes parametrus, ja salīdzina ar esošajiem nātrija augstspiediena spuldžu gaismekļiem.

Viedo *LED* apgaismojuma sistēmu gadījumā bez kustības sensoriem mēnesī ir iespējams ietaupīt ap 51–72 % elektroenerģiju, vidēji gadā tas ir līdz 60 %, vienlaikus samazinot uzstādīto gaismekļu jaudu par aptuveni 40 % un nodrošinot normatīvajiem aktiem atbilstošu apgaismojuma kvalitāti.

Praktiskie apgaismojuma mērījumi jaunām *LED* apgaismes sistēmām liecina par to, ka faktiskais apgaismojums ir vidēji par 63 % lielāks, nekā nepieciešams, kas vienlaikus ir arī enerģijas ietaupījumu potenciāls. Šāda novirze daļēji skaidrojama ar to, ka, veicot *Dialux* aprēķinus, tika izmantots uzturēšanas koeficients (*MF*) ar vērtību 0,8–0,85, kā arī "vidējais" ielas platums un "vidējais" balstu attālums, kas ne vienmēr sakrīt ar reālo situāciju. Veicot mērījumus viedām apgaismes sistēmām, ir salīdzinoši viegli izmainīt gandrīz lineāro gaismas atdeves (lx) un jaudas (W) sakarību, nodrošinot katram apgaismes balstam atbilstošu apgaismes klasi (*M*).

5. Apgaismes sistēmas *LED* gaismekļu adaptīvā vadības algoritma izstrāde

„Gaisma pēc pieprasījuma" [19] vai satiksmei adaptīvas [22], [23] apgaismojuma vadības sistēmas joprojām ir aktuāla problēma. Atbilstoši *LVS* standartiem [10], kas jau tagad ļauj veidot četras laika joslas (Δt_n) nakts laikā, katrai piešķirot savu *M* vai *C* klasi, attiecīgi paaugstinot vai samazinot arī apgaismojumu un arī P_{max}/P_{min} jaudas līmeņus. Ja izmanto *PIR* (2, 4), radara (7) vai citus dinamiskas kustības detektēšanas sensorus (1), tad šo zonu var būt vairāk – katrai nakts stundai sava. Esošām apgaismojuma vadības sistēmām ir iespēja nodrošināt arī vairāk nekā četras šādas laika joslas (5.1. att.). Šajā gadījumā t_0 ir plkst. 15.00, t_1 = plkst. 17.00, t_2 = plkst. 22.00, t_3 = plkst. 24.00, t_4 = plkst. 5.00, t_6 = plkst. 7.00 un t_7 = plkst. 9.00.



5.1. att. *LED* gaismekļu dimmēšanas režīmu laika joslas un *M* klases lietojuma piemērs.

Standarts *13201-1* [10] nosaka ceļa apgaismojuma *M* klases un konflikta zonu *C* klases izvēles principus, ņemot vērā gan tā ģeometriskos, gan satiksmes datus. Savukārt *13201-2* nosaka jau minimālās prasības katrai klasei, kur galvenie kvalitātes parametri ir vidējais apgaismojums (L, cd·m^{-2}), horizontālā apgaismojuma vienmērība (U_0), garenvirziena nevienmērība (U_l), apžilbinājuma koeficients (f_{TI}) un fona apgaismojumu (R_{EI}), savukārt *C* klasei vidējais horizontālais apgaismojums (E, lx) un vienmērība (U_0).

5.1. tabula

Minimālās apgaismojuma vidējās vērtības *C* un *M* klasēm

M klase	*M*1	*M*2	*M*3	*M*4	*M*5	*M*6
L, cd·m^{-2}	2	1,5	1	0,75	0,5	0,3
C klase	*C*0	*C*1	*C*2	*C*3	*C*4	*C*5
E, lx	40	30	20	15	10	7,5

C klasei, salīdzinot ar *M* klasi, luksu vērtības ir augstākas. Lai pārietu no kandelu vienībām uz aptuvenām luksu vienībām, var izmantot lineāru 5.1. sakarību. Vadības programmatūrā šāda pieeja ļaus

vienkāršot *Dialux* programmā iegūto un faktiski nomērīto E_{spot} apgaismojuma vērtību, tā ļaujot noteikt precīzāku nepieciešamo jaudu apgaismojuma klases prasību izpildei (5).

$$E(lx) = 1{,}027 \times (M)^2 - 13{,}7 \times (M) + 52. \tag{5.1.}$$

Apgaismojuma *M* (vai *C*) klasi nosaka pēc 5.2. formulas, kur tiek izmantota svērto vērtību summa (*VWS*), vai analizējot šo summu veidojošos individuālos parametrus, kur dinamiski mainīgi parametri (5.2. tab.) ir satiksmes ātrums () un satiksmes intensitāte (), savukārt konstantie parametri ir satiksmes dalībnieku sastāvs (V_c), krustojumu blīvums (V_s), stāvoša transportlīdzekļa klātbūtne (V_p), apkārtējās vides apgaismojums (V_a), navigācijas sarežģītība (V_n), ņemot vērā to, ka tā ir tumšā diennakts daļa. Konstanto parametru summa var variēt veselo vērtību diapazonā no +8 līdz –1. Ja *VWS* summa ir mazāka par 0, tad aprēķiniem izmanto "0" vērtību, ja $M \leq 0$, tad piemēro *M1* klasi.

$$M = 6 - VWS, \tag{5.2.}$$

$$M = 6 - \left(V_v + V_i + V_c + V_s + V_j + V_n + V_a + V_n\right). \tag{5.3.}$$

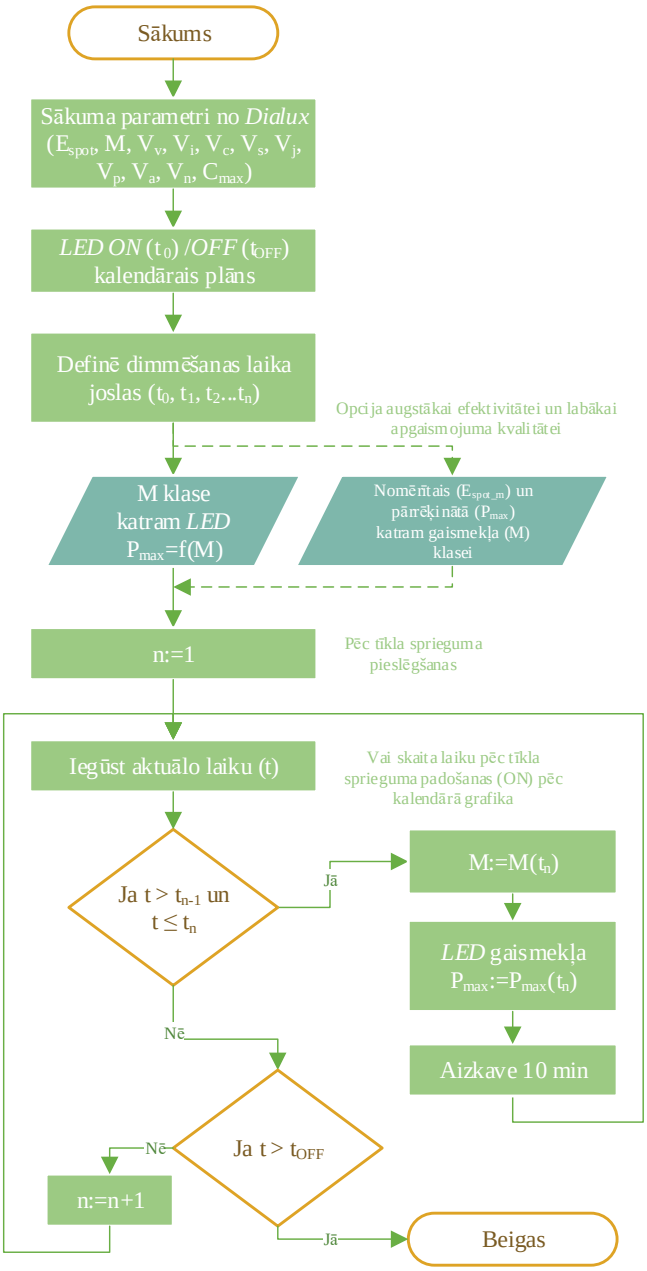
5.2. tabula

Dinamisko parametru (V_v) un (V_i) svara vērtību piešķiršanas nosacījumi

Parametrs	Nosacījums	Svara vērtība VW
Satiksmes ātrums (V_v)	$v \geq 100$ km/h	2
	$70 < v < 100$ km/h	1
	$70 < v < 100$ km/h	–1
	$v \leq 40$ km/h	–2
Satiksmes blīvums / intensitāte (V_i) ceļiem ar divām joslām vai mazāk	> 65 % no maksimālās kapacitātes*	1
	35–65 % no maksimālās kapacitātes	0
	< 35 % no maksimālās kapacitātes	–1
Satiksmes blīvums / intensitāte (V_i) ceļiem ar vairāk kā divām joslām	> 45 % no maksimālās kapacitātes	1
	15–45 % no maksimālās kapacitātes	0
	< 15 % no maksimālās kapacitātes	–1

* Maksimālā kapacitāte ir maksimālais automašīnu skaits, kas konkrētajos apstākļos un laika posmā šķērso joslu vai brauktuvi (abos virzienos), izteikts kā automašīnu skaits stundā vai dienā/naktī.

LED gaismekļu vadības algoritms variantam bez kustības sensoru datiem redzams 5.2. attēlā, kur gaismeklis var darboties gan patstāvīgā režīmā, gan – gadījumā, ja kontrollerim ir komunikācijas mezgls, saņemt vadības komandu no centrālās vadības sistēmas (segmenta kontrollera). Kontrollera atmiņā tiek noteiktas sākotnējās parametru vērtības (E_{spot}, M, V_v, V_i, V_c, V_s, V_j, V_p, V_a, V_n, C_{max}), kalendārais apgaismojuma ieslēgšanas un izslēgšanas laika plāns katrai dienai, vai izmantojot 4.4. formulu, kā arī tiek noteiktas dimmēšanas laika joslu skaits un ilgums. Atbilstoši Dialux modelim tiek noteiktas katras joslas M klase un attiecīgi Pmax jaudas vērtība, kas to nodrošina. Energoefektivitātes un apgaismojuma kvalitātes uzlabošanai pēc gaismekļu uzstādīšanas var veikt apgaismojuma (E_{spot}) mērījumus (4.13. a att.) reizi piecos gados, attiecīgi koriģējot sākotnējās iestatītās vērtības. Tālāk tiek noteikts aktuālais laiks no vadības sistēmas, iebūvētas mikroshēmas, vai atskaitot laiku pēc kalendārā grafika, pēc kura tiek noteikta konkrētā diennakts laika josla un izvēlēta atbilstošā *M* klase, pēc kuras kontrolleris *LED* balastu noregulē uz nepieciešamo jaudas līmeni. Tad ik pēc 10 minūtēm tiek pārbaudīts aktuālais laiks un aktuālā laika josla. Ja $t > t_n$, tad tiek pārbaudīts arī, vai tas nav pārsniedzis izslēgšanās laiku, pie kura gaismeklis tiek izslēgts. Pretējā gadījumā mainīgais *n* tiek palielināts par 1, un cikls atkārtojas nākamajā laika joslā.



5.2. att. LED gaismekļu vadības algoritms variantam bez sensoru datiem (patstāvīgs režīms).

5.4. attēlā redzams *LED* gaismekļu dinamiski adaptīvais vadības algoritms variantam ar kustības sensoru datiem gan lokālam, gan tīklā slēgtam režīmam, kad viens sensors var vadīt blakus esošos gaismekļus. Līdzīgi patstāvīgā režīma algoritmam, sākums ir identisks, bet, ņemot vērā to, ka viedais *PIR* sensors detektē satiksmes kustības ātrumu (V_v), satiksmes intensitāti (V_i) un maksimālo satiksmes kapacitāti (C_{max}), satiksmes virzienu (N_L – *pa kreisi*; N_R – *pa labi* no sensora) un katra virziena kustības notikumu jeb mašīnu skaitu *N* konkrētas diennakts stundas laika periodā *T*, kas šai gadījumā ir viena stunda, tad šie parametri tiek izmantoti aprēķinos. N_i ir *i*-tais mērījums pēc kārtas konkrētā laika periodā (šai gadījumā 1 h) neatkarīgi no kustības virziena, t. i., $N_i = N_L + N_R$.

$$V_i = N = \sum_{T}^{T+1} \left(N_i \right) \tag{5.4.}$$

C_{max} ir izteikts kā transportlīdzekļu skaits diennaktī, un kā maksimālā vērtība var tikt izmantota iepriekšējās diennakts vai maksimālā vērtība vairāku diennakšu periodā (piemēram, mēneša). Tiek pieņemts, ka satiksmes kapacitātes maksimālā vērtība var neparedzēti pieaugt tikai kādu ārkārtēju apstākļu vai dažādu plānotu pasākumu (izstādes, koncerti utt.) dēļ. Lai gadalaika sezonalitāte mazāk ietekmētu klases vērtības izmaiņas, pieņemts, ka labāks ir īsāks periods.

$$C_{\max} = \sum_{T-24}^{T} \left(N \right) \tag{5.5.}$$

Satiksmes intensitāte (V_i) ir faktiskais automašīnu skaits stundas laikā vienā punktā, t. i., pie apgaismes staba.

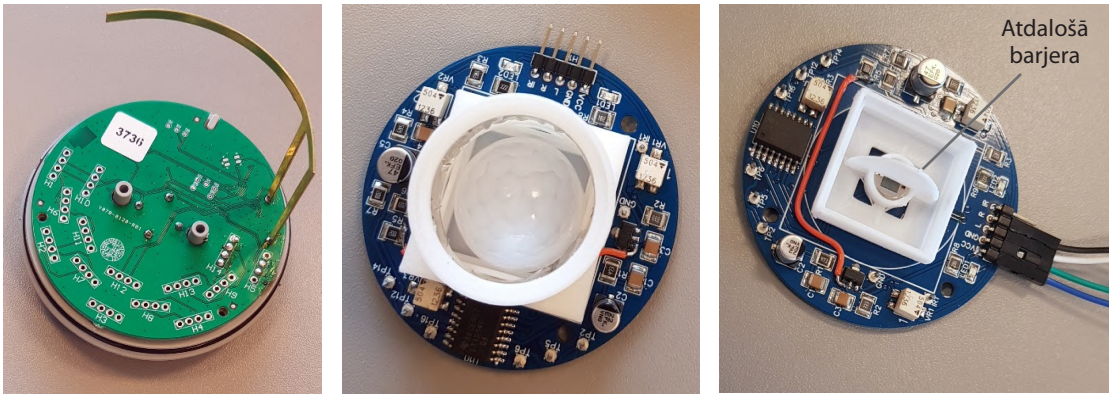
Satiksmes ātrums (V_v) atbilstoši standartam ir maksimālais ierobežotais ātrums, ko nosaka atbilstoša ceļa zīme konkrētajam ielas posmam (vai diennakts periodam), jo līdz šim nav bijis iespējams iegūt aktuālos ātruma datus. Tādēļ šo parametru ir iespējams dinamiski mainīt, balstoties uz aktuālajām vērtībām, ko var iegūt no atbilstoša kustības sensora (sīkāku uzbūvi un darbības principu skatīt publikācijās (2) un (4). Vidējo ātrumu no sensora datiem var aprēķināt divos veidos:

$$\overline{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \tag{5.6.}$$

$$v_i = v_{\text{avg}} = \frac{d}{\Delta t}. \tag{5.7.}$$

$\overline{v}$ ir vidējais ātrums "pārvietojumam" konkrētā laika periodā $\Delta t = t_{\text{beigu}} - t_{\text{sākuma}}$, kas atbilst radara sensora pieejai, kad ir vairāki mērījumi, kamēr auto ir sensora redzamības zonā. Savukārt v_{avg} atbilst *PIR* sensora pieejai, kura redzamības zona ir 19° leņķī. Atkarībā no sensoru uzstādīšanas augstuma mainās ceļš "*d*", kas ir sensora redzamības zonā, katram atsevišķajam elementam tas ir *d*/2. *PIR* sensoram (5.3. b att.) ir divi detektēšanas elementi, kas atdalīti ar "barjeru" (5.3. c att.), tāpēc viens no elementiem detektē laikā $t_{\text{sākuma}}$, otrs attiecīgi t_{beigu}. Jāatzīmē, ka, mainoties kustības virzienam, arī laiki tiek reģistrēti pretēji, attiecīgi izrēķinot Δt_{LR} vai Δt_{RL}. Ātrums visā ielas posmā var nebūt konstants, tāpēc ātruma vērtību var aprēķināt arī kā vidējo vērtību visam ielas posmam, balstoties uz apgaismes balstu kopējo attālumu un kopējo pavadīto laiku, taču šāda pieeja ir daudz sarežģītāk identificējama un aprēķināma katram konkrētam auto, ņemot vērā izmantotā sensora īpatnības. *M* klasei nepieciešamās vidējās V_v vērtības tiek rēķinātas vienu reizi stundā (t = 0 līdz t = 60 min) vai reizi minūtē (t = 0 līdz t = 60 s) atkarībā no dinimiskā algoritma precizitātes vajadzībām.

$$V_{\text{v}} = \frac{\sum_{t=0}^{t=60} v_i}{i} \tag{5.8.}$$



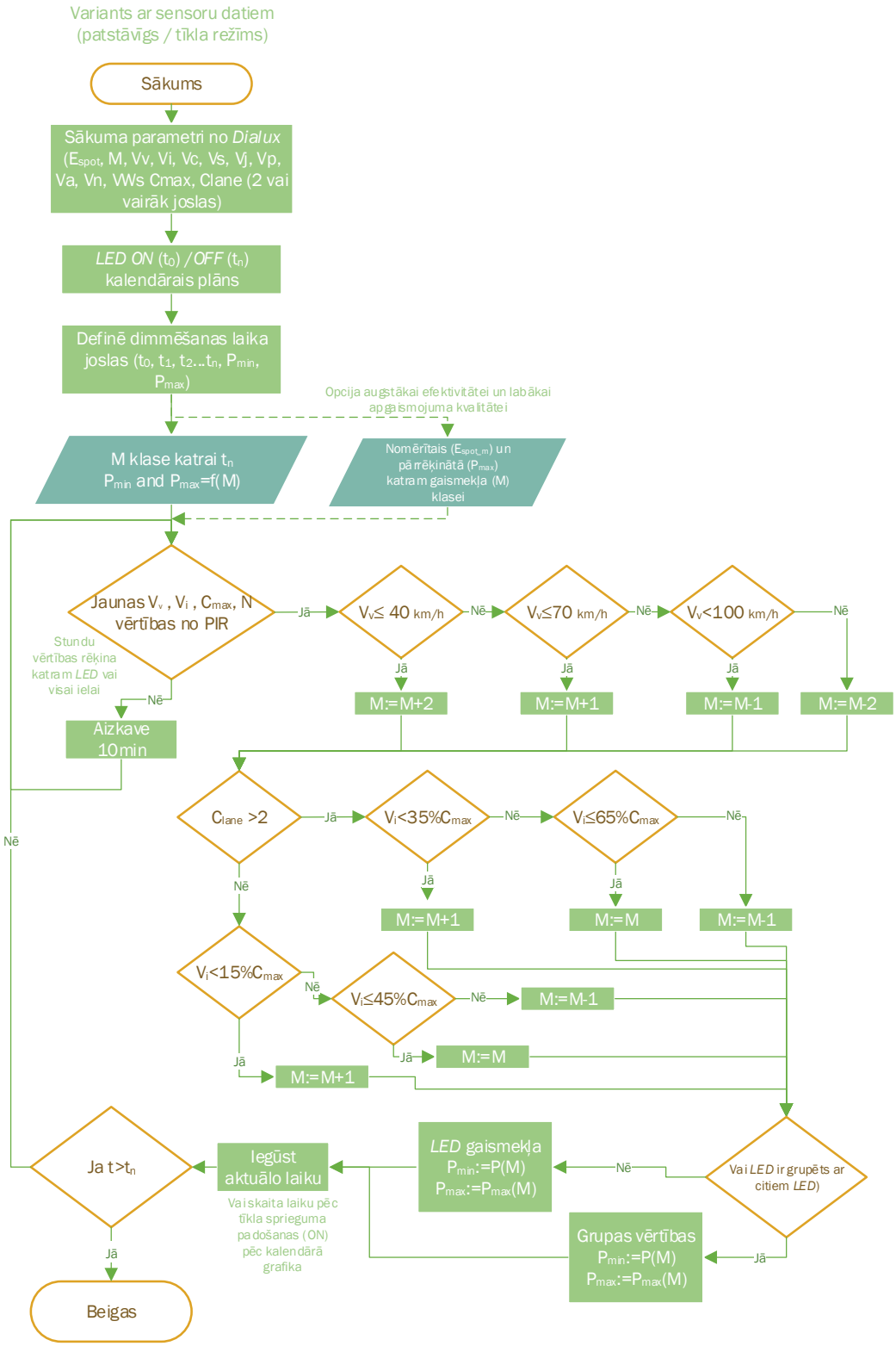
a) Komunikācijas modulis *ZHAGA* korpusā; b) *PIR* sensora plate; c) atdalošā barjera.

5.3. att. Izveidotā *PIR* sensora prototips.

Dinamiskākai vai prognozējošākai apgaismojuma klases izmaiņai sensoru dati var tikt aprēķināti arī īsākā laika periodā, piemēram, ik pēc 10 min, tādējādi uzlabojot precizitāti izvēlētajai *M* klasei vai veidojot koeficientu sistēmu no vēsturiskie datiem, kas prognozētu potenciālu pieaugumu vai samazinājumu tuvākās stundas laikā.

Tālāk algoritms pārbauda, kurā diapazonā ir V_v, attiecīgi mainot *M* klasi ($V_v \in \{2;1;-1;-2\}$), tālāk attiecīgi nosakot V_i parametra ietekmi uz *M* klasi ($V_i \in \{1;0;-1\}$). Tālāk tiek noteikts, vai gaismeklis ir jāregulē individuāli vai visa grupa, attiecīgi nomainot iestatītās P_{min} un P_{max} vērtības. Tad tiek iegūts aktuālais laiks un pārbaudīts, vai tas nav lielāks par t_n, šajā gadījumā izslēdzot apgaismojumu, ja nē, tad cikls tiek atkārtots pēc laika aiztures 10 min.

Kā krēslas sensors vai apžilbinošas gaismas noteikšanas sensors var tikt izmantots salīdzinoši lētais izstrādātais *RGBC* mikroshēmas sfērisks sensors (6), kas spēj noteikt *LED* gaismekļa spektrālo sastāvu (sarkanā, zaļā un zilā spektra pīķos) un relatīvo gaismas daudzumu, t. i., noteikt diennakts gaišo vai tumšo laiku, kā arī atstarotās gaismas palielinājumu, piemēram, auto, kas tuvojas, vai slapjš asfalts lietus vai sniega apstākļos, tādējādi ļaujot samazināt apgaismojuma līmeni, radot vēl papildu enerģijas ietaupījumus vai – pretējā gadījumā – to palielinot, uzlabojot autovadītāja komfortu [20], [21] un satiksmes drošību no apgaismojuma viedokļa.



5.4. att. *LED* gaismekļu adaptīvs vadības algoritms variantam ar sensoru datiem (patstāvīgs un/vai tīkla režīms).

Izveidotais dinamiskais vadības algoritms faktiski ļauj vadīt apgaismojumu adaptīvi satiksmes intensitātei, balstoties uz vēsturiskajiem datiem, turklāt gan individuāla gaismekļa vadībai, gan no centralizētas sistēmas – visai ielai vai ielu grupām vairāku diennakts laika joslu diapazonos, tādējādi iegūstot maksimālu efektivitāti, nesamazinot satiksmes drošību no apgaismes viedokļa.

Secinājumi

Viedo *LED* gaismas avotu balastu (iekļaujot *LED* draivera mezglu un vadības mezgla patēriņu) lietderības koeficienti pie nomināliem slodzes parametriem ir virs 0,80, ko pierāda arī eksperimentālie mērījumi, kur lietderības koeficients ir 0,88 pie 150 W slodzes un ieejas sprieguma diapazona no 130 V līdz 256 V. Lietderību ir iespējams uzlabot, izvēloties shēmas elementus ar precīziem nepieciešamajiem nomināliem/parametriem un korpusa veidu (piemēram, rezistorus, kondensatorus, pusvadītājus), kas ļautu uzlabot efektivitāti par vismaz 2–5 %.

Izveidotais termokompensētais šunts ļauj integrēt *LED* gaismekļu elektroenerģijas patēriņa noteikšanas mezglu pašā *PCB* platē, samazinot ražošanas izmaksas, salīdzinot ar piedāvātajiem risinājumiem, kas izmanto dārgāku materiālu ar mazu pretestības temperatūras koeficientu. Risinājuma inovitāti apliecina saņemtais *WIPO* patents.

Ar viedām ielu apgaismojuma sistēmām, kas aprīkotas ar *LED* gaismekļiem un kustības sensoriem, elektroenerģijas patēriņu ir iespējams samazināt par 69–73 %, vienlaikus samazināt uzstādīto gaismekļu jaudu par vairāk nekā 50 %, savukārt sistēmām bez kustības sensoriem mēnesī ir iespējams ietaupīt ap 51–72 % elektroenerģiju, vidēji gadā tas ir līdz 60 %, vienlaikus samazinot uzstādīto gaismekļu jaudu par aptuveni 40 %, nodrošinot tādus pašus vai uzlabotus apgaismojuma *kvalitātes* parametrus, ja salīdzina ar esošajiem nātrija augstspiediena spuldžu gaismekļiem.

Praktiskie apgaismojuma mērījumi jaunām *LED* apgaismes sistēmām liecina par to, ka faktiskais apgaismojums ir vidēji par 63 % lielāks, nekā nepieciešams, kas vienlaikus ir arī enerģijas ietaupījumu potenciāls. Veicot mērījumus viedām apgaismes sistēmām, ir salīdzinoši viegli izmainīt gandrīz lineāro gaismas atdeves (lx) un jaudas (W) sakarību, nodrošinot katram apgaismes balstam atbilstošu apgaismes klasi (*M*).

Izveidotais dinamiskais vadības algoritms ļauj vadīt apgaismojumu adaptīvi satiksmes intensitātei, balstoties uz vēsturiskajiem datiem, turklāt gan individuāla gaismekļa vadībai, gan no centralizētas sistēmas – visai ielai vai ielu grupām.

Nākotnes pētījumos ir plānots pilnveidot dinamisko vadības algoritmu, ieviešot prognozes modeli un piemērojot vēsturisko datu koeficientus, kā arī izpētīt esošo maiņstrāvas (*AC*) apgaismojuma sistēmas elektroapgādes tīklu nomaiņu uz līdzstrāvas (*DC*) elektroapgādes mikrotīklu, kur ir iespējams samazināt esošo elektroenerģijas patēriņu vēl papildus par 5–10 %, iegūstot apgaismes infrastruktūrai papildu funkcionalitāti dienas laikā (piemēram, elektrisko ietaišu uzlāde, lokāla saules enerģijas pārvade, komunikācijas tīkls u. c.).

Literatūras saraksts

[1] Eiropas Parlamenta un Padomes 2012. gada 25. oktobra ES Direktīva 2012/27/ES par energoefektivitāti.

[2] Eiropas Komisijas paziņojums. Zaļais kurss. Briselē, 11.12.2019. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640&from=EN.

[3] A vision for a sustainable and competitive construction sector by 2030. February 25th, 2005 European Construction Technology Platform (ECTP) / Internets, – www.ectp.org.

[4] L. Bourdeau. Presentation *„The key role of ECTP and collaboration with other ETPs”,* ECTP & E2BA Secretary General. 29.04.2009.

[5] LightingEurope position paper, *„Adaptive road lighting: an intelligent alternative to simply switching off at night”*, 3 July 2013 / Internets – http://www.lightingeurope.org/library.

[6] L. Ribickis un A. Avotiņš, *Apgaismošanas tehnoloģijas*. Rīga: RTU, 2007.

[7] Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2014 *„Efficient blue light-emitting diodes leading to bright and energy-saving white light sources”*, compiled by the Class for Physics of the Royal Swedish Academy of Sciences. 07.10.2014. / Internets – *http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/advanced.html* [pēdējoreiz skatīts 02.07.2015.].

[8] L. Bergström, P. Delsing, A. L'Huillier, O. Inganäs, the Nobel Committee for Physics, editor: S. Gustavsson *„Blue LEDs – Filling the world with new light”*, October 2014. ©The Royal Swedish Academy of Sciences.Lawrence Berkeley national Laboratory „Understanding the Cost of Power Interruptions to U.S. Electricity Consumers” LBNL-55718 September 2004.

[9] AIEE, 1935. The Important Rôle Played by Street Lighting in Automobile Fatalities. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 54, no. 9, pp. 969–969, Sept. 1935. https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1935.5057115.

[10] CEN/TR standards. (2015–2016). EN13201 part 1 LVS CEN/TR 13201-1:2015 Road lighting – Part 1: Guidelines on selection of lighting classes. LVS EN 13201-2:2016 Road lighting – Part 2: Performance requirements. LVS EN 13201-3:2016 Road lighting – Part 3: Calculation of performance. LVS EN 13201-4:2016 Road lighting – Part 4: Methods of measuring lighting performance. LVS EN 13201-5:2016 Road lighting – Part 5: Energy performance indicators. Retrieved from https://www.lvs.lv/.

[11] B. N. Taylor, A. Thompson, „The International System of Units (SI)”, NIST Special Publication 330, 2008 Edition.

[12] LEDinside, 03.01.2021. *„Top 10* LED *ražotāji”* / Internets – https://www.ledinside.com/intelligence/2019/4/china_manufacturers_raise_capacity_causing_stagnation_revenue_growth_led_packaging_suppliers.

[13] P. Apse-Apsītis. Promocijas darbs *„Elektrotehnoloģisko iekārtu bezvadu monitoringa un vadības sistēmu izpēte”*, Rīga 2013, RTU Izdevniecība.

[14] Apse-Apsītis P., Avotiņš A., Ribickis L., System and method for monitoring real power consumption. WIPO patents WO2013/093554 A1, patenta publikācijas datums 27.06.2013.

[15] A. Avotiņš, I. Galkins, L. Ribickis, M. Jirgensons. FP7 projekta Led-based Intelligent Street Lighting for Energy Saving (LITES) atskaite "D4.1 – Report on Power supply design and optimization". Rīga, RTU, 30.03.2011.

[16] G. Asmanis, A. Avotiņš, I. Galkins, L. Ribickis, M. Jirgensons. FP7 projekta Led-based Intelligent Street Lighting for Energy Saving (LITES) atskaite "D4.2 – Report on Power supply quality tests", Rīga, RTU, 05.11.2010.

[17] Avotiņš, A., Apse-Apsītis, P. Viedā LED gaismekļa elektriskās daļas izstrāde. Zinātniskā projekta atskaite valsts pētījumu programmas „LATENERGI" ietvaros, 2017, Rīga.

[18] Sarbu I., Sebarchievici C., Solar Heating and Cooling Systems, Chapter 2: Solar Radiation, 21st October 2016, Academic Press, eBook ISBN: 9780128116630.

[19] A. Cela, R. Natowicz and S. Abidi, „Smart Street Lighting Energy Consumption Simulation," 2019 International Conference in Engineering Applications (ICEA), 2019, pp. 1–5.
[20] Czyżewski D., 2018. The Influence of Luminaire Photometric Data Accuracy on Road Lighting Calculations Quality. VII. Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4), Trebic, 2018, pp. 1–4.
[21] Maierová L., 2018. Public Lighting, Public Health. VII. Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4), Trebic, 2018, pp. 1–5.
[22] Shlayan N., Challapali K., Cavalcanti D., Oliveira T. and Yang Y., 2018. A Novel Illuminance Control Strategy for Roadway Lighting Based on Greenshields Macroscopic Traffic Model. IEEE Photonics Journal, vol. 10, no. 1, pp. 1–11, Feb. 2018, Art no. 8200211.
[23] Yang C., Nefedov E., Sierla S. and Flikkema P., 2015. Vehicle and pedestrian aware street lighting automation. IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Cambridge, 2015, pp. 1269–1274.

Ansis Avotiņš dzimis 1980. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis bakalaura (2001) un maģistra grādu (2004) elektrozinātnē. Strādājis par apgaismojuma sistēmu ekspertu gan SIA "Vides investīciju fonds", gan LR Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrijā, piedalījies Rīgas pašvaldības aģentūras "Rīgas gaisma" apgaismojuma attīstības koncepcijas izveidē. Kopš 2004. gada strādā RTU Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūtā (IEEI), ieņemot asistenta, laboratoriju un projektu vadītāja amatus. Patlaban ir IEEI pētnieks un laboratoriju vadītājs.
Jau vairākus gadus ir Latvijas Energoefektivitātes asociācijas (LATEA) valdes loceklis, kā arī LVS Standartizācijas tehniskās komisijas 46. darba grupas "Apgaisme" eksperts un ilggadējs *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (*IEEE*) biedrs. Pētījumu tematika pārsvarā saistās ar ielu apgaismojumu, energoefektivitāti, kvalitāti un drošību, ņemot vērā arī viedo pilsētu tehnoloģiju sasniegumus, attīstības tendences un izaicinājumus. Ir nozarē atzīts eksperts un aktīvi sadarbojas ar industriju un pilsētu pašvaldībām, izstrādājot dažādus matemātiskos modeļus, veidojot attīstības koncepcijas un veicot ekspertīzes pakalpojumus šajā jomā.