



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Kārlis Gičevskis

ELASTĪGAS ELEKTROAPGĀDES RISINĀJUMI: MODELĒŠANAS METODES UN INOVATĪVAS PIEEJAS ILGTSPĒJĪGAI ENERĢĒTIKAS TRANSFORMĀCIJAI

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Kārlis Gičevskis

Doktora studiju programmas "Viedā elektroenerģētika" doktorants

ELASTĪGAS ELEKTROAPGĀDES RISINĀJUMI: MODELĒŠANAS METODES UN INOVATĪVAS PIEEJAS ILGTSPĒJĪGAI ENERĢĒTIKAS TRANSFORMĀCIJAI

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji
profesors *Dr. sc. ing.*
OĻEGS LINKEVIČS
profesors *Dr. habil. sc. ing.*
ANTANS SAUĻUS SAUHATS

RTU Izdevniecība
Rīga 2024

Gičevskis, K. Elastīgas elektroapgādes risinājumi: modelēšanas metodes un inovatīvas pieejas ilgtspējīgai enerģētikas transformācijai. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. 62 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-05” 2024. gada 26. marta lēmumu, protokols Nr. 98/24.

Promocijas darbs izstrādāts ar Rīgas Tehniskās universitātes Doktorantūras grantu programmas un Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projektā Nr. 8.2.2.0/20/I/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās”.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Sociālais
fonds

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ



Vāka attēls ģenerēts ar *openAI DALL- E/ ChatGPT 4.0*.

<https://doi.org/10.7250/9789934370533>
ISBN 978-9934-37-053-3 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 20. jūnijā plkst. 11.30 Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 306. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors *Dr. sc. ing.* Romāns Petričenko,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesore *Dr. sc. ing.* Irina Oļeiņikova,
Norvēģijas Zinātņu un tehnoloģiju universitāte, Norvēģija

Profesors *Dr. sc. ing.* *Saulius Gudzius*,
Kauņas Tehnoloģiskā universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

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

Kārlis Gičevskis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 69 attēli, 23 tabulas, 10 pielikumu, kopā 121 lappuse, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 97 nosaukumi.

PATEICĪBAS

Liels paldies Latvijas Zinātņu akadēmijas korespondētājloceklim Antanam Sauļum Sauhatam un profesoram Oļegam Linkevičam par viņu sniegto atbalstu un iedrošinājumu zinātniskajā darbā!

Esmu pateicīgs Edgaram Grozam un Santai Ķienei no RTU par palīdzību sarežģītos tehniskos jautājumos visa promocijas darba sagatavošanas laikā. Paldies Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes zinātniekiem profesoram Vitālijam Osadčukam un Aldim Peckam par vērtīgajiem padomiem un manam darba devējam AS “Latvenergo” par finansiālo atbalstu, veicot eksperimentālo izpēti par ārpustikla elektroapgādes sistēmu, kas bija nepieciešams promocijas darba izstrādē!

Pateicos par atbalstu un motivējošām sarunām arī saviem kolēģiem Edijam Vesperim, Kasparam Karlsonam, Poļinai Grebešai, Jānim Andersonam, Mārim Balodim, Ilmāram Stuklim un Kasparam Cikmačam no AS “Latvenergo”, kā arī citiem jaunajiem enerģētikas nozares profesionāļiem, kuri piedalījās Pasaules Enerģētikas padomes Latvijas komitejas iniciētajā programmā “Nākotnes enerģētikas līderi Latvijā (2022)”!

Vissirsnīgākais paldies manai ģimenei, vecākiem un vecvecākiem par nemitīgo atbalstu visa pētniecības ceļa laikā!

SATURS

IEVADS	7
Pētījuma aktualitāte	7
Promocijas darba hipotēze, mērķis un uzdevumi	8
Zinātniskā novitāte	9
Pētījuma praktiskā nozīme	10
Publikācijas un konferences	10
Autora personīgais ieguldījums	11
Darba apjoms un struktūra	12
1. MĀJSAIMNIECĪBAS ĀRPUSTĪKLA ELEKTROAPGĀDES SISTĒMAS PARAMETRU NOTEIKŠANAS METODOĻĢIJA	13
1.1. Motivācija un priekšvēsture	13
1.1.1. Modelēšana, izmantojot programmatūras rīku	15
1.2. Metodoloģija	17
1.2.1. Mājsaimniecības atrašanās vieta un slodze	18
1.2.2. Ārpustīkla elektroapgādes sistēmas parametri	18
1.3. Trīs alternatīvu scenāriju simulāciju rezultāti	19
2. JAUNS MATEMĀTISKAIS MODELIS MĀJSAIMNIECĪBAS ĀRPUSTĪKLA SISTĒMAS SIMULĀCIJAI	22
2.1. Motivācija un priekšvēsture	22
2.2. Metodoloģija	22
2.2.1. Modelis mājsaimniecības ārpustīkla sistēmas simulācijai	22
2.3. Konkrēta gadījuma izpēte	24
2.4. Rezultāti	25
3. REĀLA ĀRPUSTĪKLA SISTĒMAS PROJEKTA ANALĪZE LATVIJĀ	30
3.1. Motivācija un priekšvēsture	30
3.2. Materiāli un metodes	30
3.2.1. Ārpustīkla sistēmas uzstādīšana	30
3.3. Rezultāti un diskusija	33
3.3.1. Ārpustīkla veiktspējas novērtējums	33
4. PĀREJA UZ DECENTRALIZĒTO ENERĢĒTIKU LATVIJĀ	39
4.1. Grozījumi valsts tiesību aktos	39
4.2. Ieteikumi turpmākiem grozījumiem tiesību aktos	40
4.3. Decentralizētu atjaunojamās enerģijas avotu atmaksāšanās analīze	42
4.3.1. Motivācija un priekšvēsture	42

4.3.2. Metodoloģija – gadījuma izpētes pieņēmumi.....	43
4.3.3. Rezultāti un diskusija	44
5. IZAICINĀJUMI AR JAUNIEM SISTĒMAS PAKALPOJUMIEM.....	48
5.1. Bateriju elektroenerģijas uzkrājēja sistēmas modelēšana.....	48
5.1.1. Motivācija un priekšvēsture	48
5.1.2. Metodoloģija.....	48
5.1.3. Rezultāti un diskusija	50
5.2. Decentralizēta elektroda katla nozīme palīgpakalpojumu nodrošināšanai.....	54
5.2.1. Motivācija un priekšvēsture	54
5.2.2. Metodoloģija.....	55
5.2.3. Rezultāti un diskusija	57
SECINĀJUMI.....	59
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	61


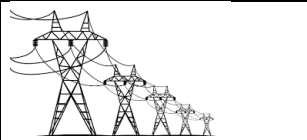

IEVADS

Pētījuma aktualitāte

Klimata pārmaiņas rada nopietnu risku mūsu planētai, un to sekas ir vērojamas visā pasaulē. Reaģējot uz to, valstis un reģioni ir noteikuši vērienīgus klimata neitralitātes mērķus. Starptautiski nolīgumi, piemēram, Parīzes nolīgums, tiecas ierobežot globālo sasilšanu, lai tā nepārsniegtu 2 °C, un ir centieni sasniegt vēl stingrākus mērķus. Eiropas Savienība (ES) ir apņēmusies līdz 2050. gadam panākt klimata neitralitāti, cenšoties panākt nulles neto siltumnīcefekta gāzu emisijas. Latvija, tāpat kā citas ES valstis, ir pievienojusies šiem centieniem, atzīstot, ka steidzami nepieciešama kopīga rīcība. Šīs saistības atspoguļo kopīgu apņemšanos risināt klimata pārmaiņu problēmu, veicināt inovācijas enerģētikas jomā un virzīties uz ilgtspējīgu nākotni [1].

Lai gūtu panākumus, ļoti svarīga ir izpratne par to, kāpēc tiek ieviestas inovācijas un kāpēc ir nepieciešams pārveidot enerģētikas sistēmu. Atbilde uz jautājumu, kāpēc mums ir jāievieš inovācijas, var palīdzēt definēt, kā izskatītos panākumi, uz kādām inovācijām tiecamies un kā vislabāk organizēt un ieviest inovācijas, lai palīdzētu pārveidot energosistēmu. Svarīgi atzīmēt, ka inovācijas un energosistēmas transformācija var nozīmēt daudzas un dažādas lietas. Elektroenerģijas uzkrājēji, elastīga ģenerācija, hibrīda sistēmas, reāllaika uzraudzība un kontrole, pieprasījuma reakcija un elastība – tās ir tikai dažas inovācijas energosistēmas transformācijai (1.1. tab.).

1.1. tabula. Inovācijas energosistēmas transformācijai [2]

 Ģenerācija	 Pārvade un sadale	 Patēriņš
Hibrīdās enerģijas sistēmas Elastīga ģenerācija Elektroenerģijas pārveidošana dažādas vielās, t. sk. ūdeņradī (P2X) Enerģijas uzglabāšana Virtuālās elektrostacijas Digitālie dvīņi Siltuma ražošana ar elektroenerģiju (Power-to-heat) Mikrotīkli	Reāllaika uzraudzība un kontrole Tīkla automatizācija Uzlabota analītika Mākslīgajā intelektā balstīti vadības centri Viedā aktīvu pārvaldība Simulēšanas rīki hibrīdām maiņstrāvas/līdzstrāvas sistēmām Pārredzamība un tirgus platformas	Galapatēriņa elektrifikācija Elektriskie transportlīdzekļi, viedā uzlāde un transportlīdzeklis-tīkls (V2G) Spēcīgi patērētāji Enerģētikas kopienas Vienādranga elektroenerģijas tirdzniecība Pieprasījuma reakcija un elastība Agregatori

Tomēr lielākoties inovācijas gandrīz vienmēr ir vērstas uz mērķu sasniegšanu – jaunām darbībām, kas nodrošinātu reālu peļņu vienai vai vairākām ieinteresētajām personām, mazinātu ietekmi uz vidi vai uzlabotu energoapgādes drošību. Šo jauno darbību raksturs un to īstenošanas

veids ir daudzu ideju avots, tostarp no ieinteresētajām personām, kuras ikdienā izmanto energosistēmu.

Inovācijas nepieciešamību parasti var iedalīt mazākos iemeslu kopumos. Šeit minēti tikai daži no tiem:

1. inovatīvāku uzņēmumu puses konkurences spiediens;
2. tendences, kas pārveido nozari un maina tirgus dalībnieku pozīcijas;
3. tiešas izmaiņas produktu vai pakalpojumu pieprasījumā;
4. ekonomiskā lejupslīde (piemēram, tā, kas daudziem uzņēmumiem sākās līdz ar pandēmiju);
5. klientu vajadzību izmaiņas (piemēram, saistībā ar jaunām tehnoloģijām);
6. stagnējoši vai sarūkoši pamattirgi;
7. jaunu tirgus iespēju izpēte;
8. jauno tehnoloģiju radītās iespējas, piemēram, saistībā ar digitalizāciju un mākslīgo intelektu.

Pastāv dažādi pasākumi un inovācijas, lai paātrinātu pāreju no fosilā kurināmā uz videi nekaitīgām tehnoloģijām. Lai piemērlētu ilgtspējīgu, tehniski un ekonomisku efektīvu risinājumu kombināciju un to parametrus, ir jāizmanto jaunas modelēšanas metodes, simulācijas rīki un inovatīvas pieejas drošai un ilgtspējīgai enerģētikas transformācijai. Tāpēc promocijas darbā autors fokusējas uz inovatīvām metodoloģijām un matemātiskajiem modeļiem, lai kopā ar eksperimentālu pieeju risinātu vairākus galvenos aspektus šajā jomā:

1. novērtēšanas sistēmas izstrāde ārpus tīkla (nav pieslēgta elektrotīklam) un mikrotīkla sistēmām; tas ietver aprīkojuma parametru optimizāciju, dažādu darbības režīmu ietekmes apsvēršanu un matemātisko modeļu izveidi, lai uzlabotu šo sistēmu efektivitāti;
2. sistemātisks pašreizējās likumdošanas un dažādu decentralizētu elektroapgādes risinājumu (piemēram, saules paneļi, mazas jaudas elektroenerģijas uzkrājēji) ekonomiskās dzīvotspējas novērtējums; tā mērķis ir sniegt vērtīgu ieskatu normatīvajā vidē un finansiālajā iespējamībā, kas saistīta ar dažādām decentralizētām energosistēmām;
3. lielas jaudas elektroenerģijas uzglabāšanas sistēmām pielāgota novērtēšanas un optimizācijas modeļa formulēšana;
4. tehniski ekonomiskā pamatojuma algoritma izstrāde, kā arī palielināta elastība, izmantojot elektrodu katlu; tas ir paredzēts aktīvai dalībai balansēšanas tirgos, veicinot gan tehnisko efektivitāti, gan ekonomisko dzīvotspēju.

Izstrādes tika izmantotas, lai simulētu tehnoloģijas Latvijas un tās energosistēmas apstākļos.

Promocijas darba hipotēze, mērķis un uzdevumi

Hipotēze

Piešķirot prioritāti decentralizētu elektroapgādes risinājumu efektīvai plānošanai un darbībai, var izveidot elastīgāku, ilgtspējīgāku un līdzsvarotāku enerģētikas vidi. Decentralizēti elektroapgādes risinājumi var efektīvi novērst nepastāvīgas ražošanas problēmas, uzlabot sistēmas elastību, samazināt enerģijas cenas un uzlabot enerģētikas infrastruktūras vispārējo

efektivitāti. Svarīgi atrast efektīvu risinājumu kombināciju un noteikt sistēmu optimālus parametrus, kas ir izdarāms ar inovatīviem simulācijas rīkiem.

Mērķis

Promocijas darba mērķis ir piedāvāt jaunas modelēšanas metodes, simulācijas rīkus un inovatīvas pieejas decentralizētu elektroapgādes risinājumu izvēlei, novērtēšanai un to darbības optimizēšanai (pilnveidošanai) mainīgos darbības apstākļos.

Uzdevumi

Lai sasniegtu promocijas darba mērķi, tika definēti vairāki uzdevumi:

1. veikt padziļinātu ārpuslīklu sistēmu izpēti, uzsvāru liekot uz novērtēšanas sistēmas izstrādi, kas ietver patērētāju paradumus, galveno uzmanību pievēršot iekārtu parametru optimizācijai, dažādu darbības režīmu ietekmes novērtēšanai un matemātisko modeļu formulēšanai, lai palielinātu šo sistēmu vispārējo efektivitāti;

2. veikt sistemātisku esošo tiesību aktu novērtējumu un izvērtēt dažādu decentralizētu elektroapgādes risinājumu ekonomisko dzīvotspēju; sniegt ieskatu par normatīvo regulējumu un finansiālo pamatojumu dažādos scenārijos;

3. izstrādāt novērtēšanas un optimizācijas modeli, kas īpaši pielāgots elektroenerģijas uzglabāšanas sistēmām, kas tika izmantotas sistēmas pakalpojumu sniegšanai (frekvences regulēšanai); šis uzdevums ietver metodoloģiju, lai uzlabotu šo uzglabāšanas sistēmu efektivitāti un veiktspēju pēc Baltijas energosistēmas sinhronizācijas ar kontinentālās Eiropas sinhrono zonu (CESA);

4. izstrādāt tehniskā un ekonomiskā pamatojuma algoritmu, galveno uzsvāru liekot uz elastības palielināšanu, integrējot elektrodu katlu; šī algoritma mērķis ir veicināt aktīvu dalību balansēšanas tirgos, tādējādi sekmējot gan tehnisko efektivitāti, gan ekonomisko dzīvotspēju.

Zinātniskā novitāte

Tika izstrādāti detalizēti matemātiski apraksti un specializēti algoritmi, lai novērtētu dažādu tehnoloģiju tehniskos un ekonomiskos aspektus, lai uzlabotu to veiktspēju dažādos apstākļos. Mērķis bija padarīt tos labākus dažādās situācijās un paātrināt pāreju uz tīrāku enerģiju, piedāvājot ātri un precīzi noteikt sistēmu optimālu sastāvu vai citus parametrus, salīdzinot ar esošiem komerciāliem modelēšanas rīkiem. Šīs pieejas ir pielāgotas galvenajām tehnoloģijām – ārpuslīklu un mikrotīkla sistēmām, saules paneļiem, elektroenerģijas uzglabāšanas sistēmām un elektroda katlam, un tā rezultātā ir izstrādātas četras atšķirīgas metodoloģijas, kas paredzētas katrai konkrētai tehnoloģijai.

Šo tehnoloģiju matemātiskie apraksti, tehnisko un ekonomisko aspektu novērtēšanai izmantotie algoritmi, kā arī likumdošanas sistēma ir analizēta Latvijas un tās enerģētikas sistēmas kontekstā.

Pētījuma praktiskā nozīme

Pētījumos izstrādātie algoritmi ir izstrādāti tā, lai tos varētu pielāgot arī citi izstrādātāji. Šiem algoritmiem ir reāli lietojumi ārpustīkla un mikrotīkla sistēmu plānošanā, iekārtu sastāva un parametru izvēlē, kā arī darbības pilnveidošanā.

Šie algoritmi ir atraduši praktisku lietojumu, īpaši AS “Latvenergo” īstenoto projektu tehniski ekonomiskajā novērtēšanā. Šo projektu vidū ir ārpustīkla sistēma, bateriju enerģijas uzkrāšanas sistēma (*BESS*) Rīgas hidroelektrostacijā un elektriskā katla uzstādīšana Rīgas termoelektrocentrālēs. Ārpustīkla eksperimentālā sistēma ir veiksmīgi uzstādīta un patlaban darbojas Bauskas novadā. Turpinās šīs sistēmas demonstrācija un darbības pilnveidošana.

Turklāt izstrādātie algoritmi bija noderīgi, veidojot priekšizpēti gan *BESS*, gan elektriskā katla projektam. Šos pētījumus ir paredzēts izmantot, lai piesaistītu Eiropas Savienības līdzfinansējumu. Patlaban notiek iepirkuma procedūra, lai izvēlētos piemērotu kandidātu *BESS* darbuzņēmējam, kas būs atbildīgs par *BESS* tehniskā projekta izstrādi un būvniecību.

Promocijas darba rezultātus AS “Latvenergo” var izmantot, lai izvērtētu dažādas šo tehnoloģiju uzlabošanas iespējas. Turklāt iegūtos rezultātus var izmantot politikas veidotāji, izstrādātāji un Rīgas Tehniskās universitātes pētnieki.

Promocijas darba sagatavošanas laikā autors piedalījās lekciju materiālu izstrādē Rīgas Tehniskās universitātes studentiem. Pētījumu rezultāti ir izmantoti šādās lekcijās:

1. “Mikrotīkli, to pamatelementi, vadības sistēmas un modelēšana” (EES708, “Elektriskās stacijas un apakšstacijas” maģistra līmeņa studentiem);
2. “Pētniecība un attīstība, inovācijas enerģētikā” (EES731, “Ievads specialitātē un nozares pētniecība” bakalaura līmeņa studentiem);
3. “Elektromobiļu uzlādes infrastruktūra, viedie risinājumi” (EES731, “Ievads specialitātē un nozares pētniecība” bakalaura līmeņa studentiem).

Publikācijas un konferences

Pētījumu rezultāti ir prezentēti zinātniskajos žurnālos Latvijā un ārzemēs. Raksti publicēti zinātniskajos žurnālos.

1. **Gicevskis K.** and Linkevics O., “The Role of Decentralized Electrode Boiler in Ancillary Services and District Heating: a Feasibility Assessment”, *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 60, no. 5, 2023, pp. 32–42, <https://doi.org/10.2478/lpts-2023-0029>.
2. **Gicevskis K.**, Linkevics O. and Karlsons K., “Transitioning to decentralized renewable energy in Latvia: a comprehensive payback analysis”, *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 60, no. 6, 2023, pp. 19–34, <https://doi.org/10.2478/lpts-2023-0034>.
3. Groza E., Kiene S., Linkevics O. and **Gicevskis K.**, “Modelling of Battery Energy Storage System Providing FCR in Baltic Power System after Synchronization with the Continental Synchronous Area”, *Energies*, 2022, vol. 15 (11), doi:10.3390/en15113977.

4. Groza E., **Gicevskis K.**, Linkevics O. and Kiene S., “Mathematical Model for Household Off-Grid Simulation (Off-Grid System Sizing)”, *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2022, vol. 59 (4), pp. 3–18, doi: 10.2478/lpts-2022-0029.

5. Linkevics O., Vesperis E., **Gicevskis K.**, Osadcuks V., Pecka A. and Galins A., “Analysis of Experimental Data from Household Off-Grid System in Latvia”, *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 60, no. 3, pp. 3–17, <https://doi.org/10.2478/lpts-2023-0014>.

Promocijas darbā prezentētie pētījumu rezultāti tika apspriesti divās starptautiskās zinātniskās konferencēs, kurās tika apspriestas arī aktuālas enerģētikas nozares problēmas.

1. **Gicevskis K.**, Linkevics O., Groza E. and Kiene S., “Multiple Scenario and Criteria Approach for Optimal Solution and Sizing of Household Off-grid System”, in 2020 IEEE 8th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 2021, pp. 1–7, doi: 10.1109/AIEEE51419.2021.9435627.

2. **Gicevskis K.**, Groza E., Karpovica I., Smiltans E., “The Energy Trilemma Index as a tool to support national security of energy system towards climate neutrality”, in the 80th International Scientific Conference of the University of Latvia, Latvia, Riga, 18 March, 2022, pp. 5–5, https://dspace.lu.lv/dspace/bitstream/handle/7/61077/book-of-abstracts_18-03-2022.pdf?sequence=1.

Pētījuma rezultāti publicēti arī rakstā grāmatā un rakstos citos žurnālos.

1. Groza E., **Gicevskis K.**, Smiltans E., Karpovica I., Valdmanis G., “Latvia’s Energy Supply and Security”, *Towards Climate Neutrality: Economic Impacts, Opportunities and Risks: reviewed monograph*. Riga, University of Latvia Press, 2023, pp. 135–150, doi:10.22364/tcn.23.

2. Groza E., Smiltans E., **Gicevskis K.**, Karpovica I., “Pasaules enerģētikas trilemmas indekss: globālā pieredze lokālu risinājumu meklējumos”, *Enerģija un pasaule*, 2022, vol. 1, no. 132, pp. 58–63, URL: http://www.enerģijaunpasaule.lv/wp-content/uploads/2022/02/EP_132_2-3lpp_SATURS.pdf.

3. **Gicevskis K.**, Linkevics O., Groza E., “Jauni elektroenerģijas tirgus dalībnieki un tehnoloģijas–regulatīvie izaicinājumi”, *Jurista vārds*, 2022, vol. 1247, no. 33, pp. 30–35.

Autora personīgais ieguldījums

Promocijas darba izstrādes laikā autors piedalījies vairākos sadarbības projektos, strādājot kopā ar AS “Latvenergo”, Rīgas Tehniskā universitātes, Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes u. c. organizāciju pētniekiem. Promocijas darba izstrādes kopējā koncepcija tika attīstīta, autoram cieši sadarbojoties ar profesoru *Dr. sc. ing.* Oļegu Linkeviču profesora *Dr. habil. sc. ing.* Antana Sauļus Sauhata vadībā. Autors devis ieguldījumu visos darba posmos, jo īpaši datu apstrādē, izvērtējumā un aprēķinu veikšanā, strādājot pie gadījumu izpētēm un analizējot to rezultātus.

Darba apjoms un struktūra

Darbs ir uzrakstīts angļu valodā. Tajā ir ievads, piecas galvenās nodaļas, secinājumi un bibliogrāfijas ar 97 literatūras avotiem. Darbā ir 69 attēli, 23 tabulas, kopā – 121 lappuses.

Ievadā tiek sniegta informācija par pētījuma aktualitāti, formulēta hipotēze, darba mērķis un uzdevumi. Tajā izklāstīta arī pētījuma zinātniskā novitāte un praktiskā nozīme, kā arī uzskaitīti autora zinātniskie darbi.

1. nodaļā izklāstīta metodika, kā simulēt ārpustīkla sistēmas un noteikt māsaimniecības ārpustīkla sistēmas optimālo kombināciju un lielumu, izmantojot dažādus scenārijus. Tajā aplūkotas trīs dažādas ārpustīkla tehnoloģiskās alternatīvas, trīs dispečēšanas stratēģijas, dažu sistēmas komponentu darbības ierobežojumi un jutīguma analīze. Nodaļas nobeigumā izklāstītas izmantotās metodes priekšrocības un trūkumi, kā arī ierosināti uzlabojumi turpmākajiem pētījumiem.

2. nodaļā sniegts pārskats par dažādām metodēm un rādītājiem, ko varētu ņemt vērā ārpustīkla iekārtu novērtēšanas procesā. Tā iepazīstina ar jaunu vairāku mērķu simulācijas rīku, kas kalpo kā novērtēšanas rīks, lai noteiktu ārpustīkla un mikrotiklu iekārtu parametrus. Izstrādātais modelis tiek validēts, salīdzinot ar **1. nodaļā** veiktajiem aprēķiniem, izmantojot *Homer Pro* programmatūru, un **3. nodaļā** sniegtajiem reālās ārpustīkla sistēmas datiem.

3. nodaļā aprakstīts eksperimentāls autonomais elektriskais ārpustīkla risinājums Latvijā. Lai analizētu sistēmas veiktspēju un vadības stratēģiju, tika apkopoti reālas autonomas ārpustīkla sistēmas darbības dati. Šai informācijai ir liela nozīme izmaksu ziņā efektīvu atjaunojamo ārpustīkla sistēmu plānošanā un parametru noteikšanā. Piemēram, jāņem vērā tas, ka simulācijas dažos aspektos var atšķirties no reālās sistēmas darbības. Pirmajās trijās nodaļās gūtie secinājumi arī norādīja, ka ārpustīkla un mikrotiklu sistēmas saskaras ar līdzīgām problēmām kā lielas energosistēmas. Tāpēc turpmākajās nodaļās ir aplūkotas decentralizētās tehnoloģijas, kas ietekmē kopējo energosistēmu.

Tāpēc **4. nodaļa** ievieš plašāku skatījumu uz decentralizētiem energoresursiem un jauniem dalībniekiem enerģētikas jomā. Tajā aplūkotas tendences elektroenerģijas tirgos, normatīvais regulējums un tā ietekme uz iespējamo ietaupījumu no inovatīviem risinājumiem dažādos scenārijos Latvijas kontekstā. Nodaļā sniegti ieteikumi likumdošanas izmaiņām un atziņas, kas varētu kalpot par papildu motivāciju investīcijām enerģētikas pārejā.

Visbeidzot, **5. nodaļā** aplūkota algoritma izveide, lai novērtētu tehniskās iespējas nodrošināt frekvences noturēšanas rezervi (*FCR*) ar akumulatoru bateriju elektroenerģijas uzkrājēja sistēmu (*BESS*). Tai skaitā ir izstrādāta metodoloģija un veikti aprēķini par atjaunošanas rezerves ar manuālu aktivizēšanu (*mFRR*) sniegšanu, izmantojot elektrodu katlu.

Darba secinājumi sniedz galveno atziņu kopsavilkumu.

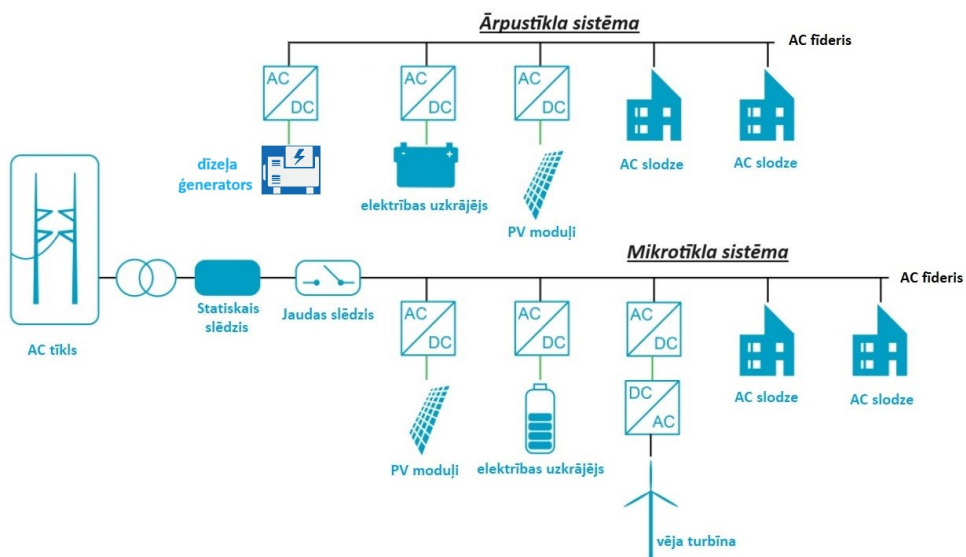
1. MĀJSAIMNIECĪBAS ĀRPUSTĪKLA ELEKTROAPGĀDES SISTĒMAS PARAMETRU NOTEIKŠANAS METODOLOĢIJA

1.1. Motivācija un priekšvēsture

Elektrifikācija var būt izmaksu ziņā efektīvs veids, kā cīnīties pret klimata pārmaiņām un sasniegt ES dekarbonizācijas mērķus [3]. Turklāt par elektrifikāciju var uzskatīt ne tikai elektroenerģijas lietotāju pieslēgšanu elektrotīklam, bet arī ārpustīkla sistēmām. Lai gan pasaulē nav vienotas ārpustīkla sistēmas definīcijas, šajā darbā tiks lietota šāda:

- ārpustīkla sistēma ir savstarpēji savienotu elektroenerģijas patērētāju, kontrolējamu slodžu, decentralizētu enerģijas avotu un enerģijas uzkrājēju kopa, kas ir atvienota no zemsprieguma elektrotīkla. Kopa darbojas kā neatkarīga, kontrolējama elektroapgādes sistēma un ir spējīga darboties neatkarīgā jeb salas režīmā.

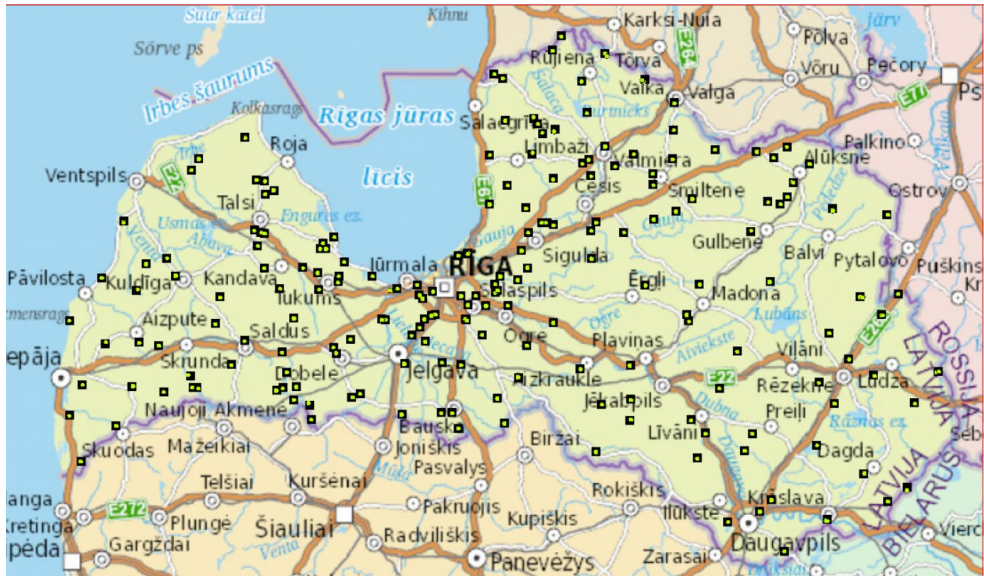
Ja šāda kopa ir pievienota zemsprieguma elektrotīklam un spēj darboties sinhroni ar sadales sistēmas operatora tīklu, šādu sistēmu sauc arī par mikrotīklu (1.1. att.).



1.1. att. Ārpustīkla un mikrotīkla elektroapgādes sistēmas.

Lietotājiem un elektroapgādes pakalpojumu sniedzējiem ārpustīkla vai mikrotīkla sistēma var piedāvāt vairākus ieguvumus, piemēram, samazināt enerģijas patēriņu (līdz ar to – arī izmaksas), samazināt ietekmi uz vidi, uzlabot elektroenerģijas drošumu, samazināt zudumus sadales tīklos, samazināt pārslodzes iespējamību, uzlabot sprieguma kvalitāti u. c. [4]. Ārpustīkla vai mikrotīkla elektroapgādes risinājumi varētu pozitīvi ietekmēt Latvijas lauku

atīstību, piemēram, izmantojot tos lauku reģionos ar garām sadales elektrolīnijām vai vietās bez esošas elektroapgādes (1.2. att.).

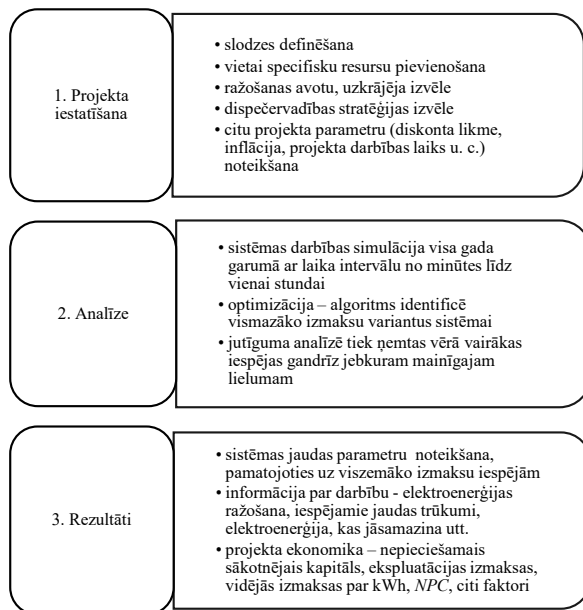


1.2. att. Ārpustīkla vai mikroģekla elektroapgādes risinājumu potenciālās vietas pie klientiem Latvijā [5].

Daudzviet pasaulē tiek uzskatīts, ka ārpustīkla un mikroģekla tehnoloģijas ir sadales elektrotīklu nākotne. Visā dzīvojamā sektorā ārpus pilsētu teritorijām ārpustīkla elektroenerģijas sistēmas sāk kļūt arvien atzītākas, tomēr šādu sistēmu plānošana no ekonomiskā un tehniskā viedokļa joprojām rada virkni jautājumu un problēmu. Bieži vien uzstādītas jaudas ziņā tās ir vai nu pārāk jaudīgas, vai arī nepietiekami jaudīgas, lai apmierinātu enerģijas pieprasījumu [6], [7].

1.1.1. Modelēšana, izmantojot programmatūras rīku

HOMER (saīsinājums no angļu val. – *Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources*) *Pro* programmatūra¹ ir ekonomiskās optimizācijas rīks, kas paredzēts ārpusētikla (*off-grid*) un pie tīkla pieslēgtu hibrīdo enerģosistēmu simulācijai un optimizācijai. Programmatūru var izmantot, lai pieņemtu lēmumus par optimālu resursu kombinācijas izvēli, sistēmas parametru konfigurāciju vai analizētu kapitāla un ekspluatācijas izmaksas enerģosistēmas plānošanai. *Homer Pro* darbības procesu varētu aprakstīt trīs vienkāršos posmos: 1) projekta iestatišana; 2) analīze; 3) rezultāti (1.3. att.).



1.3. att. *Homer Pro* procesa diagramma.

HOMER Pro mērķa funkcija tiek izmantota, lai minimizētu kopējās neto pašreizējās izmaksas (*NPC* – kas pazīstamas arī kā sistēmas izmaksas tās darbības laikā). *NPC* ietver kapitāla izmaksas, aizstāšanas izmaksas, ekspluatācijas un uzturēšanas (*O&M*) izmaksas, degvielas izmaksas, soda naudas par emisijām un elektroenerģijas iepirkšanas izmaksas no tīkla (pēdējās divas izmaksas šajā promocijas darbā netiks piemērotas). *NPC* ir galvenais ekonomiskais rezultāts un vērtība, pēc kuras *HOMER Pro* optimizācijas rezultātos tiek sarindotas visas sistēmas konfigurācijas. Lai aprēķinātu kopējās neto pašreizējās izmaksas (EUR), programmatūra izmanto 1.1. vienādojumu.

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann, tot}}{CRF(i, N_{proj})}, \quad (1.1)$$

¹ <https://homerenergy.com/products/pro/index.html>.

kur $C_{\text{ann,tot}}$ – kopējās gada izmaksas (EUR); i – gada reālā diskonta likme (%); N_{proj} – projekta darbības laiks (gados); $CRF(i, N)$ – funkcija, kas atgriež kapitāla atgūšanas koeficientu, ko aprēķina pēc 1.2. vienādojuma.

$$CRF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{i(1+i)^N - 1}, \quad (1.2)$$

kur i – reālā diskonta likme; N – gadu skaits. Savukārt, i aprēķina, izmantojot 1.3. vienādojumu.

$$i = \frac{i' - f}{1 + f}, \quad (1.3)$$

kur i' – nominālā diskonta likme (likme, par kādu varētu aizņemties naudu); f – paredzamais inflācijas līmenis. Piemēram, ja nominālā diskonta likme ir 8 % un paredzamā inflācija ir 3,5 %, tad gada reālā diskonta likme ir 4,35 %. Šādi definējot reālo diskonta likmi, ekonomiskajā analīzē netiek ņemta vērā inflācija [8].

Veidojot projektu, programmatūras lietotājam jāizvēlas dispečerēšanas stratēģija, lai noteiktu, kā ģenerācija var nodrošināt slodzi. Dispečerēšanas stratēģiju var definēt kā noteikumu kopumu, kas attiecas uz enerģijas plūsmām starp ārpustīkla sistēmas komponentēm. Programmatūra piedāvā dažādas dispečerēšanas stratēģijas, piemēram, cikla uzlādi, sekošanu slodzei, kombinēto dispečerēšanu. Katrai dispečervadības stratēģijai ir savi darbības principi.

1. Sekošana slodzei (LF) – kad nepieciešams ģenerators, tas ražo tikai tik daudz enerģijas, lai apmierinātu pieprasījumu. Tas cenšas neuzlādēt akumulatoru ar dīzeļģeneratoru, ja vien netiek sasniegta minimālā ģenerators jauda. Sekošana slodzei mēdz būt optimālāka ārpustīkla sistēmās ar lielu atjaunojamās enerģijas daudzumu, kas dažkārt pārsniedz slodzi.

2. Cikla uzlāde (CC) – kad nepieciešams dīzeļģenerators, tas darbojas ar pilnu jaudu, un jaudas pārpalikums uzlādē akumulatoru. Tas pārtrauc akumulatora uzlādi pie akumulatora uzlādes stāvokļa iestatījuma. Cikla uzlāde ir optimālāka ārpustīkla sistēmās ar nelielu atjaunojamās enerģijas daudzumu vai bez tā.

3. Kombinētā uzlādes dispečerēšanas stratēģija (CS) – intelligenti pārslēdzas starp sekošanu slodzei un cikla uzlādes stratēģiju, tādējādi efektīvāk izmantojot rezerves dīzeļģeneratoru, tā uzlabojot veiktspēju, salīdzinot ar cikla uzlādes un sekošanu slodzei dispečerēšanas stratēģijām [8].

1.2. Metodoloģija

Šajā gadījumā tiks aplūkota mājsaimniecība kā elektroenerģijas patērētājs, kam nav piekļuves elektroīklam un kam ir augstas pieslēguma izmaksas. 1.4. attēlā redzama gadījuma izpētes blokhēma.

1. Tips	Ārpustikla		
2. Ārpustikla alternatīvas	1.alternatīva: vēja turbīna, saules paneļi, dīzeļģenerators, BESS	2.alternatīva: saules paneļi, dīzeļģenerators, BESS	3.alternatīva: vēja turbīna, dīzeļģenerators, BESS
3. Dispečerēšanas stratēģija	Sekošana slodzei	Cikla uzlāde	Kombinēto stratēģija
4. Dīzeļģenerators darba ierobežojumi	Nav ierobežojumu	Ar 1000 stundu ierobežojumu gadā	
5.1. Jūtīguma analīze: degvielas cena	1 EUR/L	1,2 EUR/L	1,4 EUR/L
5.2. Jūtīguma analīze: jaudas trūkums	0 %	2 %	5 %

1.4. att. Gadījuma izpētes blokhēma.

Tiek salīdzinātas dažādas alternatīvas, lai noteiktu optimālāko risinājumu izvēlētajai mājsaimniecībai. Liela uzmanība tiek pievērsta šādu kritēriju nodrošināšanai: vislielākais atjaunojamo energoresursu izmantojums; vismazākais elektroenerģijas pārpalikums; viszemākās sistēmas izmaksas. Atkarībā no enerģijas avotiem tiek pieņemtas trīs ārpustikla alternatīvas. Pirmā alternatīva ietver vēja turbīnu, saules paneļus, rezerves dīzeļģeneratoru un akumulatoru enerģijas uzglabāšanas sistēmu (*BESS*; litija jonu tipa). Otrajā alternatīvā ir saules paneļi, rezerves dīzeļģenerators un *BESS*. Trešā alternatīva ietver vēja turbīnu, rezerves dīzeļģeneratoru un *BESS*. Ņemot vērā mājsaimniecības atrašanās vietu, tiek iegūti attiecīgie noklusējuma dabas resursu dati. Tika analizētas visas ārpustikla sistēmas iekārtu komponentes un visu alternatīvu izmaksas, izmantojot trīs dažādas dispečerēšanas stratēģijas ar un bez noteiktiem rezerves dīzeļģenerators darbības ierobežojumiem. Ģenerators darbības laika ierobežojums ir noteikts 1000 h gadā (lai pagarinātu ģenerators kalpošanas laiku, nodrošinātu vides un komforta faktoros). Turklāt dīzeļģenerators degvielas patēriņš un sākotnēji nepieciešamie ieguldījumi alternatīvām tiek analizēti ar jutīguma analīzes palīdzību, kur ir pārbaudītas degvielas cenu izmaiņas un dažādi jaudas deficīta līmeņi.

Izmantojot ievades datus, kas redzami 1.4. attēlā un turpmākajās apakšnodalās, tiek analizētas visas ārpustikla alternatīvas ar attiecīgajiem scenārijiem (kopā 162 simulācijas).

1.2.1. Mājsaimniecības atrašanās vieta un slodze

Ārpustīkla sistēmas atrašanās vieta ir Latvijā, netālu no galvaspilsētas Rīgas. Modelēšanas ieejas dati par saules radiāciju, temperatūru un vēja resursiem izvēlētajā vietā ir iegūti *Homer Pro* programmatūras datubāzēs. Ierosinātajā vietā maksimālā saules radiācija ir 5,5 (kWh/m²/dienā) jūnijā, minimālā saules radiācija – 0,42 (kWh/m²/dienā) decembrī, gada vidējā saules radiācija – 2,87 (kWh/m²/dienā). Maksimālā temperatūra jūlijā ir 17,61 °C, minimālā temperatūra februārī ir – 5,56 °C, gada vidējā temperatūra – 5,79 °C. Maksimālais vēja ātrums 50 m augstumā ir 7,68 m/s janvārī, minimālais vēja ātrums – 5,4 m/s jūlijā, gada vidējais vēja ātrums – 6,54 m/s. Vēja ātrums mājsaimniecības atrašanās vietā ir iegūts 50 m atskaites augstumā, mājsaimniecības vēja turbīnas noteiktais augstums – 10 m. Lai ekstrapolētu vēja ātrumu noteiktajā augstumā, tika izmantots *Homer Pro* logaritmiskais vēja ātruma profils. Šim gadījuma pētījumam ir savākti reāli mājsaimniecības stundas slodzes dati, kas integrēti programmatūrā un izmantoti simulācijās. Mājsaimniecību vidējais dienas elektroenerģijas pieprasījums ir 30,27 kWh, kas gadā sasniedz 11,049 MWh. Mājsaimniecībā ir divas personas. Par lielākajiem elektroenerģijas patērētājiem šajā mājsaimniecībā var uzskatīt siltumsūkni, ko izmanto siltuma un karstā ūdens apgādei, un elektromobili transporta vajadzībām. Šāds mājsaimniecības veids atbilst elektrifikācijas mērķiem, kam ir izšķiroša nozīme, lai sasniegtu Eiropas Savienības dekarbonizācijas politikas mērķus.

1.2.2. Ārpustīkla elektroapgādes sistēmas parametri

Gadījuma izpētes pamatprojekta ekonomiskā raksturojuma pieņēmumi ir šādi: 10 gadu projekta darbības laiks, 8 % diskonta likme, 2 % paredzamā inflācija. Aprīkojuma kapitālieguldījumu (*CAPEX*), tostarp uzstādīšanas, ekspluatācijas un uzturēšanas izmaksas (*OPEX*), kā arī citi tehniskie aspekti tika iegūti, veicot tirgus izpēti un apspriežoties ar ekspertiem (1.2. tab.).

1.2. tabula. Ārpustīkla komponentu ievades dati

Aprīkojums	CAPEX, ieskaitot uzstādīšanu	OPEX (EUR/gadā)	Kalpošanas laiks	Citi īpaši nosacījumi
Saules paneļi	1250 EUR/kW	10	25 gadi	pazeminājuma koeficients – 10 %
Vēja turbīna	3500 EUR/kW	70	20 gadi	vēja turbīnas augstums – 10 m
Rezerves dīzeļģenerators	600 EUR/kW	0,03 (EUR/o p.hr)	15 000 stundas	minimālā slodzes attiecība – 25 %, dīzeļģenerators darba ierobežojums – 2172 litru dīzeļdegvielas (kas ir aptuveni 1000 stundas, kad nominālā ģenerators izejas jauda ir 6,6 kW)
BESS	540 EUR/kW un EUR/ kWh	10	15 gadi	minimālais uzlādes stāvoklis (SoC) – 20 %, sākumā SOC – 100 %, elektroenerģijas caurlaides spēja (kWh) – 3000
Pārveidotājs	750 EUR/kW	0	15 gadi	invertora efektivitāte (<i>DC-AC</i>) – 95 %, taisngrieža efektivitāte (<i>AC-DC</i>) – 85 %, taisngrieža jauda – 75 %
Kontrolieris	1300 EUR/kW	0	25 gadi	iestatītais uzlādes stāvoklis – 80 %.

1.3. Trīs alternatīvu scenāriju simulāciju rezultāti

Sistēmas aprīkojuma parametri (kW un kWh) vai iespējamie ārpusstikla aprīkojuma komponentu parametri tiek noteikti, ņemot vērā visas dispečerēšanas stratēģijas, scenāriju ar un bez dīzeļģeneratora ierobežojuma un dažādās degvielas cenas un pieļaujamās jaudas trūkuma līmeņus.

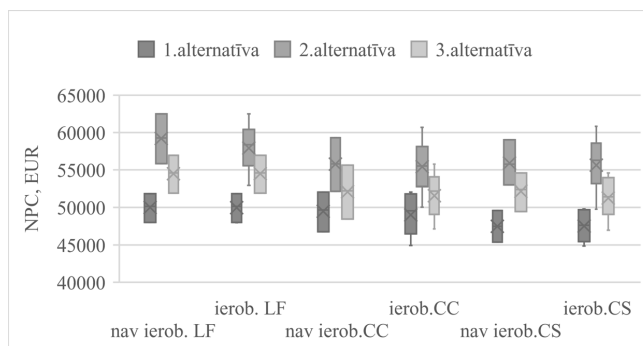
1.3. tabulā apkopotas vidējās aprīkojuma parametru vērtības katrai alternatīvai. Lielākās atšķirības ir vērojamas attiecībā uz BESS uzglabāšanas ietilpību. Otrajai alternatīvai būtu nepieciešama vislielākā uzglabāšanas ietilpība, savukārt trešajai alternatīvai būtu nepieciešama vismazākā. Salīdzinot ar otro un trešo alternatīvu, pirmajai alternatīvai būtu vajadzīga mazāka saules paneļu un vēja turbīnu jauda.

1.3. tabula. Vidējie aprīkojuma parametri visām alternatīvām

Sistēmas aprīkojums	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3
Saules paneļi (kW)	4,0	9,4	0
Vēja turbīna (kW)	3,0	0	4,0
Dīzeļģenerators (kW)	11,0	11,0	11,0
BESS ietilpība (kWh)	22,0	28,3	17,8
Pārveidotājs (kW)	4,7	5,0	5,0

Šajā gadījumā NPC izmaksas 10 gadu darbības laikā ietver kapitāla izmaksas, ekspluatācijas un uzturēšanas izmaksas, kā arī dīzeļdegvielas izmaksas. 1.5. attēlā redzami NPC rezultāti atkarībā no trim dažādām dispečerēšanas stratēģijām ar un bez dīzeļģeneratora darbības ierobežojumiem.

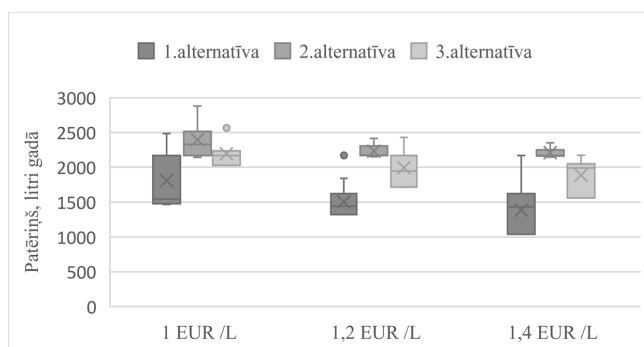
Pirmās alternatīvas NPC ir 44 863–52 066 EUR robežās. Pirmā alternatīva ar kombinēto uzlādes dispečerēšanas stratēģiju (CS) un dīzeļģeneratoru darbības ierobežojumiem ir izrādījusies visrentablākā (zemākā NPC vērtība), salīdzinot ar visiem pārējiem scenārijiem. 1.5. attēlā redzams, ka dispečerēšanas stratēģijas ietekme var būt nozīmīgāka nekā degvielas ierobežojumi. Tajā pašā laikā nevar noliegt, ka scenārijiem ar dīzeļģeneratoru darbības ierobežojumiem ir ietekme uz NPC vērtībām. Ietekme ir, un to var redzēt, kad NPC vērtības dažos gadījumos ir paplašinātas abos virzienos. Pareizi piemēroti ģeneratoru ierobežojumi var arī samazināt NPC.



1.1. att. NPC rezultāti atkarībā no dažādām dispečerēšanas stratēģijām.

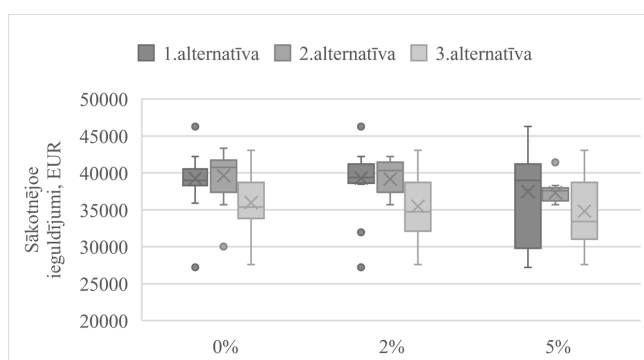
Trešās alternatīvas *NPC* ir 46 968–56 947 EUR robežās, otrās alternatīvas *NPC* – 49 783–62 506 EUR robežās. No *NPC* viedokļa var secināt, ka otrajai un trešajai alternatīvai piemērotāka varētu būt cikla uzlāde (*CC*) un kombinētā uzlādes dispečerēšanas stratēģija (*CS*). Tā kā tās abas ir salīdzinoši labākas nekā sekošanas slodzei dispečerēšanas stratēģija.

Veicot jutīguma analīzi, noskaidrota 1.6. attēlā redzamā degvielas cenas ietekme uz dīzeļģeneratora degvielas patēriņu. Palielinoties cenai no 1 EUR/L līdz 1,4 EUR/L, degvielas patēriņa vidējā vērtība pirmajai alternatīvai samazinās no 1806 L līdz 1386 L gadā.



1.2. att. Dīzeļģeneratora patēriņš atkarībā no degvielas cenas.

Tiek salīdzināts viena gada patēriņš visām ārpusstikla alternatīvām. Pirmkārt, jutīguma analīze liecina, ka, tiklīdz degvielas cena pieaug, degvielas patēriņam ir tendence samazināties. Otrkārt, dispečerēšanas stratēģijas izvēle, ģeneratoru ierobežojumi un jaudas deficīta līmenis var salīdzinoši lielā mērā ietekmēt nepieciešamo degvielu pat viena ārpusstikla alternatīvas līmeņa ietvaros. Dažos gadījumos tas var pārsniegt tūkstošiem litru gadā. Salīdzinot sākotnējās ārpusstikla investīciju izmaksas atkarībā no jaudas deficīta līmeņiem (1.7. att.), ir iespējams novērtēt jaudas deficīta ietekmi.

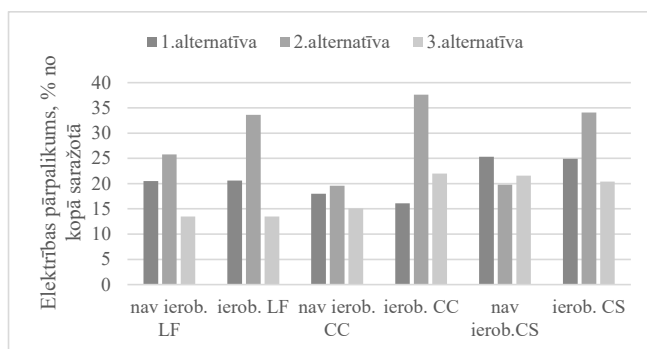


1.3. att. Sākotnējās ārpusstikla investīciju izmaksas atkarībā no jaudas deficīta.

Lielāks jaudas trūkums (5%), visticamāk, nozīmēs, ka ārpusstikla sistēmas izveidei varētu būt nepieciešami mazāki sākotnējie ieguldījumi. Tajā pašā laikā 1.7. attēlā redzams, ka praktiski

nav atšķirības starp jaudas trūkuma neesamību (0 %) un salīdzinoši nelielu jaudas trūkumu (2 %).

Papildus visām iepriekš veiktajām analizēm tiek analizēta arī tā sauktā “pārpalikuma elektroenerģija”. Elektroenerģijas pārpalikums rodas tad, kad ārpusstikla sistēmā tiek saražots elektroenerģijas pārpalikums (vai nu ar dīzeļģeneratoru, vai no atjaunojamiem avotiem) un akumulatori nespēj uzņemt visu elektroenerģiju. Elektroenerģijas pārpalikums procentos (%) no kopējās saražotās enerģijas sešām simulācijām, kurās izmantotas trīs ārpusstikla alternatīvas un trīs dažādas dispečeru stratēģijas ar un bez dīzeļģeneratora darbības ierobežojumiem, redzams 1.8. attēlā.



1.4. att. Elektrības pārpalikums visās ārpusstikla alternatīvās.

Vidēji mazākais “elektrības pārpalikums” radās trešajai alternatīvai – 17,68 % (kas ir ap 2670 kWh gadā). Nākamā ar 20,9 % (jeb 3235 kWh) ir pirmā alternatīva, savukārt lielākais “elektrības pārpalikums” bija otrajai alternatīvai – 28,41 % (jeb 5108 kWh). Tika secināts, ka, ja ārpusstikla sistēmā ietver *PV* paneļus, ir ļoti svarīgi pareizi noteikt to jaudu un saskaņot to ar atbilstošu uzglabāšanas ietilpību.

2. JAUNS MATEMĀTISKAIS MODELIS MĀJSAIMNIECĪBAS ĀRPUSTĪKLA SISTĒMAS SIMULĀCIJAI

2.1. Motivācija un priekšvēsture

Šīs nodaļas galvenais mērķis ir ieviest jaunu vairāku mērķu simulācijas rīku, lai novērtētu ārpustīkla sistēmu veiktspēju pie dažādām dispečerēšanas pieejām, kas vēl vairāk palielinātu zināšanas par šādām sistēmām un uzlabotu jau esošo simulācijas rīku elastību. Izstrādātais rīks tiek izmantots, lai pamatotu ārpustīkla sistēmas iekārtu sastāvu un jaudu reālam pilotprojektam, par ko tiks runāts nākamajā nodaļā. Motivācija jauna vairāku mērķu simulācijas rīka izveidei ir radīt rīku, lai ar to būtu iespējams pārbaudīt iekārtu parametrus ļoti specifiskiem gadījumiem un vizualizēt sistēmas darbību konkrētām dienām. Tāpat to var izmantot, lai apstiprinātu esošo programmatūras rīku rezultātus.

2.2. Metodoloģija

2.2.1. Modelis mājsaimniecības ārpustīkla sistēmas simulācijai

Šajā apakšnodaļā aprakstītais simulācijas modelis tika izstrādāts reālas ārpustīkla sistēmas novērtēšanai. Pirms eksperimentālās ārpustīkla sistēmas izpētes (detalizētāk nākamajā nodaļā) informācija par sistēmas jaudu noteikšanu bija diezgan nepietiekama. Modelis noteica nepieciešamo ražošanas iekārtu jaudu un uzglabāšanas iekārtu ietilpību, kas palīdzēja novērtēt ārpustīkla projekta atmaksāšanos un ļāva vizualizēt ekspluatācijas apstākļus.

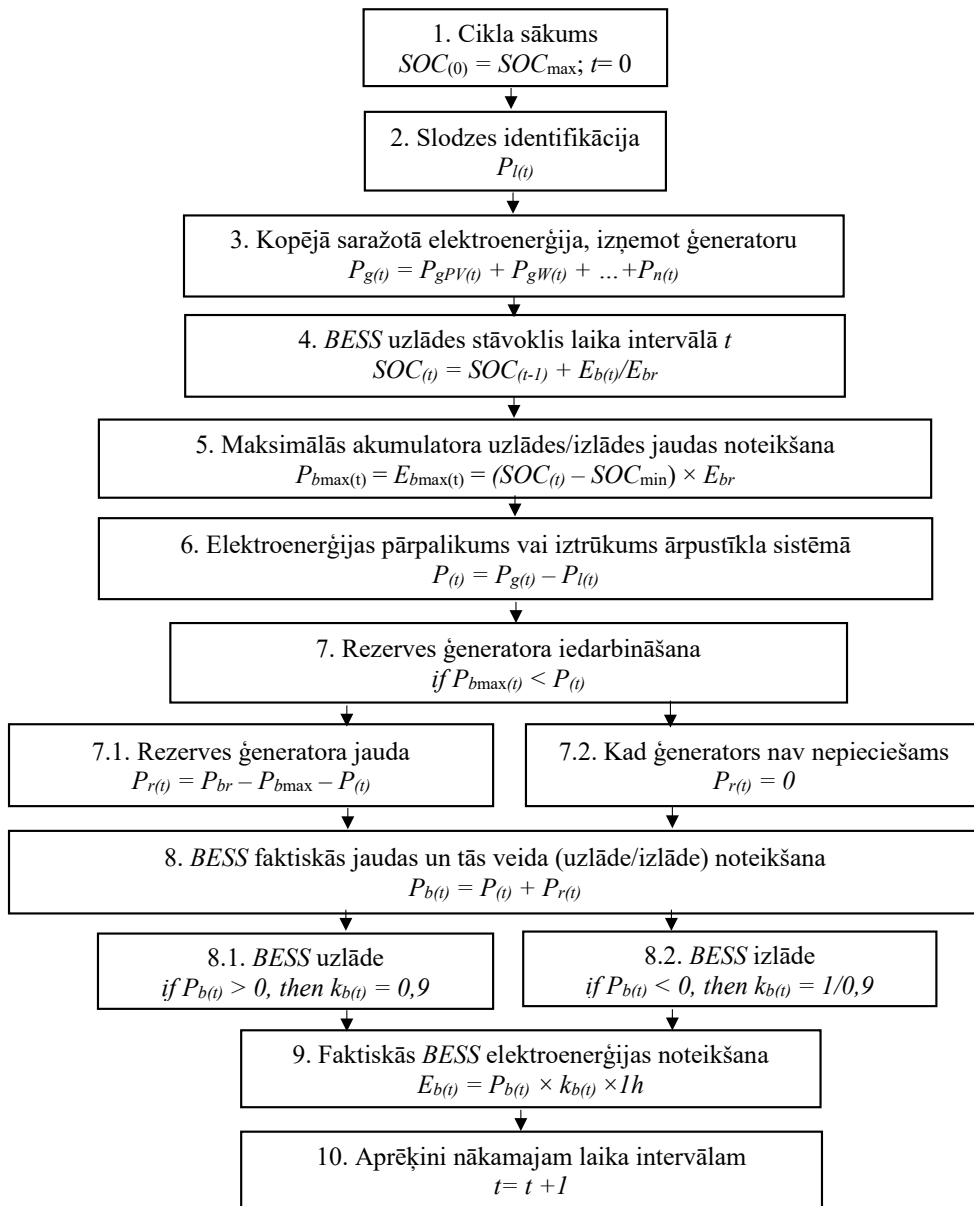
Modelis ir piemērots ārpustīkla sistēmai, kas ietver saules fotoelementu, vēja turbīnas, akumulatora enerģijas uzkrāšanas sistēmas (*BESS*) un rezerves ģeneratoru. Šajā nodaļā izklāstītais modelis ir veidots kā algoritmu kopums, kas nosaka ārpustīkla risinājuma darbību atbilstoši slodzei un elektroenerģijas apgādes jaudas līdzsvaram, kā norādīts 2.1. tabulā un 2.1. attēlā.

2.1. tabula. Terminoloģijas saīsinājumi

Parametrs	Saīs.	Parametrs	Saīs.	Parametrs	Saīs.
Slodze (kW)	P_l	Maks. <i>BESS</i> enerģijas daudzums (kWh)	E_{bmax}	<i>PV</i> moduļu jauda (kW)	P_{gpv}
Ražošanas jauda (kW)	P_g	Min. <i>BESS</i> enerģijas daudzums (kWh)	E_{bmin}	Vēja ģeneratoru jauda (kW)	P_{gwg}
Citas ražošanas jaudas (kW)	P_n	<i>BESS</i> uzlādes stāvoklis (%)	<i>SOC</i>	Rezerves ģeneratora jauda (kW)	P_r
Akumulatora nominālā jauda (kW)	P_{br}	Maks. <i>BESS</i> uzlādes stāvoklis (%)	SOC_{max}	Minimāla rezerves ģeneratora jauda	P_{rmin}
Akumulatora nominālā ietilpība (kWh)	E_{br}	Min. <i>BESS</i> uzlādes stāvoklis (%)	SOC_{min}	Izlīdzinātās elektroenerģijas izmaksas, EUR/kWh	<i>LCOE</i>

Modelis ir izstrādāts tā, lai nodrošinātu visaugstāko (gandrīz 100 %) elektroenerģijas pieejamību, ņemot vērā elektroenerģijas ražošanas avotu (sauli, vēju u. c.), kas pieslēgti ārpustīklam, stohastisko dinamiku. Tādējādi ir nepieciešama elektroenerģijas uzkrāšana un rezerves ģenerators.

2.1. attēlā redzama aprakstītās ārpustīkla sistēmas darbības secības blokshēma.

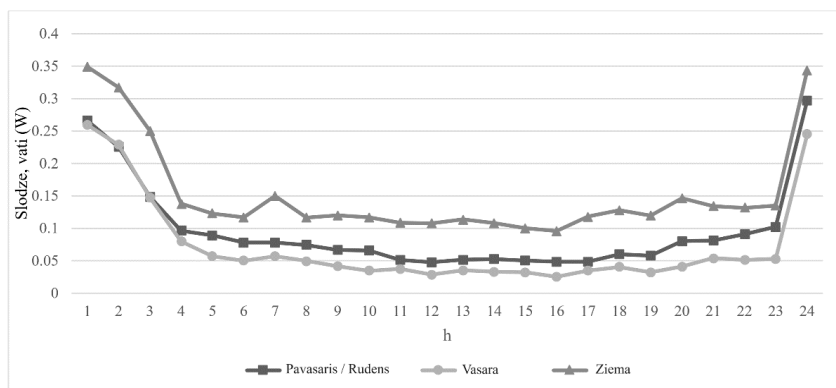


2.1. att. Ārpustīkla sistēmas darbības modeļa principi.

Ārpustīkla sistēmas gada izmaksas un izlīdzinātās elektroenerģijas izmaksas (*LCOE*) tiek noteiktas atsevišķā algoritmā. Pirms algoritma izmantošanas ir nepieciešams konfigurēt modeli, lai iestatītu nepieciešamo dispečerēšanas stratēģiju un ievades datus.

2.3. Konkrēta gadījuma izpēte

Konkrētā gadījuma izpētei tiek apkopoti reālas mājsaimniecības stundas slodzes dati, kas tika minēti arī 1.2.1. apakšnodaļā. 2.2. attēlā redzama šīs mājsaimniecības tipiskā diennakts slodzes līkne (24 stundu periodā) ar siltumsūkni un elektromobiļa uzlādi. Lielākais elektroenerģijas daudzums tiek patērēts nakts laikā, kamēr tiek uzlādēts elektriskais transportlīdzeklis. Šajā gadījumā ir ļoti svarīgi izvēlēties piemērotus ražošanas un elektroenerģijas uzkrājēju risinājumus. Nolasot rādījumus, mājsaimniecība bija pieslēgta sadales sistēmas operatora tīklam, tāpēc enerģijas pieejamība nebija problēma un vienmēr atbilda pieprasījumam. Tādējādi pieslēgums ļauj mājsaimniecībai neapsvērt slodzes novirzīšanu.



2.2. att. Slodzes līkne relatīvās vērtībās trīs sezonās.

Kā redzams 2.2. tabulā, tika izvērtētas piecas alternatīvas ar dažādiem iekārtu parametriem. Pirmās trīs parametru alternatīvas ir ņemtas no iepriekšējās nodaļas par ārpustīkla sistēmas komponentu parametru noteikšanu ar *Homer* programmatūru. Rezerves ģenerators jauda ir vismaz 11 kW, ņemot vērā to, ka sistēmai jāsedz maksimālā dienas slodze (kas ir aptuveni 9 kW), tādējādi nodrošinot lielāku piegādes drošību [9]. Lai atrastu ilgtspējīgāko un ekonomiski visefektīvāko risinājumu, tika izstrādāti divi papildu parametru noteikšanas varianti.

2.2. tabula. Vidējie iekārtu parametri visām alternatīvām

Sistēmas aprīkojums	1. alternatīva	2. alternatīva	3. alternatīva	4. alternatīva	5. alternatīva
BESS (kW)	4,7	5	5	8,2	8,2
BESS (kWh)	22	28,3	17,8	30	16
Saules paneļi (kW)	4	9,4	0	6,2	3
Vēja ģenerators (kW)	3	0	4	2	2
Rezerves ģenerators (kW)	11	11	11	13	13

Šajā gadījumā pētījumā rezultāti ir parādīti šādām alternatīvām: trīs dispečerēšanas stratēģijas; dažādi parametru varianti; jaudas avoti *PV*; vējš; *BESS*; rezerves ģenerators; kombinētā dispečerēšanas stratēģija; jaudas deficīts.

2.4. Rezultāti

2.3. tabulā apkopoti rezultāti visām piecām iekārtu parametru alternatīvām, ņemot vērā trīs dažādas dispečerēšanas stratēģijas – sekošana slodzei (*LF*), cikla uzlāde (*CC*), kombinētā uzlādes dispečerēšanas stratēģija (*CS*).

2.3. tabula. Modelēšanas rezultāti

Alternatīva	1.	2.	3.	4.	5.
Kombinētā dispečerēšanas stratēģija (CCDS)					
Rezerves ģenerators darbības stundas	1277	1234	1448	778	953
Atjaunojamās enerģijas pārpalikums, kWh	1290	3990	71	2083	1029
Pārpalikums salīdz. ar kopējo atjaun. enerģijas apjomu, %	18 %	40 %	2 %	26 %	20 %
<i>LCOE</i> , EUR/kWh	0,71	0,73	0,73	0,79	0,70
Sekošana slodzei stratēģija (LFS)					
Rezerves ģen. stundas	2249	2276	2804	1923	2333
Atjaunojamās enerģijas pārpalikums, kWh	1073	3646	46	1870	676
Pārpalikums salīdz. ar kopējo atjaun. enerģijas apjomu, %	13 %	33 %	1 %	21 %	10 %
<i>LCOE</i> , EUR/kWh	0,81	0,83	0,87	0,91	0,85
Cikla uzlādes stratēģija (CCS)					
Rezerves ģen. stundas	1406	1355	1561	949	1248
Atjaunojamās enerģijas pārpalikums, kWh	2273	5336	293	2999	1408
Pārpalikums salīdz. ar kopējo atjaun. enerģijas apjomu, %	32 %	52 %	7 %	37 %	26 %
<i>LCOE</i> , EUR/kWh	0,78	0,80	0,80	0,87	0,83

Līdzīgi kā *Homer Pro* programmatūras gadījumā, izveidojot projektu, izmantojot simulācijas rīku, ir iespējams konfigurēt dispečerēšanas stratēģijas, lai noteiktu darbības principus, kā ģenerācija var nodrošināt slodzi.

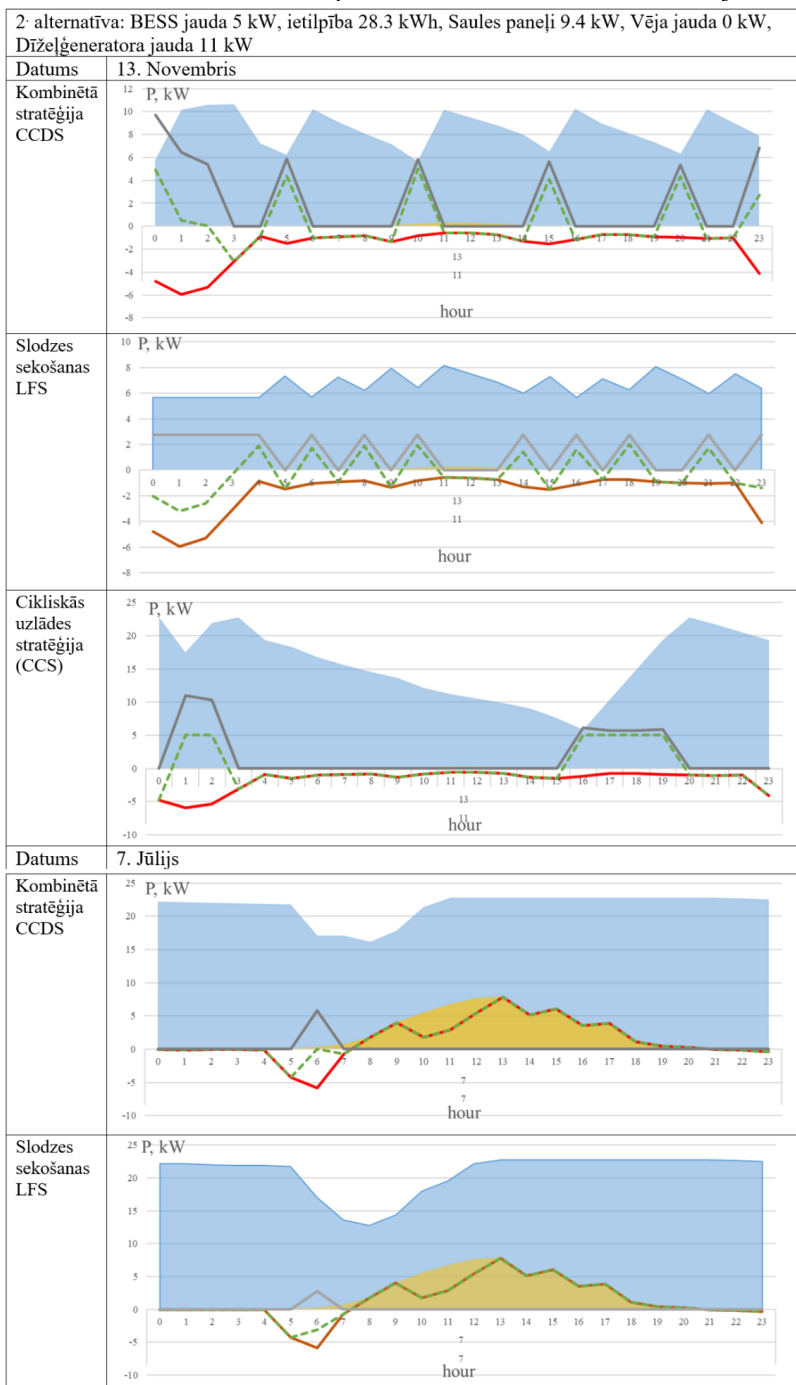
1. Kombinētā uzlādes dispečerēšanas stratēģija (CCDS) – inteliģenti pārslēdzas starp sekošanu slodzei un cikla uzlādes stratēģiju. Tādējādi tā var uzlabot veiktspēju, salīdzinot ar cikla uzlādes un sekošanu slodzei dispečerēšanas stratēģijām, efektīvāk izmantojot rezerves ģeneratoru. Līdzvērtīga kombinētās uzlādes dispečerēšanas stratēģijai (CS) no iepriekšējās nodaļas.

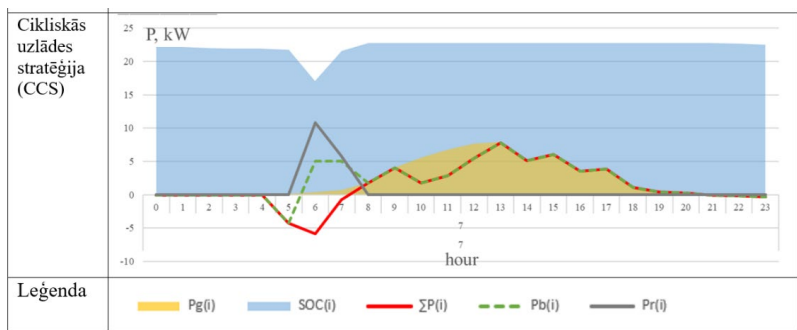
2. Sekošana slodzei stratēģija (LFS) – kad ģenerators ir nepieciešams, tas ražo tikai tik daudz enerģijas, lai apmierinātu pieprasījumu. Tā cenšas neuzlādēt akumulatoru ar rezerves dīzeļģeneratoru, ja vien netiek sasniegta minimālā ģenerators jauda. Sekošana slodzei mēdz būt optimālāka ārpusstikla sistēmās ar lielu atjaunojamās enerģijas daudzumu, kas dažkārt pārsniedz slodzi. Līdzvērtīga sekošanai slodzei (LF) stratēģijai no iepriekšējās nodaļas.

3. Cikla uzlādes stratēģija (CCS) – kad vien ir nepieciešams rezerves ģenerators, tas darbojas ar pilnu jaudu, un jaudas pārpalikums uzlādē akumulatoru. Tas pārtrauc akumulatora uzlādi pie akumulatora uzlādes stāvokļa iestāšanās. Cikla uzlāde parasti ir optimālāka ārpusstikla sistēmās ar nelielu atjaunojamās enerģijas daudzumu vai bez tā. Līdzvērtīga cikla uzlādes (CC) stratēģijai no iepriekšējās nodaļas.

Lai labāk izprastu, kā dažādas dispečerēšanas stratēģijas ietekmē ģenerējošo avotu darbību un *BESS* uzlādi/izlādi, 2.4. tabulā sniegta ārpusstikla sistēmas darbības vizualizācija vasaras un ziemas dienā vienai iekārtu izmēru alternatīvai un trim dispečerēšanas stratēģijām. Diagrammās parādīti enerģijas avoti un to ģenerācijas apjomi, elektroenerģijas uzkrājēja ietilpība, slodze un tās raksturs, baterijas jauda un tās raksturs, rezerves ģenerators jauda. Datumi tika izvēlēti tā, lai atspoguļotu ekstrēmās situācijas, kad bija atjaunojamo energoresursu ģenerācijas pārpalikums vai deficīts. Novērojuma periodā, 7. jūlijā, bija zema vēja ražošanas jauda, savukārt 13. novembrī – zema saules paneļu jauda. Apskatot 2. alternatīvu, ir skaidri redzams, ka mikrotīkla priekšrocības, ko sniedz diversificēti ražošanas avoti, ļauj samazināt rezerves ģeneratoru noslodzi un maksimāli palielināt atjaunojamo energoresursu īpatsvaru. Dispečerēšanas stratēģijas visvairāk ietekmē *LCOE*.

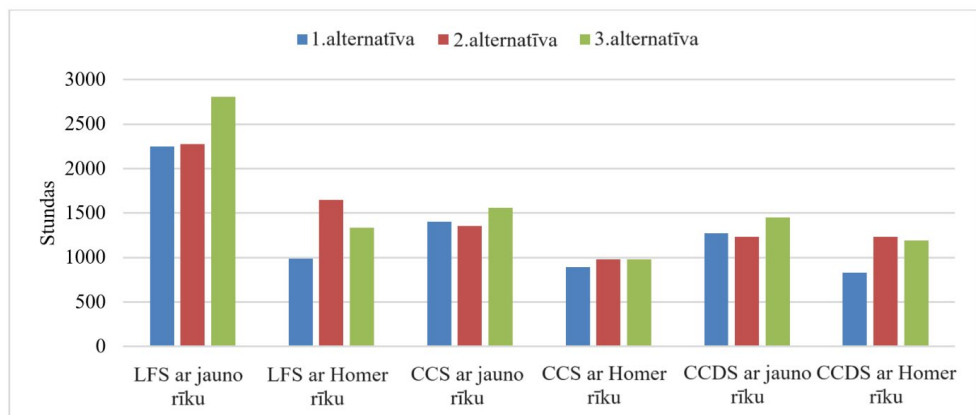
2.4. tabula. Ārpusfīkla sistēmas darbības vizualizācija. 2. alternatīva





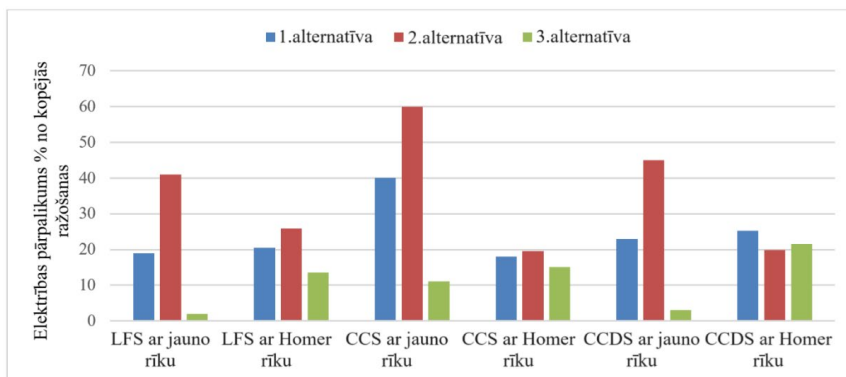
Papildus iepriekš veiktajai analīzei nākamajos trīs attēlos ir veikts jaunā simulācijas rīka un programmatūras *Homer Pro* rezultātu salīdzinājums.

Pirmkārt, tiek analizētas rezerves ģeneratora darbības stundas. Tā kā ir jāizvairās no rezerves ģeneratora saražotās elektroenerģijas izmantošanas, ja tā vietā var izmantot atjaunojamo enerģiju, ir jāpievērš uzmanība rezerves ģeneratora darbības stundām. Kā redzams 2.3. attēlā, visās alternatīvās un dispečerēšanas stratēģijās jaunais rīks uzrāda vairāk rezerves ģeneratora darbības stundu nekā *Homer Pro* programmatūra. Lielākā atšķirība ir novērojama sekošanas slodzei stratēģijā (*LFS*). Tomēr abi rīki rāda, ka ģeneratora stundas būs vismazākās 1. alternatīvai kombinētās uzlādes dispečerēšanas stratēģijā (*CCDS*).



2.3. att. Rezerves ģeneratora darbības stundas.

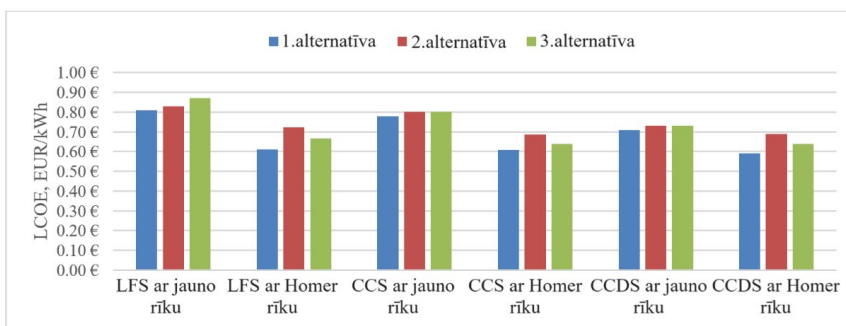
Otrkārt, tiek analizēts elektroenerģijas pārpalikums. Elektroenerģijas pārpalikums rodas tad, kad ārpus tīkla sistēmā tiek saražots elektroenerģijas pārpalikums (vai nu no rezerves ģeneratora, vai no atjaunojamiem avotiem) un akumulators vai slodze nespēj uzņemt visu elektroenerģiju. Elektroenerģijas pārpalikums procentos (%) no kopējās saražotās elektroenerģijas apjoma trīs ārpus tīkla sistēmas alternatīvām un trim dažādām dispečerēšanas stratēģijām redzams 2.4. attēlā.



2.4. att. Elektroenerģijas pārpalikums ārpustīkla sistēmās.

Vidēji abiem rīkiem vismazāko “elektroenerģijas pārpalikumu” uzrādīja trešā alternatīva – 10,03 %, kam sekoja pirmā alternatīva (21,13 %) un otrā alternatīva (31,7 %). Lai gan elektroenerģijas pārpalikums (%) starp modelēšanas rīkiem atšķiras (jo īpaši alternatīvai, kas ietver vēju), kopējā tendence ir vienāda, un tas liecina, ka, ja ārpustīkla sistēma ietver PV paneļus, tad ir būtiski precīzi noteikt paneļu jaudu un saskaņot to ar atbilstošu uzkrājēja elektroenerģijas ietilpību.

Visbeidzot, 2.5. attēlā tiek salīdzinātas trīs alternatīvas attiecībā uz izlīdzinātajām elektroenerģijas izmaksām kā vidējām izmaksām par kWh sistēmas saražotās lietderīgās elektroenerģijas. Iepriekšējā publikācijā netika aplūkota *LCOE*, bet tika izmantoti simulācijās iegūtie rezultāti.



2.5. att. Elektroenerģijas izlīdzinātās izmaksas visām ārpustīkla sistēmas alternatīvām.

Kā redzams 2.5. attēlā, jaunā rīka vidējās izmaksas ir no 0,72 EUR/kWh līdz 0,84 EUR/kWh, savukārt *Homer Pro* programmatūras gadījumā tās svārstās no 0,64 EUR/kWh līdz 0,67 EUR/kWh. Rezultāti atšķiras jaunajā rīkā ieviesto emisiju izmaksu un pašu modeļu atšķirību dēļ. Kopumā abi simulācijas rīki uzrāda līdzīgas tendences, kas apstiprina un validē to precizitāti.

3. REĀLA ĀRPUSTĪKLA SISTĒMAS PROJEKTA ANALĪZE LATVIJĀ

3.1. Motivācija un priekšvēsture

Šajā nodaļā tiek pieņemts, ka autonoma ārpusstīkla sistēma ir savstarpēji savienotu kontrolējamu un nekontrolējamu mājsaimniecību slodžu, decentralizētu enerģijas avotu un enerģijas uzkrāšanas ierīces kopums, kas nav savienots ar elektrotīklu. Tas nozīmē iekārtu kopu, kas darbojas neatkarīgi, tā saucamajā salas režīmā.

Sākotnēji tika izveidots īpašs matemātiskais modelis, lai izvēlētos enerģijas avotus, noteiktu iekārtu parametrus un turpinātu pārbaudīt šīs ārpusstīkla sistēmas darbību Latvijas klimatiskajos apstākļos. Tādējādi šajā nodaļā autors koncentrējas uz šīs reālās autonomās ārpusstīkla sistēmas darbības novērtēšanu.

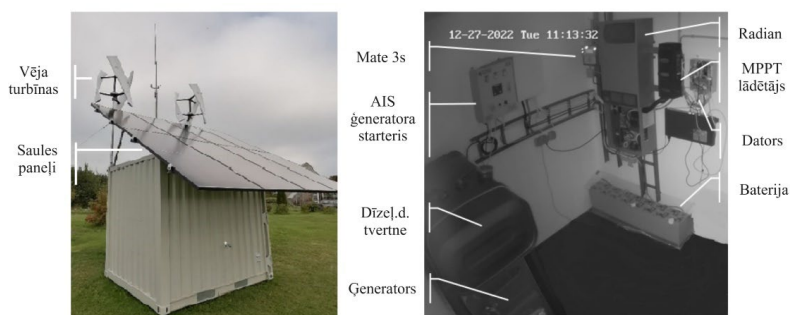
3.2. Materiāli un metodes

3.2.1. Ārpusstīkla sistēmas uzstādīšana

Elektriskā ārpusstīkla sistēma (3.1. att.), kas tika uzstādīta 2022. gada vasarā, ir pielāgota individuālās mājsaimniecības autonomai elektroapgādei, kas atrodas, Latvijā, Jelgavas pilsētas tuvumā. Elektriskā ārpusstīkla sistēma ietver:

1. vēja mikroturbīnas un saules paneļus;
2. dīzeļģeneratoru;
3. akumulatoru elektroenerģijas uzglabāšanas sistēmas; tas viss ir izvietots standarta jūras konteinerā (3,0 m × 2,5 m, 2,5 m augsts) kopā ar citu nepieciešamo aprīkojumu (sensori, kabeļi u. c.), lai nodrošinātu ārpusstīklu sistēmas darbību.

Ārpusstīkla sistēma ir modulāra, un to var salīdzinoši viegli pārvietot. Tā ir paredzēta uzstādīšanai ar minimālām atbilstības prasībām

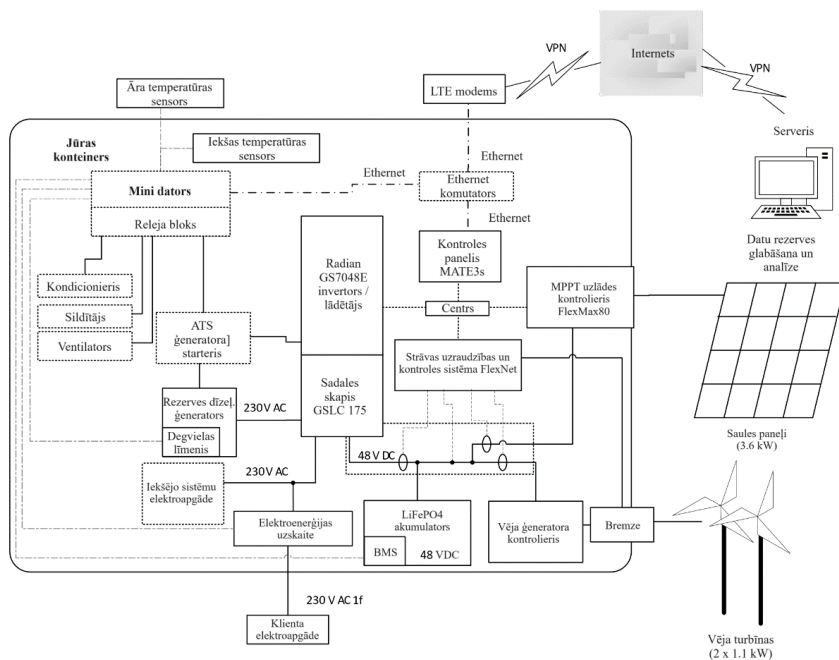


3.1. att. Eksperimentāla autonoma ārpusstīkla sistēma.

Ārpusstīkla sistēmas pamatā ir “*OutBack Power*” ražotais iekārtu komplekts, kas paredzēts ārpusstīklu un mikrotīklu ieviešanai. Sistēmā ietilpst “*Radian GS7048E*” invertors/uzlādētājs,

sistēmas vadības iekārta, panelis “MATE3”, akumulatoru monitoringa iekārta “FlexNetDC” un saules paneļu (3,6 kW) uzlādes kontrolieris “FlexMax80”. Vēja mikroturbīnu ($2 \times 1,1$ kW) saražotās elektroenerģijas elektroapgādei uz ārpusstiklu tiek izmantoti atsevišķi uzlādes kontrolieri, kas tiek savienoti ar jaudas releju palīdzību atkarībā no akumulatora uzlādes līmeņa. Ja nav pieejami atjaunojamie resursi, tiek nodrošināts rezerves dīzeļģenerators ar automātisku iedarbināšanu atkarībā no akumulatora uzlādes līmeņa. Elektroenerģijas uzkrāšanai izmanto LiFePO₄ akumulatorus ar nominālo spriegumu 52,8 V (3,3 V katrā šūnā), kura kopējā ietilpība ir 160 Ah (7 kWh). Elektroenerģijas patērētāja (t. i., mājsaimniecības, kas piedalās eksperimentā) elektroapgāde galvenokārt notiek no akumulatoru baterijas.

Konteiners, kurā atrodas akumulatori, invertors un citas elektroniskās ierīces, kas ir jutīgas pret temperatūru, tika izolētas un aprīkotas ar ierīcēm, kas nodrošina nepieciešamo mikroklimatu – sildītāju, kondicionieri un ventilāciju. Ārpusstikla sistēmas konceptuālā shēma redzama 3.2. attēlā.



3.2. att. Uzstādītās ārpusstikla sistēmas konceptuālā shēma.

Elektroenerģijas plūsmas kontroles princips ārpusstikla sistēmā ir balstīts akumulatora sprieguma līmenī. Ja akumulatora spriegums samazinās zem 52,0 V un ir pieejama saules elektroenerģija, tiek uzsākta uzlāde ar pastāvīgu strāvu. Ja saules elektroenerģija nav pieejama un spriegums nokrītas līdz 57,6 V, vēja turbīnas sāk ražot elektroenerģiju, pieslēdzot vēja lādētājus līdzstrāvas kopnei. Ja gan vēja, gan saules elektroenerģija ir nepietiekama vai nav pieejama un spriegums ir zemāks par 52,8 V, dīzeļģenerators pārņem vadību un uzlādē akumulatoru, tādējādi novēršot elektroapgādes pārtraukumus. Dīzeļģenerators darbība ir iestatīta 50 V spriegumā.

Paredzams, ka pēc ārpuslīkļa sistēmas ieviešanas mājsaimniecībai piegādātās elektroenerģijas kvalitāte atbilstīs Latvijas sadales sistēmas operatora tīkla pieslēguma prasībām saskaņā ar *LVS EN 50160* standartu. Nākotnē pētniecības nolūkos plānots eksperimentālo sistēmu papildināt arī ar kurināmā elementu sistēmu. Pirms jaunās ārpuslīkļa sistēmas uzstādīšanas tika veikta mājsaimniecības īpašnieka aptauja par elektroenerģijas patēriņu un esošajām elektroierīcēm, kā arī par iespējamām izmaiņām pēc ārpuslīkļa sistēmas ieviešanas, lai izveidotu nepieciešamo sistēmas konfigurāciju. Jāatzīmē, ka pirms eksperimenta mājsaimniecība tiešā viedā nebija pieslēgta elektroapgādei (to nodrošināja kabelis no kaimiņa), bet šī klienta pieslēgšanai AS “Sadales tīkls” pieprasīja ap 25 tūkst. EUR. Tāpēc klientam nebija precīzu datu par pieprasījumu un viņš pilnvērtīgi nevarēja lietot elektriskās iekārtas.

Ar elektrotīkļa analizatora palīdzību tika apkopoti mājsaimniecības slodzes dati, un tika izveidota vidējās slodzes prognoze visam gadam, kas tika izmantota kā ievaddati *Homer Pro* programmatūrā, lai novērtētu optimālo enerģijas avotu kombināciju un ārpuslīkļa sistēmas parametrus. Pirms ārpuslīkļa sistēmas izveides mājsaimniecību elektrība galvenokārt tika izmantota apgaismojumam, datora uzlādei un citām mājsaimniecības iekārtām. Vidējais dienas elektroenerģijas patēriņš mājsaimniecībā bija 4 kWh, kopā 1 460 MWh gadā pirms ārpuslīkļa sistēmas izveides. Patērētājs paļāvās uz dīzeļdegvielas ģeneratoru, kaimiņa pieslēgumu ar jaudu līdz 1 kW un pāris saules paneļiem, tomēr bija periodi, kad mājsaimniecībai bija ierobežota piekļuve elektrībai.

Pēc ārpuslīkļa sistēmas izbūves mājsaimniecības īpašnieks varēja palielināt elektroenerģijas patēriņu, piemēram, pēc vēlēšanās izmantojot gaisa kondicionieri. Tika prognozēts, ka elektroenerģijas patēriņš būs 12 kWh dienā, ņemot vērā gaisa kondicioniera izmantošanu vasaras sezonā. Tādējādi kopējais gada patēriņš būtu 4380 MWh, ko nodrošinātu izveidotā ārpuslīkļa sistēma. Pēc ārpuslīkļa sistēmas izbūves mājsaimniecības īpašnieks nolēma uzstādīt arī siltumsūkni ēkas apkurei.

Datu vākšana

Ārpuslīkļa sistēmas darbības datu uzkrāšana tiek organizēta gan vietējā datubāzē, kas atrodas konteinerā (*Rapsberry PI*) uzstādītā minidatorā, gan attālināti kā rezerves kopija. Galvenie monitoringa datu avoti ir uzskaitīti turpmāk (3.2. att.):

1. “OutBack power MATE3” vadības panelis – apkopo datus no ierīcēm, kas savienotas ar “OutBack Hub-FlexMax80”, “FlexNetDC” un “Radian GS7048E”. Savienots ar minidatoru, izmantojot “Ethernet” tīklu;
2. akumulatora vadības sistēmai (BMS) ir sava izejas datu plūsma caur sērijas portu uz miniprosesoru;
3. elektrotīkļa analizators “EM21-Modbus RTU” ierīce, kas savienota ar minidatoru, izmantojot “RS485” tīklu;
4. minidators – apkopo informāciju no pievienotajiem sensoriem un analogajām un digitālajām ieejām un izejām.

3.3. Rezultāti un diskusija

Ārpustīkla sistēmas datu analīze tika veikta saskaņā ar iepriekšējām apakšnodaļām. Tā tiek veidota, izmantojot “Python” valodu, kas ir tīmeklī bāzēta interaktīva skaitļošanas platforma. Diagrammu kodī tika rakstīti “Python”, izmantojot tādas bibliotēkas kā “pandas”, “numpy”, “matplotlib”, “seaborn”. Laika posmā no 2022. gada 18. oktobra līdz 21. novembrim no ārpustīkla sistēmas tika savākta 31 dienas datu kopa ar paraugu ņemšanas biežumu pa minūtēm. Analizētā datu kopa ietver 37 ievades signālus un augstas granularitātes datus ar kopumā 48 301 datu punktiem.

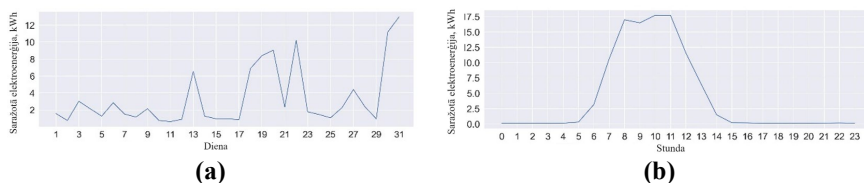
Iegūtā datu kopa atspoguļo tikai vienu gada laiku. Lai izveidotu precīzāku analīzi, izmaiņu aplēsei vēlams izmantot vēsturiskos datus, ņemot vērā visu gadalaiku izmaiņas.

Pētījumā tiek izmantotas dažādas statistikas metodes – laikrindu analīze, kumulatīvās kolonnas un histogrammas.

Ārpustīkla sistēmas darbības dati ir svarīgi un nepieciešami, lai atklātu sistēmas kļūmes vai defektus, jo īpaši šādas ārpustīkla sistēmas ieviešanas sākumposmā. Rezultāti sniedz idejas turpmākiem pētījumiem un liecina par datu pieejamības un izšķirtspējas nozīmi.

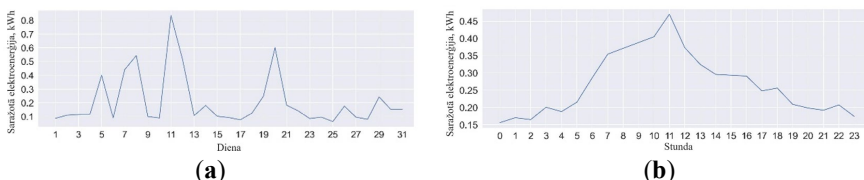
3.3.1. Ārpustīkla veiktspējas novērtējums

3.3.–3.5. attēlā redzamas ārpustīkla sistēmas elektroenerģijas dienas un stundas ražošanas datu līknes no 2022. gada oktobra līdz 2022. gada novembrim. Tiek apskatīta kumulatīvā elektroenerģijas ražošana no saules, vēja un dīzeļģeneratora.



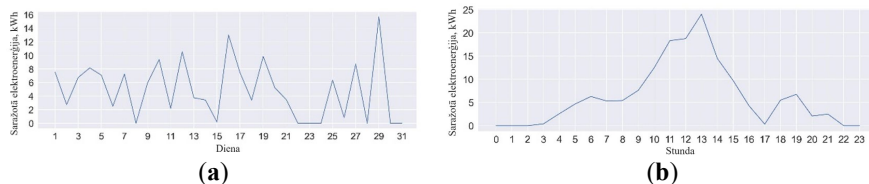
3.3. att. Elektroenerģija no saules: a) ikdienas šķērsgriezums; b) kumulatīvs stundu profils.

3.3. attēlā redzams, ka saules enerģija tiek ražota salīdzinoši plašā mērogā un ar izteiktu tendenci no plkst. 6.00 līdz plkst. 15.00. Saules kilovatstundas (kWh) tiek aprēķinātas, izmantojot datus, kas iegūti no “FlexnetDC”.



3.4. att. Elektroenerģija no vēja: a) ikdienas šķērsgriezums; b) kumulatīvs stundu profils.

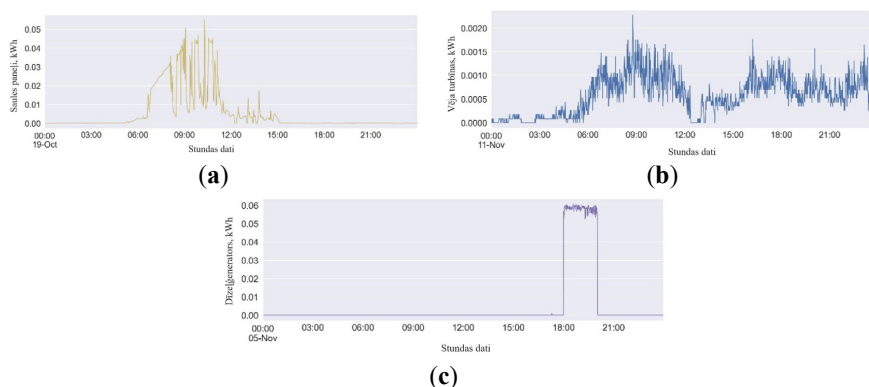
3.4. attēlā redzams, ka vēja enerģija tiek ražota salīdzinoši nelielā mērogā un bez izteiktas tendences dienās. Arī vēja kilovatstundas (kWh) tiek aprēķinātas, izmantojot datus, kas iegūti no “FlexnetDC”.



3.5. att. Elektroenerģija no dīzeļģeneratora: a) ikdienas šķērsgriezums; b) kumulatīvs stundu profils.

3.5. attēlā redzams, ka dīzeļģenerators jauda tiek ģenerēta gandrīz katru dienu – aptuveni vienlīdz daudz (7–12 kWh). Salīdzinot ar saules un vēja enerģiju, ģenerators darbojas arī agrās rīta un vēlās vakara stundās. Dīzeļģenerators kilovatstundas (kWh) tiek aprēķinātas, izmantojot datus, kas iegūti no invertora “*RadianGS*”.

Aplūkojot ikminūtes datus, 3.6. attēlā redzams, kā elektroenerģijas ražošanas profili atšķiras atkarībā no to avotiem.

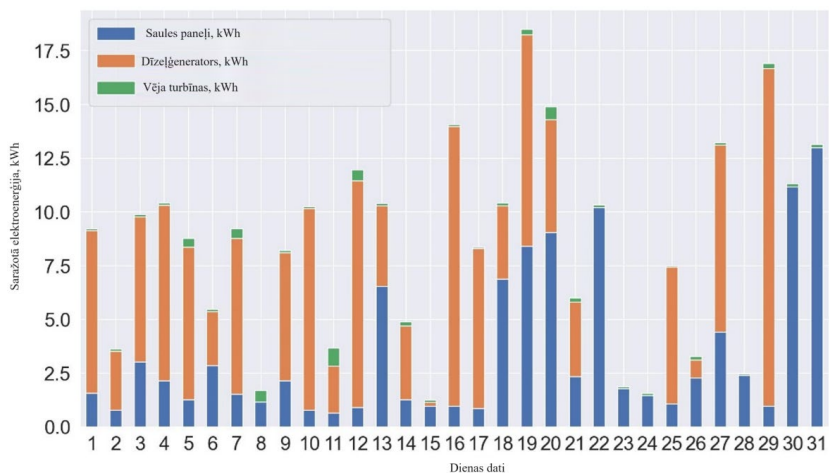


3.6. att. Elektroenerģijas ražošanas profili: (a) saules enerģija; (b) vēja enerģija; (c) dīzeļdegviela.

Pētījumam ņemti 19. oktobra, 5. un 11. novembra dati. Pateicoties datu augstajai granularitātei, izveidots katra elektroenerģijas ģenerācijas avota ražošanas tendences garfiks, kas redzams 3.6. attēlā. Redzams, ka atjaunojamie avoti mūsdienās uzrāda lielu mainīgumu, savukārt dīzeļģenerators ir strādājis konkrētu periodu ar noteiktu jaudu.

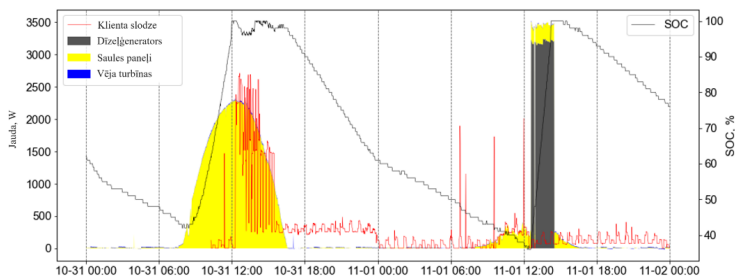
Saražotās elektroenerģijas daudzums pēc ģenerācijas avota veida

31 novērošanas dienas laikā (3.7. att.) visvairāk elektroenerģijas saražoja dīzeļģenerators (152 kWh), tam seko saules (104 kWh) un vēja enerģija (7 kWh). Vēlāk tika atklāts, ka zemais vēja ģenerācijas apjoms ir saistīts ne tikai ar nenožīmīgu vēja ātrumu pētījuma periodā, bet arī ar vēja lādētāja vadības loģikas neatbilstošu darbību, kā arī ar Ķīnā ražoto vēja turbīnu faktiskas izstrādes neatbilstību specifikācijai un tehniskām kļūmām. Šis ir izaicinājums, kas jārisina eksperimentālās darbības laikā.



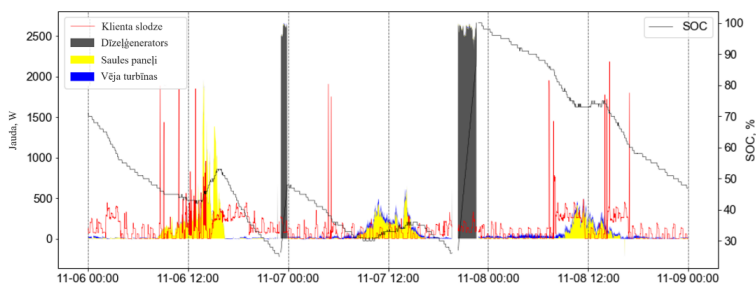
3.7. att. Kumulatīvā elektroenerģijas ražošana pēc ģenerācijas avota veida.

Ārpustīkla sistēmas darbības analīze visā eksperimenta laikā liecināja, ka sistēma darbojas pietiekami. Tomēr kādu laiku tika novēroti trūkstoši dati.



3.8. att. Ārpustīkla sistēmas raksturlielumi saulainā dienā oktobra beigās.

Piemēram, 3.8. attēlā redzamas divas saulainas dienas oktobra beigās un novembra sākumā. Šajā laikā elektroenerģijas patēriņš sākumā netika reģistrēts, norādot, ka datu iegūšana ir jāpārbauda, lai nodrošinātu datu nepārtrauktību.

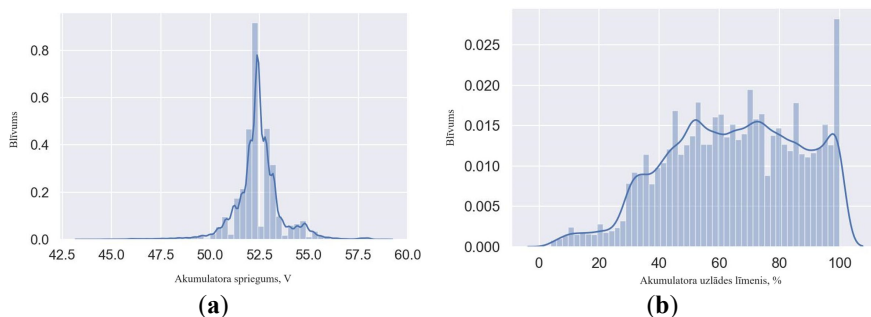


3.9. att. Ārpustīkla sistēmas raksturlielumi saulainā dienā novembra sākumā.

3.8. un 3.9. attēlā var redzēt katra ģenerācijas avota kopējo ieguldījumu elektroapgādē. Ja slodze ir lielāka par kopējo ģenerējošo avotu ieguldījumu, akumulatora uzlādes stāvoklis (*SOC*) samazinās, savukārt, ja slodze ir mazāka, akumulators uzlādējas. Kad ģenerators ir ieslēgts, *SOC* līmenis strauji paaugstinās.

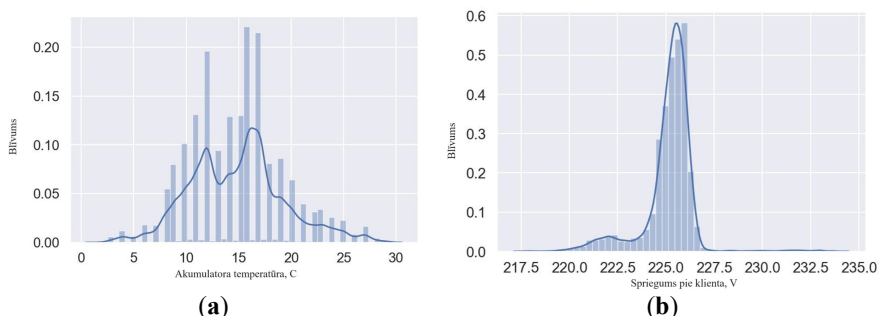
Elektrotehniskie dati – spriegums, *SOC*, frekvence

Ekspērimētā bija svarīgi novērot arī elektrotehniskos datus. 3.10. un 3.11. attēlā redzamas četras histogrammas. Histogramma sadala mainīgo nodalījumos, saskaita datu punktus katrā nodalījumā un parāda nodalījumus uz x ass un skaitļus uz y ass. Šajā gadījumā tika izmantota “Python” bibliotēka “seaborn”, kas pagriež y asi kā blīvuma laukumu, kas ir varbūtības blīvuma funkcija. Blīvuma shēma ir vērtība relatīvam salīdzinājumiem. Y ass ir blīvuma izteiksmē, un histogramma tiek normalizēta pēc noklusējuma, lai tai būtu tāda pati Y skala kā blīvuma laukumam [10].



3.10. att. Elektrotehniskie dati: a) akumulatora spriegums; b) akumulatora *SOC* līmenis.

Ņemot vērā 3.11. attēlā redzamos elektrotehniskos datus, var pamanīt, vai faktiski ir kāds pārspriegums vai akumulators tiek darbināts visefektīvākajā veidā, lai samazinātu degradācijas riskus.



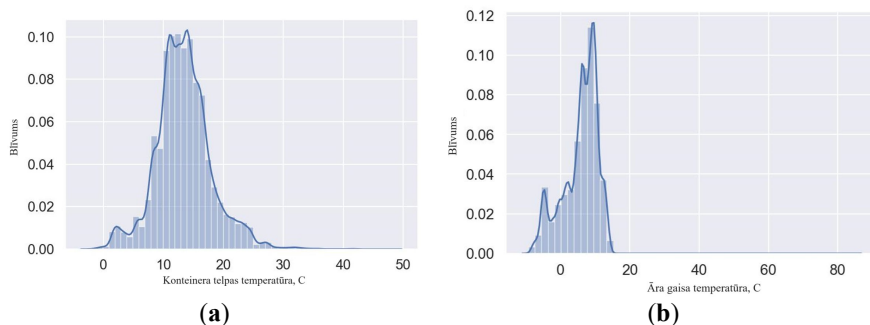
3.11. att. Elektrotehniskie dati: a) akumulatora temperatūrai; b) spriegumam pie patērētāja.

Svarīgi ir uzraudzīt, kas notiek ar akumulatora temperatūru un vai elektroenerģijas patērētājam ir nodrošināta atbilstoša elektroapgādes sprieguma kvalitāte (3.11. att.).

Akumulatora sprieguma dati tika iegūti no invertora “*RadianGS*”, *SOC* un temperatūras dati no sistēmas pārraudzības “*FlexnetDC*” ierīces, savukārt patērētāja spriegums – no elektrotīkla analizatora “*Carlo Gavazzi EM2I*”.

Klimata datu analīze (vēja ātrums, temperatūra)

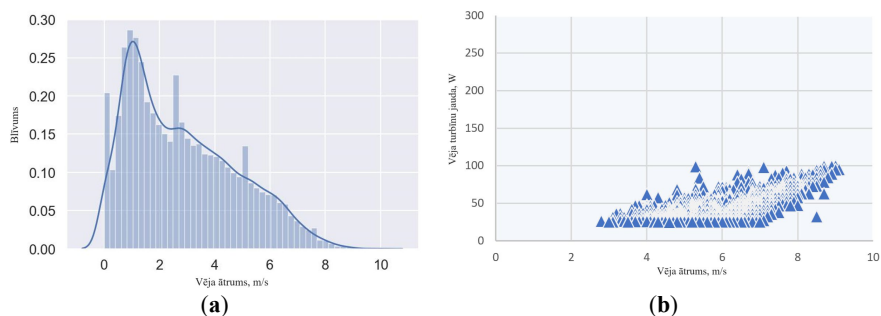
Novērojumu laikā tiek uzraudzīta ārpusē esošā konteineru iekšējā un ārējā gaisa temperatūra. Sensors “*DS1280*” tiek izmantots abu parametru noteikšanai. Rezultāti doti 3.12. attēlā.



3.12. att. Gaisa temperatūras dati: a) konteineru telpai; b) apkārtējam gaisam.

Latvijas klimatiskajos apstākļos svarīgi, lai ziemas periodā (no novembra līdz decembrim) konteiners būtu pietiekami silts, savukārt vasaras periodā (no jūnija līdz augustam) – otrādi, lai konteineru telpa nepārkarstu. Novērošanas periodā konteineru telpas temperatūra tika novērota virs 0 °C, neskatoties uz to, ka āra gaisa temperatūra noslīdēja arī zem 0 °C.

Paralēli liela uzmanība tiek pievērsta vēja ātruma novērojumiem. Vēja elektroenerģijas ģenerācija ārpusē novērošanas laikā nav tāda, kā sākotnēji tika plānots. Par to liecina arī dati (3.13. att.), kas liecina, ka vēja ātrums nav īpaši liels, taču tas nepaskaidro, kāpēc vēja ģenerators turbīnas jauda ir tik zema. Korelācija starp vēja jaudu un vēja ātrumu redzama 3. 13. (b) attēlā.



3.13. att. Vēja ātruma dati: a) izmantojot histogrammu; b) izmantojot laika izkliedes analīzi.

Jāatzīst, ka vēja dati iegūti tikai par pusi no novērojumu laika. Visi iepriekšējie laikapstākļi objektā tika mērīti katru minūti. Vēja ātruma dati tika iegūti no anemometra virs jūras konteinera.

4. PĀREJA UZ DECENTRALIZĒTO ENERĢĒTIKU LATVIJĀ

Eiropas Savienības (ES) mērķi un progress klimata neitralitātes jomā rada iespējas plašākai decentralizēto ražošanas avotu izmantošanai un jaunu tirgus dalībnieku iesaistei elektroenerģijas tirgū.

Tāpēc pareiza sistēmu integrācija un normatīvais regulējums būs svarīgs, lai vienkāršotu un efektīvi izmantotu visus resursus un pieejamās tehnoloģijas, kā arī nodrošinātu augstāku energoapgādes sistēmas uzticamību un stabilitāti. Šajā nodaļā tiks analizēti jaunie tirgus dalībnieki, ņemot vērā normatīvās vides tendences turpmākajos gados, tostarp, kas ietekmēs decentralizētos energoresursus.

4.1. Grozījumi valsts tiesību aktos

Grozījumi Enerģētikas likumā

2022. gada 14. jūlijā, otrajā – galīgajā – lasījumā Saeima atbalstīja par steidzamiem atzītos grozījumus Enerģētikas likumā [11], lai pārņemtu ES direktīvu nosacījumus. Ar regulējumu energokopienām paredzēts veicināt Latvijas sabiedrības iesaisti elektroenerģijas ģenerācijai. Ar grozījumiem Enerģētikas likumā tiek paredzēts definēt jaunu tirgus dalībnieku jēdzienus:

1. “Atjaunojamās enerģijas kopiena” – energokopiena, kas nodarbojas ar atjaunojamās enerģijas ražošanas un kurai pieder, vai tā attīsta vai apsaimnieko atjaunojamās enerģijas ražošanas iekārtas, kas teritoriāli saistītas ar atjaunojamās enerģijas kopienā;

2. “Elektroenerģijas energokopiena” – energokopiena, kas darbojas elektroenerģijas nozarē;

3. “Enerģokopiena” – juridiska persona ar atvērtu, demokrātisku un brīvprātīgu dalību, kuras mērķis ir sniegt vides, ekonomiskus vai sociālus labumus saviem biedriem vai daļu turētājiem, vai teritorijām, kurās tās darbojas; kura darbojas enerģijas, primāri no atjaunojamiem energoresursiem iegūtas elektroenerģijas, kā arī cita veida atjaunojamās enerģijas ražošanā, tirdzniecībā, elektroenerģijas kopīgošanā, patēriņā, pieprasījuma reakcijas pakalpojuma nodrošināšanā, elektroenerģijas uzkrāšanā, elektrisko transportlīdzekļu uzlādes pakalpojuma sniegšanā, energoefektivitātes vai citu energopakalpojumu sniegšanā.

Grozījumi Enerģētikas likumā vienlaikus kopīgi ar atbalstītajiem grozījumiem Elektroenerģijas tirgus likumā un atbilstoši izstrādājamajiem Ministru kabineta noteikumiem veidos juridisko bāzi, īstenojot energokopienā potenciālu. Papildus tam būs nepieciešamas investīciju atbalsta programmas un plaša sabiedrības informēšana, tajā skaitā grozījumos paredzētās vadlīnijas, ko būs jāizstrādā pašvaldību vajadzībām.

Grozījumi Elektroenerģijas tirgus likumā

2022. gada 14. jūlijā, otrajā – galīgajā – lasījumā Saeimā atbalstīja arī grozījumus Elektroenerģijas tirgus likumā [12], kura mērķis ir pārņemt Direktīvas 2019/944 un Direktīvas 2018/2001 nosacījumus. Grozījumi Elektroenerģijas tirgus likumā paredz elektroenerģijas neto

uzskaites sistēmas pilnveidošanu un papildināšanu ar neto norēķinu sistēmu, kā arī nosaka principus elektroenerģijas energokopien un aktīvo lietotāju darbībai.

Ar grozījumiem tiek paredzēts definēt jaunu tirgus dalībnieku jēdzienus:

1. “Aktīvais lietotājs” – galalietotājs, kurš ražo elektroenerģiju savām vajadzībām un var saražotās elektroenerģijas pārpalikumu pārdot, kopīgot, iesaistīties elastības pakalpojumos vai energoefektivitātes shēmās un kurš nav energoapgādes komersants;

2. “Elektroenerģijas kopīgošana” – aktīvā lietotāja saražotās un sadales sistēmā nodotās elektroenerģijas nodošana citiem galalietotājiem, tajā skaitā aktīvajiem lietotājiem, vai elektroenerģijas energokopienā saražotās un sistēmā nodotās elektroenerģijas nodošana elektroenerģijas energokopienas biedriem vai daļu turētājiem;

3. “Kopīgi darbojoši no atjaunojamajiem energoresursiem iegūtas enerģijas aktīvie lietotāji” – grupa ar vismaz diviem galalietotājiem, kas katrs atsevišķi ir pieslēgts pie elektroenerģijas sadales sistēmas, un kuri pēc savstarpējas vienošanās savām vajadzībām kopīgi ražo elektroenerģiju no atjaunojamajiem energoresursiem un kuri rīkojas kopīgi vienā un tajā pašā ēkā vai teritorijā, kas atrodas vienā adresē;

4. “No atjaunojamajiem energoresursiem iegūtas elektroenerģijas aktīvais lietotājs” – aktīvais lietotājs, kurš ražo elektroenerģiju savām vajadzībām no atjaunojamajiem energoresursiem.

Lai regulējums varētu darboties pilnā apmērā, Ministru kabinetam būs jānosaka:

1. kārtība, kādā piemērojama neto uzskaites sistēma;
2. neto norēķinu sistēmas izmantošanas nosacījumi, kārtība, kādā piemērojama neto norēķinu sistēma un veicama informācijas apmaiņa starp iesaistītajām pusēm tās administrēšanas nodrošināšanai, un *de minimis* atbalsta nosacījumu piemērošanas kārtība;
3. kārtība, kādā īstenojama elektroenerģijas kopīgošana un nosacījumus elektroenerģijas kopīgošanai.

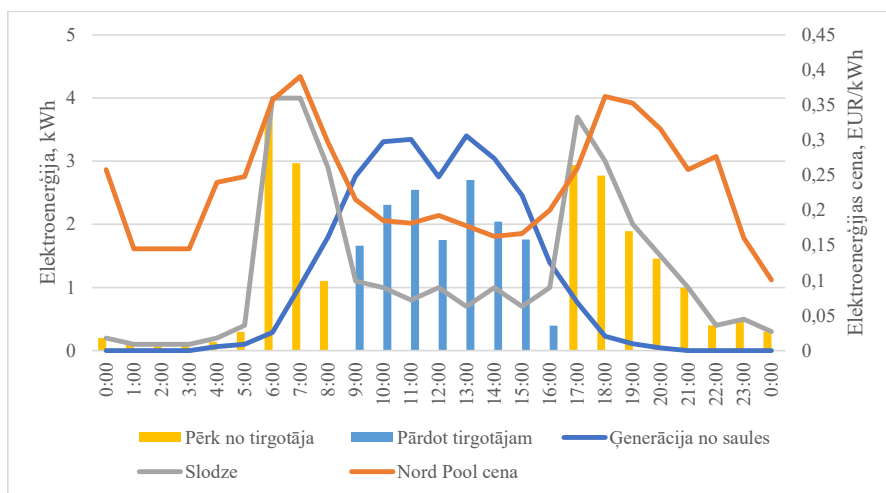
4.2. Ieteikumi turpmākiem grozījumiem tiesību aktos

Priekšlikumi turpmākajiem likumdošanas grozījumiem

1. Būtu izvērtējams, vai nevajadzētu detalizētāk definēt pretrunas starp abām kopienām – “iedzīvotāju energokopien” un “atjaunojamās enerģijas kopien”, apvienojot tās vienā. Ņemot vērā to, ka “iedzīvotāju energokopiena” ir tehnoloģiju neitrāla, savukārt “atjaunojamās enerģijas kopiena” ir limitēta ar atjaunojamās enerģijas tehnoloģijām, kam jābūt piederošo un attīstīto atjaunojamās enerģijas projektu tuvumā.

2. Likuma grozījumus būtu skaidri jākomunicē ar sabiedrību, jo īpaši par ieguvumiem dalībai vienā vai otrā neto sistēmā – “Elektroenerģijas neto norēķinu sistēmā” vai “Elektroenerģijas neto uzskaites sistēmā”, uzskatāmāk parādot atšķirības starp tām. Piemēram, 4.1. attēlā ir redzams piemērs par iespējamiem ieguvumiem, kad tiek uzskaitīta ne tikai ģenerētā elektroenerģija un patēriņš, bet arī noteikta elektroenerģijas vērtība, ņemot vērā attiecīgā brīža *Nord Pool* elektroenerģijas biržas tirgus vērtību. Šajā gadījumā ģenerētā elektroenerģija mājsaimniecībā – 27 kWh, patēriņš – 32 kWh, pārdotais apjoms tirgotājam – 15 kWh (par 3 EUR bez PVN, t. i., tikai par elektrības komponenti), no tirgotāja iepirktais apjoms – 20 kWh

(par 5,71 EUR bez PVN, t. i., tikai par elektrības komponenti). **Pāreja no “Elektroenerģijas neto uzskaites sistēmas” uz “Elektroenerģijas neto norēķinu sistēmu” drīzāk ieviestu taisnīgāku ieguvumu sadalījumu no tirgotāja viedokļa, savukārt patērētājam tas varētu samazināt ieguvumus no saules sistēmu uzstādīšanas.** Šāds secinājums būtu spēkā pie cenu profila, kas redzams 4.1. attēlā (šāda situācija Latvijā būs raksturīga nākotnē, kad uzstādīto saules sistēmu jauda būs vairākas reizes lielāka nekā patlaban). Pieaugot lieljaudas saules parku jaudai, ir sagaidāms ievērojams cenu samazinājums stundās ar augstāko saules enerģijas intensitāti, kas vēl vairāk ietekmēs mājāsaimniecības ar saules paneļiem, kas izmantos neto norēķina principu. Daļēji šo problēmu var atrisināt, uzstādot elektroenerģijas uzkrāšanas iekārtas, tomēr pagaidām uzkrājēju iegāde ir salīdzinoši dārga. Turpmāk darbā (4.3.2. apakšnodaļā) tika izskatīts šāds piemērs.



4.1. att. Latvijas mājāsaimniecības elektroenerģijas patēriņš (2022. gada 20. jūlijā).

3. Nosacījumos vai anotācijā varētu skaidrot, kā tieši tirgotājam ļauts noteikt elektroenerģijas tirgus vērtību (t. i., vai tā var būt tā sauktā vienošanās cena, fiksēta cena vai līdzsvara cena). Viens no izaicinājumiem ir, kā izveidot taisnīgu ieguvumu sadalīšanas principu, kas būtu izdevīgs tirgotājam un aktīvajiem lietotājiem, gan arī kopienai dalībniekiem, jo pāreja no “Elektroenerģijas neto uzskaites sistēmas” uz “Elektroenerģijas neto norēķinu sistēmu” ir viens no šādas problēmas risinājuma mēģinājumiem.

4. Elektroenerģijas tirgus likuma grozījumos vai anotācijā būtu vēlams iekļaut plašāku vērtējumu par sistēmas operatora tiesībām noteikt neto uzskaites sistēmas administrēšanas maksu, tās apmēru un ietekmi uz pašu galveno neto uzskaites sistēmas uzdevumu – kā veicināt no atjaunojamiem energoresursiem iegūtas elektroenerģijas ģenerāciju.

5. Abos likumu grozījumos tika saskatīti vairāki termini, ko nākotnē būtu nepieciešams harmonizēt vismaz Latvijas likumdošanas un politikas dokumentos. Piemēram, “atjaunojamā” vai “atjaunīgā” enerģija, elektroenerģijas “ražošana” vai “ģenerācija” u. c.

6. Ieviešot energokopienas sistēmu, sistēmas operatoram būtu nepieciešams izvērtēt jaunu tarifu aprēķināšanas principu izstrādi. Piemēram, gadījumā, kad elektroenerģijas sadalīšana

notiek gan vienas kopienas ietvaros, gan starp kopienām. Vai papildu noteikumus, kas regulē kopienas atbildību par radīto nebalansu. Sabiedrību vajadzētu arī informēt par to, kāds ieguvums būtu no dalības energokopienā vai elektroenerģijas tirdzniecībai starp šādām kopienām.

7. Pieaugot aktīvo lietotāju skaitam un mikroģenerācijas sistēmu jaudai, nedaudz var samazināties sadales sistēmas operatora ienākumi par elektroenerģijas sadalīšanas pakalpojumu sniegšanu (vidēji par 1/3). Taču vienlaikus pieaug arī tīklā nodotais elektroenerģijas daudzums. Līdz ar to būtu nepieciešama tarifu izvērtēšana, kāds būtu taisnīgs regulējums, pieaugot aktīvo lietotāju skaitam un mikroģenerācijas sistēmu jaudai.

4.3. Decentralizētu atjaunojamās enerģijas avotu atmaksāšanās analīze

4.3.1. Motivācija un priekšvēsture

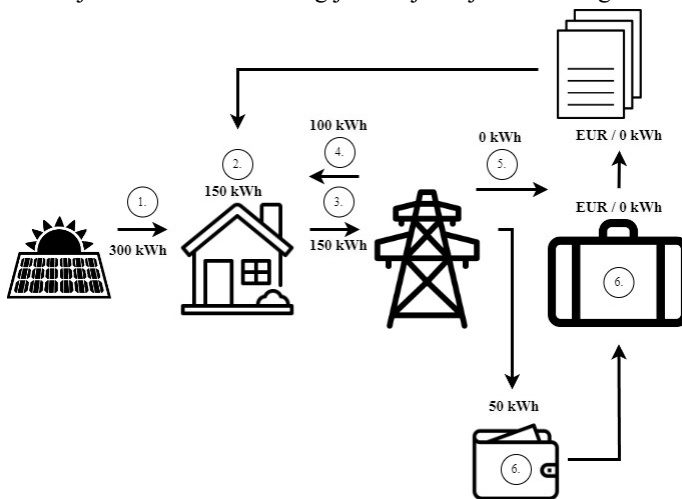
Lai gan ir pieejama plaša informācija par jaunajiem neto norēķinu sistēmas noteikumiem Latvijā, plašākai sabiedrībai trūkst detalizēta skaidrojuma par iespējamo ekonomisko ietekmi uz decentralizēto ergoapgādes risinājumu īpašniekiem [13].

Tādējādi šajā apakšnodaļā tiek salīdzināta iepriekšējā neto uzskaites sistēma ar jauno neto norēķinu sistēmu. Šāda analīze ļautu precīzāk izvērtēt jaunu tehnoloģiju ieviešanu un prognozēt normatīvo aktu ietekmi uz ekonomisko dzīvotspēju dažādās tirgus situācijās.

Neto uzskaites un norēķinu sistēma Latvijā

Saskaņā ar 2023. gada 16. februārī veiktajiem grozījumiem elektroenerģijas tirgus likumā Latvijā ir ieviestas būtiskas izmaiņas attiecībā uz mikroģenerāciju.

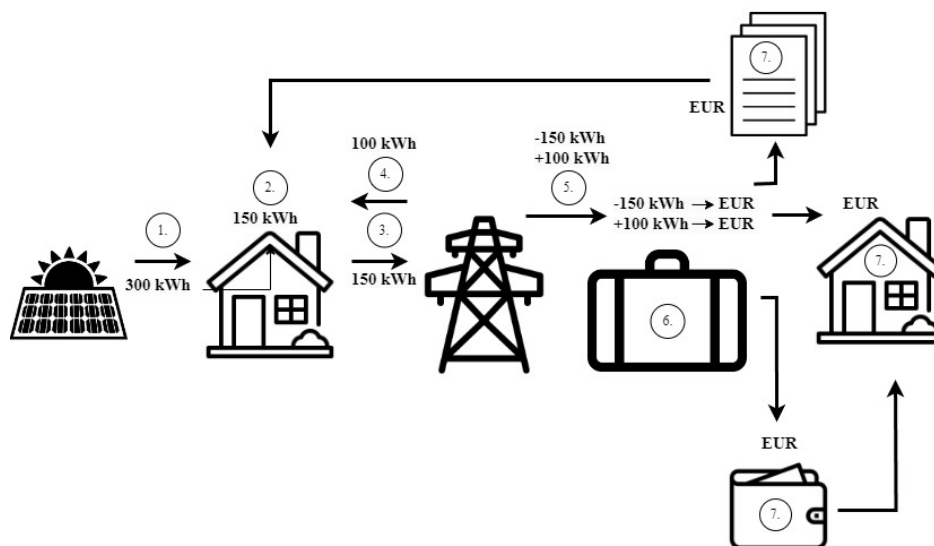
Neto uzskaites sistēma (jau esošā sistēma; 4.2. att.). Iepriekš tiesību normas regulēja neto elektroenerģijas uzskaites sistēmu, kas ieskicēja kārtību, kādā sadales sistēmas operators norēķinās par lietotāju saražoto elektroenerģiju no atjaunojamiem energoresursiem.



4.2. att. Neto uzskaites sistēmas shematisks attēlojums [14].

4.2. attēlā redzams, ka klients elektrotīklā nodeva par 50 kWh vairāk nekā saņēma no tīkla. Klientam šomēnes ir jāmaksā tikai sadales sistēmas operatora apkalpošanas maksa, bet par elektrību nav jāmaksā.

Neto norēķinu sistēma (jaunā sistēma; 4.3. att.). Ar grozījumiem Elektroenerģijas tirgus likumā tika ieviesta jauna neto elektroenerģijas norēķinu sistēma. Šī sistēma ne tikai fiksē klienta saražotās un patērētās elektroenerģijas daudzumu, bet arī nosaka šīs elektroenerģijas vērtību naudas izteiksmē.



4.3. att. Neto norēķinu sistēmas shematisks attēlojums [14].

Elektroenerģijas tirgotājs nosaka elektrotīklā nodotās un no elektrotīkla saņemtās elektroenerģijas vērtību (4.3. att.).

4.3.2. Metodoloģija – gadījuma izpētes pieņēmumi

Gadījuma izpētē viena mājsaimniecība aplūkota kā elektroenerģijas patērētājs ar piekļuvi elektrotīklam, saules paneļiem un elektroenerģijas uzkrājēju sistēmai dažādos neto uzskaites sistēmas un neto norēķinu sistēmas darbības scenārijos.

Tiek salīdzinātas divas neto sistēmas alternatīvas, lai izpētītu, kā potenciālie mājsaimniecību ietaupījumi mainās atbilstoši dažādiem scenārijiem, proti, ar *BESS*, bez *BESS*, ar finansiālu atbalstu savai *PV* sistēmai un bez finansiāla atbalsta.

Būtisks uzsvars tiek likts uz elektroenerģijas cenām, kas pēdējos gados ir uzrādījušas ievērojamas svārstības un kurām ir svarīga nozīme, nosakot ekonomisko atdevi par uzstādītajiem elektroenerģijas apgādes risinājumiem. Gadījuma izpētē tiek analizētas trīs iespējamās elektroenerģijas cenas (retrospektīva elektroenerģijas cena no 2019./2020. gada sezonas, 2022./2023. gada sezonas vai brīdī, kad elektroenerģijas cena ir fiksēta 150 EUR/MWh). Ir rūpīgi analizēti iespējamie ietaupījumi, ņemot vērā jaunā sadales sistēmas tarifa ietekmi (salīdzinot ar iepriekšējo tarifu), kas skar visus pašreizējos Latvijas sadales

sistēmas operatora tīklam pieslēgtos klientus. Turklāt ir izpēti arī jaunieviešā īpašā tarifa ietekme, ko ikviens lietotājs var izvēlēties bez maksas.

Lai pētītu jauno neto norēķinu sistēmu un salīdzinātu to ar esošo neto uzskaites sistēmu, no Latvijas sadales sistēmas operatora AS “Sadales tīkls” vienas anonīmas mājsaimniecības tika iegūti šādi gada dati ar 1 stundas izšķirtspēju: datums un laiks; elektroenerģijas patēriņš; elektroenerģijas ražošana [15]. Mājsaimniecības elektroenerģijas pieprasījums gadā bija 11,32 MWh, savukārt tīklā ievadītā saules elektroenerģija sasniedza 4,23 MWh gadā. Diemžēl informācija par konkrētiem mājsaimniecības paradumiem nebija pieejama (arī par dažādu ierīču lietošanu). Jāatzīmē arī, ka trūkst pieejamu datu par elektroenerģijas ražošanu, ko mājsaimniecības patērē tieši no saules paneļiem (tā saucamais pašpatēriņš). Lai nodrošinātu lielāku ekonomisko ieguvumu, mājsaimniecībām ar saules paneļu sistēmām būtu jāsasniedz pēc iespējas augstāks tiešā elektroenerģijas patēriņa līmenis. Saskaņā ar [16] datiem mājsaimniecību tiešais elektroenerģijas patēriņš no saules paneļiem Eiropā ir vidēji 20–30 %.

Izmantojot iepriekš aprakstītos ievades datus (4.1. tab.), tika analizēti visi attiecīgie scenāriji.

4.1. tabula. Mājsaimniecības elektroapgādes sistēmas ievaddati un pieņēmumi [15], [16], [17]

Raksturlielums	Indikators vai pieņēmums
Tiešais elektroenerģijas patēriņš no saules paneļiem	30 % no kopējā saražotā apjoma
Saules sistēmas jauda un izmaksas	5 kW, 1200 EUR/kW (6000 EUR), kam ir iespēja saņemt finansiālu atbalstu 2500 EUR
Elektroenerģijas uzkrājēja sistēmas (BESS) elektroenerģijas ietilpība, izmaksas un darbība	10 kWh, 7000 EUR. Maksimālais izlādes līmenis – līdz 2 kWh, maksimālais uzlādes līmenis – līdz 10 kWh. Tā saucamā “Roundtrip” efektivitāte 90 %
Ievadaizsardzības aparāta (IAA) strāvas lielums un elektrības pieslēguma fāzes	trīs fāzes un 25 A
Iepriekšējais sadales tīkla tarifs	maksa par elektroenerģijas piegādi 0,04076 EUR/kWh maksā par IAA strāvas lielumu 2.4 EUR/A/gadā
Jaunais sadales tīkla tarifs	maksa par elektroenerģijas piegādi 0,03985 EUR/kWh maksā par IAA strāvas lielumu 0,92 EUR/A/mēnesī
Jauns speciālais sadales tīkla tarifs	maksa par elektroenerģijas piegādi 0,1594 EUR/kWh maksā par IAA strāvas lielumu 0,37 EUR/A/mēnesī

4.3.3. Rezultāti un diskusija

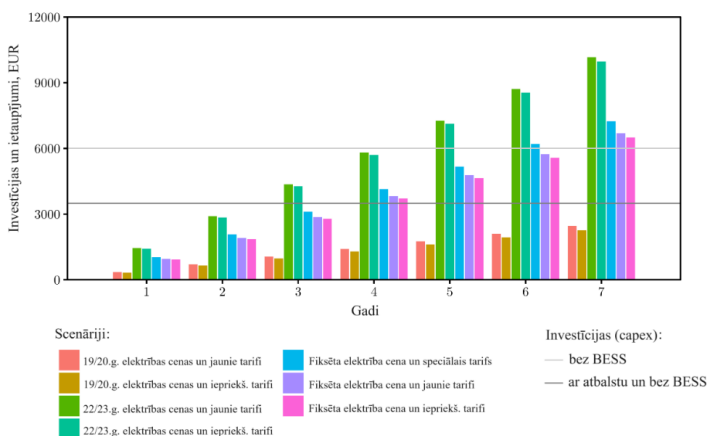
Pirmā gadījuma izpēte – neto uzskaites sistēma

4.4. attēlā redzami iespējamie ietaupījumi no saules paneļiem, izmantojot neto uzskaites sistēmu. Grafikā parādīts ietaupījums, balstoties esošajos sadales tīklu tarifos un jaunajos, kā arī ņemot vērā scenārijus ar atšķirīgām elektroenerģijas cenām – 2019.–2020. un 2022.–2023. gada sezonas Nord Pool biržas cenas, fiksētas elektroenerģijas cenas (150 EUR/MWh)

un scenārijs ar sadales sistēmas operatora (SSO) speciālo tarifu. Jāņem vērā, ka “Speciālais” tarifs ir paredzēts mājāsaimniecībām ar ļoti mazu vai sezonālu elektroenerģijas patēriņu. Tiek pieņemts, ka speciālais tarifs tiek izmantots trīs mēnešus (jūnijs, jūlijs un augusts), atlikušajiem mēnešiem atstājot pamata tarifu. Speciālajā tarifā ir iekļauta mazāka fiksētā daļa (jaudas uzturēšanas maksa, EUR/mēn.), taču tam ir lielāka mainīgās daļas īpatsvars (maksā par elektroenerģijas piegādi, EUR/kWh), salīdzinot ar pamata tarifu.

Aprēķinu algoritms ir izstrādāts, lai novērtētu iespējamās ietaupījumus, salīdzinot ar scenāriju, kad netiek izmantoti saules paneļi, un ar atbilstošo SSO tarifu. Šajā gadījumā *BESS* nav integrēts sistēmā. Aprēķinot potenciālo ietaupījumu, algoritms ņem vērā gan fiksēto daļu (vidēji no kopējā gada patēriņa), gan mainīgo sadales tīkla tarifa daļu, ko attiecina uz vienu patērēto kilovatstundu. Uzkrātie ietaupījumi attēloti ar “stabiņiem”, savukārt horizontālās līnijas parāda ieguldījumu saules paneļu sistēmā ar un bez valsts finansiālā atbalsta (kas tika pieņemts 2500 EUR).

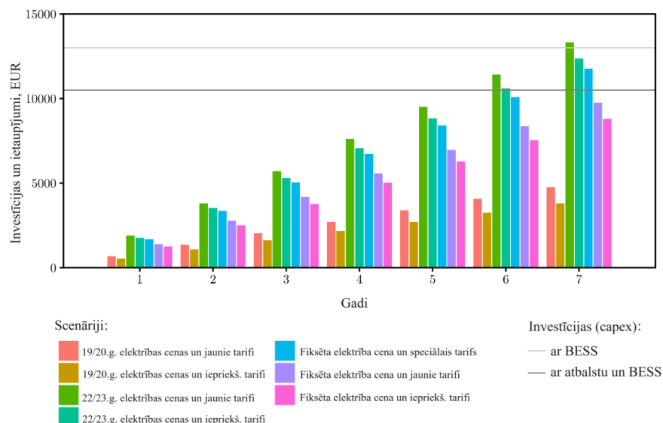
4.4. attēlā redzams, ka vismazākie iespējamie ietaupījumi tiek gūti scenārijā, kurā tiek pieņemtas 2019.–2020. gada *Nord Pool* elektroenerģijas biržas cenas (zemākie pie vecā SSO tarifa). Redzams, ka ar 2022.–2023. gada sezonas *Nord Pool* cenām un jauno SSO tarifu jau trešajā gadā ietaupījums varētu būt lielāks nekā veiktās investīcijas, gadījumā, kad tiek saņemts valsts atbalsts saules paneļu uzstādīšanai. Ievērojamo ietaupījumu potenciālu rada 2022.–2023. gada sezonas *Nord Pool* cenas. Visos scenārijos redzams, ka vecā tarifa sistēma palēninātu ietaupījumus saules paneļu sistēmai, kas nozīmē, ka jaunā tarifa sistēma ir izdevīgāka (jo tā ir dārgāka). Lai gan ir tiesa, ka atsevišķos scenārijos sadales “īpašais” tarifs piedāvā lielākus ieguvumus, ja salīdzina ar fiksēto elektroenerģijas cenu, gan ar vecajiem, gan jaunajiem SSO tarifiem, tomēr ir svarīgi atzīt, ka kopējā elektroenerģijas cena joprojām ir galvenais noteicošais faktors ietaupījuma ietekmēšanā.



4.4. att. Iespējamie ietaupījumi septiņu gadu periodā – neto uzskaitē (bez *BESS*).

4.5. attēlā redzami iespējamie ietaupījumi, ja paralēli saules paneļiem tiek uzstādīta *BESS* sistēma. Algoritms pieņem, ka elektroenerģija no tīkla tiek patērēta tikai tad, kad uzstādītajā *BESS* sistēmā tā ir sasniegusi 2 kWh uzlādes līmeni. Līdzīgi kā 4.4. attēlā redzamajā scenārijā,

arī šeit var novērot, ka vecie tarifi un zemās elektroenerģijas cenas samazina potenciālos ietaupījumus. Tajā pašā laikā ir iespējams sasniegt ietaupījumus sākotnējo izmaksu (*capex*) līmenī, ja tiek saņemts valsts finansiālais atbalsts vai augstu elektroenerģijas cenu gadījumā septiņus gadus pēc kārtas.

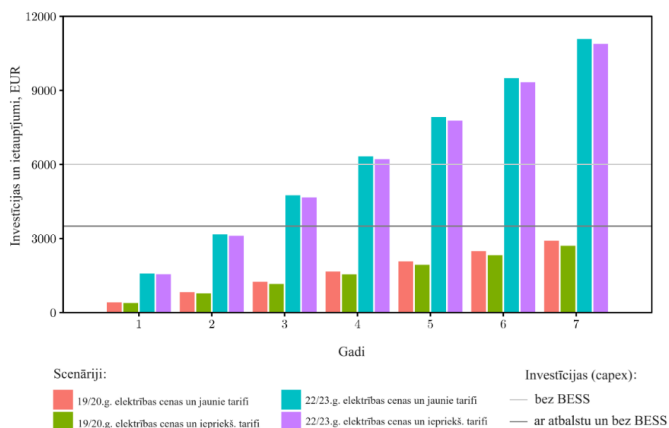


4.5. att. Iespējamie ietaupījumi septiņu gadu periodā – neto uzskaitē (ar *BESS*).

Atšķirībā no iepriekšējā gadījuma, kad nebija *BESS* sistēmas, *BESS* sistēma un fiksēta elektroenerģijas cena šajā gadījumā nesasniedz ietaupījumus, kas vienādi ar sākotnējo ieguldījumu.

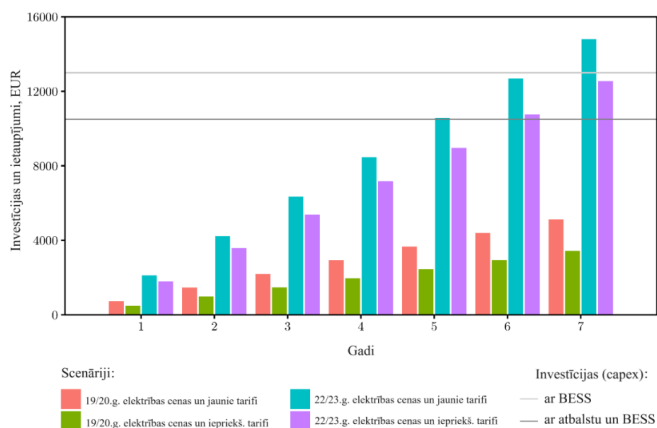
Pirmā gadījuma izpēte – neto norēķinu sistēma

Līdzīgs algoritms ir izveidots neto norēķinu sistēmas novērtēšanai. Šajā gadījumā tiek pieņemts, ka elektroenerģijas pārpalikums tiek pārdots elektroenerģijas tirgotājam par attiecīgo *Nord Pool* cenu. Neto norēķinu sistēmas potenciālie ietaupījumi redzami 4.6. attēlā, kur “stabiņi” attēlo uzkrātos ietaupījumus, savukārt horizontālās līnijas parāda ieguldījumus saules paneļu sistēmā ar un bez finansiāla atbalsta. 4.6. attēlā *BESS* nav integrēta sistēmā. Kā redzams, elektroenerģijas cenām ir būtiska ietekme uz potenciālajiem ietaupījumiem, t. i., pie zemām tirgus cenām un pat ar subsīdijām saules paneļu sistēma septiņu gadu laikā var neatmaksāties. Turpretī pie augstākām elektroenerģijas cenām un jaunā SSO tarifa šāda sistēma atmaksātos aptuveni trešajā gadā. Var novērot, ka ietaupījumi situācijā ar SSO jaunajiem tarifiem ir nedaudz lielāki nekā ar vecajiem tarifiem.



4.6. att. Iespējamie ietaupījumi septiņu gadu periodā: – neto norēķini (bez *BESS*).

4.7. attēlā redzams potenciālais ietaupījums, izmantojot *BESS*. Arī šajā gadījumā algoritms pieņem, ka elektroenerģija no tīkla tiek patērēta tikai tad, kad tā ir sasniesusi 2 kWh izlādes līmeni uzstādītajā *BESS*. Var novērot, ka jaunie tarifi palielina potenciālo ietaupījumu arī šajā gadījumā. Tajā pašā laikā ietaupījumus sākotnējo izmaksu (*capex*) līmenī ir iespējams sasniegt tikai ar valsts finansiālā atbalsta palīdzību un pie augstām elektroenerģijas cenām.



4.7. att. Iespējamie ietaupījumi septiņu gadu periodā – neto norēķini (ar *BESS*).

Pie zemām elektroenerģijas cenām šajā gadījumā ietaupījumus līdz sākotnējo izmaksu (*capex*) līmenim diez vai izdosies panākt. Tas varētu notikt tikai pie augstām elektroenerģijas cenām.

5. IZAICINĀJUMI AR JAUNIEM SISTĒMAS PAKALPOJUMIEM

5.1. Bateriju elektroenerģijas uzkrājēja sistēmas modelēšana

5.1.1. Motivācija un priekšvēsture

Šīs nodaļas galvenais ieguldījums ir algoritma izveide, ko var izmantot, lai novērtētu tehniskās iespējas nodrošināt frekvences noturēšanas rezervi (*FCR*) ar akumulatoru bateriju elektroenerģijas uzkrājēja sistēmu (*BESS*). Šajā sakarā tiek veikta gadījuma izpēte, lai pierādītu ierosināto metožu dzīvotspēju konkrētos apstākļos Latvijas energosistēmā.

Ideja par *BESS* izmantošanu *FCR* vajadzībām tiek apspriesta jau kādu laiku. Citos pētījumos par šo tematu ir secināts, ka *BESS* var nodrošināt nepieciešamo reakcijas ātrumu, lai nodrošinātu *FCR*. Regulēšanas palīgpakalpojumu sniegšanas spējai un palīgpakalpojumu cenām ir liela ietekme uz *BESS* ekonomisko atmaksāšanos un darbību. Tādēļ *BESS* darbības algoritms jāpielāgo konkrētajai elektroenerģijas sistēmai un elektroenerģijas tirgus vajadzībām. Apskatītajos pētījumos nav aplūkotas problēmas, ar kurām Baltijas pārvades sistēmas operatori (*PSO*) saskarsies tuvākajā nākotnē, tāpēc ierosināto metodiku varētu izmantot kā vadlīnijas lēmumu pieņemšanas procesā Baltijas gadījumā [18], [19], [20], [21], [22].

Turpmākajās apakšnodaļās tiek piedāvāta metodoloģija, lai noteiktu iespēju izmantot elektroenerģijas uzkrājēja sistēmu *FCR* pakalpojumam.

5.1.2. Metodoloģija

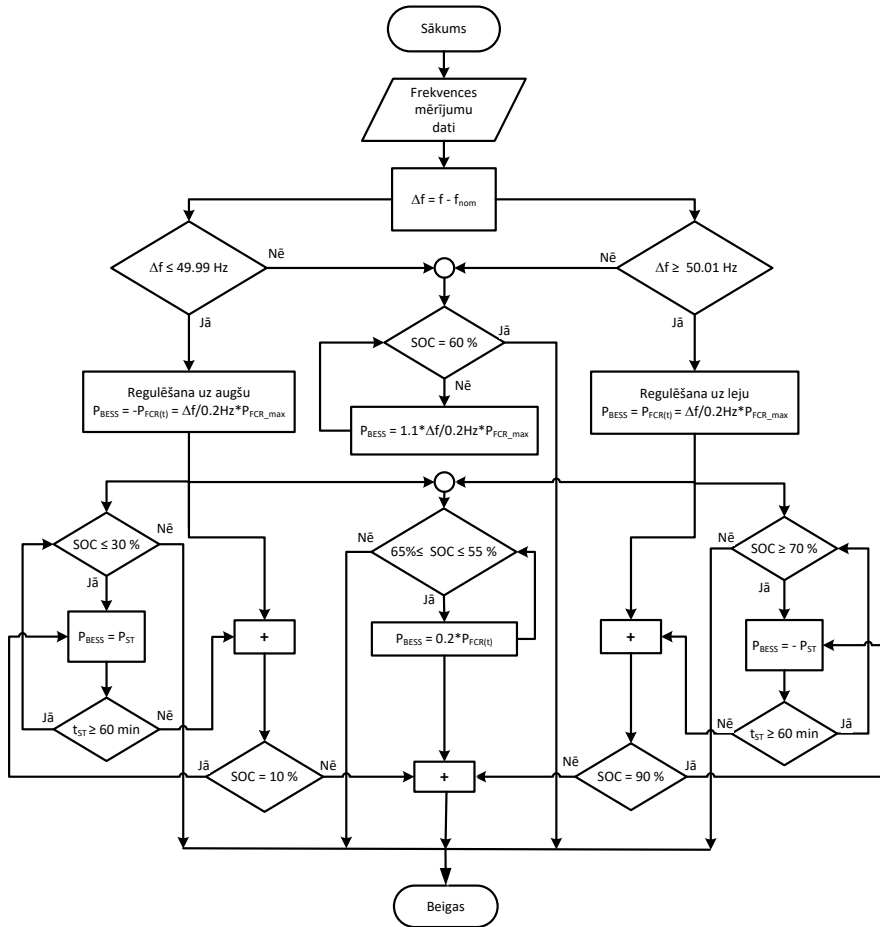
Lai saprastu, vai Latvijas energosistēmā ir iespējams uzturēt frekvences stabilitāti ar *BESS*, tika veikta gadījuma izpēte, izstrādāts aprēķinu modelis un pārbaudīta sistēmas frekvences ierobežošanas iespējas iepriekš reģistrētām frekvences novirzēm.

***BESS* modeļa aprēķinu algoritms**

Algoritms (5.1. att.) nosacīti iedalīts divās daļās – *FCR* nodrošināšana un uzlādes stāvokļa jeb *SOC* līmeņa atgūšana, kas savukārt ir iedalīta trīs daļās atbilstoši aprakstītajām *SOC* pārvaldības iespējām: tā saucamā “nejūtības zonas” izmantošana (frekvencnoteiktas reakcijas nestrādes zona), *FCR* apjoma pārsniegšana un plānoti tirgus darījumi.

BESS vadība nodrošina *FCR* pakalpojumu pieprasītajā laikā, izņemot gadījumus, kad ir sasniegta augšējā vai apakšējā uzlādes robeža (attiecīgi 90 % un 10 %). Kad *BESS* uzlādes stāvoklis sasniedz norādītās robežas, *FCR* pakalpojums tiek atslēgts un *BESS* tiek uzlādēts/izlādēts līdz *SOC* iestatītajam punktam, tādējādi atjaunojot iespēju sniegt *FCR* pakalpojumu.

Tā saucamās “nejūtības zonas” izmantošana tiek aktivizēta, tiklīdz frekvences izmaiņas ir noteiktajās nestrādes zonas robežās un *SOC* līmenis ir ārpus noteiktās normālās vērtības (60 %). Noteiktā *FCR* apjoma pārpildīšana, kā arī plānotie tirgus darījumi notiek paralēli attiecīgajiem *SOC* iestatījumiem.



5.1. att. BESS darbības blokhēma.

BESS parametru izvēle un darbības princips

BESS nominālās jaudas (P_{BESS_nom}) izvēli nosaka nepieciešamais FCR apjoms Latvijas enerģosistēmai pēc sinhronizācijas ar CESA, kas ir ± 11 MW. 5.1. tabulā redzami visi BESS izvēlētie tehniskie parametri.

Saskaņā ar Eiropas Komisijas Regulas ES 2017/1485 prasībām, gan augšpārveido, gan lejupveido FCR solījumu nodrošināšanai jābūt vismaz 15 minūšu garumā. Šis kritērijs nosaka BESS darbības vai uzlādes stāvokļa (SOC) ierobežojumus. BESS uzlādes stāvoklis ir svarīgs kritērijs tās darbības plānošanā. BESS ražotāji neiesaka pilnībā izlādēt vai uzlādēt litija jonu akumulatoru sistēmas, jo akumulatoru elementi pastiprināti degradējas. Tā vietā ir jānosaka maksimālais un minimālais uzlādes režīms, kas jāievēro, lai nodrošinātu BESS norādītā darbības cikla saglabāšanu. Izstrādātais BESS modelis pieņem, ka maksimālais SOC (SOC_{max}) ir 0,9 jeb 90 % no akumulatora nominālās ietilpības (E_{BESS_nom}), savukārt akumulatoru var

izlādēt (SOC_{\min}) līdz 10 % no tā nominālās ietilpības. Tādējādi maksimālais akumulatora izlādes dziļums ir 80 %, kas nosaka akumulatora faktisko pieejamo jaudu (E_{BESS_fact}).

Lai nodrošinātu iepriekš minēto 15 minūšu kritēriju abos virzienos, kā arī pieļaujamās SOC līmeņus, minimālo akumulatora ietilpību matemātiski nosaka šādi:

$$E_{BESS_nom} = P_{BESS_nom} \cdot 0,5 / DOD_{\max}, \quad (5.1)$$

kur 0,5 – nosaka pusstundas vai FCR sniegšanas laiku, kas ir 15 minūtes gan uz augšu, gan uz leju; DOD_{\max} – izlādes dziļuma koeficients, kas vienāds ar 0,8.

Aprēķinot 5.1. vienādojumu un noapaļojot uz augšu, tika noteikta akumulatora nominālā jauda 7 MWh. Turklāt $BESS$ normālais uzlādes stāvoklis (SOC_{norm}) jāuztur tuvu 50 %, lai garantētu pilnīgu $BESS$ pieejamību gan augšupvērstai, gan lejupvērstai FCR regulēšanai. Aprēķinā pieņemts, ka normālais uzlādes līmenis ir 60 %.

Tiek aprēķināts akumulatora uzlādes stāvoklis, un modelis pārbauda, vai SOC atrodas atļautajā SOC joslas platumā šādi:

$$\text{uzlādei } SOC(t) = SOC(t - 1) + \frac{P_{BESS}(t) \cdot \eta_{BESS} \cdot \Delta t}{E_{BESS_nom}}, \quad (5.2)$$

$$\text{izlādei } SOC(t) = SOC(t - 1) + \frac{P_{BESS}(t) \cdot \Delta t}{\eta_{BESS} \cdot E_{BESS_nom}}, \quad (5.3)$$

kur $SOC(t - 1)$ – uzlādes stāvoklis iepriekšējā brīdī; η_{BESS} – tā saucamā “round-trip” uzkrājēja sistēmas efektivitāte; Δt – laika moments 1 min pētāmajā gadījumā. Jāatgādina, ka akumulatora jauda $P_{BESS}(t)$ ir pozitīva uzlādes laikā un negatīva izlādes laikā.

Ņemot vērā invertora un paaugstinošā transformatora, kā arī pašas baterijas efektivitāti, tiek pieņemts, ka $BESS$ tā saucamā “round-trip” (kopējā) efektivitāte uzlādes un izlādes procesos ir 92 % [23].

$BESS$ darbojas nepārtraukti ar nenozīmīgiem dīkstāves periodiem, tāpēc aprēķinos netiek ņemta vērā $BESS$ vispārējā pašizlāde. Aprēķinos nav ņemts vērā arī $BESS$ pašpatēriņš.

5.1. tabula

Izvēlētie $BESS$ parametri

Nominālā jauda	P_{BESS_nom} , MW	11,0
$BESS$ nominālā elektriskā ietilpība	E_{BESS_nom} , MWh	7,0
Pieejamā $BESS$ elektroenerģija	E_{BESS_fact} , MWh ($0,8E_{BESS_nom}$)	5,6
Uzlādes stāvoklis (min)	SOC_{\min}	0,1
Uzlādes stāvoklis (norm)	SOC_{norm}	0,6
Uzlādes stāvoklis (max)	SOC_{\max}	0,9
$BESS$ tā saucamā “round-trip” efektivitāte	η	92 %

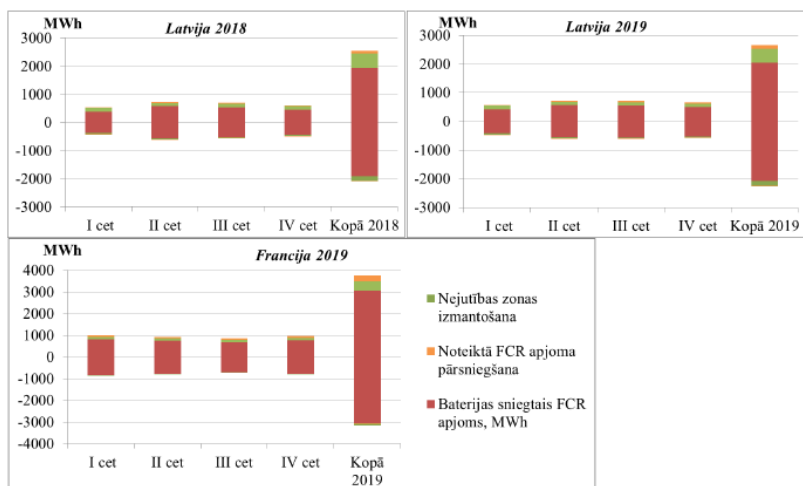
5.1.3. Rezultāti un diskusija

Lai izpētītu $BESS$ darbību trīs frekvences svārstību gadījumos Latvijas elektroenerģijas sistēmā 2018. un 2019. gadā, kā arī Francijas elektroenerģijas sistēmā 2019. gadā, tika izmantots izstrādātais aprēķinu algoritms.

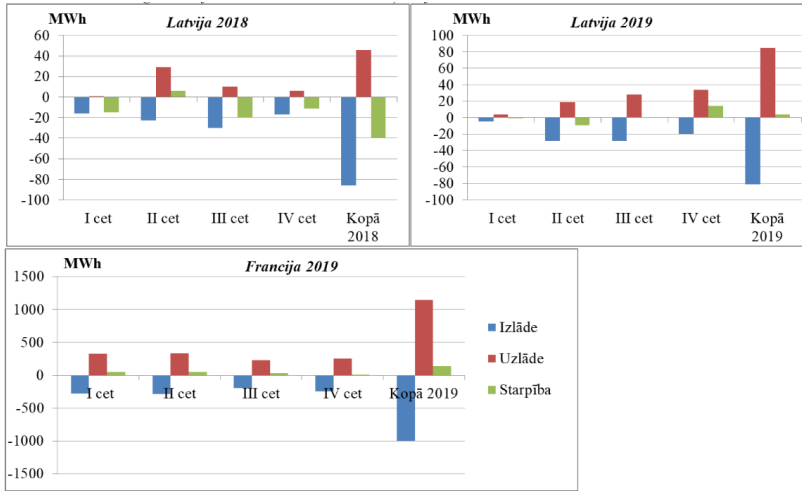
5.2. attēlā redzams *BESS* nodrošinātais *FCR* apjoms, kā arī elektroenerģija, kas patērēta vai nodota, lai atjaunotu *BESS* normālu uzlādes stāvokli, izmantojot visas trīs *SOC* pārvaldības iespējas (uzlāde ar “+” un izlāde ar “-”). Kopumā Latvijas enerģosistēmā pētāmajā gadā *BESS* izlādēja tīklā 2100–2240 MWh un attiecīgi uzlādei patērēja 2540–2660 MWh. Elektroenerģija, kas nepieciešama *SOC* atjaunošanai, veidoja tikai nelielu daļu no kopējās *BESS* elektroenerģijas – 0,5 % līdz 5 %, veicot *FCR* pārpildi, un 7 % līdz 20 %, izmantojot tā saucamo “nejūtības zonu”.

Jāatzīmē, ka Francijas enerģosistēmas frekvences noviržu piemērā *BESS* nespēja nodrošināt vajadzīgo *FCR* apjomu ar izvēlētajiem parametriem. Francijas piemērā *BESS* nodrošinātā elektroenerģija uzlādes un izlādes procesos gandrīz par 70 % pārsniedza Latvijas piemēra elektroenerģijas daudzumu. Tāpēc aprēķinos ar Francijas enerģosistēmas frekvences svārstībām plānotajiem tirgus darījumiem nepieciešamā jauda tika palielināta līdz 2 MW. Rezultāti (5.2. att.) liecina, ka šajā gadījumā *BESS* uz elektrotīklu pārvadīja aptuveni 3160 MWh un elektroenerģijas uzlādei patērēja aptuveni 3800 MWh.

5.3. attēlā redzams elektroenerģijas daudzums, kas nepieciešams *SOC* atjaunošanai, izmantojot plānotos tirgus darījumus, kas ļauj novērtēt nepieciešamās papildu izmaksas *BESS* uzlādei vai ienākumus no *BESS* izlādes. 5.3. attēlā redzams, ka plānotie tirgus darījumi notika atšķirīgi pa ceturkšņiem. Latvijas enerģosistēmas frekvences izmaiņu gadījumā 2018. gadā galvenokārt dominēja pārdotā elektroenerģija, radot papildu ienākumus no *BESS* izlādes. Turpretī 2019. gadā *BESS* uzlādei iepirktās elektroenerģijas apjoms bija lielāks (4 MWh), radot papildu ekspluatācijas izmaksas. Lielāku frekvences noviržu gadījumā, kā tas bija Francijā, ievērojami lielāks tirgus darījumu apjoms tika novērots *SOC* atjaunošanai (ar jaudu 2 MW). Kopumā *SOC* atjaunošanai Francijā plānotajos tirgus darījumos iepirktās elektroenerģijas apjoms bija 142 MWh.

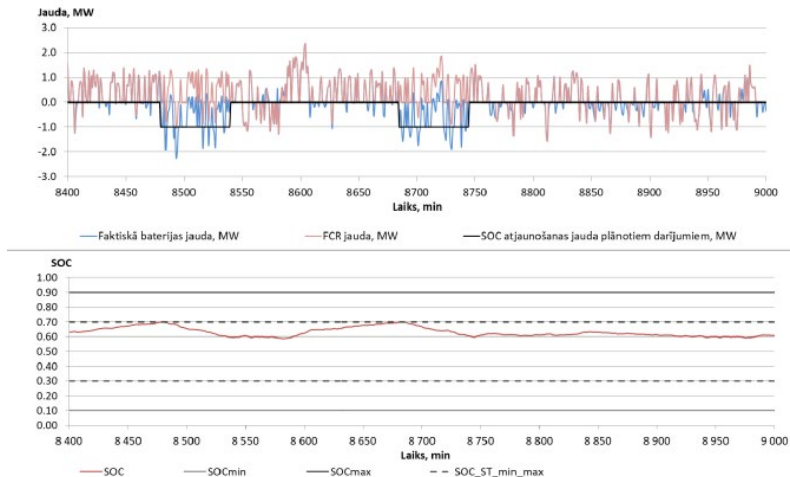


5.2. att. *BESS* sniegums *FCR* nodrošināšanai un *SOC* vadībai: (a) Latvija 2018; (b) Latvija 2019; (c) Francija 2019.



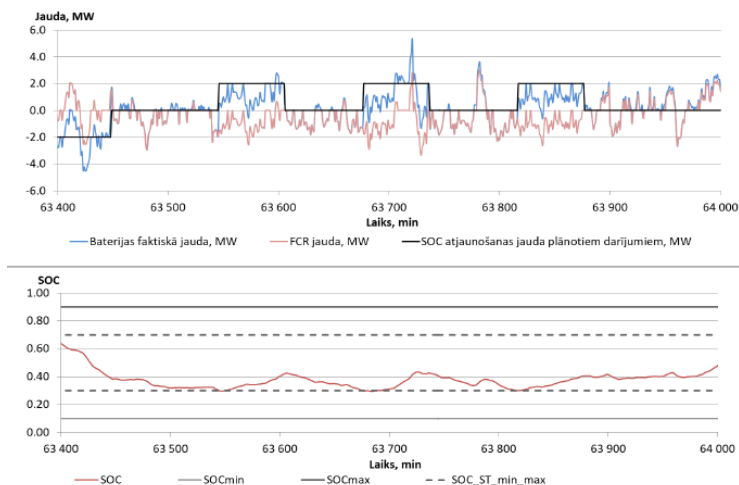
5.3. att. Plānotie tirgus darījumi, lai atjaunotu SOC.

BESS aktīvās jaudas un uzlādes stāvokļa dinamika noteiktā laika periodā Latvijas elektroenerģijas sistēmas frekvences gadījumā 2018. gadā redzama 5.4. attēlā. Kopējo akumulatora jaudu veido jauda, kas paredzēta FCR pakalpojumam, kā arī SOC atjaunošanai nepieciešamā jauda (tā saucamās “nejūtības zonas” izmantošana, FCR apjoma pārsniegšana un plānoti tirgus darījumi). Akumulatora SOC vidēji svārstās ap normālo iestatījumu noteiktajās robežās. Kad SOC parametrs sasniedz noteikto robežu 0,7, tiek aktivizēts plānotais tirgus darījums ar 1 MW jaudas izlādi tīklā uz 1 h, un 5.4. attēlā redzams, kā mainās faktiskās BESS jaudas darba punkts.



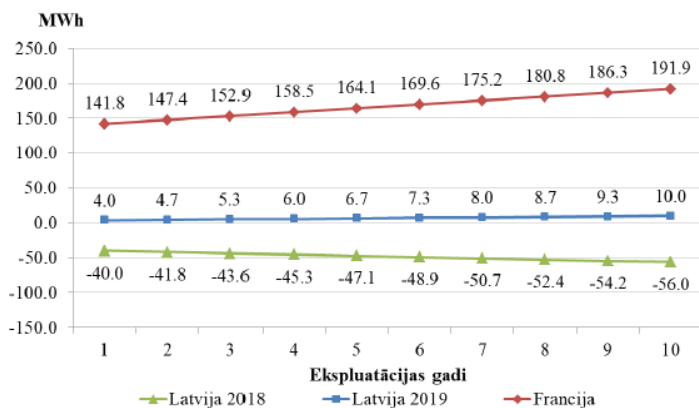
5.4. att. BESS jauda un SOC dinamika – Latvijas enerģosistēmas frekvences izmaiņas (2018. g. 1. cet., 06.01.18., plkst. 20.00–07.01.18, plkst. 06.00).

Francijas energosistēmas piemērā (5.5. att.) parādīta akumulatora jaudas un *SOC* dinamika. *SOC* svārstības ir biežākas, ar lielāku izlādes dziļumu atbilstoši frekvences svārstībām. Veiktā *SOC* pārvaldība nodrošina tās uzturēšanu pieļaujamās robežās.



5.5. att. BESS jauda un *SOC* dinamika – Francijas energosistēma (2019. g. 2. cet., 15.05.19, plkst. 00.40–10.40).

Turklāt ir aprēķināts elektroenerģijas daudzums, kas nepieciešams, lai atjaunotu akumulatora uzlādes stāvokli tā dzīves cikla beigās. Sakarā ar ikgadējo akumulatora šūnu degradāciju tiek pieņemts, ka akumulatora tehniskā kalpošanas laika beigās tā jauda ir samazinājusies līdz 80 % no nominālās vērtības. Aprēķinu rezultātos nav vienotas tendences. Piemēram, Latvijas gadījumā 2018. gada frekvences datiem bija nepieciešams papildus izlādēt akumulatoru *SOC* atjaunošanai. Dienas tirgū pārdotās elektroenerģijas pārpalikums šajā gadījumā pirmajā darbības gadā būtu 40 MWh, savukārt pēdējā gadā tas palielinātos līdz 56 MWh (+40 %). Tomēr, analizējot 2019. gada datus, *SOC* atjaunošanai bija nepieciešams iegādāties papildu elektroenerģijas daudzumu no 4 MWh pirmajā gadā līdz 10 MWh (+150 %) akumulatora darbības beigās. Francijas piemērā elektroenerģijas daudzums, kas iegādāts *SOC* atjaunošanai akumulatora darbības laika beigās, palielinājās par 35 %, salīdzinot ar pirmo akumulatora darbības gadu. Gada elektroenerģijas patēriņš visā akumulatora tehniskajā ekspluatācijas laikā Latvijas un Francijas gadījumā redzams 5.6. attēlā.



5.6. att. Ikgadējais elektroenerģijas patēriņš *BESS* uzlādes stāvokļa atjaunošanai visā tā kalpošanas laikā.

Tomēr Latvijas divu gadu novērojumi (par 2018. un 2019. gadu) neļauj ticami prognozēt *BESS* plānotās nākotnes izmaksas vai ienākumus. Aprēķini par *BESS* darbību tehniskā kalpošanas laika beigās ir balstīti tādās pašās frekvenču svārstībās kā pirmajā gadā, jo frekvenču dinamiku nevar prognozēt. Var pieņemt, ka nepieciešamība uzlādēt *BESS* palielināsies šūnu degradācijas dēļ.

Visi aprēķini tika veikti konkrētiem izvēlētiem parametriem, lai novērtētu iespējamo *BESS* darbību *FCR* pakalpojuma sniegšanai, kā arī iespējamās *BESS* ienākumus un izmaksas. *BESS* modeļa parametru maiņa var mainīt kopējos rezultātus. Turklāt *BESS* parametru izvēli ietekmē atšķirīgie frekvenču raksturlielumi dažādās sinhronajās zonās. Šajā gadījumā netika veikts optimizācijas uzdevums, lai noteiktu ekonomiski izdevīgākos un tehniski lietderīgākos bateriju sistēmas parametrus.

5.2. Decentralizēta elektroda katla nozīme palīgpakalpojumu nodrošināšanai

5.2.1. Motivācija un priekšvēsture

Šajā apakšnodaļā novērtēta elektroda katla (*EB*) uzstādīšana. Mērķis ir novērtēt dažādas *EB* jaudas un potenciālos ieguvumus no dalības siltumenerģijas un Baltijas balansēšanas tirgos. Konkrētāk, šajā apakšnodaļā novērtētas atjaunošanas rezerves ar manuālu aktivizēšanu (*mFRR*), lai gan *EB* ir pietiekami elastīgs, lai nodrošinātu atjaunošanas rezerves arī ar automātisku aktivizēšanu (*aFRR*) vai pat frekvences noturēšanas rezervi (*FCR*). Atšķirībā no iepriekšējiem pētījumiem par Rīgas centralizētās siltumapgādes sistēmu [24] *EB* izmantošana tiks pētīta attiecībā uz palīgpakalpojumu un siltumapgādes nodrošināšanu. Ierosinātajā metodoloģijā tiek ņemti vērā ienākumi gan no siltumenerģijas, gan no palīgpakalpojumiem Baltijas *mFRR* tirgū.

5.2.2. Metodoloģija

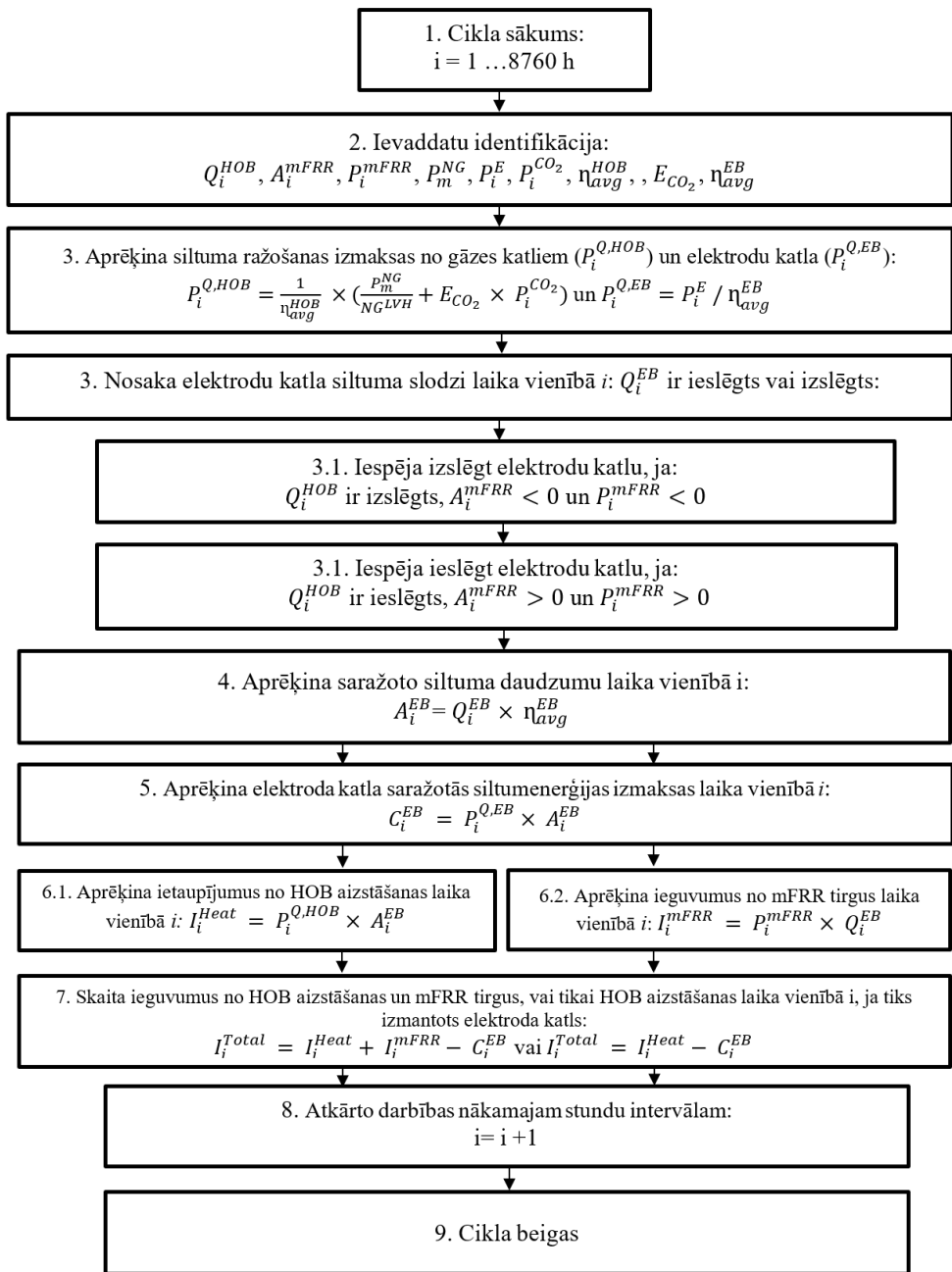
Kā minēts iepriekš, plānots ekspluatēt *EB* Baltijas balansēšanas tirgū, kur *mFRR* produkta cena un pieprasījums nepārtraukti mainās. Mērķis ir aizstāt gāzes apkures katlus (*HOB*) darbību ar *EB*. Tiek pieņemts, ka *EB* izmantos *mFRR* lejupvērsto produktu, lai līdz minimumam samazinātu siltumenerģijas izmaksas, vienlaikus gūstot papildu ieņēmumus no Baltijas balansēšanas tirgus. Papildus ekonomiskajiem ieguvumiem *HOB* aizstāšana ar *EB* varētu potenciāli samazināt CO₂ emisijas.

EB darbības aprēķina principi redzami 5.7. attēlā. Tiek pieņemts, ka cikls ir viens gads. Cikla sākumā ir definēti ievades dati. Algoritmu ievadi ietver šādus datus:

1. dati par faktisko siltuma slodzi gāzes apkures katliem CHP-1 un CHP-2 stacijā uz laika vienību i (Q_i^{HOB}); attiecīgajā sezonā diapazonā no 0–546 MW, kopā 5751 stundas gadā;
2. pieprasījuma un cenas dati par *mFRR* produktu laika vienībā i (A_i^{mDRR}, P_i^{mFRR}); 2021. gadā pieprasījums sasniedza 223 644 MWh, vidējā cena 71 EUR/MWh;
3. dabasgāzes cena mēnesī m (P_M^{NG}) bija robežās no 0,226–1,237 EUR/m³;
4. *Nord Pool* nākamās dienas elektroenerģijas cena par laika vienību i (P_i^E); diapazonā no 1,41 EUR/MWh līdz +1000,07 EUR/MWh; vidēji – 118 EUR/MWh; aprēķinos nav iekļautas pārvades izmaksas un elektroenerģijas nodokļi;
5. oglekļa dioksīda cena par laika vienību i ($P_i^{CO_2}$) svārstījās no 33,54 EUR/t līdz 79,097 EUR/t;
6. *HOB* vidējā efektivitāte (η_{avg}^{HOB}) tika pieņemta – 0,995;
7. dabasgāzes oglekļa dioksīda emisijas koeficients (E_{CO_2}) tika pieņemts – 0,201 t/MWh;
8. tika pieņemts, ka ieguldījumi (CAPEX) ir šādi: 0,08 miljoni EUR par MW; fiksētās darbības (OPEX) izmaksas – 1100 EUR par MW; mainīgās darbības (OPEX) – 0,5 EUR par MWh gadā.

Visas datu kopas tika iegūtas, izmantojot 2021. gada datus, lai nodrošinātu, ka analīzi neietekmē parametru svārstības, kas parādījās, sākot no 2022. gada, piemēram, kad sākās elektroenerģijas un gāzes cenu pieaugums, gāzes ietaupījumi koģenerācijas stacijās utt.

Algoritmu rezultātos ir iekļautas gāzes katlu un *EB* siltumenerģijas ražošanas izmaksas, tāpēc ir jānosaka, vai ir potenciāls izmantot elektroenerģijas katlu, kā arī *EB* ekspluatācijas izmaksas un potenciālos ienākumus kopā vai neatkarīgi no *HOB* nomaiņas un *mFRR* tirgus.

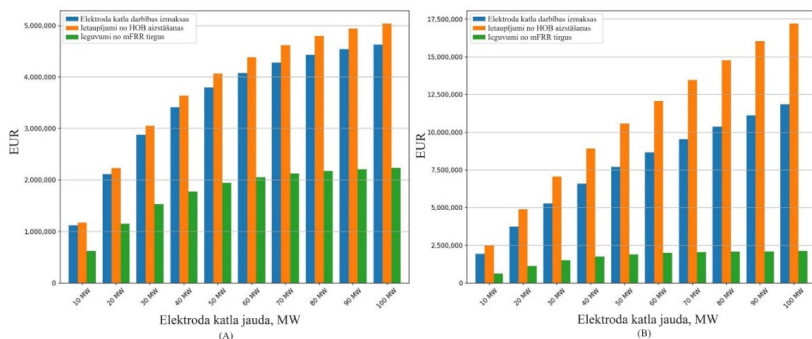


5.7. att. Aprēķina principi EB darbībai.

5.2.3. Rezultāti un diskusija

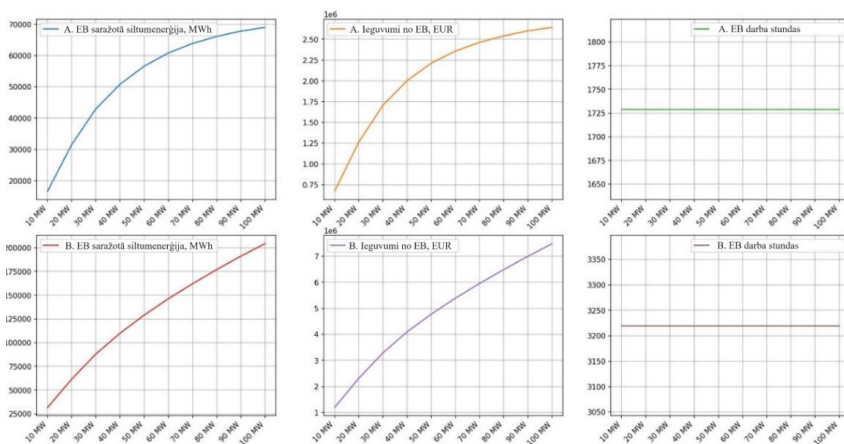
Pamatojoties uz koģenerācijas staciju *CHP-1* un *CHP-2* analīzi un darbības modeļiem, ir iegūti rezultāti dažādām *EB* jaudām, sākot no 10 MW līdz 100 MW.

EB izmantošana ne tikai samazina koģenerācijas staciju siltuma ražošanas izmaksas, bet arī rada ienājumus no Baltijas balansēšanas tirgus (5.8. att.). 5.8. (a) attēlā redzams scenārijs, kurā darbojas *EB* un tiek gūti ietaupījumi no *HOB* nomaiņas un ienājumumi *mFRR* tirgū. 5.8. (b) – scenārijs, kurā *EB* var izmantot arī *HOB* nomaiņai, ja tas ir izdevīgi, pat ja konkrētā stundā nav pieprasījuma pēc *mFRR* produkta.



5.8. att. *EB* darbība pie dažādām jaudām.

5.9. attēlā redzams, ka abos scenārijos – A un B – kopējie ienākumi, izmantojot *EB*, ir ievērojami lielāki. B scenārijs parāda, ka *EB* jāizmanto ne tikai tad, kad ir pieprasījums pēc *mFRR* produkta, bet arī citās situācijās, kad tā var efektīvi palielināt ietaupījumus no *HOB* nomaiņas. Turklāt 5.9. attēlā redzamas arī *EB* siltumenerģijas ražošanas, ienākumu un darba stundu izmaiņas starp scenārijiem A un B. Tas kalpo kā vēl viens apstiprinājums tam, ka *EB* jāizmanto ne tikai tad, kad ir pieprasījums pēc *mFRR* produkta, bet arī citās stundās, kad tā var būtiski optimizēt ietaupījumus, aizstājot *HOB*.



5.9. att. *EB* darbība divos scenārijos – A un B.

Jāatzīmē, ka tad, kad *EB* jauda sasniedz 50–60 MW, saražotās siltumenerģijas daudzums, ieņēmumi no *mFRR* tirgus būtiski nepalielinās (5.9. att.). Vēl vairāk, no šādas jaudas palielinās projekta atmaksāšanās rādītāji. Rezultātā tiek ierosināts, ka šāda lieluma (50–60 MW) *EB* būtu izdevīgi attīstīt.

SECINĀJUMI

1. Tika apstiprināta promocijas darba hipotēze, kurā uzsvēta decentralizēto elektroapgādes risinājumu efektīvas plānošanas un ekspluatācijas prioritāte. Pierādījumi liecina, ka atbilstošu modeļu un metožu pieņemšana var veicināt elastīgāku, ilgtspējīgāku un līdzsvarotāku enerģētiku Latvijā. Decentralizētās energoapgādes risinājumi ir pierādījuši savu efektivitāti saistībā ar nepastāvīgu ģenerāciju, uzlabojot sistēmas elastību, samazinot enerģijas cenas un uzlabojot kopējo infrastruktūras efektivitāti. Lai veicinātu pāreju uz tīrāku enerģētiku Latvijā un Baltijas reģionā, ir būtiski uzlaboti darbības modeļi un metodes, veicinot visu tirgus dalībnieku netraucētu līdzdalību, koncentrējoties uz atjaunojamo energoresursu integrāciju un optimizējot kritiskās komponentes, tostarp mikrotilklus, elektroenerģijas uzkrājējus, elektriskos katlus, valsts īstenotās enerģētikas programmas un patērētāju pieprasījuma apmierināšanu, tostarp elektriskos transportlīdzekļus, siltumsūkņus un citas inovācijas.
2. Izstrādātā metodoloģija, izmantojot šajā pētījumā piedāvāto programmatūras (*Homer Pro*) rīku mājsaimniecību ārpusētikla sistēmas parametru noteikšanai, nodrošina viegli lietojamu metodi, lai novērtētu vairākus scenārijus un kritērijus optimālai ārpusētikla sistēmas iekārtu parametru noteikšanai, piedāvājot vienkāršus, bet vienlaikus perspektīvus rezultātus mājsaimniecību elektroapgādes plānošanai un ekspluatācijai.
3. Izpētes gaitā izstrādāto matemātisko modeļi var izmantot kā novērtēšanas rīku ārpusētikla un mikroētikla iekārtu parametru noteikšanai. Tas ļauj analizēt potenciālo elektroenerģijas ģenerāciju pēc avota veida, *BESS* uzlādi un izlādi atkarībā no nepieciešamās slodzes, aprēķināt ikgadējās sistēmas izmaksas un citus parametrus. Tas sniedz visus nepieciešamos raksturlielumus, lai novērtētu iespēju izveidot mikroētikla risinājumu.
4. Praktiski abiem apskatītajiem rīkiem ir savas priekšrocības un trūkumi. Programmatūras rīks ļauj lielā mērā automatizēt parametru noteikšanas piedāvājumu, tādējādi nodrošinot ātru pieeju vairākiem scenārijiem. Savukārt izstrādātais simulācijas modelis dod priekšrocības pielāgot aprīkojuma parametru noteikšanu ļoti specifiskiem gadījumiem, ko var tālāk ieviest vairākos programmatūras rīkos, ņemot vērā lietotāju vēlnes. To var izmantot arī citu programmatūras rīku rezultātu apstiprināšanai.
5. Abi novērtētie rīki ir pierādījuši, ka tie spēj palīdzēt noteikt optimālo enerģijas avotu kombināciju un ārpusētikla sistēmas parametru lielumu. Tomēr, rūpīgi pārbaudot sniegtos datus, kļuva skaidrs, ka simulācijas rezultāti uzrādīja neatbilstības konkrētos aspektos, salīdzinot ar faktisko ārpusētikla sistēmas darbību. Ir svarīgi atzīt, ka simulācijas rīki nevar konsekventi apstiprināt rezultātus visos reālās dzīves scenārijos. Lai novērtētu to precizitāti, eksperimentālām pārbaudēm var būt nepieciešams ilgāks periods dažādu darbības režīmu izpētei un dažādu mērierīču iekļaušanai.
6. Neraugoties uz valsts finansiālo atbalstu mikroģeneratoru uzstādīšanai Latvijas mājsaimniecībās, kā uzsvērts atmaksāšanās analizē, ieguldījumu izmaksas citām attiecīgajām tehnoloģijām, jo īpaši enerģijas uzkrāšanai, noteiktos scenārijos galalietotājiem joprojām ir pārāk augstas. Turpretī citās situācijās ir acīmredzams, ka,

piemēram, saules mikroģeneratori var dot pozitīvu atdevi pat bez ārēja atbalsta. Tiesību aktu pārskatā norādīts, ka politikas veidotājiem pirms jaunu noteikumu formulēšanas attiecībā uz neto norēķinu programmām un finansiālā atbalsta shēmām, kas saistītas ar decentralizētiem elektroapgādes risinājumiem, ir nepieciešams uzlabot pamatojumu un saziņu ar attiecīgajām ieinteresētajām personām. Piemēram, parādot, ka ietaupījumi no saules paneļiem galvenokārt būs atkarīgi no elektroenerģijas cenas tirgū, nevis neto sistēmām. Vai parādot gadījumus, kuros elektroenerģijas uzkrājējs gūs pietiekamus ietaupījumus, lai attaisnotu ieguldījumus. Turklāt, kā ietaupījumi mainīsies, ņemot vērā dažādus uzkrājēja darbības principus.

7. Situācija Latvijas energosistēmā pēc tās desinhronizācijas no *BRELL* ir unikāla, un patlaban nav skaidru prognožu par nākotnes frekvences dinamiku energosistēmā vai *FCR* pakalpojumu cenu attīstību. Tomēr šajā pētījumā ierosinātais matemātiskais modelis pierādīja, ka ir vērts apsvērt akumulatoru bateriju elektroenerģijas uzkrāšanas sistēmu (*BESS*) kā iespēju nodrošināt pietiekamu frekvences noturēšanas rezervju līmeni, kā arī citus palīgpakalpojumus. Izmantojot izstrādāto modeli, ir iespējams veikt aprēķinus konkrētiem izvēlētiem parametriem, lai novērtētu iespējamo *BESS* darbību *FCR* pakalpojuma sniegšanā, kā arī novērtētu iespējamās *BESS* ienākumus un izmaksas. Ir būtiski atzīmēt, ka *BESS* modeļa parametru modificēšana var ietekmēt kopējos rezultātus.
8. Cits algoritms, kas izstrādāts tehniskai un ekonomiskai novērtēšanai, lietots tā saucamajam “*power-to-heat*” risinājumam, precīzāk, elektriskajiem katliem. Izvirzītā hipotēze elektrisko katlu novērtēšanai ir apstiprināta, liecinot par to potenciālu samazināt siltumenerģijas ražošanas izmaksas koģenerācijas stacijām un radīt papildu ieguvumus, piedaloties Baltijas balansēšanas tirgos. Tomēr tā piemērojamība un ekonomiskā dzīvotspēja dažādās situācijās un reģionos var atšķirties. Šīs tehnoloģijas ekonomiskā iespējamība ir atkarīga no tādiem faktoriem kā izvēlēta elektriskā katla jauda, sākotnējās un ekspluatācijas izmaksas, pieslēguma izmaksas un citiem, ko var precīzāk novērtēt turpmākajos pētījumos.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] International Energy Agency, “Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach”, France, IEA Publications, 2023.
- [2] AS “Augstsprieguma tīkls”, “Synchronisation as a regional innovation opportunity forum” [Online]. Available: <https://greentechlatvia.eu/en/synchronisation-as-a-regional-innovation-opportunity/>. [Accessed: 12.11.2023].
- [3] K. Keramidas et al., “Global Energy and Climate Outlook 2019: Electrification for the low-carbon transition”, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.
- [4] “Off-Grid or Stand-Alone Renewable Energy Systems”, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, [Online]. Available: <https://www.energy.gov/energysaver/grid-or-stand-alone-renewable-energy-systems>. [Accessed: 11.02.2024].
- [5] Lekciju materiāls “Elektriskās stacijas un apakšstacijas (EES708)”, Enerģētikas institūts Energosistēmas vadības un automatizācijas katedra, Pirmais modulis, 5. tēma, 2021. gads
- [6] Petricenko R. and Boreiko D. “Adaptive Detection of Battery Energy Storage System Charge/Discharge Cycles Quantity”, in 2019 IEEE 7th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE 2019): Proceedings, Latvia, Liepāja.
- [7] Kunicina N., Galkina A., Zhiravecka A., Chaiko Y. and Ribickis L., “Increasing Efficiency of Power Supply System for Small Manufactures in Rural Regions using Renewable Energy Resources”, Elektronika Ir Elektrotehnika, 2009, vol. 96 (8), pp. 19–22, Retrieved from <https://eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/9953>.
- [8] HOMER Pro User Manual, [Online]. Available: <https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/index.html>. [Accessed: 06.02.2021].
- [9] Gicevskis K., Linkevics O., Gorza E., and Kiene S., “Multiple scenario and criteria approach for optimal solution and sizing of household off-grid system”, in 2020 IEEE 8th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE 2020), 2021, pp. 31–37, 22–24 April 2021, Vilnius, Lithuania.
- [10] Waskom M., “Visualizing Distributions of Data”, [Online]. Available: <https://seaborn.pydata.org/tutorial/distributions.html#tutorial-hist>. [Accessed: 27.12.2022].
- [11] The Parliament of the Republic of Latvia, “Amendments to the Energy Law”, [Online]. Available: <https://titania.saeima.lv/LIVS13/saeimalivs13.nsf/webSasaiste?OpenView&count=1000&restricttocategory=1503/Lp13>. [Accessed: 16.06.2022].
- [12] The Parliament of the Republic of Latvia, “Amendments to the Electricity Market Law”, [Online]. Available: <https://titania.saeima.lv/LIVS13/saeimalivs13.nsf/webSasaiste?OpenView&count=1000&restricttocategory=1504/Lp13>. [Accessed: 18.06.2022].
- [13] Gicevskis K., Linkevics O., Groza E., “Jauni elektroenerģijas tirgus dalībnieki un tehnoloģijas–regulatīvie izaicinājumi”, Jurista vārds, 2022, vol. 1247, no. 33, pp. 30–35.

- [14] AS “Sadales tikls”, “NETO uzskaitē un NETO norēķini”, [Online]. Available: <https://sadalestikls.lv/lv/blog/post/neto-uzskaitē-un-neto-norekini>. [Accessed: 26.07.2023].
- [15] AS “Sadales tikls”, “Data sets for innovation development”, [Online]. Available: <https://sadalestikls.lv/lv/inovacijas>. [Accessed: 27.07.2023].
- [16] Zemite L., Sauhats A., Petricenko L., Kozadajevs J., Bezrukovs D., “Evaluation of the NETO electricity system and proposals for system improvements”, 2018, [Online]. Available: https://www.em.gov.lv/lv/neto-sistema-elektroenerģijas-mikroģenerācijai/elis_net0_10.08.2018_nodevums1.pdf. [Accessed: 26.07.2023].
- [17] AS “Sadales tikls”, “Tariffs for distribution system services”, [Online]. Available: <https://sadalestikls.lv/lv/tarifi>. [Accessed: 23.08.2023].
- [18] Thien T., Schweer D., vom Stein D., Moser A., Sauer D. U., “Real-world operating strategy and sensitivity analysis of frequency containment reserve provision with battery energy storage systems in the German market”, *J. Energy Storage*, vol. 13, pp. 143–163, 2017, doi: 10.1016/j.est.2017.06.012.
- [19] Jomaux J., Latiers A., de Jaeger E., “Cost-based dimensioning of Battery Energy Storage and energy management system for Frequency Containment Reserves provision”, in proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting, USA, 28–30 July 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.4181.5521.
- [20] Filippa A., Hashemi S., Traholt C., “Economic Evaluation of Frequency Reserve Provision using Battery Energy Storage”, in proceedings of the 2019 IEEE 2nd International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE 2019), Canada, 2019; pp. 160–165, doi: 10.1109/REPE48501.2019.9025133.
- [21] Maucher P., Lens H., “On the specification of requirements for the activation dynamics of Frequency Containment Reserves”, in proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids, SmartGridComm 2021, Germany, 2021, pp. 45–50, doi: 10.1109/SmartGridComm51999.2021.9632295.
- [22] Shafique H., Tjernberg L. B., Archer D. E., Wingstedt S., “Energy Management System (EMS) of Battery Energy Storage System (BESS)–Providing Ancillary Services”, in proceedings of the 2021 IEEE Madrid PowerTech, PowerTech 202–Conference Proceedings, Spain, 2021, doi: 10.1109/PowerTech46648.2021.9494781.
- [23] Zablocki A., “Energy Storage”, Environmental and Energy Study Institute: USA, 2019, [Online]. Available: <https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019>. [Accessed: 17.02.2022].
- [24] Ivanova P., Sauhats A., Linkevics, O. “Cost-benefit analysis of electric boiler at combined heat and power plants”, in IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), pp. 1–6, Riga, Latvia, 2017. doi: 10.1109/RTUCON.2017.8124747.



Kārlis Gičevskis dzimis 1990. gadā Aizkrauklē. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis bakalaura grādu (2012) un maģistra grādu (2014) vides zinātnē. Otrs maģistra grāds vides inženierzinātnē iegūts Viļņas Ģedimina tehniskajā universitātē (2014). Maģistra studiju laikā piedalījies *Erasmus* programmā Padujas Universitātē, Itālijā. Kopš 2014. gada strādā enerģētikas sektorā, pievienojoties Latvijas Ekonomikas ministrijas un Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas komandām. Patlaban ir Pētniecības un inovāciju departamenta projektu vadītājs vienā no lielākajiem zaļās elektroenerģijas ražotājiem Baltijā – AS "Latvenergo". Profesionālās karjeras laikā aktīvi piedalījies enerģētikas normatīvā regulējuma (Elektroenerģijas un gāzes tīklu kodeksi un vadlīnijas) ieviešanā Latvijā un Eiropā. Akadēmiskās intereses saistītas ar inovācijām enerģētikas sektorā, jo īpaši – decentralizētiem elektroapgādes risinājumiem.