

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte

Enerģētikas institūts

Zane Broka

Doktora studiju programmas “Enerģētika un elektrotehnika” doktorante

**PATĒRIŅA ELASTĪBAS
IZMANTOŠANA UN NOVĒRTĒJUMS
ELEKTROENERĢIJAS TIRGOS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. habil. sc. ing.*
ANTANS SAUHATS

RTU Izdevniecība
Rīga 2020

Broka, Z. Patēriņa elastības izmantošana un novērtējums elektroenerģijas tirgos. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2020. 50 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-05” 2020. gada 28. septembra lēmumu Nr. 79/20.



Daļu no promocijas darbā ietvertajiem pētījumiem finansējusi Latvijas Republikas Ekonomikas ministrija, projekts “Ilgtspējīga Latvijas energosistēmas attīstība un integrācija Eiropā (*FutureProof*)”, projekta Nr. VPP-EM-INFRA-2018/1-0005.



Daļa no promocijas darbā iekļautajiem pētījumiem veikta projektā *RealValue*. Šis projekts saņēmis Eiropas Savienības pētniecību un inovāciju programmas “Apvārsnis 2020” finansējumu, dotācijas līgums Nr. 646116.

<https://doi.org/10.7250/9789934225130>

ISBN 978-9934-22-512-3 (print)

ISBN 978-9934-22-513-0 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2020. gada 12. novembrī plkst. 11.30 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē Āzenes ielā 12 k-1, 306. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētā profesore *Dr. sc. ing.* Anna Mutule,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Vadošā plānošanas inženiere *Dr. sc. ing.* Jūlija Matevosjana,
Teksasas elektriskās drošības padome (*ERCOT*), ASV

Profesors *Dr. sc. ing.* Saulius Gudžius,
Kauņas Tehnoloģiju universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi 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.

Zane Broka (paraksts)

Datums

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, 84 attēli, 21 tabula, pieci pielikumi, kopā 170 lappušu. Literatūras sarakstā ir 117 nosaukumu.

SATURS

IEVADS	5
Pētījuma konteksts un aktualitāte	5
Promocijas darba hipotēze, mērķis un uzdevumi	7
Pētniecības metodes un līdzekļi.....	8
Zinātniskā novitāte	9
Promocijas darba praktiskā nozīme.....	9
Autores personīgais ieguldījums	10
Pētniecības rezultātu aprobācija	10
Promocijas darba struktūra	13
1. REGULĒŠANAS REZERVJU OPTIMĀLA AKTIVIZĀCIJA.....	14
1.1. Pētījuma konteksts un aktualitāte	14
1.2. Metodika.....	15
1.3. Rezultāti un diskusija.....	18
1.4. Kopsavilkums	21
2. VIEDĀS ELEKTROAPSIĻDES MODELĒŠANA.....	22
2.1. Pētījuma konteksts un aktualitāte	22
2.2. Metodika.....	23
2.3. Rezultāti un diskusija.....	26
2.4. Kopsavilkums	27
3. IEGUVUMU NOVĒRTĒJUMS NO <i>SETS</i> KĀ PATĒRIŅA REAKCIJAS RESURSA.....	28
3.1. Pētījuma konteksts un aktualitāte	28
3.2. <i>SETS</i> ietekmes uz sadales tīklu modelēšana.....	29
3.3. <i>SETS</i> ietekmes uz energosistēmu modelēšana.....	32
3.4. Kopsavilkums	36
4. PATĒRIŅA REAKCIJAS EKONOMISKAIS NOVĒRTĒJUMS MĀJSAIMNIECĪBAS LĪMENĪ.....	37
4.1. Pētījuma konteksts un aktualitāte	37
4.2. Metodika.....	38
4.3. Gadījumizpēte par mājssaimniecības <i>DR</i> dalību balansēšanas tirgū	39
4.4. Gadījumizpēte par ieguvumiem no tiešās un netiešās <i>DR</i>	42
4.5. Kopsavilkums	45
SECINĀJUMI	46
LITERATŪRAS SARAKSTS	47

IEVADS

Pētījuma konteksts un aktualitāte

Līdz ar memoranda par **Baltijas enerģijas tirgus starpsavienojuma plānu** parakstīšanu 2009. gadā tika uzsākta rīcības plāna īstenošana ar mērķi integrēt Baltijas elektroenerģijas tirgus vienotajā Eiropas Savienības (ES) tirgū [1], [2]. Tā rezultātā ir notikusi veiksmīga Baltijas un Ziemeļvalstu elektroenerģijas vairumtirdzniecības tirgu sasaiste – Igaunija, Lietuva un Latvija pievienojās elektroenerģijas biržai *Nord Pool* attiecīgi 2010., 2012. un 2013. gadā [3]. Elektroenerģijas ražotāji un tirgotāji no Baltijas valstīm piedalās *Nord Pool* biržas **nākamās dienas** un **tekošās dienas** tirgos, kuros tiek noslēgti lielākā daļa elektroenerģijas tirdzniecības darījumu.

Tomēr atšķirībā no citām ES valstīm Baltijas valstu energosistēmas vēsturiski un vēl joprojām darbojas sinhronā režīmā ar Krievijas un Baltkrievijas energosistēmām (*IPS/UPS*). Saskaņā ar Baltkrievijas, Krievijas, Igaunijas, Latvijas un Lietuvas pārvades sistēmu operatoru noslēgto līgumu (*BRELL*) primāro energosistēmas frekvences regulēšanu un sistēmas stabilitāti nodrošina Krievijas energosistēma [4]. Baltijas valstu dalību *IPS/UPS* plānots pārtraukt līdz 2025. gadam, kad tiks pabeigta Baltijas energosistēmas sinhronizācija ar kontinentālās Eiropas tīklu [5].

Taču, lai stiprinātu Baltijas valstu enerģētisko neatkarību un regulēšanas pakalpojuma sniegšanā iesaistītu arvien vairāk vietējos resursus jau vairākus gadus pirms plānotās desinhronizācijas, 2018. gadā Latvijas, Igaunijas un Lietuvas pārvades sistēmu operatori izveidoja **kopēju Baltijas balansēšanas tirgu**, kurā notiek koordinēta balansēšanas resursu aktivizācija un apmaiņa starp trim valstīm [6]. Pieprasījums pēc balansēšanas avotiem palielinās arī augošā pārtraukumaino ģenerācijas avotu īpatsvara dēļ. Minētie apstākļi nosaka to, ka nepieciešams uzlabot energosistēmas elastību, lai nodrošinātu frekvences regulēšanu ne vien normālā, bet arī izolētā darba režīmā, ja notikusi energosistēmas dalīšana [7].

Energosistēmas elastību definē kā tās spēju pielāgoties slodzes un ģenerācijas svārstībām un nenoteiktībām [8]. Mūsdienās šo balansēšanu galvenokārt nodrošina **tradicionālās elektrostacijas**; taču pastāv iespēja izmantot arī **patēriņa puses elastīgumu**, kas līdz šim nav plaši apgūts resurss [8]. Līdz ar informācijas tehnoloģijas (IT) rīku, vadības un prognozēšanas metožu attīstību patēriņa reakcija (angļu val. *demand response*; *DR*) pēdējā laikā gūst arvien lielāku ievērību kā potenciālais energosistēmas elastības avots [9]. Paralēli tam energosistēmās arvien vairāk tiek integrēti atjaunīgie energoresursi, ko galvenokārt veido pārtraukumaini ģenerācijas avoti, tādējādi arvien palielinot pieprasījumu pēc balansēšanas avotiem un uzlabotas sistēmas elastības.

Vienkāršākais patēriņa reakcijas veids ir sistemātiska energosistēmas atslodze, ko jau vairākas desmitgades izmanto kā galīgo mēru energosistēmas sabrukuma novēršanai [9]. Tomēr IT attīstība mūsdienās pavērusi iespēju īstenot sarežģītākus patēriņa reakcijas veidus. Līdz ar to vairākās energosistēmās jau šobrīd **patēriņa puses resursi** var piedalīties sistēmas balansēšanā līdzvērtīgi ģenerācijas avotiem un lielapjoma enerģijas akumulācijai. Tiek atzīts, ka, sniedzot elastības pakalpojumus, patēriņa reakcija var nest virkni **labumu**, tādējādi kļūstot

par vienu no galvenajiem viedo elektrotīklu komponentiem [10]. Vienlaikus gan pastāv arī virkne izaicinājumu, kas saistīti ar līdz šim nepilnīgi apgūto patēriņa puses resursu iesaisti energosistēmu režīmu vadībā ikdienā.

Eiropas Komisijas Viedo tīklu darba grupa **patēriņa elastību** definē kā galalietotāju (gan mājsaimniecību, gan juridisko personu) pašreizējā vai ierastā enerģijas patēriņa izmaiņas, kas notikušas, reaģējot uz tirgus signāliem, piemēram, laikā mainīgām elektroenerģijas cenām vai stimulējošiem maksājumiem, vai pēc atbilstoša pieteikuma akceptēšanas tirgū, ko galalietotājs iesniedzis individuāli vai caur agregatoru, lai organizētā elektroenerģijas tirgū par noteiktu cenu pārdotu patēriņa samazinājumu/palielinājumu [11]. Savukārt patēriņa reakciju definē kā galalietotāju brīvprātīgi veiktas izmaiņas no ierastā elektroenerģijas/gāzes patēriņa [11].

No vienas puses, par šādas elastības avotiem var kalpot galalietotāji no rūpnieciskā, komerciālā vai mājsaimniecību sektora [12], kuru elektroenerģijas patēriņam vai izkliedētajai ģenerācijai/akumulācijai raksturīgs elastīgums. No otras puses, pastāv virkne potenciālo šādu pakalpojumu saņēmēju – pārvades sistēmas operatori (PSO), sadales sistēmas operatori (SSO) un tirgotāji, kam elastības avoti nepieciešami energosistēmas balansēšanai (PSO), tīklu pārslodzes vadībai (SSO) vai sava portfeļa balansēšanai (tirgotāji) [11]. Tādējādi var izšķirt trīs galvenos ieguvumu virzienus, ko dod patēriņa reakcija [9]:

- ieguvumi **energosistēmas režīmu vadībā ikdienā**, ar *DR* palīdzību balansējot pārtraukumaino ģenerācijas avotu (piemēram, vēja elektrostaciju) radītās svārstības (prognožu kļūdas). Tiek uzskatīts, ka, salīdzinot ar tradicionālajām elektrostacijām, patēriņa puses izmantošana palīgpakalpojumu sniegšanā var palielināt sistēmas darbības drošumu, turklāt agregātiem patēriņa resursiem jaudas izmaiņu ātrums varētu būt daudz lielāks [9];
- ieguvumi **ilgtermiņa plānošanā** – pateicoties *DR* izmantošanai, samazinās nepieciešamais sistēmas jaudas rezervju apjoms un iespējams atlikt vai pat novērst vajadzību pēc jaunām investīcijām elektrotīkla stiprināšanā vai ģenerācijas jaudu palielināšanā [9], [12];
- **ekonomiski ieguvumi** – samazinās elektroenerģijas ražotāju ietekme tirgū un pazeminās elektroenerģijas vidējā cena [9], [13].

Tomēr, lai izmantotu šos labumus, vispirms jāatrisina virkne izaicinājumu, kas citastarp atkarīgi no **patēriņa reakcijas veida**. Izšķir divas galvenās patēriņa reakcijas formas:

- **netieša patēriņa reakcija** jeb vadība – galalietotāji reaģē uz dinamiskām tirgus cenām vai mainīgiem tīkla tarifiem [14];
- **tieša patēriņa reakcija** jeb vadība – patēriņa puses resursi (galvenokārt apkopotā veidā) tiek piedāvāti vairumtirdzniecības, balansēšanas un jaudas tirgos, un galalietotāji saņem atlīdzību par patēriņa izmaiņām, kas veiktas pēc attiecīga pieprasījuma (piemēram, sistēmas balansēšanas vai tīkla pārslodzes vadības nolūkos) [14].

Svarīgi piebilst, ka dažādu galalietotāju un patērētāju iesaistes veicināšanai nepieciešami **abi patēriņa reakcijas veidi**, tādējādi ļaujot pilnībā izmantot tās sniegtos ieguvumus [14].

Galvenie izaicinājumi *DR* ieviešanā [9] ir atbilstošu **tirgus** mehānismu un **regulējuma** trūkums; grūtības izveidot *DR* un/vai tās agregatoram piemērotu **biznesa modeli**; problemātiska *DR* atzīšana par **vērtīgu resursu**; **galalietotāju** uzvedība. Šie izaicinājumi tiešā veidā attiecināmi arī uz Latvijas energosistēmu, kurā patēriņa reakcija varētu būt

noderīgs resurss, kas spētu nodrošināt nepieciešamo papildu elastību, ja vien tiktu atbilstoši ieviesta un integrēta energosistēmā.

Patēriņa reakcijas jēdziens un tās izmantošana energosistēmas elastībai ir aplūkota virknē zinātnisko publikāciju, kurās autori analizējuši ieguvumus, izaicinājumus, šķēršļus un virzītājspēkus gan vispārīgā kontekstā [15]–[18], gan arī konkrētu valstu gadījumizpētē [19]–[22]. Šajā promocijas darbā veikts tādu pasākumu novērtējums, kas varētu **palielināt energosistēmas elastību**, pateicoties dažāda veida **patēriņa reakcijas** izmantošanai un papildus – arī uzlabojot sistēmas **balansēšanas procesu** kopumā. Tāpēc darba sākumā piedāvāta optimizēta regulēšanas rezervju aktivizācijas stratēģija, pēc tam veikts potenciālo ieguvumu novērtējums dažādos aspektos, ko sniegtu patēriņa reakcijas izmantošana energosistēmā. Tā ietvaros veikta detalizēta mājāsaimniecību sektorā izmantojamās tehnoloģijas – viedo elektrisko termoakumulācijas sildītāju – modelēšana, kas var nodrošināt patēriņa reakciju. Konkrētā tehnoloģija izvēlēta tāpēc, ka tieši elektriskās apsildes iekārtas var nodrošināt ievērojamu un prognozējamu patēriņa reakcijas apjomu, salīdzinot ar citām viedajām elektroierīcēm [23]. Lai palīdzētu izvēlēties piemērotu biznesa modeli un kvantificēt patēriņa reakcijas labumus, darbā izstrādāts komplekss rīks, kas veic novērtējumu no patēriņa ietaišu īpašnieka viedokļa. Zināšanas par ieguvumiem ļautu piesaistīt jaunus dalībniekus Baltijas balansēšanas tirgū, palielinot tirgus likviditāti un uzlabojot energosistēmas elastību. Tādējādi promocijas darbā izstrādāts plašs rīku un metožu klāsts, kas ļauj novērtēt ieguvumus no patēriņa reakcijas Baltijas energosistēmā.

Promocijas darba hipotēze, mērķis un uzdevumi

Hipotēze

Patēriņa reakcija var kalpot kā vērtīgs resurss, lai nodrošinātu energosistēmas augošās elastības vajadzības, radot ieguvumus gan sistēmai kopumā, gan galalietotājiem, kuri sniedz šo pakalpojumu. Turklāt energosistēmas elastību iespējams uzlabot, arī optimizējot balansēšanas procesu, tādējādi veicinot efektīvu pieejamo regulēšanas rezervju izmantošanu.

Mērķis

Patēriņa reakcijas izmantošanas izmaksu un ieguvumu novērtējums, ņemot vērā tās ietekmi gan uz energosistēmu kopumā (tostarp sadales tīklu), gan uz galalietotājiem, kuri sniedz šo pakalpojumu, un optimālas balansēšanas resursu aktivizācijas stratēģijas izstrāde Baltijas energosistēmai.

Uzdevumi

1. Izstrādāt metodiku un programmatūru balansēšanas resursu aktivizācijas optimizācijai Baltijas balansēšanas tirgus ietvaros.
2. Izstrādāt ēku termomodeļus to siltumenerģijas patēriņa aprēķināšanai (apsildei izmantojot viedos termoakumulācijas sildītājus).
3. Novērtēt viedo elektrisku termoakumulācijas iekārtu, kas nodrošina patēriņa reakciju, plaša mēroga ieviešanas ietekmi un ieguvumus Latvijas energosistēmā.
4. Izstrādāt metodiku un programmatūru varbūtiskam patēriņa reakcijas izmaksu un ieguvumu novērtējumam no *DR* resursa īpašnieka viedokļa.

Pētniecības metodes un līdzekļi

Promocijas darbā iekļautie pētījumi veikti, izmantojot dažādus RTU EVIF Enerģētikas institūtā tapušus specializētus rīkus un algoritmus, ko izstrādājusi promocijas darba autore kopā ar citiem institūta darbiniekiem.

1. nodaļā programmas *AOF parameter search* izstrādē optimizācijas uzdevuma definēšanai un risināšanai izmantota programmēšanas vide **MATLAB** un tās rīkkopa **Global Optimization Toolbox**, jo īpaši optimizācijas algoritms *patternsearch*. Tā rezultātā tika kompilēta īpaša lietojumprogramma, ko iespējams izpildīt jebkurā datorā, izmantojot bez maksas pieejamo vidi **MATLAB Runtime**. Datu ievadei un izvadei izmantota programma **Microsoft Excel** tās lietotājdraudzīgās saskarnes dēļ. Optimizācijas ceļā iegūto rezultātu validācija un analīze arī veikta programmā *Microsoft Excel*, kas ļauj lietotājam manuāli pārlūkot nebalansa prognozes dinamiku un regulēšanas gaitu jebkurā interesējošā periodā.

2. nodaļā aplūkoti ēku termomodeļi izstrādāti modelēšanas vidē **MATLAB Simscape**, kas ļauj izveidot fizikālu sistēmu (šajā gadījumā – ēku) modeļus un imitēt to fizikālos procesus, izmantojot programmu **MATLAB Simulink**. Līdz ar to **MATLAB** izmantota gan termomodeļa ekvivalento parametru noteikšanai, gan ēku siltumpatēriņa imitācijai, lai iegūtos ikstundas enerģijas patēriņa datus izmantotu energosistēmas modelēšanai nākamajā nodaļā. Vienkāršotā termomodeļa darbība tika salīdzināta ar sarežģītāku modeli, kas kalibrēts programmā *EnergyPlus*, pateicoties sadarbībai ar RTU partneriem projektā *RealValue*. Savukārt fizisku eksperimentu veikšanai ēkās izmantoti temperatūras reģistrētāji, lai iegūtu ēku atdzišanas un sasilšanas raksturlīknes.

3. nodaļā jaudas plūsmu modelēšanai sadales tīklā izmantota programma **MATLAB**. Slodzes patēriņa grafika optimizācijai ar dažādām mērķfunkcijām izmantota rīkkopa **Optimization Toolbox**. Proti, slodzes svārstību minimizācijai un zudumu izmaksu minimizācijai izmantots algoritms *fmincon (interior-point)*, kas paredzēts nelineāriem optimizācijas uzdevumiem ar ierobežojumiem. Savukārt enerģijas izmaksu minimizācijai, kas ir lineārās programmēšanas uzdevums, izmantots algoritms *linprog (dual-simplex)*.

Energosistēmas modelēšanas uzdevuma ietvaros izmantota RTU izstrādātā lietojumprogramma **OptiBidus-TEC**, lai iegūtu divu lielāko Latvijas koģenerācijas staciju elektroenerģijas izstrādes grafikus. Dažādu nākotnes scenāriju modelēšanai izmantota programma **MATLAB**, lai sagatavotu un mērogotu ieejas datus atbilstoši attiecīgajiem pieņēmumiem. Galīgais energosistēmas ieguvumu novērtējums veikts programmā **Microsoft Excel**. Tā ietvaros veikta arī lineārā regresija, izmantojot **mazāko kvadrātu metodi**.

Līdzīgi kā 1. nodaļā, lietojumprogrammas *DR Assess* izstrādei **4. nodaļā** izmantota programmēšanas vide **MATLAB**. Lai to varētu brīvi izmantot jebkura ieinteresēta persona, kompilēta lietojumprogramma, ko iespējams izpildīt jebkurā datorā, izmantojot bez maksas pieejamo vidi **MATLAB Runtime**. Ieejas datu ievadei un detalizētu rezultātu izvadei atsevišķiem scenārijiem izmantota programma **Microsoft Excel** tās lietotājdraudzīgās saskarnes dēļ. Tas ļauj sīki analizēt katru patēriņa reakcijas aktivizāciju konkrētā scenārijā un no tās izrietošās naudas plūsmas.

Zinātniskā novitāte

Lai veicinātu optimālu energosistēmas balansēšanas resursu aktivizāciju, izstrādāta **specializēta lietojumprogramma AOF parameter search**. Tā ietver komplicētu algoritmu, kas imitē PSO dispečera veiktās darbības, pasūtot regulēšanas rezerves (*mFRR*) sistēmas balansa uzturēšanai. Atšķirībā no tādas procedūras, ko īsteno vienīgi cilvēks, piedāvātais algoritms automatizēti apstrādā lielu apjomu vēsturisko datu, lai izstrādātu optimālu stratēģiju energosistēmas regulēšanas procesam. Optimizētie regulēšanas parametri nodrošina **efektīvāku energosistēmas balansēšanu**, ietaupot gan enerģiju, gan izmaksas, un ļauj samazināt Baltijas valstu summāro nebalansu attiecībā pret t.s. atvērto balansēšanas pakalpojuma nodrošinātāju, tādējādi uzlabojot Baltijas valstu enerģētisko neatkarību.

Darbā veikti pētījumi par **izmaksu un ieguvumu novērtējumu dažādiem patēriņa puses elastības resursiem**, ko var izmantot ne tikai energosistēmas balansēšanai (kā tiešo patēriņa reakciju), bet arī citos nolūkos, piemēram, netiešai pieprasījuma reakcijai. Lai veiktu šo novērtējumu no dažādiem aspektiem un ņemtu vērā ieguvumus gan energosistēmai kopumā, gan galalietotājiem, ir izstrādāti vairāki matemātiskie modeļi.

Pirmkārt, ēku termiskajai modelēšanai izmantota **efektīva uz datiem balstīta modelēšanas metode**, lai novērtētu to siltumenerģijas pieprasījumu. Tas ir būtiski, lai varētu veikt izmaksu un ieguvumu novērtējumu viedajiem elektriskajiem termoakumulācijas sildītājiem (angļu val. *smart electric thermal storage; SETS*). Šīs iekārtas, pateicoties to patēriņa reakcijas iespējām, var sniegt virkni priekšrocību gan energosistēmai kopumā, gan galalietotājiem. Iegūtās ēku siltumpatēriņa laikrindas pēc tam tiek izmantotas **sadales tīkla un energosistēmas** modeļos, kas īpaši izstrādāti, lai pētītu *SETS* ieviešanas ietekmi Latvijas energosistēmā. Lai gan šāda veida apkure jau gadu desmitiem tiek izmantota vairākās Eiropas valstīs, Latvijas tirgū tā līdz šim ir bijusi praktiski nezināma. Tādējādi veiktais pētījums ir pirmais, kas sniedz ieskatu par *SETS* ieviešanu Latvijā. Turklāt pētījumā tika izmantoti arī dati, kas iegūti no *SETS* praktiskās demonstrācijas 50 dažādās ēkās visā Latvijā.

Visbeidzot, lai informētu potenciālos galalietotājus – patēriņa reakcijas pakalpojuma sniedzējus – par saistītajām izmaksām un ieguvumiem, izstrādāta **lietojumprogramma DR Assess**. Tā balstīta uz **Montekarlo imitācijām**, tādējādi ievērojot elektroenerģijas tirgū raksturīgās nenoteiktības un veicot **varbūtisku novērtējumu** par galalietotāja potenciālajiem ieguvumiem, īstenojot tiešu vai netiešu patēriņa reakciju. Lai gan šis rīks izstrādāts Latvijas gadījumizpētei, ņemot vērā Baltijas balansēšanas tirgus un *Nord Pool* nākamās dienas tirgus regulējumu, to varētu viegli piemērot arī citu gadījumu pētījumiem ar līdzīgu tirgus struktūru.

Promocijas darba praktiskā nozīme

Promocijas darba izstrādes gaitā veiktie pētījumi devuši ieguldījumu vairāku pētniecības un inovācijas projektu īstenošanā. Kā uzskaitīts turpmāk, tie ietver gan nacionālas, gan starptautiskas nozīmes projektus un līgumdarbu enerģētikas nozares vadošajam uzņēmumam.

1. Valsts pētījumu programmas projekts “Energoeфекtīvi un oglekļa mazietilpīgi risinājumi drošai, ilgtspējīgai un klimata mainību mazinošai energoapgādei (**LATENERGI**)” (2014–2017).

2. Projekts “Viedo elektriskās-termālas enerģijas akumulēšanas tehnoloģiju izmantošana elektroenerģijas tirgus apstākļos (**RealValue**)” (2015–2018), ko finansējusi ES izpētes un inovāciju programma “Apvārsnis 2020”.
3. Līgumdarbs “Matemātisko modeļu izstrāde patēriņa elastības potenciāla noteikšanai un balansēšanas aktivizācijas optimizācijai” ar AS “**Augstsprieguma tīkls**” (2017–2018).
4. Projekts “Viedās enerģētikas stratēģiskā un operatīvā vadība (**I-POWER**)” (2018–2021), ko finansē Latvijas Zinātnes padome.
5. Valsts pētījumu programmas “Enerģētika” projekts “Ilgtspējīga Latvijas energosistēmas attīstība un integrācija Eiropā (**FutureProof**)” (2018–2021).
6. Valsts pētījumu programmas “Enerģētika” projekts “Inovatīvas viedo tīklu tehnoloģijas un to optimizācija (**INGRIDO**)” (2018–2021).
7. Projekts “PSO, SSO un lietotāju sadarbības arhitektūra inovatīvu tīkla pakalpojumu sniegšanai un energosistēmas efektivitātes uzlabošanai (**INTERFACE**)” (2019–2022), ko finansējusi ES izpētes un inovāciju programma “Apvārsnis 2020”.

Autores personīgais ieguldījums

Promocijas darba izstrādes laikā tās autore piedalījies vairākos pētniecības projektos, cieši sadarbojoties ar citiem RTU EVIF Enerģētikas institūta darbiniekiem.

Proti, programmu *AOF parameter search* autore izstrādāja profesora A. Sauhata vadībā sadarbībā ar pētnieku K. Baltputni. Autore piedalījās visos darba posmos, jo īpaši literatūras avotu analīzē, matemātiskā modeļa konceptualizācijā un formulēšanā, datu vākšanā un analīzē, piedalījās rīka programmēšanā un testēšanā, kā arī veica gadījumizpēti un analizēja rezultātus.

Viedo elektrisko termoakumulācijas iekārtu modelēšanu un to potenciālo ieguvumu novērtējumu Latvijas energosistēmā autore veica kopā ar pētnieku K. Baltputni, vadošo pētnieku J. Kozadajevu un L. Petričenko; šo darbu vadīja profesors A. Sauhats un koordinēja vadošā pētniece D. Žalostība. Autore piedalījās literatūras avotu analīzē, modeļu un metodikas konceptualizācijā, modeļu programmēšanā un testēšanā, kā arī datu vākšanā un analīzē. Autore arī interpretēja un analizēja veiktās gadījumizpētes rezultātus.

Visbeidzot, rīku *DR Assess* autore izstrādāja profesora A. Sauhata vadībā, cieši sadarbojoties ar pētnieku K. Baltputni. Autore piedalījās literatūras analīzē, matemātiskā modeļa konceptualizācijā un formulēšanā, rīka programmēšanā un testēšanā un analizēja gadījumizpētes rezultātus.

Pētniecības rezultātu aprobācija

Promocijas darba ietvaros veiktās pētniecības rezultāti iekļauti **astoņos recenzētos zinātniskajos rakstos** sešu starptautisku konferenču krājumos, kas visi indeksēti *Scopus*.

Zinātniskais raksts, kas attiecas uz 1. nodaļu

1. **Broka, Z.**, Baltputnis, K., Sauhats, A., Junghāns, G., Sadoviča, L., Lavrinovičs, V.
Towards Optimal Activation of Balancing Energy to Minimize Regulation from

Neighboring Control Areas. In: *2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM 2018)*, Poland, Lodz, 27–29 June, 2018. Piscataway: IEEE, 2018, pp.1042-1046. ISBN 978-1-5386-1489-1. e-ISBN 978-1-5386-1488-4. e-ISSN 2165-4093. doi:10.1109/EEM.2018.8469935 (Scopus).

Zinātniskie raksti, kas attiecas uz 2. nodaļu

2. **Broka, Z.**, Kozadajevs, J., Sauhats, A., Finn, D., Turner, W. Modelling Residential Heat Demand Supplied by a Local Smart Electric Thermal Storage System. In: *2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2016): Proceedings*, Latvia, Riga, 13–14 October, 2016. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, pp. 259–266. ISBN 978-1-5090-3732-2. e-ISBN 978-1-5090-3731-5. doi:10.1109/RTUCON.2016.7763128 (Scopus).
3. Kozadajevs, J., **Broka, Z.**, Sauhats, A. Modelling Heat Demand in Buildings with an Experimental Approach. In: *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Italy, Milan, 6–9 June, 2017. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 1308–1311. ISBN 978-1-5386-3918-4. e-ISBN 978-1-5386-3917-7. doi:10.1109/EEEIC.2017.7977621 (Scopus).

Zinātniskie raksti, kas attiecas uz 3. nodaļu

4. Petričenko, L., **Broka, Z.**, Sauhats, A. Impact of Smart Electric Thermal Storage on Distribution Grid. In: *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Italy, Milan, 6–9 June, 2017. Piscataway, NJ: IEEE, 2017, pp. 1330–1335. ISBN 978-1-5386-3918-4. e-ISBN 978-1-5386-3917-7. doi:10.1109/EEEIC.2017.7977625 (Scopus).

Zinātniskie raksti, kas attiecas uz 4. nodaļu

5. **Broka, Z.**, Baltputnis, K., Sauhats, A., Sadoviča, L., Junghāns, G. Stochastic Model for Profitability Evaluation of Demand Response by Electric Thermal Storage. In: *2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2018)*, Latvia, Riga, 12–14 November, 2018. Piscataway, NJ: IEEE, 2018, pp. 449–454. ISBN 978-1-5386-6904-4. e-ISBN 978-1-5386-6903-7. doi:10.1109/RTUCON.2018.8659837 (Scopus).
6. Sadoviča, L., Junghāns, G., Sauhats, A., **Broka, Z.**, Baltputnis, K., Lavrinovičs, V. Case Study – Assessing Economic Potential for Demand Response in Baltic Balancing Market. In: *2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2018)*, Latvia, Riga, 12–14 November, 2018. Piscataway, NJ: IEEE, 2018, pp. 257–261. ISBN 978-1-5386-6904-4. e-ISBN 978-1-5386-6903-7. doi:10.1109/RTUCON.2018.8659901 (Scopus).
7. Baltputnis, K., **Broka, Z.**, Sauhats, A. Influence of Flexibility Modeling Parameters on Residential-Scale Demand Response Assessment. In: *2019 IEEE Milan PowerTech*,

Italy, Milan, 23–27 June, 2019. Piscataway: IEEE, 2019, pp. 2053–2058. ISBN 978-1-5386-4723-3. e-ISBN 978-1-5386-4722-6. doi:10.1109/PTC.2019.8810947 (*Scopus*).

8. Baltputnis, K., **Broka, Z.**, Sauhats, A. Analysis of the Potential Benefits from Participation in Explicit and Implicit Demand Response. In: *2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2019)*, Romania, Bucharest, 3–6 September, 2019. Piscataway: IEEE, 2019, pp. 72–76. ISBN 978-1-7281-3350-8. e-ISBN 978-1-7281-3349-2. doi:10.1109/UPEC.2019.8893589 (*Scopus*).

Promocijas darba rezultāti apspriesti **sešās starptautiskās zinātniskajās konferencēs**.

1. 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2016) Latvijā, Rīgā 2016. gada 13.–14. oktobrī.
2. 17th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering & 1st IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe) Itālijā, Milānā 2017. gada 6.–9. jūnijā.
3. 15th International Conference on the European Energy Market (EEM 2018) Polijā, Lodzā 2018. gada 27.–29. jūnijā.
4. 59th IEEE International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2018) Latvijā, Rīgā 2018. gada 12.–14. novembrī.
5. 13th IEEE PowerTech Itālijā, Milānā 2019. gada 23.–27. jūnijā.
6. 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2019) Rumānijā, Bukarestē 2019. gada 3.–6. septembrī.

Doktorantūras studiju laikā publicēti **vairāki citi recenzēti zinātniskie raksti**, kas indeksēti *Scopus*, bet nav iekļauti promocijas darbā. Daļa no tiem uzskaitīti turpmāk.

1. Sauhats, A., Coban, H., Baltputnis, K., **Broka, Z.**, Petričenko, R., Varfolomejeva, R. Optimal Investment and Operational Planning of a Storage Power Plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, Vol. 41, Iss. 29, pp. 12443–12453. ISSN 0360-3199. doi:10.1016/j.ijhydene.2016.03.078.
2. Baltputnis, K., **Broka, Z.**, Sauhats, A., Petričenko, R. Short-Term Optimization of Storage Power Plant Operation under Market Conditions. In: *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC 2016)*, Italy, Florence, 7–10 June, 2016. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, pp. 250–255. ISBN 978-1-5090-2321-9. doi:10.1109/EEEIC.2016.7555466.
3. Sauhats, A., Petričenko, R., Baltputnis, K., **Broka, Z.**, Varfolomejeva, R. A Multi-Objective Stochastic Approach to Hydroelectric Power Generation Scheduling. In: *2016 Power Systems Computation Conference*, Italy, Genoa, 20–24 June, 2016. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, pp. 56–62. ISBN 978-1-4673-8151-2. doi:10.1109/PSCC.2016.7540821.
4. Sauhats, A., Petričenko, R., **Broka, Z.**, Baltputnis, K., Soboļevskis, D. ANN-Based Forecasting of Hydropower Reservoir Inflow. In: *2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON*

- 2016): *Proceedings*, Latvia, Riga, 13–14 October, 2016. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, pp. 267–272. ISBN 978-1-5090-3732-2. doi:10.1109/RTUCON.2016.7763129.
5. Baltputnis, K., **Broka, Z.**, Sauhats, A. Assessing the Value of Subsidizing Large CHP Plants. In: *2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM 2018)*, Poland, Lodz, 27–29 June, 2018. Piscataway: IEEE, 2018, pp. 488–492. ISBN 978-1-5386-1489-1. doi:10.1109/EEM.2018.8469816.
 6. Petričenko, L., **Broka, Z.**, Sauhats, A., Bezrukovs, D. Cost-Benefit Analysis of Li-Ion Batteries in a Distribution Network. In: *2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM 2018)*, Poland, Lodz, 27–29 June, 2018. Piscataway, NJ: IEEE, 2018, pp. 1–5. ISBN 978-1-5386-1489-1. doi:10.1109/EEM.2018.8469782.
 7. **Broka, Z.**, Baltputnis, K. Handling of the Rebound Effect in Independent Aggregator Framework. *17th International Conference on the European Energy Market (EEM 2020)*, Sweden, Stockholm, 16–18 September, 2020. Piscataway: IEEE, 2020, pp. 1–5 (*pieņemts*).

Promocijas darba struktūra

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, **84** attēli, **21** tabula, **pieci** pielikumi, kopā **170** lappušu. Literatūras sarakstā ir **117** nosaukumu.

1. nodaļā izstrādāta Baltijas energosistēmas balansēšanas procesa optimizācijas procedūra. Tā ir nozīmīga gan ekonomiskā, gan politiskā ziņā, jo ļauj samazināt energosistēmas balansēšanas izmaksas un palielināt triju Baltijas valstu enerģētisko neatkarību. Lai nodrošinātu energosistēmas balansu, ir svarīgi, lai PSO rīcībā būtu pietiekams apjoms elastības avotu. Šajā ziņā patēriņa puses elastība kopumā atzīta par līdz šim nepietiekami izmantotu resursu, it īpaši Baltijas balansēšanas tirgū, kurā dažkārt trūkst balansēšanas pakalpojuma nodrošinātāju. Tāpēc turpmākās nodaļas ir veltītas patēriņa reakcijas izmantošanai šajā nolūkā un to izmaksu un ieguvumu novērtējumam.

Viedā elektriskā termoakumulācija izvēlēta kā potenciālais patēriņa elastības resurss. **2. nodaļā** aprakstīta šī tehnoloģija un modelēšanas metode, kas izmantota, lai novērtētu ēku siltumenerģijas pieprasījumu ar datus balstītu “melnās kastes” pieeju. Pēc tam minēto iekārtu elektroenerģijas patēriņš izmantots to sniegto ieguvumu un ietekmes novērtējumam gan sadales tīkla, gan energosistēmas līmenī **3. nodaļā**.

Visbeidzot, **4. nodaļā** aprakstīta metodoloģija un rīks, kas veic varbūtisku patēriņa reakcijas ekonomisko novērtējumu no tāda galalietotāja viedokļa, kas sniedz šo pakalpojumu. Šis rīks informē potenciālos patēriņa reakcijas nodrošinātājus par paredzamajām naudas plūsmām, ņemot vērā nenoteiktības, kas saistītas ar elektroenerģijas vairumtirdzniecības un balansēšanas cenām, kā arī ar balansēšanas tirgus pieprasījumu. Tādējādi tas var atvieglot jaunu balansēšanas tirgus dalībnieku ienākšanu tirgū un palielināt Baltijas energosistēmas vispārējo elastību.

1. REGULĒŠANAS REZERVJU OPTIMĀLA AKTIVIZĀCIJA

1.1. Pētījuma konteksts un aktualitāte

Šī nodaļa veltīta lietojumprogrammai *AOF parameter search*, kas izstrādāta 2017. gadā, gatavojoties vienotā Baltijas balansēšanas tirgus atvēršanai, ko 2018. gadā dibināja Latvijas, Lietuvas un Igaunijas pārvades sistēmu operatori (PSO) ar virsmērķi izveidot kopīgu Ziemeļvalstu un Baltijas balansēšanas tirgu manuāli aktivizētām frekvences atjaunošanas rezervēm (*mFRR*) [24]. Nodaļā ietverts lietisks pētījums par *mFRR* optimālu aktivizāciju, kas balstīts uz Baltijas energosistēmas piemēru un reālo situāciju.

Rīks balansēšanas rezervju aktivizācijas apjoma un laika grafika noteikšanai tika izstrādāts, lai atvieglotu pārvades sistēmas operatora lēmumu pieņemšanas procesu energosistēmas balansēšanā Baltijas koordinētajā balansēšanas apgabalā. Pētījums ir nozīmīgs sakarā ar notiekošo balansēšanas tirgu integrāciju Eiropas Savienībā un no tās izrietošo nepieciešamību izstrādāt aktivizācijas optimizācijas funkciju. Līdz šim Baltijas valstu balansēšanas vajadzības galvenokārt nodrošināja Krievijas energosistēma. Šo pētījumu motivēja vēlme balansēšanā arvien vairāk iesaistīt vietējos resursus gan politisku, gan ekonomisku apsvērumu dēļ.

Baltijas energosistēmas īpatnība ir sinhrons darba režīms ar Krievijas un Baltkrievijas integrēto/vienoto energosistēmu (*IPS/UPS*). Krievijas energosistēma nodrošina primārās frekvences regulēšanas rezerves un drošu sistēmas darbību *BRELL* loka (Baltkrievija, Krievija, Igaunija, Latvija un Lietuva) ietvaros [4]. Kopš 2018. gada jau darbojas trīs Baltijas valstu PSO izveidotais balansēšanas tirgus, kurā notiek savstarpēja balansēšanas enerģijas apmaiņa. Tomēr atlikušo summāro nebalansu sedz t. s. atvērtais balansēšanas pakalpojuma sniedzējs (*OBP*), kas nodrošina balansēšanas enerģiju no Krievijas energosistēmas, izmantojot septiņas pārvades līnijas. Baltijas valstu kopējo nebalansu attiecībā pret *OBP* sauc par zonas kontroles kļūdu (angļu val. *area control error*; *ACE*). To aprēķina kā starpību starp plānoto un faktisko enerģijas plūsmu ik minūti, summējot (integrējot) visā nebalansa norēķinu periodā, lai iegūtu stundas *ACE*, kas izteikts MWh. Tādējādi, norēķinoties par Baltijas valstu *ACE*, tiek segtas Krievijas frekvences regulēšanas pakalpojuma izmaksas [25].

Formāli Baltijas valstīm jāuztur nebalanss noteiktās robežās (Igaunijai un Latvijai ± 30 MWh/h, Lietuvai ± 50 MWh/h [24]). Praksē ikdienā neliela apjoma nebalansu līdz 2017. gada beigām novērsa Krievijas energosistēma, bet vietējā regulēšana tika izmantota salīdzinoši retos gadījumos vien lielāka nebalansa gadījumā. Tādējādi *ACE* enerģijas apjoms veidoja lielāko daļu no kopējās Baltijas balansēšanas enerģijas, un tai bija ievērojams īpatsvars Baltijas balansēšanas izmaksās (piemēram, aptuveni 40 % no kopējām balansēšanas izmaksām Latvijā 2014. gadā [25]). *ACE* novēršana, izmantojot enerģiju no Krievijas energosistēmas, ir dārga *OBP* cenu politikas dēļ: zema pārdošanas cena, kas noteikta 5 €/MWh apmērā, un augsta pirkšanas cena, kas var pārsniegt 100 €/MWh (dati par 2015. gadu) [25]. Salīdzinājumam – vidējā nākamās dienas tirgus elektroenerģijas cena trīs *Nord Pool* Baltijas valstu apgabalos 2016. gadā bija 35,23 €/MWh.

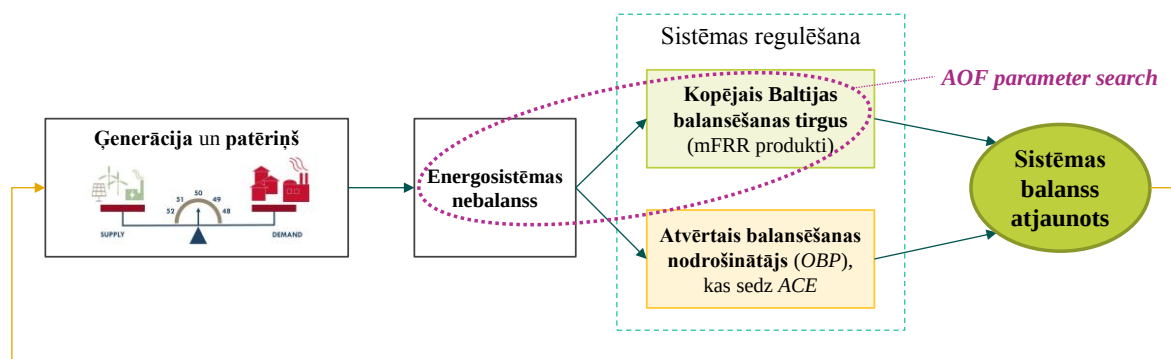
Iepriekš minētie apsvērumi, kā arī politiskais lēmums līdz 2025. gadam pārtraukt sinhronizētu darbību ar *IPS/UPS* [26] rosināja Baltijas PSO izstrādāt IT sistēmu Baltijas energosistēmas balansēšanai, kuras primārā funkcija būtu nodrošināt ilgtspējīgu sistēmas balansēšanu Baltijas apgabalā. Šī sistēma veicina balansēšanas enerģijas apmaiņu starp trim valstīm, lai palielinātu *mFRR* izmantošanu no vietējiem ražotājiem, kuru piedāvājumi tiek iekļauti kopīgā sarakstā pēc to izdevīguma secības (angļu val. *common merit order list*; *CMOL*). Paredzams, ka tas samazinās kopējās balansēšanas izmaksas, kas rodas trim Baltijas PSO, vienlaikus veicinot Latvijas, Igaunijas un Lietuvas enerģētisko neatkarību.

Viens no balansēšanas sistēmas pamatelementiem ir **aktivizācijas optimizācijas funkcija** (AOF). Kā to paredz *ENTSO-E* izstrādātās pamatnostādnes [27], AOF nosaka iespējami efektīvāku ienākošā balansēšanas pieprasījuma aktivizēšanu, vienlaikus ievērojot tehniskos ierobežojumus. Baltijas PSO plāno īstenot AOF kā automātisku algoritmu, kura galvenie ieejas dati ir pieteikumi no *CMOL* (ievērojot pārvades ierobežojumus) un aktivizācijas apjoma priekšlikums [24], kas ir šā pētījuma uzmanības centrā. Proti, tas ir algoritms, kas nosaka optimālu balansēšanas rezervju aktivizācijas apjomu, kā arī laika grafiku, pamatojoties uz vēsturiskajiem *ACE* datiem ar minūtes izšķirtspēju un pašreizējo *ACE* prognozi. Tas paredzēts kā atbalsta rīks PSO dispečeriem lēmumu pieņemšanā un tādējādi ir pirmais solis ceļā uz pilnīgi automātisku sistēmu balansēšanas rezervju aktivizēšanai.

1.2. Metodika

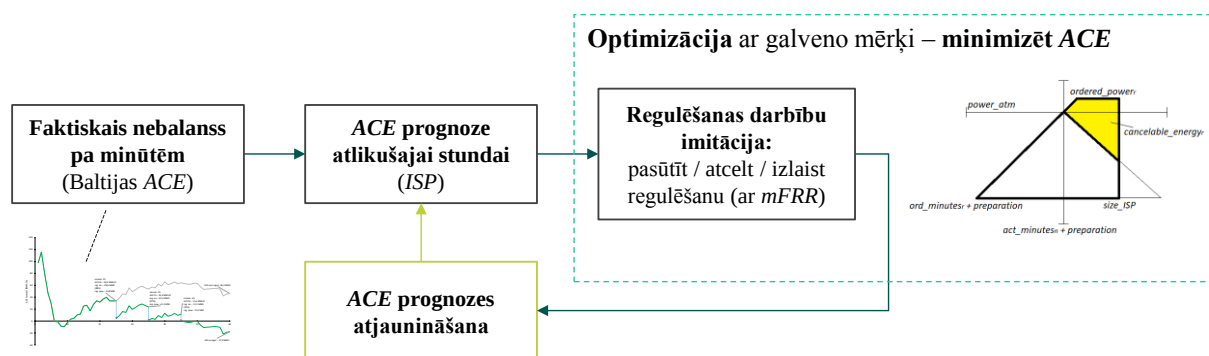
Šajā pētījumā tika izstrādāta lietojumprogramma **optimālu *mFRR* aktivizācijas parametru** ieguvei, kas izmantojami Baltijas energosistēmas balansēšanai. Īstenotā algoritma galvenais mērķis ir identificēt (tuvināti) optimālus regulēšanas parametrus un novērtēt atbilstoši šiem parametriem veiktā balansēšanas procesa rezultātus. Optimizācijas uzdevums tiek formulēts un risināts programmā *MATLAB*, lai izmantotu tās datu apstrādes spējas un algoritmus. Datu ievadei un izvadei izmantots *Microsoft Excel* tā lietotājdraudzīgās saskarnes dēļ.

Rīka *AOF parameter search* izstrāde notika 2017. gadā AS “Augstsprieguma tīkls” pasūtītā pētniecības līgumdarbā “Matemātisko modeļu izstrāde patēriņa elastības potenciāla noteikšanai un balansēšanas aktivizācijas optimizācijai”. Rīka darbības tvērums ir regulēšanas rezervju (proti, *mFRR*) aktivizēšana kopējā Baltijas balansēšanas tirgus ietvaros, lai minimizētu *ACE*, kas jāsedz *OBP* (1.1. att.).



1.1. att. Rīka *AOF parameter search* loma Baltijas valstu balansēšanas procesā.

AOF parameter search pamatā ir aktivizācijas apjoma un laika noteikšanas algoritms. Rīks īstenots kā atsevišķa lietojumprogramma izmantošanai dispečeriem, lai noteiktu, vai konkrētajā brīdī ir jāpasūta balansēšanas aktivizācija un, ja tā ir, kādā virzienā un kādā apmērā. Algoritms saņem Baltijas *ACE* prognozes datus ar minūtes izšķirtspēju kopā ar galīgo *ACE* katra nebalansa norēķinu perioda (*ISP*) beigās (pašlaik *ISP* ir 1 stunda). Tad tiek izmantota optimizācijas procedūra (1.2. att.), lai noteiktu visefektīvāko balansēšanas grafiku, pamatojoties uz vēsturiskajiem *ACE* datiem.



1.2. att. Vienkāršota rīka *AOF parameter search* darbības ilustrācija.

Balansēšanas enerģija tiek aktivizēta, balstoties uz trim dažādu parametru kopām:

- **aktivizēšanas laiks** (minūšu skaits no katra *ISP* sākuma);
- nebalansa apmērs **procentos no ACE prognozes**, par kādu notiks regulēšana;
- zemākais **ACE prognozes sliekšnis**, pie kāda tiek sākta regulēšana.

1.2.1. Mērķfunkcija

Lai aprēķinātu mērķfunkcijas vērtību, algoritms virzās cauri katram nebalansa norēķinu periodam konkrētajā *ACE* datu kopā un imitē balansēšanas aktivizācijas procesu atbilstoši attiecīgajai parametru kopai. Lai īstenotu daudzkritēriju optimizāciju, tiek izmantota **svērtās summas metode**, lai daudzkritēriju uzdevumu pārveidotu par **vienkritērija funkciju**, kura ir minimizācijas objekts. Tās vērtību veido vairāki rādītāji, no kuriem svarīgākā parasti ir **ACE** absolūto vērtību summa katra *ISP* beigās. Pārējās divas metrikas, kas izmantotas algoritmā, ir **izmantotās balansēšanas enerģijas** summa un **pasūtītās balansēšanas jaudas** kopsumma katrā *ISP*. Šo rādītāju apvienošana vienā funkcijā ir iespējama, katram kritērijam piemērojot lietotāja izvēlētos **svara koeficientus**. To galvenais mērķis ir noteikt katra mērķfunkcijas komponenta svarīgumu, bet tie arī palīdz nodrošināt to, ka dažādo komponentu dimensijas ir savstarpēji saskanīgas. Tādējādi mērķfunkciju var izteikt kā

$$w_{1a} \sum_{ISP=1}^{ISPs} ACE_{pos}^{ISP} + w_{1b} \sum_{ISP=1}^{ISPs} |ACE_{neg}^{ISP}| + w_2 \sum_{ISP=1}^{ISPs} |E_{reg.suppl.}^{ISP}| + w_3 \sum_{ISP=1}^{ISPs} |P_{reg.ord.}^{ISP}| \rightarrow \min, \quad (1.1.)$$

kur w_{1a} , w_{1b} , w_2 , w_3 – dažādo optimizācijas kritēriju svara koeficienti;

ACE_{pos}^{ISP} – pozitīvais *ACE* jeb balansēšanas enerģijas neto eksports uz Krievijas energosistēmu vienā *ISP*, MWh/h;

ACE_{neg}^{ISP} – negatīvais ACE jeb balansēšanas enerģijas neto imports no Krievijas enerģosistēmas vienā ISP , MWh/h;

$E_{reg.suppl.}^{ISP}$ – izmantotās balansēšanas enerģijas kopsumma vienā ISP , MWh;

$P_{reg.ord.}^{ISP}$ – pasūtītās balansēšanas jaudas kopsumma vienā ISP , MW;

$ISPs$ – ISP skaits apmācības datu kopā.

Svara koeficientus lietotājs var pielāgot atkarībā no savām prioritātēm. Mūsu gadījumā galvenais mērķis bija samazināt ACE katra ISP beigās, vienlaikus arī cenšoties efektīvi samazināt izmantotās balansēšanas enerģijas apjomu un pasūtītās regulēšanas jaudas.

Optimizācijas mainīgos veido parametru kopums, ko dispečers izmantotu faktiskajām balansēšanas darbībām, proti: 1) aktivizēšanas **laiks** (minūtes no katra ISP sākuma); 2) nebalansa apmērs **procentos** no ACE prognozes, par kādu jāveic regulēšana; 3) **zemākais ACE prognozes sliekšnis**, pie kāda tiek sākta regulēšana. Šo mainīgo ierobežojumus nosaka lietotājs. Turklāt lietotājs izvēlas maksimālo aktivizācijas reižu skaitu stundā (1...5), sagatavošanās laiku rezervju aktivizēšanai un jaudas izmaiņu ātrumu. Optimizācijas gaitā visi šie iestatījumi darbojas kā ierobežojumi un tiek izmantoti regulēšanas darbību imitācijā.

Ņemot vērā to, ka mērķfunkcija ir ļoti sarežģīta (tā ietver apmācības datu kopas izmantošanu regulēšanas darbību imitācijai ar virkni loģisko instrukciju, tostarp gan regulēšanas jaudas pasūtīšanu, gan tās daļēju vai pilnīgu atcelšanu, ņemot vērā jaudas izmaiņu ātrumu), tad nav iespējams izmantot tradicionālas uz gradientu balstītas optimizācijas metodes. Tā vietā jāizmanto vispusīgāki algoritmi, piemēram, *MATLAB patternsearch*. Vēl viena problēma, kas var rasties mērķfunkcijas sarežģītības dēļ, ir risks apstāties lokālajā minimumā, ko var daļēji mazināt, uzsākot optimizāciju dažādos sākumpunktos. Jo lielāks ir sākumpunktu skaits, jo lielāka ir iespēja atrast labāku risinājumu, taču tas prasa ilgāku skaitļošanas laiku. Tomēr konkrētajai mērķfunkcijai nav garantēti iespējams atrast globālo minimumu, tāpēc jāņem vērā, ka turpmāk ar terminu “optimālais risinājums” tiks apzīmēts tāds optimizācijas rezultāts, kas ir vislabākais, ko ar attiecīgo algoritmu bija iespējams atrast tam atvēlētajā laikā.

1.2.2. Regulēšanas procesa imitācijas loģiskā struktūra

Lai veiktu regulēšanas procesa imitāciju, tiek pieņemts, ka katrā aktivizācijas reizē iespējams pieņemt trīs atšķirīgus lēmumus: pasūtīt regulēšanas enerģiju; pieprasīt izmainīt (tostarp – atcelt) iepriekš pasūtītu regulēšanas enerģiju; nedarīt neko. Mērķfunkcijas aprēķina algoritma iekšējo ciklu veido komplicēta instrukciju kopa, kas nodrošina sistēmas regulēšanas imitāciju. Tajā ir ņemti vērā tādi faktori kā **sagatavošanās laiks** (no lēmuma pieņemšanas brīža par regulēšanas pasūtīšanu/izmaiņām līdz tās īstenošanas sākumam), **jaudas izmaiņu ātrums** (no viena jaudas līmeņa uz citu) un **iespējamība** piegādāt nepieciešamo regulēšanas enerģiju atlikušajā ISP laikā (kopā ar jaudas izmaiņu ātrumu tas nosaka arī maksimālo regulēšanas jaudu, ko konkrētajā aktivizācijas reizē iespējams pasūtīt).

Lēmums par regulēšanas enerģijas aktivizēšanu tiek pieņemts, ja noteiktajā aktivizācijas minūtē *ACE* prognoze sasniedz vai pārsniedz attiecīgo **prognozes sliekšni**. Pēc tam *ACE* prognoze tiek atbilstoši atjaunināta. Lai tiktu pieņemts lēmums par iepriekš pasūtītas regulēšanas atcelšanu, arī ir nepieciešams vismaz sasniegt prognozes sliekšni, turklāt arī jābūt izmainītai *ACE* prognozes zīmei. Pasūtījuma **atcelšana** šajā gadījumā ļauj izvairīties no situācijas, kad vienlaikus paralēli pastāv divas aktivizācijas pretējos virzienos. Tādējādi tiek minimizēts regulēšanas enerģijas apjoms, kas tiek “izniekots”, mainot *ACE* nepareizā virzienā, kā rezultātā būtu nepieciešama papildu regulēšana, lai to novērstu vai mazinātu.

1.3. Rezultāti un diskusija

Lai iegūtu (tuvināti) optimālus *mFRR* aktivizācijas parametrus, optimizācijas procedūra tika izmantota vēsturiskajiem 2016. gada datiem, ko nodrošināja PSO. Dati tika sadalīti apmācības un testēšanas apakškopās. *ACE* prognozes laikrindas un faktiskais *ACE* ar minūtes izšķirtspēju tika sadalīts trīs mēnešu periodos, lai tādējādi censtos ietvert sezonālās datu atšķirības. Šī pieeja arī atspoguļo Baltijas PSO paredzēto algoritma izmantošanas veidu, proti, optimizāciju ar vēsturiskajiem viena vai dažu mēnešu datiem, lai iegūtu aktivizācijas parametrus, ko pēc tam dispečers var izmantot sistēmas balansēšanai nākamajos periodos (piemēram, vienu vai dažus turpmākos mēnešus). Regulēšanas parametru optimizācija tika veikta apmācības datu apakškopai, kas veido 2/3 no vēsturisko datu kopas. Lai pārbaudītu optimizētā balansēšanas grafika veiktspēju, iegūtie parametri tika piemēroti testēšanas datu apakškopai (t. i., atlikušajai 1/3), imitējot visas regulēšanas darbības, ko veiktu PSO. Līdz ar to turpmākie rezultāti iekļauj regulēšanas rādītājus tikai testēšanas datu kopai un ļauj novērtēt optimizācijas procedūras vispārināmību.

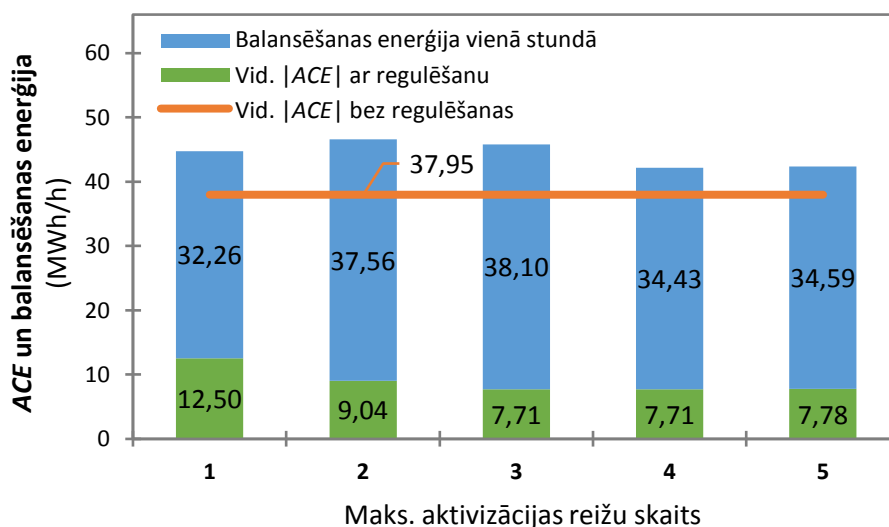
Optimālie aktivizācijas parametri un no tiem izrietošais *ACE* vienai no trīs mēnešu datu kopām (no 2016. gada jūlija līdz septembrim) ir dots 1.1. tabulā. Iegūtais *ACE* pēc balansēšanas darbību imitācijas saskaņā ar optimizēto grafiku tam pašam periodam ir parādīts arī 1.3. attēlā. *ACE* ir ievērojami samazinājies (līdz pat 4,9 reizēm) no **37,95 MWh/h** pirms jebkādas regulēšanas līdz **7,71–12,50 MWh/h**.

1.3. attēlā redzamā stabiņdiagramma ļauj novērtēt **regulēšanas efektivitāti** attiecībā uz piegādāto balansēšanas enerģiju un *ACE* samazināšanos. *ACE* summa pēc regulēšanas un nodrošinātā balansēšanas enerģija vienmēr ir lielāka nekā *ACE* bez jebkādas regulēšanas, kam iemesls ir *ACE* nenoteiktība, kuras dēļ dažkārt tiek veikti lieki papildu balansēšanas enerģijas pasūtījumi. Konkrētajā periodā visefektīvākā regulēšana bijusi tad, ja maksimālais aktivizācijas reižu skaits ir 4–5. Tad atcelšana ir nepieciešama attiecīgi tikai 1,4 %–1,7 % apmērā no pasūtītās regulēšanas enerģijas. Turklāt *ACE* samazināšanai izmantots mazāk balansēšanas enerģijas nekā gadījumos ar 2–3 aktivizācijas reizēm. Tas ir saistīts ar pakāpeniskāku un piesardzīgāku regulēšanu, kas ir iespējama ar lielāku aktivizācijas reižu skaitu *ISP* ietvaros.

1.1. tabula

Optimizētie regulēšanas parametri un rezultējošais sistēmas nebalanss

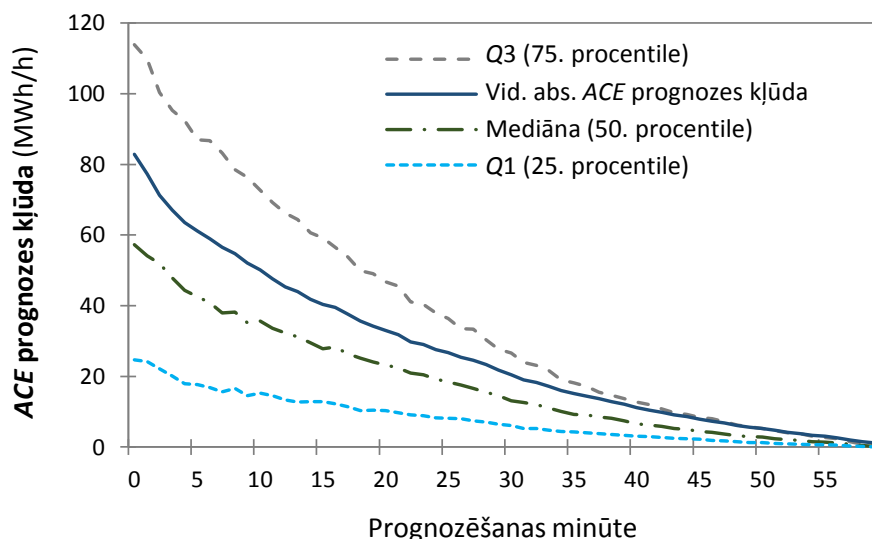
Optimizētie reg. parametri							
aktivizāciju maks. skaits		1	2	3	4	5	
aktivizācijas minūtes		35	23; 45	22; 34; 45	15; 25; 35; 45	5; 15; 25; 35; 45	
regulēšanas apjoms, % no ACE prognozes		90,5	75,4; 97,4	65,9; 81,9; 98,5	50,1; 50,7; 80,6; 93,7	31,1; 31,1; 31,1; 76,7; 94,3	
zemākais ACE prognozes sliekšnis MWh		10,0	22,1; 10,0	33,0; 27,5; 10,0	192,0; 107,0; 31,0; 10,0	182,0; 137,5; 81,8; 33,0; 10,0	
Nebalansa rādītāji		Bez viet. reg.	Pēc vietējās regulēšanas ar optimizētajiem parametriem				
Vidējais ACE	MWh/h	37,95	12,50	9,04	7,71	7,71	7,78
Vidējais ACE	MWh/h	21,85	4,42	3,63	2,47	2,73	2,55
Summārais ACE	MWh	19 315	6364	4601	3924	3923	3961
Summārais poz. ACE	MWh	15 218	4308	3224	2590	2657	2630
Summārais neg. ACE	MWh	-4097	-2056	-1377	-1335	-1266	-1331
ACE prognozes kļūda pēdējās aktiv. minūtē	MWh/h		10,67	6,34	6,34	6,34	6,34
Piegādātā bal. enerģija	GWh		16,419	19,116	19,394	17,527	17,605
augšupregulēšanai	GWh		3,775	4,921	4,764	3,899	3,891
lejupregulēšanai	GWh		12,644	14,195	14,630	13,629	13,714



1.3. att. Vidējais |ACE| pirms/pēc regulēšanas un piegādātā balansēšanas enerģija.

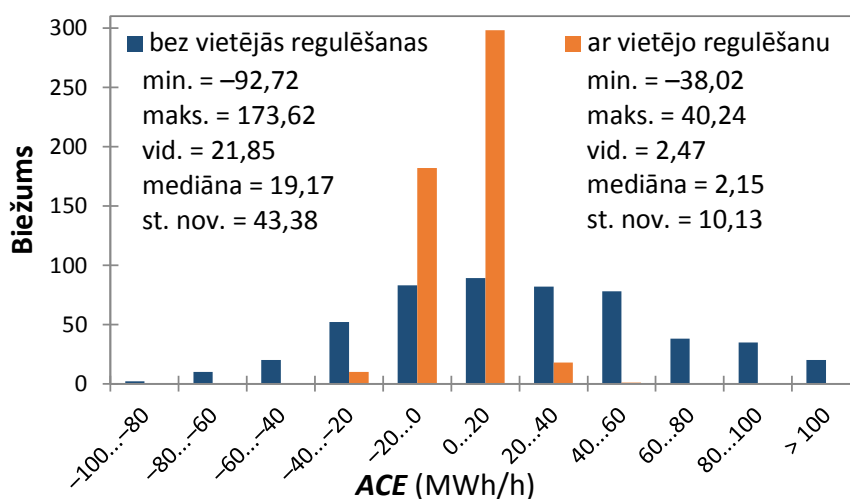
Ir svarīgi atzīmēt, ka 45. minūtē ACE prognozes vidējā absolūtā kļūda 2016. gada jūlija–septembra periodā bija 6,34 MWh/h (1.1. tab.). Tas ir ļoti tuvu zemākajai sasniegtajai vidējai ACE vērtībai (7,71 MWh/h), kas vēlreiz parāda piedāvāto aktivizācijas parametru efektivitāti un vispārināmību, kad tos piemēro testēšanas datu apakškopai.

Visos gadījumos, izņemot tikai ar vienu aktivizāciju, pēdējā izvēlētajā aktivizācijas minūtē ir 45, kas ir arī šī optimizācijas mainīgā maksimālā robežvērtība. Iemesls tam ir ACE prognozes sākotnēji ļoti augstā nenoteiktība, tās precizitātei ievērojami pieaugot katra ISP beigās (1.4. att.). Tā kā priekšlaicīga rezervju aktivizācija var novest pie liekiem regulēšanas pasūtījumiem un no tā izrietošās pasūtījumu atcelšanas, ja to virziens kļūst pretējs vēlamajam, tad algoritms acīmredzami cenšas atlikt regulēšanas darbības pēc iespējas ilgāk.



1.4. att. ACE prognozes kļūdas statistika atkarībā no prognozēšanas minūtes vienā nebalansa norēķinu periodā.

Ikstundas ACE histogramma pirms un pēc regulēšanas parādīta 1.5. attēlā, kur regulēšanas parametri piemēroti 2016. gada jūlija–septembra datu testēšanas apakškopai (kopā 509 stundām). ACE bez regulēšanas (zilie stabiņi) ir nedaudz nobīdīts pa labi uz horizontālās ass, tā vidējā vērtība ir +21,9 MWh/h. To var izskaidrot ar balansēšanas pakalpojuma sniedzēju (angļu val. *balance responsible parties*; BRP) uzvedību, kuri ierasti dod priekšroku pozitīvam sava portfeļa nebalansam, nevis negatīvam, jo potenciālais finanšu risks attiecībā uz negatīva nebalansa izmaksām ir daudz ievērojamāks nekā pozitīva nebalansa gadījumā [25]. Rezultātā Baltijas valstis kopumā OBP pārdod vairāk regulēšanas enerģijas, nekā to iepērk. Pēc optimizēto regulēšanas parametru piemērošanas 2016. gada jūlija–septembra testēšanas apakškopai vidējais ACE samazinās no +21,9 MWh/h līdz +2,5 MWh/h (oranžie stabiņi 1.5. att.). Tādējādi ir gandrīz pilnībā novērsta ACE vērtību nobīde pozitīvajā virzienā. Tas skaidri parāda ne tikai labu regulēšanas procesa veikspēju ar optimizētajiem parametriem, bet arī iegūto parametru vispārināmību, ja tos piemēro testēšanas datiem.



1.5. att. ACE histogramma pirms/pēc regulēšanas (maks. aktivizācijas reižu skaits – 3).

1.4. Kopsavilkums

Regulēšanas darbību skaitliskā imitācija, pamatojoties uz parametriem, kas optimizēti, izmantojot vēsturiskās laikrindas, apstiprināja rezultātu vispārināmību – vairumā gadījumu vidējais absolūtais *ACE* bija tuvs tā prognozes kļūdai. Turklāt tas apstiprina, ka *ACE* prognozēšanas metodikas uzlabošana ir daudzsološa joma turpmākai izpētei, jo ir sagaidāms, ka precīzākas prognozes uzlabos balansēšanas darbību efektivitāti. Turklāt, tā kā pašlaik balansēšanas parametru optimizācijas rīks tiecas atlikt regulēšanu uz *ISP* otro pusi, kad prognozes ir precīzākas, pilnveidotas agrīnās prognozēšanas spējas ļautu veikt vienmērīgākas regulēšanas darbības visā nebalansa norēķinu periodā.

Šajā pētījumā aplūkotajai datu kopai tika noteikts, ka četras un piecas aktivizācijas reizes nodrošina visefektīvāko balansēšanu vienā *ISP*, kas vienāds ar stundu. Lai gan gadījumā ar maksimāli trīs aktivizācijas reizēm arī tika sasniegts kopumā mazs *ACE*, iepriekš minētie gadījumi bija pārāki attiecībā uz izmantoto balansēšanas enerģiju un aplēstajām regulēšanas izmaksām.

Lai gan izstrādāto lietojumprogrammu būtu iespējams vēl paplašināt, iekļaujot balansēšanas piedāvājumus no tirgus to izdevīguma secībā, sākotnējie vienkāršotie ekonomiskie aprēķini jau norāda uz pamanāmiem finansiāliem ieguvumiem no aktīvākas vietējās balansēšanas Baltijas energosistēmā un samazinātas atkarības no Krievijas energosistēmas puses, jo īpaši ņemot vērā *OBP* balansēšanas enerģijas cenu politiku, kāda tā bija pētījuma veikšanas laikā.

Pat neņemot vērā finansiālos aspektus, vienotā Baltijas balansēšanas tirgus attīstība pēc tā izveidošanas 2018. gada sākumā noris veiksmīgi. Visā Eiropā notiek līdzīgas tendences, jo PSO jāīsteno nesen izstrādātās Eiropas Komisijas vadlīnijas par elektroenerģijas balansēšanu un jāievieš AOF efektīvākai energosistēmu regulēšanai. Tādējādi šim pētījumam ir būtiska nozīme kontekstā ar balansēšanas tirgu attīstību Eiropā. Šī pētījuma sākotnējos rezultātus Baltijas PSO ir izmantojuši, arī veidojot un attīstot trīs valstu kopējo balansēšanas tirgu. Tas ir īpaši nozīmīgi arī sakarā ar Baltijas valstu 2025. gadā plānoto desinhronizāciju no *IPS/UPS*.

2. VIEDĀS ELEKTROAPSILDES MODELĒŠANA

2.1. Pētījuma konteksts un aktualitāte

Tādu pārtraukumainu atjaunīgo energoavotu (*RES*) izmantošana kā vēja, viļņu un saules enerģija rada jaunus izaicinājumus energosistēmā. Lai energosistēmā integrētu ģenerāciju no izkliedētajiem un atjaunīgajiem energoavotiem un šos resursus izmantotu efektīvi, tos neierobežojot, ir nepieciešama enerģijas uzkrāšana. Pastāv dažādi veidi, kā īstenot akumulāciju, piemēram, mehāniskās enerģijas uzkrāšana (hidroenerģija, saspiegts gaiss, spārati), elektroķīmiskie akumulatori, gāzes uzkrāšana (tās ieguvei izmantojot elektroenerģiju; angļu val. – *power to gas*), elektriskās un magnētiskās enerģijas uzkrāšana (kondensatori un superkondensatori, supravadītājmateriāli), siltumenerģijas akumulācija.

Lai gan ir izstrādātas un jau sen zināmas tehnoloģijas liela mēroga enerģijas uzkrāšanai, piemēram, hidroakumulācija, kas ir visvairāk izmantotais enerģijas akumulācijas veids pasaulē kopumā, daudz pūļu tiek veltīts mazjaudas enerģijas uzkrāšanas tehnoloģiju attīstībai, jo īpaši izmantošanai mājāsaimniecībās. Viena no šādām tehnoloģijām ir viedā elektriskā termoakumulācijas ar ierīcēm telpu apsildei un karstā ūdens sildīšanai [28]. Tā ir sajūtāmā siltuma uzkrāšanas sistēma [29], kas patērē elektroenerģiju un spēj to ilgstoši uzglabāt siltumenerģijas veidā, lai to varētu izmantot vēlāk – tieši tad, kad tas ir nepieciešams. Tādējādi apkures sistēmas elektroenerģijas pieprasījums parasti ir nobīdīts laikā no tā perioda, kad mājāsaimniecība siltumenerģiju izmanto.

Elektriskie termoakumulācijas sildītāji tiek lietoti jau gadu desmitiem, jo īpaši valstīs, kur mājāsaimniecībām vēsturiski tiek piemērots divzonu elektroenerģijas tarifs. Tradicionālajiem termoakumulācijas sildītājiem bija ierobežota vadāmība to relatīvi īsā siltuma uzglabāšanas laika dēļ. Tomēr jaunākās paaudzes viedās elektriskās termoakumulācijas sistēmas (*SETS*) siltuma uzglabāšanas laiks ir ievērojami paildzinājies, turklāt nesenā informācijas un komunikācijas tehnoloģiju attīstība ir ļāvusi būtiski modernizēt arī akumulācijas sildītājus. *SETS* ierīces tagad ir aprīkotas ar viedu vadību, ko var īstenot energosistēmas līmenī, vienlaikus nodrošinot to, ka tiek ievērotas un apmierinātas katras individuālās mājāsaimniecības vajadzības pēc telpu apsildes un ūdens sildīšanas [28]. Tas ļauj nodalīt elektroenerģijas patēriņa laiku no paredzamā siltuma pieprasījuma un piegādāt elektroenerģiju *SETS* praktiski jebkurā laikā, bet siltumu patērēt jebkurā citā laikā, kad tas ir nepieciešams. Līdz ar to visu energosistēmas darbības posmu dalībnieki, ieskaitot ražošanu, pārvadi, sadali un patēriņu, potenciāli var gūt labumu no *SETS* ieviešanas.

SETS var sniegt ieguvumus sabiedrībai kopumā, piemēram, zemākas izmaksas lietotājiem un *RES* izmantošanas veicināšana, savukārt *SETS* slodze apkopotā (agregētā) veidā var nodrošināt vairākus pakalpojumus energosistēmai, piemēram, patēriņa nobīdi laikā un pieprasījuma reakciju, palīgpakalpojumus (frekvences regulēšanu, rezervju nodrošināšanu), pārslodzes vadību, kā arī samazināt vai atlikt elektrotīklam nepieciešamos kapitālieguldījumus.

Lai gan *SETS* tehnoloģija un atbilstošas ierīces jau ir pieejamas tirgū [28], energosistēmas vēl nav spējīgas tās pilnībā integrēt, un tiek veikti dažādi pētījumi par to, kā šo procesu

atvieglot. Viena no risināmajām problēmām ir energosistēmas darba režīmu optimizācija, kurā vienlaikus ievēro arī elektroapsildei nepieciešamo patēriņu [29]. Energosistēmas modelēšanā un optimizācijā būtu jāietver arī lokālas mazjaudas termoakumulācijas ierīces ar to tehniskajiem parametriem un siltumenerģijas galapatēriņa prasībām.

Lai novērtētu potenciālo izmaksu ietaupījumu, lietotājiem izmantojot *SETS* ar dinamisku elektroenerģijas cenu liberalizēta tirgus apstākļos, jāņem vērā mainīgās elektroenerģijas cenas ar atbilstošu izšķirtspēju (piemēram, *Nord Pool* biržas nākamās dienas tirgus ikstundas cenas). Līdz ar to siltumenerģijas galapatēriņš arī būtu jāmodelē ar stundas izšķirtspēju.

Šī nodaļa ir veltīta dzīvojamo ēku siltumenerģijas pieprasījuma modelēšanai. Tajā piedāvāta metode, kas balstīta uz fiziskiem eksperimentiem un virtuālām imitācijām, lai iegūtu ekvivalentos ēkas termālos parametrus, ko pēc tam var izmantot ēkas termodinamikas modelēšanai dažādos laika apstākļos.

Šeit izklāstītā pieeja kalpoja par pamatu turpmākajiem pētījumiem, kas ietvēra arī fiziskus eksperimentus dažādās Latvijas ēkās, lai noteiktu to termiskās īpašības un siltumenerģijas pieprasījumu. Pēc tam atsevišķu ēku patēriņu iespējams mērogot, lai iegūtu kopējo patēriņu valsts līmenī. Tādējādi lokālo mazjaudas termoakumulācijas iekārtu elektriskā slodze turpmāk tiek integrēta kopējos energosistēmas modeļos, lai novērtētu *SETS* ietekmi uz energosistēmas plānošanu, tās darba režīmiem (ģenerāciju, rezervēm), sadales tīkla pārslodzi u. c. Šā ietekmes novērtējuma galvenie rezultāti ir izklāstīti 3. nodaļā. Turklāt siltuma pieprasījuma modelēšanas rezultāti izmantoti arī izmaksu un ieguvumu novērtējumā attiecībā uz patēriņa reakciju no galalietotāja viedokļa (4. nodaļa).

Pētniecības darbs, kas atspoguļots 2.–3. nodaļā, tika veikts 2015.–2018. gadā projektā *RealValue*. Projekts saņēma finansējumu no ES pētniecības un inovācijas programmas “Apvārsnis 2020” saskaņā ar dotāciju nolīgumu Nr. 646116.

2.2. Metodika

2.2.1. Termomodeļi uz elektriskās analogijas pamata

Ēku termodinamikas modelēšanai bieži izmanto *RC* shēmas, kuru pamatā ir analogija ar elektrotīklu. Katru ēkas elementu var attēlot ar rezistoriem un kondensatoriem kā koncentrētiem parametriem [30]–[34]. Šādu termomodeļu priekšrocības ir vienkāršība, pārskatāmība un zema skaitļošanas intensitāte [31]. Teorētiski vienkāršākais modelis varētu sastāvēt no vienas pretestības un viena kondensatora [35]. Taču tas ir nereālistiski no praktiskā un fizikālā viedokļa, tāpēc parasti izmanto vairāk elementu. Piemēram, [31]–[33] izmanto otrās kārtas modeļus, kur ēkas konstruktīvos elementus modelē ar trim pretestībām un diviem kondensatoriem. Avotā [33] šāds reducētais modelis ir atvasināts no 20. kārtas modeļa, izmantojot nelineāru optimizāciju ar ierobežojumiem, un tam ir dota priekšroka, salīdzinot ar vēl vienkāršāku pirmās kārtas modeli, ievērojami labākas veiktspējas dēļ. Šī pieeja vēl vairāk uzlabota avotā [31], kur izmantots meklēšanas algoritms ar daudzkritēriju optimizāciju un iekļauti rezultāti virknei dažādu konstruktīvo elementu.

Saules siltuma ieguvumi; gaisa infiltrācija

Apsilde

C_1

R_1

C_2

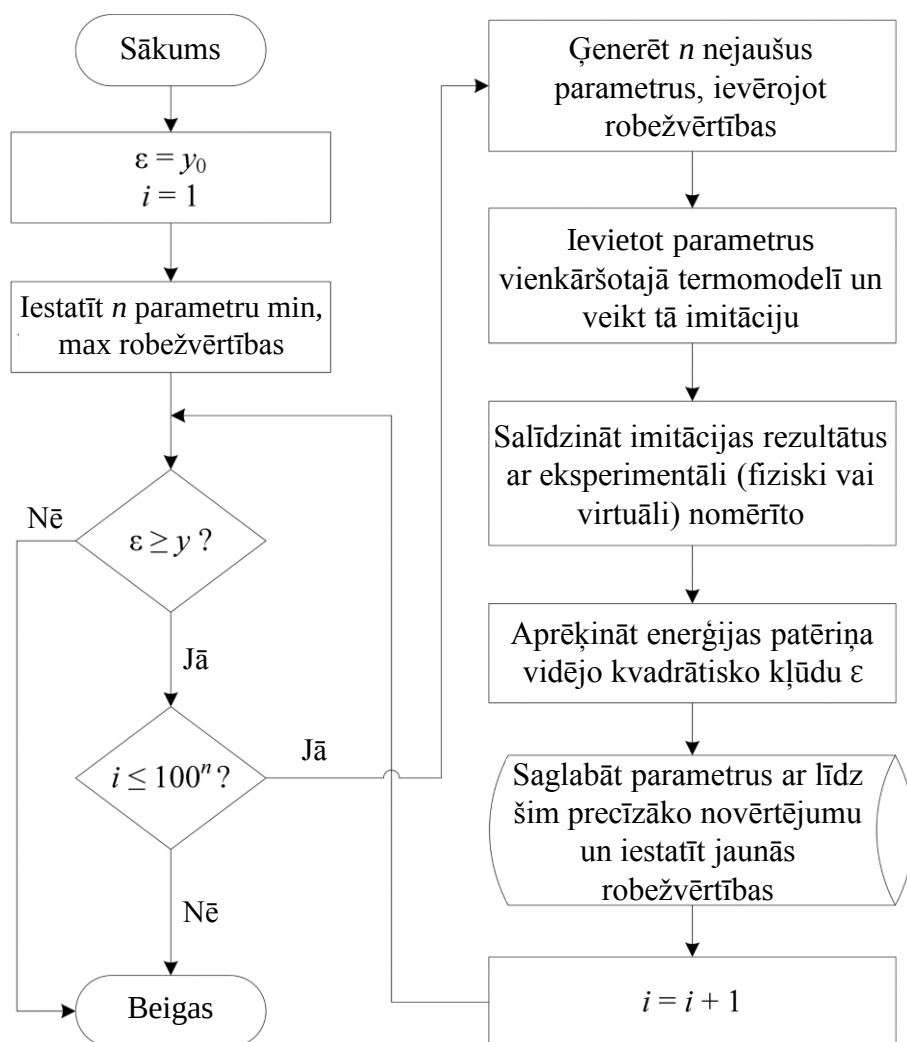
R_2

Āra temperatūra

2.2.2. Modeļa parametru noteikšana

24

skaitlisko (virtuālo) vai fizisko eksperimentu mērījumiem, kā kļūdas mēru izmantojot vidējo kvadrātisko kļūdu. Parametru ģenerēšana tika atkārtota 100^n reizes, kur $n = 4$ ir nezināmo parametru skaits. Tie parametri, kas nodrošināja visprecīzāko modeļa veiktspēju, tika saglabāti. Šī pieeja ietver daļēju pārlasi ar augstu precizitāti, pateicoties Montekarlo metodei, kur parametri tiek atlasīti pēc nejaušības principa. Tas ļauj izvēlēties tādu rezultātu, kas ir tuvs globālajam minimumam, izvairoties no lokālajiem minimumiem. Modeļi ar šādi izvēlētajiem parametriem pēc tam var izmantot siltumenerģijas pieprasījuma modelēšanai gan individuālām ēkām, gan to kopumam.

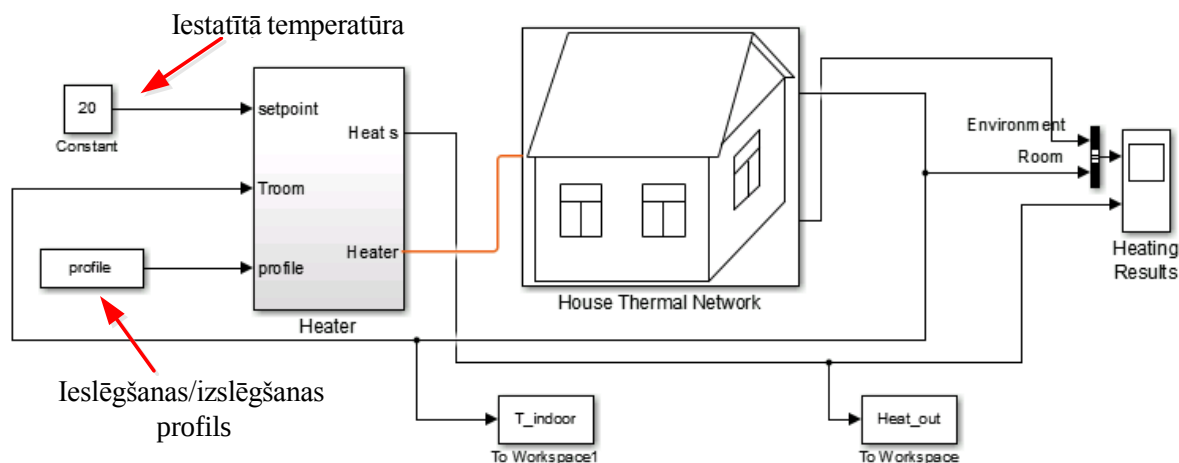


2.3. att. Blokhēma termomodeļa parametru noteikšanai.

Piedāvātā ēku siltumenerģijas pieprasījuma modelēšanas pieeja tika validēta, veicot virtuālus (skaitliskus) un fiziskus eksperimentus. Virtuālie eksperimenti ietvēra modeļa imitācijas rezultātu salīdzināšanu ar diviem sarežģītākiem modeļiem, savukārt fiziski eksperimenti tika veikti reālā dzīvojamā mājā, kas ļāva noteikt tās termomodeļa parametrus, lai salīdzinātu ēkas faktisko (nomērīto) un modelēto siltumdinamiku.

2.2.3. Ēkas termodinamikas imitācija

Ēku modeļi ar identificētajiem ekvivalentajiem termiskajiem parametriem tika izmantoti, lai modelētu to termodinamiku programmā *MATLAB Simulink* (2.4. att.). Šajā attēlā ar *House Thermal Network* apzīmēts termomodelis, kas bija dots iepriekš 2.1. attēlā.



2.4. att. *MATLAB Simulink* modelis ēkas termodinamikas imitācijai.

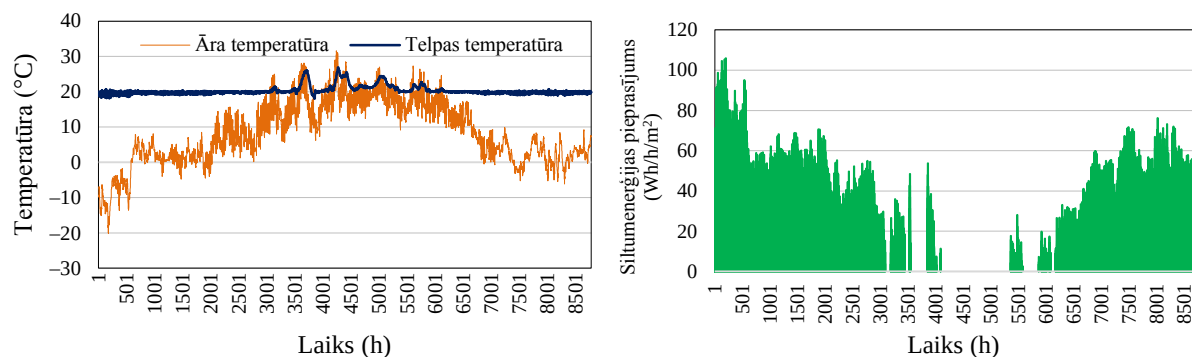
Lai veiktu katras ēkas termodinamikas imitāciju, modelī tiek ievadīts apkures grafiks, kas balstīts uz iedzīvotāju komforta prasībām. Grafiks ietver temperatūras iestatījumus un ikstundas ieslēgšanas/izslēgšanas profilu, atspoguļojot laikposmus, kad apkure ir vai nav nepieciešama. Šāda apkures iekārtu vadība imitē *SETS* ierīču darbību, kādas tika izmantotas praktiskajos izmēģinājumos Latvijā projektā *RealValue*. Imitācijām tika izmantotas dažādas komforta prasības, pamatojoties uz galalietotāja tipu un ēkas noslodzi. Imitācijas var veikt jebkuram interesējošam periodam, piemēram, 24 stundām (vienai dienai) vai 8760 stundām (vienam gadam). Veicot imitācijas ar ēku termomodeļiem, tiek iegūtas laikrindas, kas atspoguļo ikstundas siltumenerģijas pieprasījumu un iekštelpu temperatūru. Tās tiek izmantotas turpmākajā modelēšanā.

2.3. Rezultāti un diskusija

Pamatojoties uz iepriekš izklāstīto metodiku, tika izstrādāti modeļi vairākām ēkām. Validētie modeļi tika izmantoti, lai aprēķinātu siltumenerģijas pieprasījumu gada laikā, izmantojot ikstundas āra temperatūru un saules starojumu. 2.5. attēlā ilustrēta modelētā iekštelpu temperatūras un siltuma pieprasījums koka savrupmājai 70 m² platībā 2016. gadā.

Ja izmanto 20 °C un 20 stundu apkures profilu dienā, modelētais siltumenerģijas pieprasījums ir 11,13 MWh gadā jeb 159 kWh/m². Vislielākais siltuma pieprasījums ir janvārī (0.–744. stunda), kas sakrīt ar gada aukstāko laiku. Vasaras karstākajās dienās telpas temperatūra nereti pārsniedz iestatīto 20 °C temperatūru, jo ēkas dzesēšanas sistēma netiek modelēta. Savukārt varam novērot, ka vasarā, iestājoties aukstam laikam, dažas reizes ir nepieciešams pieslēgt apkuri. Izstrādātais modelis ļauj aprēķināt ikstundas siltuma pieprasījuma laikrindas ar dažādiem komforta profiliem un atšķirīgu ēkas noslodzi.

Piemēram, siltuma pieprasījums tai pašai ēkai ar 19 °C iestatījumu un 17 stundu apkures profilu būtu 10,28 MWh gadā (par 7,6 % mazāks nekā iepriekšējā gadījumā).



2.5. att. Viengīmenes koka mājas siltuma pieprasījums.

Izmantojot eksperimentālos datus, kas nomērīti dažādās mājās, ir iespējams iegūt dažāda veida ēku termālos parametrus. Tādējādi varam aprēķināt siltumenerģijas patēriņu reprezentatīvām individuālām ēkām un ekstrapolēt to valsts mērogā, lai turpmāk novērtētu liela daudzuma viedo elektrisko termoakumulācijas ierīču ietekmi uz energosistēmu. Siltuma pieprasījums, kas iegūts no šādas termomodelēšanas, pēc tam tiek iekļauts 3. nodaļā aplūkotojās sadales tīkla un energosistēmas modeļos, kur izvērtēta *SETS* ietekme uz sadales tīkla un energosistēmas darbību Latvijā, ja šīs ierīces tiktu ieviestas plašā apjomā. Pēc tam no to siltuma pieprasījuma tiek aprēķināts elektroenerģijas patēriņš, kas elektrotīklā tiek modelēts kā papildu slodze, pievienojot to pašreizējai elektriskajai slodzei.

2.4. Kopsavilkums

Izmantojot datus par iekštelpu un āra temperatūru, saules starojumu un siltuma patēriņu, tika izstrādāts vienkāršots termomodelis, kura pamatā ir elektriskā analogija. Izmantojot inverso (t. s. “melnās kastes”) modelēšanas pieeju, tika iegūti ekvivalenti vienkāršotā modeļa termiskie parametri. Metodes validēšanai tika veikti virtuāli un fiziski eksperimenti, un vienkāršotā termomodeļa veiktspēja tika salīdzināta ar diviem sarežģītākiem *RC* modeļiem un mērījumiem reālā ēkā. Tika secināts, ka vienkāršais un skaitļošanas ziņā efektīvais modelis spēj replicēt sarežģītāko modeļu un reālas ēkas termodinamiku ar pietiekami augstu precizitāti. Tādējādi iegūto siltuma pieprasījumu var izmantot turpmākajai *SETS* ietekmes modelēšanai dažādos energosistēmas darbības aspektos. Par pamatu inversās modelēšanas metodes izmantošanai kalpo arī ierobežotā datu pieejamība par Latvijas dzīvojamo ēku fondu un tā nākotnes prognozēm, kā arī iespēja izmantot *SETS* darbības rādītājus, kas iegūti no iekārtu izmēģinājumiem reālos objektos Latvijā projektā *RealValue*.

Līdz ar to izstrādātie ēku modeļi tiek izmantoti, lai aprēķinātu ikstundas siltumenerģijas pieprasījumu gada laikā atkarībā no āra temperatūras un saules starojuma dažāda veida ēkām. Aprēķinot siltumenerģijas pieprasījumu, atkarībā no ēkas vai galalietotāju veida tiek izmantoti dažādi noslodzes profili un komforta iestatījumi (t. i., apkures grafiks un temperatūras iestatījumi), tādējādi tiek ņemti vērā dažādi siltumenerģijas patēriņa paradumi.

3. IEGUVUMU NOVĒRTĒJUMS NO *SETS* KĀ PATĒRIŅA REAKCIJAS RESURSA

3.1. Pētījuma konteksts un aktualitāte

Lai gan viedā elektriskā termoakumulācija (*SETS*), kas ir mūsdienīga tehnoloģija ar patēriņa reakcijas iespējām, var sniegt būtiskus ieguvumus energosistēmai, tā var radīt arī papildu izmaksas, piemēram, elektroenerģijas patēriņa pieauguma (ja *SETS* aizstāj cita veida apkures avotus) un slodzes profila izmaiņu rezultātā, kas var potenciāli veicināt tīkla pārslodzes risku un palielināt elektrotīkla zudumus, rēķinus par elektroenerģiju u. tml. Ir konstatēts, ka būtisks sarežģījums elastīgas pieprasījuma reakcijas ieviešanai ir tas, ka trūkst izpratnes par tās iespējamajiem ieguvumiem. Iemesls tam ir izmaksu un ieguvumu kvantitatīvās noteikšanas metodiku trūkums [36]. Tāpēc šajā sadaļā ir izklāstīta metodoloģija, kas tika izstrādāta promocijas darbā, lai veiktu vispārēju izmaksu un ieguvumu novērtējumu par to, kā ***SETS* ieviešana ietekmētu energosistēmas darbību līdz pat 2050. gadam.** Šajā pētījumā izmantoti dažādi ES un nacionāla līmeņa nākotnes scenāriji un pielāgoti RTU EVIF Enerģētikas institūtā izstrādātie modeļi, kas imitē dažādus energosistēmas darbības aspektus, lai novērtētu *SETS* radītos ieguvumus no divām perspektīvām – lielākā mērogā **energosistēmas** kontekstā un mazākā mērogā – reprezentatīvas **sadales tīkla** shēmas modeļi, kas ļauj arī aplēst izmaksu ietaupījumu, ko varētu gūt individuālas mājsaimniecības. Šis pētījums tika veikts 2015.–2018. gadā projektā *RealValue*, tāpēc ir balstīts uz Latvijas energosistēmas, tostarp elektroenerģijas tirgus, raksturīpašībām šajā periodā. Pētījuma rezultāti tika izmantoti vairāku projekta *RealValue* nodevumu sagatavošanā, kurus pieņēmusi Eiropas Komisija.

SETS ietekmes analīze īstenota, pieņemot, ka siltumapgāde Latvijā tiek daļēji elektrificēta ar dažādu īpatsvaru. Pamatscenārijā apkures elektrifikācijai tiek izmantoti tradicionāli rezistīvie sildītāji (angļu val. *direct resistance heating; DRH*), kam nav enerģijas uzkrāšanas spēju un viedas vadības. Modelēšana tiek veikta 2020., 2030. un 2050. gadam, lai gan pētījuma fokuss ir 2030. gads, jo pirmais ir pārāk tuvu, lai notiktu būtiska attīstība *SETS* ieviešanā Latvijā, bet pēdējais ir pārāk tālu nākotnē, lai izdarītu secinājumus ar augstu ticamību.

Pamatojums *SETS* ietekmes novērtējumam izvēlētajai pieejai ir pašlaik dzīvojamā sektorā izmantotās apkures tehnoloģijas un dati, kas ir pieejami siltuma pieprasījuma modelēšanai valsts mērogā. Kā norādīts [37], 69 % Latvijas iedzīvotāju jeb 64 % no visiem mājokļiem izmanto centrālo apkuri (to veido galvenokārt pilsētu centralizētā siltumapgāde un nelielā mērā arī ēku vietējā centrālapkure). Otrs izplatītākais apkures veids ir krāsns apsilde, ko izmanto 29 % iedzīvotāju un 32 % mājokļu. Šie rezultāti cieši korelē ar daudzdzīvokļu ēku un savrupmāju īpatsvaru dzīvojamo ēku fondā, jo centralizētā apkure ir vispopulārākais apkures veids dzīvokļos, bet krāsnis galvenokārt tiek izmantotas individuālajās mājās laukos. Diemžēl sīkāks centralizētās siltumapgādes sadalījums statistikas datos nav pieejams, un tādējādi tā ietver gan pilsētas centralizēto siltumapgādi, gan vietējo centrālapkuri. Vispārīgā gadījumā vietējo centrālo apkuri var izmantot gan savrupmājās, gan daudzdzīvokļu ēkās. Tikai 3–4 %

mājokļu kā galveno apkures avotu izmanto kāda cita, iepriekš neminēta veida apsildi (tostarp elektrisko). Centrālā statistikas pārvalde nesniedz sīkāku sadalījumu šiem pārējiem veidiem, tomēr var secināt, ka elektroapsildes īpatsvars Latvijā ir niecīgs. Turklāt gandrīz nemaz netiek izmantota elektriskā apsilde ar termoakumulāciju. Savukārt 26,7 % mājokļu izmanto elektriskos ūdenssildītājus. Tādējādi, novērtējot *SETS* ietekmi uz Latvijas energosistēmu, *SETS* iekārtas telpu apsildei tiek modelētas kā papildu elektriskā slodze, nevis kā esošo elektroapsildes ierīču nomaina. Mērķis ir aplēst daļējas apkures elektrifikācijas ietekmi uz Latvijas energosistēmu dažādos scenārijos un ar dažādām tehnoloģijām (piemēram, *SETS* un rezistīvie sildītāji) izvēlētajos modelētajos gados (2020., 2030. un 2050. gads).

Kas attiecas uz datu pieejamību **siltumenerģijas pieprasījuma** modelēšanai, ir pieejams ierobežots informācijas apjoms par detalizētiem ēku termālajiem raksturlielumiem Latvijā un to klasifikāciju, pamatojoties uz faktisko ēku termodinamiku, ko varētu izmantot precīzu ēku arhetipu izstrādei un to mērogošanai valsts līmenī. Turklāt konstatēts, ka nav pieejamas prognozes par dzīvojamo ēku fondu nākotnē. Ņemot vērā šādas informācijas trūkumu, tika izvēlēta uz datiem balstīta pieeja ēku termodinamikas modelēšanai, kā izklāstīts 2. nodaļā. Turklāt metodikas izvēli motivēja arī *SETS* praktiskais izmēģinājums 50 objektos Latvijā, ko īstenoja RTU un kura laikā ar *RealValue* agregatora starpniecību tika iegūti detalizēti operatīvie dati no uzstādītajām apsildes ierīcēm. Šie dati ietver galalietotāju komforta prasības, siltuma patēriņu, telpas temperatūru utt. Iegūtie siltumenerģijas pieprasījuma dati pēc tam tika pārveidoti *SETS* elektroenerģijas patēriņā, kas izmantojams kā ieejas informācija energosistēmas modelēšanā.

3.2. *SETS* ietekmes uz sadales tīklu modelēšana

Latvijas sadales sistēmu gandrīz pilnībā pārvalda tikai viens operators – AS “Sadales tīkls”. Sadales tīkla līniju kopējais garums ir aptuveni 94 000 km [38], kopējais enerģijas pieprasījuma apjoms 2016. gadā bija 6465 GWh, no tā apmēram 25 % patērēja mājsaimniecības, bet pārējo – komerciālais un rūpniecības sektors. Sadales sistēmas zudumi 2016. gadā veidoja 4,6 % [38]. Latvijas sadales tīkla kopējā uzstādītā jauda ir 5892 MVA. Šie statistikas dati ļauj novērtēt kopējo tīkla izmantošanas efektivitāti, kas ir vienāda ar 13 % un liecina par relatīvi zemu noslodzi. Tīklam ir plaši atzari pa visu valsti, tādējādi tas ir ļoti sazarots ar salīdzinoši lielu attālināti izvietotu klientu skaitu, kas veicina zemu kopējo izmantošanas efektivitāti. Tomēr sociālekonomisko tendenču dēļ lielākā daļa slodzes ir koncentrēta pilsētās, un urbanizācija arvien turpinās. Pēdējā laikā daudz pūļu un investīciju ieguldīts sistēmas drošuma uzlabošanā, rekonstruējot vecās līnijas un apakšstacijas un īstenojot tīkla automatizāciju. Kopš 2014. gada norisinās viedo skaitītāju ieviešana visā valstī, ko plānots pabeigt līdz 2022. gadam. To īsteno sadales sistēmas operators (SSO), kas bez maksas uzstāda skaitītājus visiem klientiem.

3.2.1. Izmantotā pieeja

Ņemot vērā to, ka elektriskā apkure Latvijā pašlaik nav plaši izplatīta [37], sadales tīkla modelēšanā, lai novērtētu *SETS* ietekmi, tiek pieņemta daļēja apkures elektrifikācija un veikta jaudas plūsmu modelēšana reprezentatīvā tīkla modelī, balstoties uz esošo elektrisko slodzi (pamatslodzi), ko papildina elektroapsildes iekārtu slodze. *SETS* ierīču modelētā ietekme tiek salīdzināta ar modelēto rezistīvo sildītāju atstāto iespaidu. Tas ļauj novērtēt sekas siltumapgādes elektrifikācijai kopumā un jo īpaši – konkrēto pētīto tehnoloģiju ietekmi. Kā vēl viena, iespējams, konkurētspējīga tehnoloģija, kas var nodrošināt enerģijas uzkrāšanu, promocijas darbā tika pētīti mājāsaimniecībās izmantojami elektroķīmiskie akumulatori, tos izmantojot kopā ar rezistīvajiem sildītājiem.

Siltumenerģijas pieprasījums veido lielu īpatsvaru no kopējā enerģijas patēriņa Latvijā (valsts atrodas Eiropas ziemeļu daļā, un apkures sezona ir aptuveni 200 dienas), tāpēc ir svarīgi novērtēt, kā apkures elektrifikācija ietekmētu energosistēmu, tostarp sadales tīklu, tādus aspektus un rādītājus kā sistēmas maksimālā slodze, zudumi, sprieguma līmenis un slodzes koeficients. Lai mazinātu iespējamās problēmas, kas var rasties tīklā, šajā pētījumā aplūkotas dažādas pārslodzes vadības stratēģijas. Pašreizējā lietotāju pamatslodge tiek izmantota kā viens no galvenajiem ieejas mainīgajiem lielumiem, bet papildu elektriskās slodzes (piemēram, no apkures vai akumulatoriem) darba režīms tiek optimizēts, balstoties uz dažādām mērķfunkcijām (piemēram, apkures izmaksu vai sadales tīkla zudumu minimizācija), ievērojot tīkla ierobežojumus un galalietotāju komforta prasības.

Novērtējuma veikšanā elektriskās slodzes modelēšanai izmantoti reālu lietotāju elektropatēriņa dati, datubāzē pēc nejaušības principa izvēloties virkni galalietotāju. Tie ietver daudzdzīvokļu ēkas, savrupmājas, komerciālus un rūpnieciskus objektus, sabiedriskas ēkas u. tml. Tiek īstenotas vairākas apkures vadības stratēģijas, un modelēta vienkāršota radiāla sadales tīkla topoloģija, veicot trīsfāžu jaudas plūsmu aprēķinu, kas ļauj izdarīt vispārīgus secinājumus par *SETS* potenciālo ietekmi. Jaudas plūsmas aprēķiniem izmantoti Latvijas sadales sistēmai raksturīgi elektrolīniju un transformatoru parametri.

3.2.2. Rezultāti un diskusija

Reprezentatīvās sadales tīkla shēmas modelēšanas rezultāti ietver virkni rādītāju dažādos scenārijos, ar atšķirīgu apkures elektrifikācijas īpatsvaru un vairākām *SETS* vadības stratēģijām. Kopējais modelēto kombināciju skaits ir vienāds ar $216 = 6 \text{ scenāriji} \times 3 \text{ izpētes gadi} \times 3 \text{ apsildes elektrifikācijas līmeņi} \times 4$ (3 *SETS* vadības stratēģijas un pamatscenārijs ar *DRH*). Tāpēc šajā sadaļā, lai nodrošinātu pārskatāmību, dota tikai rezultātu izlase. Pārējie rezultāti izmantoti kopējos secinājumos.

3.1. tabulā apkopoti nozīmīgākie rezultāti no ***Bāzes scenārija 2030. gadam***. Slodzes koeficienta maksimizācijas stratēģija, kas ir koordinēts *SETS* vadības veids, ir kopumā visizdevīgākā no sadales tīkla operatora un galalietotāju kompromisa viedokļa, jo tā nodrošina gan ievērojamu maksimumslodzes samazinājumu, gan ļauj samazināt elektroenerģijas rēķinus par elektroapkuri un nodrošina arī enerģijas zudumu izmaksu samazinājumu sadales tīklā.

Izmaksu samazinājums par elektroapsildi un tīkla zudumiem ir izteikts naudas vienībās (€) uz vienu mājokli, kas tiek apsildīts ar *SETS*. Reprezentatīvajā sadales tīkla modelī ietilpst arī dažas sabiedriskas un komerciālas ēkas, kurās izmanto elektroapsildi, tāpēc lasītājam jāievēro, ka jēdziens “mājoklis” šeit attiecas ne tikai uz mājāsaimniecībām. Turklāt ir būtiski norādīt, ka aprēķinos ņemta vērā tikai elektrības tarifa enerģijas komponente, kas veido aptuveni 20–30 % no galalietotāju elektroenerģijas rēķina [39]. Atlikušo rēķina daļu veido obligātā iepirkuma komponente, nodokļi, kā arī pārvades un sadales tarifi.

Otra *SETS* uzlādes stratēģija (**apkures izmaksu minimizācija**) nav koordinēta vadība, jo dažādās ēkās uzstādītās *SETS* ierīces neietekmē viena otras darbību. Vadības stratēģija *SETS* – (2) ir balstīta tikai uz cenu. Tā rezultātā visas ierīces tiecas uzlādēties tad, kad cena ir viszemākā, tādējādi ievērojami palielinot maksimumslodzi (un to nobīdot uz citu laiku). Trešā uzlādes stratēģija – SSO segto **zudumu izmaksu minimizācija** – arī palielina maksimumslodzi pie apkures elektrifikācijas 10 % un 20 % īpatsvara.

3.1. tabula

SETS uzlādes stratēģiju ietekme uz tīkla zudumu un apsildes izmaksām, *Bāzes scen.* (2030)

Apsildes stratēģija	<i>SETS</i> – (1) slodzes koef. maks.			<i>SETS</i> – (2) apsildes izmaksu min.			<i>SETS</i> – (3) zudumu izmaksu min.		
	2 %	10 %	20 %	2 %	10 %	20 %	2 %	10 %	20 %
Apsildes elektrifikācija									
Maks. slodzes samazin., kW	11,2	51,5	150,3	–23,3	–263,4	–516,3	12	–108,9	–154,6
%	1,73	7,42	17,60	–3,61	–37,94	–60,46	1,86	–15,68	–18,11
Apsildes izm. samaz., €/māj.	76,13	38,32	23,63		138,78		131,18	115,79	97,98
%	17,33	8,72	5,38		31,58		29,85	26,35	22,30
Zudumu izm. samaz., €/māj.	12,26	7,64	6,65	15,74	8,40	–0,91	17,05	13,98	13,13
%	33,84	18,36	13,75	43,46	20,19	–1,89	47,07	33,59	27,13

3.2. tabula

SETS uzlādes stratēģiju ietekme uz tīkla zudumu un apsildes izmaksām, *DSM scen.* (2030)

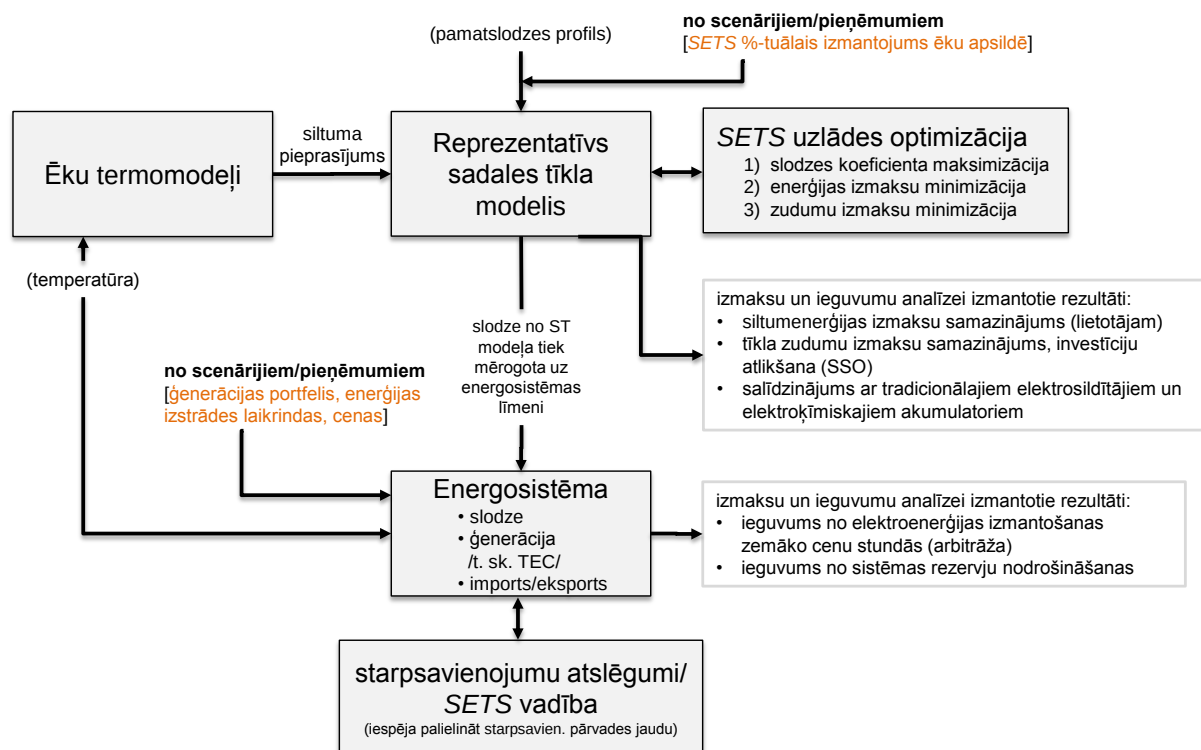
Apsildes stratēģija	<i>SETS</i> – (1) slodzes koef. maks.			<i>SETS</i> – (2) apsildes izmaksu min.			<i>SETS</i> – (3) zudumu izmaksu min.		
	2 %	10 %	20 %	2 %	10 %	20 %	2 %	10 %	20 %
Apsildes elektrifikācija									
Maks. slodzes samazin., kW	10,9	75,1	188,3	–41,7	–258,2	–502,4	12	–77,8	–48,5
%	2,23	12,78	22,27	–8,52	–43,95	–59,41	2,45	–13,24	–5,74
Apsildes izm. samaz., €/māj.	30,61	11,88	6,22		69,39		62,81	43,44	32,15
%	7,08	2,75	1,44		16,04		14,52	10,04	7,43
Zudumu izm. samaz., €/māj.	4,90	3,01	3,57	2,37	–3,85	–16,68	7,48	5,28	5,56
%	14,71	7,82	7,91	7,11	–9,99	–36,94	22,48	13,69	12,32

3.2. tabulā ilustrētais **Patēriņa puses uzlabojumu** (angļu val. *demand side measures*; *DSM*) **scenārijs** norāda, ka uzlabojas *SETS* spēja samazināt maksimumslodzi reprezentatīvajā sadales tīklā shēmā. Tomēr tas, visticamāk, skaidrojams ar pieņēmumiem, kas ir scenārija pamatā. Tradicionālā elektroapkure (*DRH*) nav pakļauta nekādiem patēriņa puses uzlabojumu pasākumiem, bet tās patēriņš ir pievienots sistēmas modelim, kurā pārējā elektriskā slodze jau ir izlīdzināta. Tā rezultātā *DRH* izmantošana rada diezgan izteiktus slodzes maksimumus, kurus *SETS* savukārt var samazināt. Tomēr finansiālie ietaupījumi ir vairāk nekā uz pusi mazāki. Piemēram, *Bāzes scenārijā* *SETS* var samazināt mājokļu elektrības izmaksas par 31,58 % (izmaksu samazināšanas stratēģija), bet *DSM scenārijā* tās ir samazinātas tikai par 16,04 %.

3.3. SETS ietekmes uz energosistēmu modelēšana

3.3.1. Izmantotā pieeja

Latvijas energosistēmas mēroga ieguvumu modelēšanai izmantots dažādu RTU EVIF Enerģētikas institūta rīku un metodiku kopums, kas tapis gan projekta *RealValue* īstenošanas laikā (2015–2018), gan iepriekš. Izveidotais modelis cieši saistīts arī ar sadales tīkla modeli, kas aprakstīts 3.2. sadaļā (proti, no sadales tīkla modeļa iegūtās elektroapsildes patēriņa laikrindas izmantotas kā ieejas dati sistēmas modelī) un kas savukārt izmanto siltumenerģijas pieprasījumu no 2. nodaļā aplūkotojām ēku termomodeļiem. Vispārīga modelēšanas struktūra, kas izmantota *SETS* ietekmes uz Latvijas energosistēmu pētīšanai, redzama 3.1. attēlā.



3.1. att. Vispārīga *SETS* ietekmes modelēšanas struktūra.

Modeļa ģeogrāfiskais mērogs ietver Latviju un Lietuvu, turpretim apkures elektrifikācija tiek veikta tikai Latvijā (proti, Lietuvā nav uzstādīti *SETS*, un arī ieguvumi tiek izteikti tikai no Latvijas energosistēmas viedokļa).

Modelis novērtē divu veidu labumus, ko rada *SETS* atšķirībā no *DRH*:

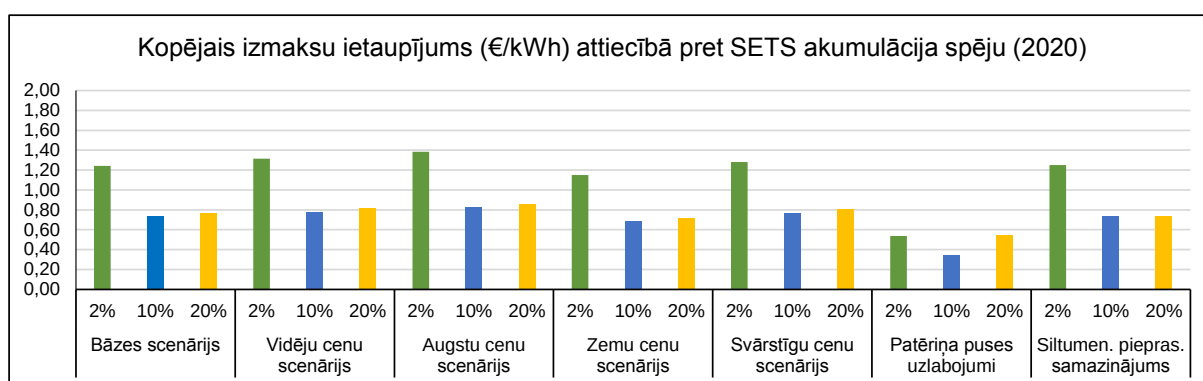
- siltuma pieprasījuma atsaiste no elektroenerģijas patēriņa (t. s. **enerģijas arbitražā**);
- **energosistēmas rezervju** nodrošināšana, pateicoties *SETS* attālinātai vadībai.

3.3.2. Rezultāti un diskusija

Rezultāti 2020. gadam

Lai gan ieguvumi no elektroenerģijas izmaksu samazinājuma, ko rada *SETS* Latvijas energosistēmā, tiek pētīti no diviem dažādiem skatpunktiem (arbitražā un rezerves), turpmākajos rezultātos doti summārie ieguvumi. Priekšrocības noteiktas, salīdzinot ar pamatgadījumu, kad apkures elektrifikāciju veic ar *DRH* tādā pašā īpatsvarā kā *SETS*. Visas izmaksas un ieguvumi izteikti pa gadiem. Visos analizētajos scenārijos var novērot tendenci, ka kopējais elektroenerģijas izmaksu samazinājums no *SETS* arbitražas palielinās gan absolūtā, gan relatīvā izteiksmē līdz ar lielāku apkures elektrifikāciju.

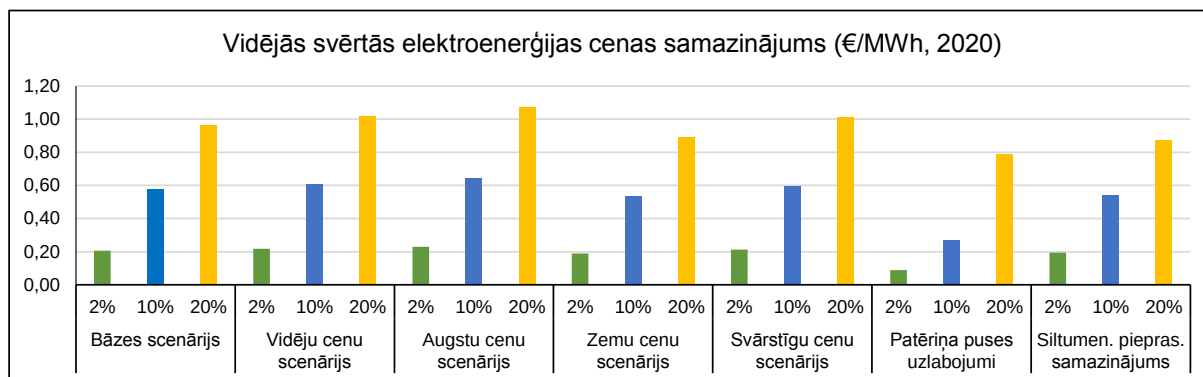
3.2. attēlā apkopoti *SETS* radītie ieguvumi 2020. gadam, kas izteikti attiecībā pret *SETS* kopējo akumulācijas spēju. Varam novērot, ka īpatnējais ieguvums no *SETS* samazinās līdz ar lielāku to īpatsvaru. Ja salīdzina dažādus elektrifikācijas līmeņus, 2 % gadījumā energosistēmā rodas vislielākie ietaupījumi (*Bāzes scen.* – 1,24 €/kWh), savukārt, ja *SETS* īpatsvars ir 10 % vai vairāk, īpatnējais ieguvums ievērojami samazinās (*Bāzes scen.* – attiecīgi 0,74 €/kWh un 0,77 €/kWh, ja *SETS* īpatsvars ir 10 % un 20 %). No dažādu scenāriju rezultātiem var secināt, ka *SETS* vērtība zināmā mērā ir atkarīga no pieņēmumiem par siltumenerģijas pieprasījumu, bet vēl jo vairāk – no pārējās elektriskās slodzes rakstura un tās elastības, kā arī elektrības tirgus cenu noteicošo ražotāju robežizmaksām.



3.2. att. Kopējais izmaksu ietaupījums attiecībā pret *SETS* akumulācijas spēju 2020. g.

3.3. attēlā var aplūkot *SETS* cenu pazeminošo ietekmi uz vidējo svērto elektroenerģijas nākamās dienas vairumtirdzniecības cenu dažādos scenārijos ar atšķirīgu *SETS* īpatsvaru. Šie ieguvumi izteikti pret *SETS* elektroenerģijas patēriņu gadā. Kā redzams attēlā, vidējā svērtā cena samazinās par attiecīgi 0,49 %, 1,25 % un 1,88 % pie *SETS* 2 %, 10 % un 20 % īpatsvara. Tas ļoti labi parāda *SETS* pozitīvo ietekmi, ko rada enerģijas uzkrāšanas un patēriņa

vadības iespējas, t. i., apsildes elektropatēriņa pārbīde no augstākas cenas periodiem uz citu laiku, tādējādi izlīdzinot kopējo slodzes grafiku.

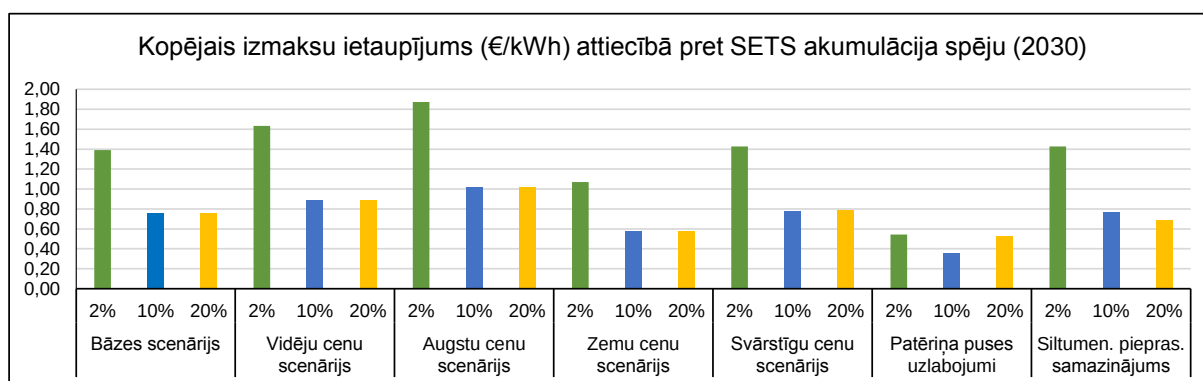


3.3. att. Elektroenerģijas cenas samazinājums Latvijas tirgus zonā pret SETS patēriņu 2020. g.

Rezultāti 2030. gadam

Modelētajos 2030. gada rezultātos ir vairākas acīmredzamas atšķirības no 2020. gada rezultātiem. Pirmkārt, izmaksu ietaupījumi, ko izraisa SETS arbitražas, kopumā ir lielāki. Tomēr šeit ir saskatāma arī iepriekš novērotā tendence, ka arbitražas radītais īpatnējais ieguvums samazinās, palielinoties SETS īpatsvaram. 2030. gada rezultātos varam novērot daudz lielākas svārstības ieguvumos no arbitražas atkarībā no cenu pieņēmumiem (*vidēju, augstu un zemu cenu scenāriji*), salīdzinot ar 2020. gadu. Tomēr galvenais iemesls tam ir modeļa struktūra un tas, ka modelī ietvertā cenu nenoteiktība nākotnē arvien palielinās.

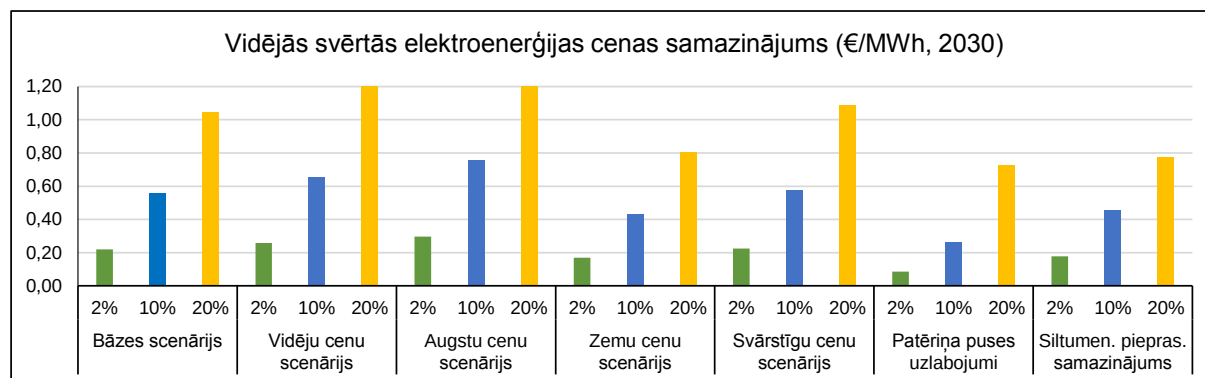
No otras puses, *Patēriņa puses uzlabojumu scenārijs* ir līdzīgs 2020. gada rezultātiem, jo tas uzrāda ievērojami mazākus izmaksu ietaupījumus nekā *Bāzes scenārijs*, kā tas labi redzams 3.4. attēlā. Proti, īpatnējais ieguvums dažādiem SETS īpatsvara līmeņiem samazinās no 1,39 €/kWh, 0,75 €/kWh, 0,71 €/kWh līdz attiecīgi 0,54 €/kWh, 0,36 €/kWh, 0,49 €/kWh. Turklāt var atkārtot iepriekšējo secinājumu, ka elektropatēriņam bez jebkādiem patēriņa puses uzlabojumiem raksturīgs lielāks izmaksu samazinājuma potenciāls SETS viedās vadības rezultātā salīdzinājumā ar tādu patēriņu, kas jau sākotnēji ir vienmērīgāks.



3.4. att. Kopējais izmaksu ietaupījums pret SETS akumulācijas spēju 2030. g.

3.5. attēlā redzama SETS ierīču ietekme uz elektroenerģijas nākamās dienas vairumtirdzniecības cenu. Līdzīgi kā līdz 2020. gada rezultātos – jo lielāks ir apkures

elektrifikācijas līmenis, jo veiksmīgāk *SETS* var samazināt elektroenerģijas cenu, salīdzinot ar *DRH* elektroapkuri. Lai gan vidējās stundas cenas izmaiņas ir nelielas (maksimāli par 0,09 %), vidējās svērtās cenas samazinājums ir daudz nozīmīgāks (līdz pat 1,88 %), kas ir ļoti izdevīgi visiem elektroenerģijas lietotājiem, bet varētu nebūt tik izdevīgi elektroenerģijas ražotājiem, jo īpaši tiem, kam nav lielas elastības ražošanas plānošanā.

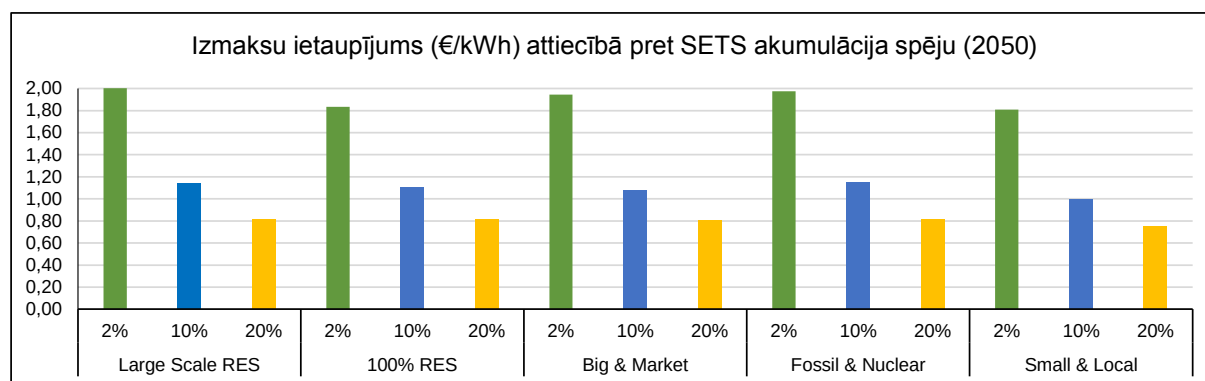


3.5. att. Elektroenerģijas cenas samazinājums Latvijas tirgus zonā pret *SETS* patēriņu 2030. g.

Rezultāti 2050. gadam

e-Highway scenāriji 2050. gadam (3.6. att.) tika analizēti no tiem pašiem diviem elektroenerģijas izmaksu ietaupījuma veidiem kā divos iepriekš pētītajos gados – arbitrāža un rezervju nodrošināšana.

Galvenās 2050. gada scenāriju atšķirības no pieņēmumiem par 2020. un 2030. gadu ir būtisks atjaunīgo energoavotu ģenerācijas pieaugums, jo īpaši no tādiem pārtraukumainiem avotiem kā vēja un saules enerģija. Protams, modelēšanas rezultāti tik tālam periodam nākotnē jāvērtē piesardzīgi, taču tie var sniegt vērtīgu ieskatu prognozētajās tendencēs.



3.6. att. Kopējais izmaksu ietaupījums pret *SETS* akumulācijas spēju 2050. g.

Arī elektroenerģijas gada pieprasījums 2050. gada scenārijos ir ievērojami lielāks nekā abos iepriekš pētītajos gados. Ieguvumi no *SETS* arbitrāžas ir mazāki relatīvajā izteiksmē (ietaupījumi pret kopējām izmaksām), bet kopumā lielāki absolūtajās vērtībās un attiecībā pret *SETS* patēriņu vai to akumulācijas spēju. No pieciem salīdzinātajiem scenārijiem, *Small & Local* gadījumā ir vismazākā īpatnējā vērtība no *SETS* pret to akumulācijas spēju

kWh, turpretim *Large Scale RES* scenārijā īpatnējā vērtība ir visaugstākā – tā mainās robežās 2,00–0,81 €/kWh ar *SETS* īpatsvaru attiecīgi 2–20 %.

3.4. Kopsavilkums

Lai izpētītu lokālu mazjaudas elektrisko termoakumulācijas ierīču ietekmi uz sadales tīkla noslodzi un potenciālo pārslodzi, tika izstrādāts modelis ar Latvijas sadales tīklam raksturīgiem parametriem un tipiskiem galalietotāju slodzes grafikiem, pieņemot, ka apkure daļēji tiek elektrificēta ar *SETS* vai tradicionāliem elektrosildītājiem. Lai mazinātu iespējamās problēmas, ko izraisa apkures elektrifikācija, tika pētītas vairākas pārslodzes vadības stratēģijas, kuru mērķis ir vai nu samazināt slodzes svārstības dienas ietvaros, samazināt kopējās zudumu izmaksas, vai arī minimizēt lietotāju izmaksas par apkuri.

Elektrifikācijas rezultātā pieaugušais elektropatēriņš rada ievērojami lielākas elektroenerģijas izmaksas sistēmā, jo īpaši 10 % un 20 % elektroapkures īpatsvara gadījumos. Tomēr ir acīmredzams, ka šo izmaksu pieaugumu var nedaudz samazināt, ja elektrifikāciju veic ar viedajām elektriskajām termoakumulācijas ierīcēm pretstatā rezistīvajiem sildītājiem.

Vairums no *SETS* ieguvumiem rodas no to viedās akumulācijas spējas, t. i., no uzlādes laikā, kad elektroenerģijas cena/pieprasījums ir zemāks, un izlādes tad, kad nepieciešama siltumenerģija, kas ļauj izvairīties no elektroenerģijas patēriņa ierastajos maksimumslodzes periodos. Tomēr tas liecina arī par to, ka ir sagaidāms, ka *SETS* radītie ieguvumi energosistēmai būs mazāki, ja kopējā patēriņa grafika maksimumslodze un minimumslodze kļūs mazāk izteikta sakarā ar citiem uzlabojumiem elektroenerģijas pieprasījuma pusē. Šīs tendences tiešām apstiprina *Patēriņa puses uzlabojumu scenārija* rezultāti. Ēku energoefektivitātes uzlabojumu un siltumpatēriņa samazināšanas pasākumi arī nozīmē mazāku *SETS* ierīču izmantojumu un to radīto ieguvumu samazinājumu. Tāpat arī ieguvums no katras uzstādītās *SETS* ierīces samazinās, jo vairāk tās tiek izmantotas sistēmā.

No sadales tīkla operatora viedokļa daļēja apkures elektrifikācija rada pārslodzes risku un arvien lielāku nepieciešamību pēc ieguldījumiem tīklā, lai no tā izvairītos. Tomēr koordinēta *SETS* vadība veiksmīgi palīdz mazināt lielāko daļu šo problēmu, kā secināts, modelējot reprezentatīvu sadales tīkla shēmu. Turklāt tas arī palīdz samazināt SSO zudumu izmaksas un pazemināt lietotāju elektroenerģijas rēķinus, salīdzinot ar pamatscenāriju, kurā apkures elektrifikāciju veic ar *DRH*. Tomēr ir jāievēro zināma piesardzība, jo, ja *SETS* vadība nav koordinēta, vadoties no ieguvumiem tīklam kopumā, bet *SETS* tikai seko elektroenerģijas cenas signāliem, lai minimizētu galalietotāju rēķinus, tas rada lielas problēmas sadales tīklā attiecībā uz maksimumslodzes un slodzes koeficienta rādītājiem, tāpēc var būt nepieciešami ieguldījumi tīkla stiprināšanā.

4. PATĒRIŅA REAKCIJAS EKONOMISKAIS NOVĒRTĒJUMS MĀJSAIMNIECĪBAS LĪMENĪ

4.1. Pētījuma konteksts un aktualitāte

Lai gan jau iepriekš ES bija izvirzījusi vērienīgus mērķus attiecībā uz dekarbonizāciju un klimata pārmaiņu mazināšanu, 2018. gada jūnijā šie mērķi tika vēl paaugstināti, paredzot, ka līdz 2030. gadam ES kopējā patēriņā jāsasniedz 32 % atjaunīgo energoavotu īpatsvars [40]. Tomēr arvien pieaugošā atjaunīgo energoavotu ieviešana rada jaunus izaicinājumus veiksmīgai un droši elektroenerģijas sistēmu darbībai. Daļu no problēmām, ko rada pieaugoša izkliedēto un atjaunīgo enerģijas avotu (jo īpaši saules un vēja) integrācija energosistēmās, izraisa to enerģijas ražošanas stohastiskais raksturs. Tas rada nepieciešamību pēc papildu frekvences regulēšanas un balansēšanas un var izraisīt elektroenerģijas kvalitātes problēmas, kas ietekmē gan energosistēmas reāllaika darbību, gan nākotnes attīstības plānošanu sadales tīkla un pārvades tīkla līmenī [41], [42].

Lai gan risinājumus aktuālajām problēmām var meklēt elektroenerģijas ražošanas, pārvades un sadales sektorā, tomēr arī patēriņa puse piedāvā daudzsološas iespējas, lai mazinātu pieaugošo energosistēmu darbības stohastisko raksturu [12]. Patēriņa reakcija (*DR*) ir atzīta par īpaši pievilcīgu instrumentu, ko energosistēmu operatori varētu izmantot sistēmas vadībai, piedāvājot stimulus lietotājiem caur tā saukto **tiešo DR**, kad *DR* resursa īpašnieks saņem atlīdzību vai nu caur klasisku tiešās vadības/atslēdzamas slodzes programmu, vai no palīgpakalpojumu/jaudas tirgus [10], [43], [44]. Savukārt **netiešā DR**, kad lietotāji pielāgo savus patēriņa paradumus, brīvprātīgi izmantojot elektroenerģijas reāllaika cenas vai cita veida uz cenu balstītus signālus, var radīt ieguvumus energosistēmai kopumā, pateicoties patēriņa sasaistei ar ģenerācijas pieejamību [45], [46].

DR var nest sistēmai virkni ieguvumu, piemēram, palīgpakalpojumu sniegšana, pārslodzes vadība, cenu svārstību mazināšana, nepieciešamo investīciju samazināšana vai atlikšana u. tml. [12], [44], [37]. Lai gan kopumā šī tēma ir plaši pētīta aktuālajā literatūrā kontekstā ar notiekošo pāreju uz viedo tīklu paradigmu [10], tomēr pastāv zināmas neskaidrības attiecībā uz *DR* ieviešanu. Nelielām individuālām slodzēm nav lielas ietekmes uz kopējo sistēmas darbību, tāpēc tās jāvada apkopotā veidā, lai sasniegtu tirgum nepieciešamo minimālās balansēšanas jaudas sliekšni. Parasti to dara agregators, kas apkopo vairāku lietotāju elastības resursus un piedāvā tos pa tiešo tirgū vai sistēmas operatoram [48].

Lai gan rezervju un regulēšanas enerģijas tirgi piedāvā jaunas un pievilcīgas iespējas, lai neliela mēroga lietotāji varētu piedalīties jaunizveidotajos un topošajos *DR* tirgos, acīmredzams šķērslis tam ir nepietiekami skaidri noteikumi par šādu resursu apkopošanu (agregēšanu) [12], [49]. Par laimi, situācija uzlabojas, un politikas veidotāji un energosistēmu operatori visā Eiropā strādā pie potenciālo *DR* resursu efektīvākas izmantošanas. Piemēram, to arvien vairāk uzskata par nozīmīgu un nepietiekami izmantotu aktīvu Baltijas reģionā [50], kas varētu palīdzēt uzlabot enerģētisko neatkarību un dažādot Baltijas balansēšanas tirgū piedāvātos elastības resursus [51]. Turklāt ES “Tīras enerģijas pakotne” arī aicina iesaistīt patēriņa puses resursus visos elektroenerģijas tirgos.

Literatūrā jau ir daudz pētīts tas, kā plaša *DR* ieviešana var ietekmēt elektrosistēmu darbību. Kaut arī ir identificēti daži ar to saistīti riski (piemēram, izteikts atsitiena fenomens laikā mainīgu elektroenerģijas cenu gadījumā [52]), lielākajā daļā avotu secināts, ka *DR* programmas spēj samazināt kopējās energoapgādes izmaksas [53]–[56]. Tomēr *DR* ekonomiskajai ietekmei uz *DR* resursu īpašniekiem (t. i., mājsaimniecībām vai uzņēmumiem ar elastīgu slodzi) tiek pievērsts mazāk uzmanības. Daži piemēri pētījumiem, kur šis temats aplūkots, ietverti [56]–[60]. Turklāt daļā gadījumu konstatēts, ka pašreizējās tirgus struktūras un stimuli šķietami vai nu nedod būtisku ekonomisku labumu *DR* resursu īpašniekiem, vai arī rada vien niecīgus ieguvumus [46], [49], [61], [62].

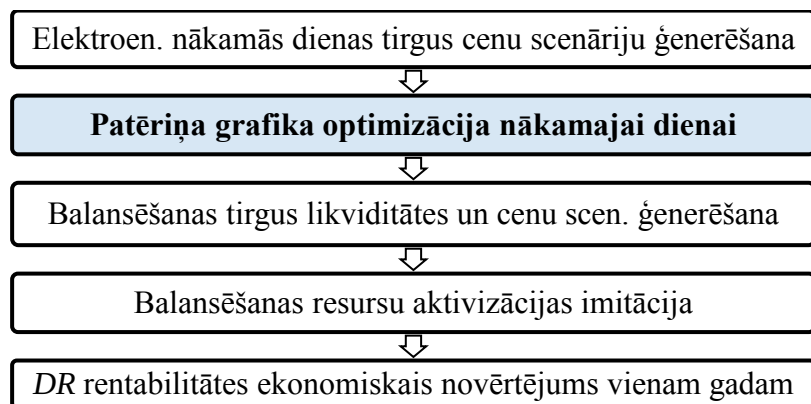
No vienas puses, lai elektroenerģijas galalietotāji kļūtu ieinteresēti *DR* pakalpojuma sniegšanā, viņiem ir jāapzinās potenciālais ieguvums, ko iespējams gūt. No otras puses, ir jāievieš pienācīgi stimuli, lai lietotāji vēlētos piedalīties *DR* programmās. Tomēr *DR* darbības modelēšana, kas nepieciešama ekonomiskā potenciāla novērtēšanai, ir diezgan sarežģīta. Svarīgs jautājums, ko nevajadzētu atstāt novārtā, ir slodzes atgūšana, kad lietotāji maina savu ierasto patēriņa grafiku stundās, kas seko pēc *DR* notikuma [63]. Citas īpatnības parādās, modelējot patērētāja elastības potenciālu un ar to saistītās nenoteiktības [64]. Nenoteiktība kā faktors attiecas arī uz cenu stohastisko raksturu elektroenerģijas tirgos un sistēmas nebalansu. Šajā nolūkā Montekarlo imitācijas tiek izmantotas kā efektīva metode nenoteiktību ievērošanai modelēšanā [65]. Pamatojoties uz iepriekš minētajiem apsvērumiem, šajā pētījumā izstrādāta īpaša lietojumprogramma, lai palīdzētu potenciālajiem *DR* sniedzējiem novērtēt ieguvumus no viņu līdzdalības kādā *DR* programmā vai elektroenerģijas tirgū.

4.2. Metodika

Lai novērtētu *DR* pakalpojuma ekonomisko potenciālu no *DR* resursa īpašnieka viedokļa, šajā pētījumā izstrādāta lietojumprogramma, izmantojot *MATLAB* programmēšanas vidi [66]. Izstrādātais rīks *DR Assess* novērtē potenciālos ekonomiskos labumus, ko vadāmas slodzes aktīvu īpašnieki varētu gūt, ja viņi piekristu piedalīties kādā *DR* programmā, piemēram, samazinot vai palielinot savu slodzi atbilstoši sistēmas balansēšanas vajadzībām, tādējādi sniedzot tiešās *DR* pakalpojumu. Rīks tika izstrādāts 2017./2018. gadā pēc Latvijas PSO AS “Augstsprieguma tīkls” pasūtījuma līgumdarbā “Matemātisko modeļu izstrāde patēriņa elastības potenciāla noteikšanai un balansēšanas aktivizācijas optimizācijai”.

Šīs programmatūras skaitļošanas pamatā ir uz Montekarlo imitācijām balstīta pieeja, lai modelētu *DR* aktivizāciju un ar to saistītās naudas plūsmas viena gada laikā. Līdz ar to modelēšanas rezultāti tiek iegūti varbūtiska sadalījuma formā, nevis kā viena determinēta vērtība, jo nebūtu pamatoti nākotnes procesus modelēt ar pilnīgu noteiktību.

Modeļa imitācijas laikā veiktās darbības var vispārīgi apkopot ar 4.1. attēlā dotajiem soļiem. Jāpiebilst, ka tajos ietvertā nākamās dienas darba režīma plānošana ir neobligāts posms, kas tiek izmantots tikai 4.4. sadaļas gadījumizpētei.



4.1. att. *DR Assess* algoritma struktūra ar neobligātu netiešo *DR* (zilā krāsā).

4.3. Gadījumizpēte par mājsaimniecības *DR* dalību balansēšanas tirgū

Šajā sadaļā aprakstīta viena no gadījumizpētēm, kas veikta ar rīku *DR Assess*. Modelis ievēro elektroenerģijas tirgus cenu un sistēmas nebalansa nenoteiktības, izmantojot Montekarlo imitācijas. Lai gan modelis piedāvā plašas pielāgošanas iespējas, šajā gadījumā galvenā uzmanība ir pievērsta potenciālajiem ieguvumiem no patēriņa reakcijas konkrētam lietotāju veidam ar viedo elektrisko termoakumulāciju. Tiek konstatēts, ka *DR* dalība balansēšanas tirgū var būt ekonomiski izdevīga resursa īpašniekam, bet ar nosacījumu, ka pietiekami lielu daļu no balansēšanas tirgus ienākumiem agregators novirza resursa īpašniekam.

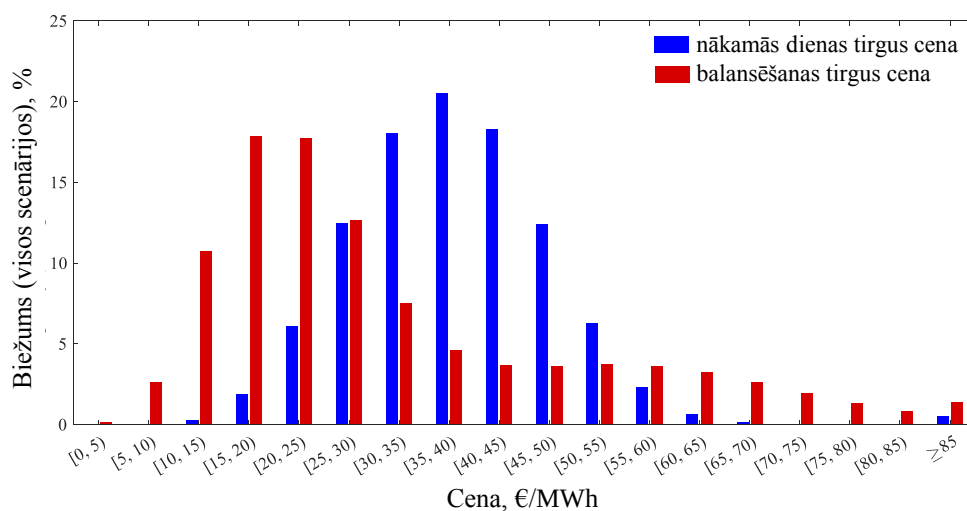
4.3.1. Pieņēmumi

Gadījumizpētei izmantots promocijas darbā izstrādātais rīks, lai veiktu ekonomisku novērtējumu viedās elektriskās termoakumulācijas (*SETS*) dalībai *DR* sniegšanā. Pētījumā pieņemts, ka hipotētiskā mājsaimniecībā uzstādītas piecas *SETS* ierīces ar 2,2 kW ieejas jaudu katra un 15,4 kWh akumulācijas spēju. Pieņemts, ka resursa īpašnieks pats nav balansatbildīgs un ar *DR* piedalās gan sistēmas augšupregulēšanā, gan lejupregulēšanā (kas nozīmē, ka *SETS* ierīces nedrīkst nekad atvienot no barošanas un interneta vārtejas). Pieņemam, ka aktīvu kalpošanas ilgums ir 15 gadu, diskonta likme – 3 %, kapitālizdevumi (*CAPEX*) – 200 € (vārtejas izmaksu segšanai) un gada fiksētās uzturēšanas izmaksas (*F-OPEX*) – 20 € (apkope u. tml. izdevumi). Vienkāršības labad pieņemts, ka mājsaimniecība pērk elektroenerģiju par vairumtirdzniecības tirgus cenu. Tiek arī pieņemts, ka agregators nodod *DR* resursa īpašniekam pilnu PSO maksājumu summu par slodzes samazināšanu (tomēr šī pieņēmuma ietekme tiks rūpīgi analizēta).

Attiecībā uz **slodzes profilu un elastīgumu** pieņemts, ka maksimālais *DR* aktivizāciju skaits ir 14 reižu nedēļā, bet neierobežojot laiku starp tām. Šajā pētījumā netiek pieļautas *DR* aktivizācijas vairāku stundu ilgumā. Maksimālais ilgums pirms slodzes atgūšanas ir 12 stundas, un jaudas samazināšanas un palielināšanas gadījumā tās atguves koeficients izvēlēts 0,9 (tas nozīmē nelielu enerģijas ietaupījumu slodzes samazināšanas gadījumā un nelielā mērā “izšķiestu” enerģiju slodzes palielinājuma gadījumā).

Sezonālā apkures pieprasījuma dati iegūti no ēku termomodelēšanas, kas aplūkota 2. nodaļā, kur tika novērots, ka kopējais nepieciešamās apkures enerģijas apjoms vasarā, pavasarī un rudenī ir attiecīgi aptuveni 10 %, 50 % un 20 % no ziemas siltumpatēriņa.

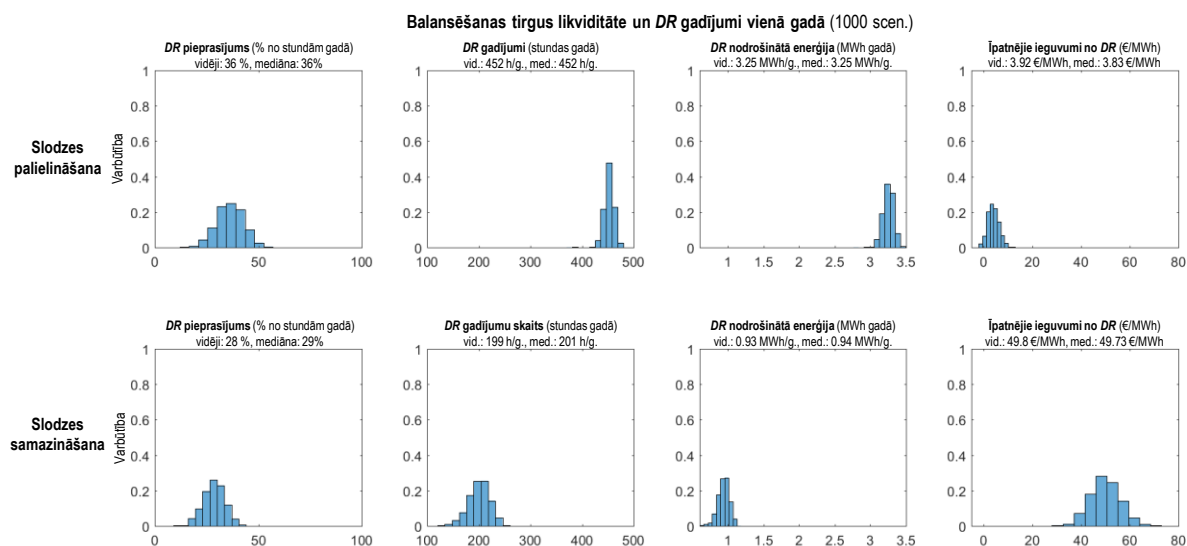
Nākamās dienas tirgus cenu scenāriju ģenerēšanas iestatījumi šim gadījumam tika atvasināti no *Nord Pool* Latvijas zonas cenu analīzes laika posmam 01.06.2017.–31.05.2018., savukārt balansēšanas tirgus scenāriju iestatījumi tika iegūti no kopējā Baltijas balansēšanas tirgus datiem (tirgus darbība tika uzsākta 01.01.2018.). Ģenerētās nākamās dienas tirgus un balansēšanas tirgus ikstundas cenas visos 1000 analizētajos scenārijos apkopotas 4.2. attēlā.



4.2. att. Nākamās dienas un balansēšanas tirgus cenu histogramma.

4.3.2. Rezultāti un diskusija

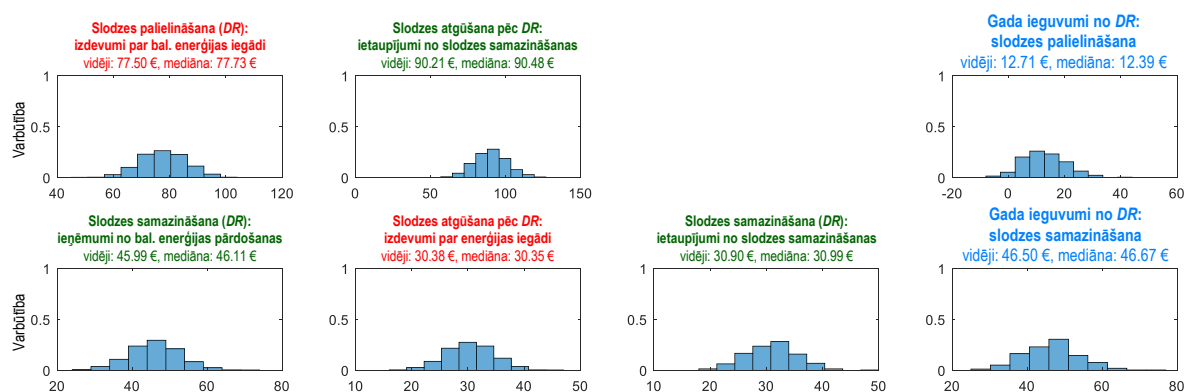
Lai gan imitāciju rezultāti liecina, ka ir bijis daudz vairāk *DR* aktivizāciju ar slodzes palielināšanu nekā ar slodzes samazināšanu (vidēji 452 stundas jeb reizes palielinājumam un 199 reizes samazinājumam, 4.3. att.), 4.4. attēls liecina, ka samazināšanas darbības kopumā ir bijušas ekonomiski izdevīgākas (46,50 € pret 12,71 € gadā visos scenārijos vidēji).



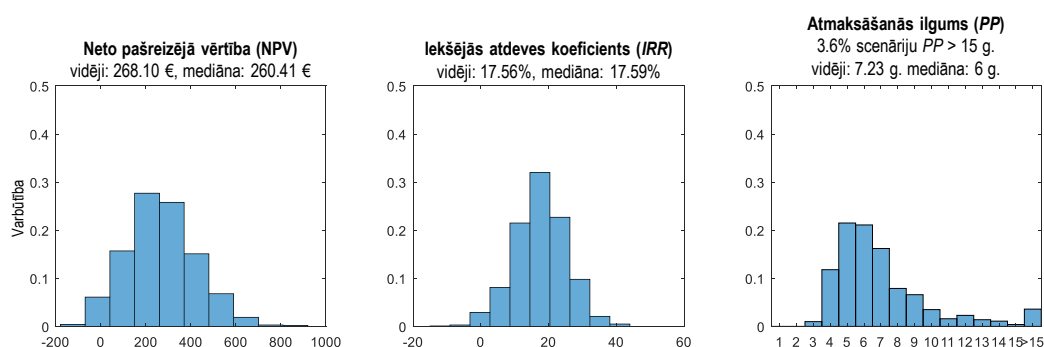
4.3. att. Gada kopējais *DR* pieprasījums, imitētie *DR* gadījumi un īpatnējie ieguvumi.

To atspoguļo arī īpatnējie ieguvumi attiecībā pret *DR* nodrošināto enerģiju – vidēji tikai 3,92 €/MWh patēriņa pieaugumam, bet 49,80 €/MWh samazinājumam (4.3. att.). To galvenokārt var izskaidrot ar diviem faktoriem – papildu pozitīvo naudas plūsmas komponentu slodzes samazināšanas gadījumā (4.4. att.) un sākotnēji pieņemto slodzes atgūšanas koeficientu 0,9 abos virzienos, kas nozīmē, ka slodzi palielinošās *DR* gadījumā enerģija tiek nedaudz izniekota.

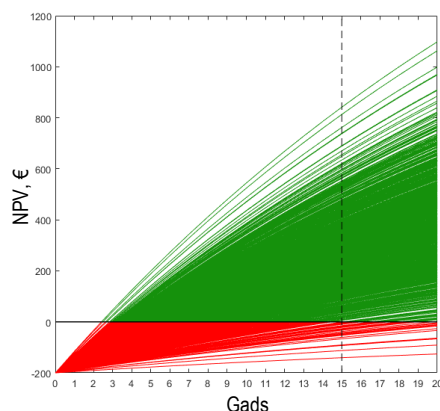
Lai gan visu scenāriju vidējā NPV ir 268,10 €, tomēr 4.4. att. un 4.5. att. liecina, ka ir daži scenāriji (3,6 %), kuros ekspluatācijas laika beigās (pēc 15 gadiem) NPV joprojām ir negatīva. Vidējais *IRR* ir 17,56 %. Tādējādi vidējais atmaksāšanas ilgums ir 7,23 gadi, bet mediāna ir 6 gadi, kas liecina par kādiem netipiskiem scenārijiem, kas vidējo rādītāju nobīda. Patiešām, 4.6. attēlā redzams, ka atsevišķos scenārijos atmaksāšanās nav sasniegta pat līdz 20. gadam.



4.4. att. Ekonomiskais novērtējums vienam modelētajam gadam.



4.5. att. Ilgtermiņa ekonomiskais novērtējums visam aktīva kalpošanas laikam (15 gadu).



4.6. att. Kumulatīvā naudas plūsma visos imitētajos scenārijos.

4.4. Gadījumizpēte par ieguvumiem no tiešās un netiešās *DR*

DR dalība palīgpakalpojumu sniegšanā (t.i., tiešā *DR*), kas bija iepriekšējās gadījumizpētes uzmanības centrā, nav vienīgais veids, kā gūt labumu no slodzes vadības. Netieša *DR*, kad lietotāji brīvprātīgi pielāgo savu patēriņu atbilstoši ārējiem cenu signāliem (piemēram, optimizē slodzes grafiku pēc ikstundas elektroenerģijas cenām), arī var sniegt ievērojamu labumu [46], un šķēršļi šādas *DR* uzsākšanai ir ievērojami mazāki, piemēram, nav obligāti nepieciešama resursu apkopošana caur agregatoru. Vienīgās prasības netiešai *DR* ir tehniskās iespējas pārplānot noslodzi un stimulējoša tarifu struktūru.

Tāpēc šī gadījumizpēte ir vērsta uz rentabilitātes analīzi dalībai gan tiešās, gan netiešās *DR* sniegšanā no elastīgā resursa īpašnieka viedokļa mājāsaimniecības līmenī. Turklāt tiek pārbaudīts, vai elastīgā patēriņa grafika optimizācija, pamatojoties uz cenām, negatīvi ietekmē dalības iespējas un rentabilitāti tiešās *DR* pakalpojumam, to piedāvājot balansēšanas tirgū. Pētījums, kura pamatā ir viedie elektriskie termoakumulācijas sildītāji ar *DR* iespējām, ļauj secināt, ka netiešā *DR* ne vienmēr kavē spēju sniegt palīgpakalpojumus energosistēmai. Tā vietā tā sniedz papildu ieguvumus aktīva īpašniekam. Turklāt tika izpētīts “optimālais” izmantojamo Montekarlo scenāriju skaits un sniegti daži apsvērumi par *DR* aktīvu īpašnieka tirgus piedāvājumu iesniegšanas stratēģiju.

4.4.1. Pieeja netiešās *DR* ieguvumu novērtēšanai

Lai novērtētu iespējamās ieguvumus, ko var gūt no dalības **tiešās *DR*** sniegšanā sistēmas balansēšanas nolūkos, par pamatu izmantota 4.2. sadaļā apkopotā metodoloģija. Tomēr var pamatoti uzskatīt, ka lietotājs, kuram ir zināma patēriņa elastība, būtu galvenokārt ieinteresēts izmantot laikā mainīgas elektroenerģijas cenas. Šajā nolūkā *DR* ekonomiskā potenciāla novērtēšanas modelis ir pilnveidots, lai varētu novērtēt arī no **netiešās *DR*** gūto labumu (proti, iegādājoties elektroenerģiju par dinamiskām ikstundas cenām, kas ir zināmas iepriekšējā dienā), kā parādīts 4.1. attēlā. Tā būtībā ir secīga optimizācija pēc nākamās dienas tirgus ikstundas cenām, kas modelī tiek veikta visam gadam ar mērķi samazināt elektroenerģijas iegādes izmaksas. Kā ierobežojums tiek izmantots kopējais dienas patēriņš, kas saglabājas nemainīgs. Ja tiek modelēta nākamās dienas slodzes grafika pārplānošana, pirms tiešās *DR* aktivizāciju imitācijas tiek attiecīgi koriģēti balansēšanas tirgum pieejamie elastības profili. Kopējās patēriņa elastības robežas paliek tās pašas, bet slodzes profils tiek mainīts atkarībā no uz cenu balstītās optimizācijas rezultātiem.

4.4.2. Pieņēmumi

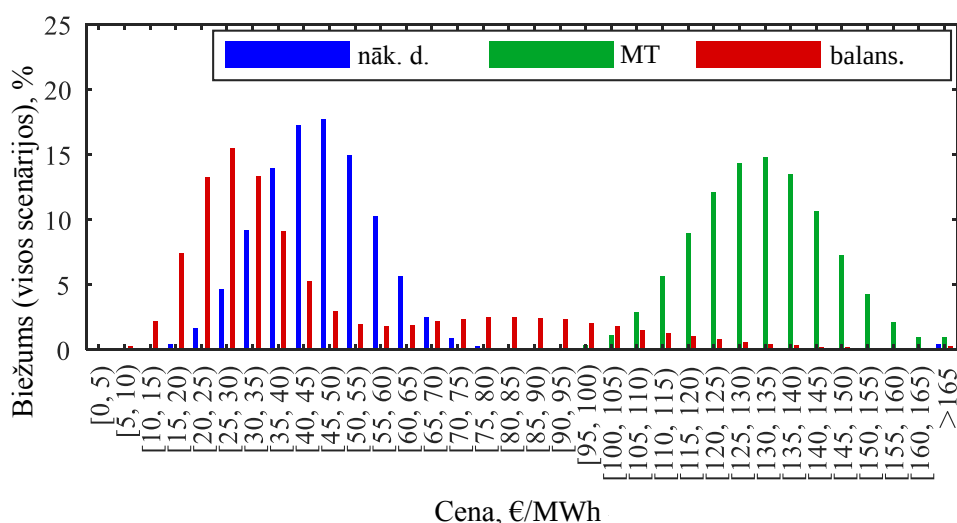
Gadījumizpēte ir balstīta uz **termostatisku elektroslodzi**, kas literatūrā ir identificēta kā viens no daudzsoļākajiem slodzes tiptiem *DR* īstenošanai mājāsaimniecībās [67]–[69]. Proti, tiek modelētas **viedās elektriskās termoakumulācijas ierīces** (kas aplūkotas 2. nodaļā), kuras spēj saņemt ārējus vadības signālus (piemēram, no agregatora). Katras ierīces nominālā ieejas jauda ir 2,2 kW, un – līdzīgi kā iepriekšējā gadījumizpētē – mēs pieņemam, ka mājāsaimniecībā uzstādītas piecas ierīces. Noklusējuma režīmā (bez interneta vārtejas

savienojuma) ierīce patērē elektroenerģiju (t. i., uzkrāj siltumenerģiju) katras diennakts pirmajās stundās, jo sildītāju labā siltumizolācija ļauj izplatīt siltumu telpā visas dienas garumā tieši tad, kad tas nepieciešams. Šajā pētījumā mainīgās *OPEX* netiek ņemtas vērā, savukārt fiksētās *OPEX* pieņemtas 20 € gadā.

Pētījumā izmantoti četri dažādi nedēļas patēriņa un elastīguma profili, lai ietvertu sezonālās atšķirības (gads ir sadalīts četrās trīs mēnešu sezonās). Siltumenerģijas pieprasījumu iegūst no ēku termomodelēšanas rezultātiem Rīgā, Latvijā, kas liecināja, ka vidējais siltuma pieprasījums pavasarī ir aptuveni 50 % no ziemas slodzes, rudenī – 20 %, vasarā – 10 %. Elastības ziņā mēs pieņemam, ka jebkuru dīkstāvē esošu sildītāju var ieslēgt un jebkuru darbošos ierīci izslēgt uz vienu stundu līdz 14 reizēm nedēļā, ja vien ir pietiekami daudz elastības pretējā virzienā, lai slodzi atgūtu nākamo 12 stundu laikā. Vasara ir izņēmums – mēs pieņemam, ka tikai vienu papildu sildītāju var ieslēgt slodzes palielināšanai. Slodzes atgūšanas koeficients abos virzienos ir 0,9, proti, *DR* ar slodzes palielināšanu izraisa nelielu enerģijas izšķērdēšanu, savukārt *DR* ar slodzes samazināšanu rada nelielu enerģijas ietaupījumu.

Nākamās dienas tirgus cenu scenāriji tiek ģenerēti, balstoties uz *Nord Pool* Latvijas cenu zonas statistiku (01.11.2017.–31.10.2018.), savukārt **balansēšanas tirgus** scenāriju parametri ir atvasināti no kopējā Baltijas balansēšanas tirgus datiem (01.01.2018.–31.10.2018.). Elastīgās slodzes īpašnieks iepērk elektroenerģiju savam ierastajam patēriņam par **dinamisku mazumtirdzniecības cenu** $\Pi_{ret,t} = 1,21 \cdot (\Pi_{DA,t} + 62,91)$, kas atbilst reprezentatīvam elektroenerģijas mazumtirdzniecības tarifam Latvijā šā pētījuma veikšanas laikā (2018. gada novembrī). To veido nākamās dienas ikstundas vairumtirdzniecības cena $\Pi_{DA,t}$, tirdzniecības komisija, obligātā iepirkuma komponente, tīkla tarifs un pievienotās vērtības nodoklis 21 %.

Salīdzināmības nolūkā visi aprēķini šajā pētījumā ir veikti, izmantojot tos pašus 1000 scenārijus nākamās dienas un balansēšanas tirgum (t. i., tie tiek ģenerēti tikai vienu reizi). Iegūto ikstundas cenu histogramma ir dota 4.7. attēlā.



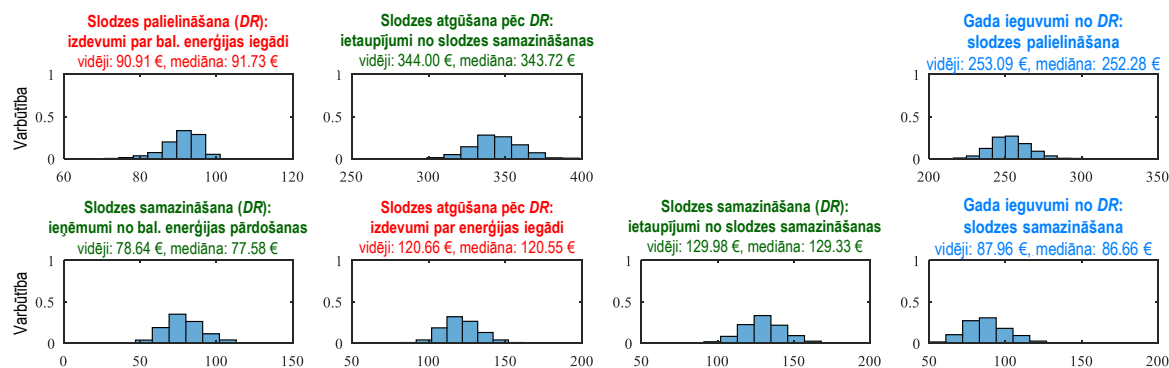
4.7. att. Ģenerēto elektroenerģijas nākamās dienas tirgus (ar zilu), mazumtirdzniecības (ar zaļu) un balansēšanas tirgus (ar sarkanu) cenu histogramma 1000 scenārijiem.

4.4.3. Rezultāti un diskusija

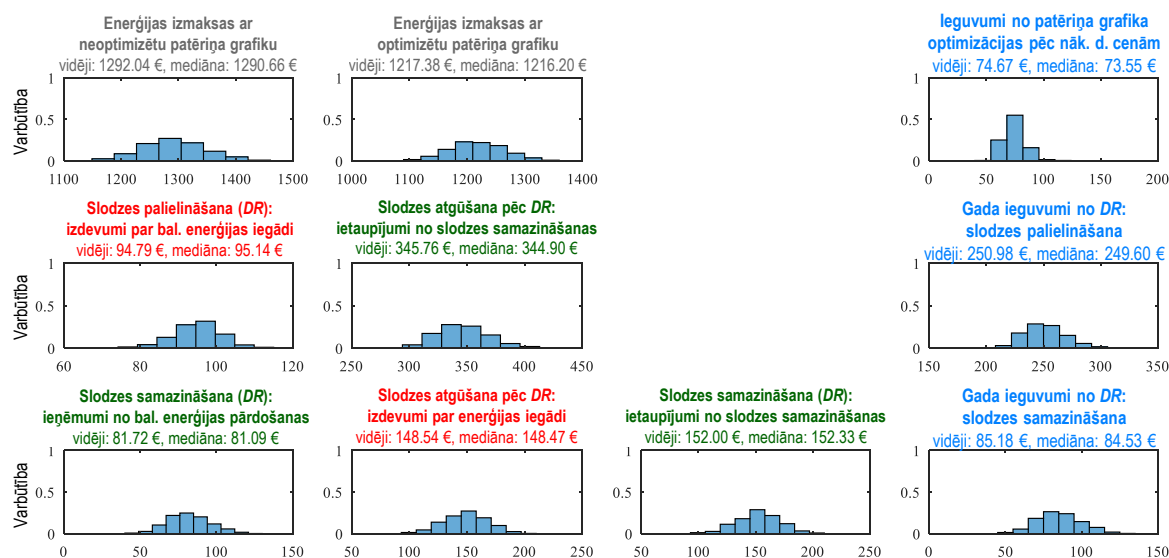
Salīdzināšanas nolūkos modeļa imitācijas veiktas divējādi: pirmkārt, tikai ar tiešo *DR* energosistēmas balansēšanai, pieņemot, ka *DR* apkopotā veidā var piedalīties Baltijas valstu *mFRR* tirgū, un, otrkārt, papildus ar netiešo *DR*, kas īstenota kā slodzes grafika pārplānošana pēc nākamās dienas tirgus cenām, tātad – pirms *DR* dalības balansēšanas tirgū.

4.8. attēlā apkopotas modelēto scenāriju naudas plūsmas pa pozitīvajām un negatīvajām plūsmas pozīcijām, kas radušās no tiešās *DR* aktivizācijām tajā gadījumā, kad sākotnējais patēriņš nav optimizēts. Salīdzinot ar tiem pašiem rādītājiem gadījumam, kad ir veikta slodzes grafika pārplānošana (4.9. att.), var izdarīt trīs galvenos secinājumus.

Pirmkārt, ieguvums no netiešās *DR* ir salīdzināms ar to labumu, ko sniedz tiešā *DR* (piemēram, 74,67 € no grafika pārplānošanas, 336,16 € no *DR* dalības balansēšanā). Otrkārt, netiešā *DR* neietekmē negatīvi ienesīgumu no tiešās *DR*, bet gan to papildina. Treškārt, tos naudas plūsmas komponentus, kas ir tieši atkarīgi no ikstundas mazumtirdzniecības cenas, slodzes grafika pārplānošana ietekmē visvairāk.



4.8. att. Modelēto naudas plūsmas pozīciju histogrammas (ar sarkanu – pozitīvie saskaitāmie, ar zaļu – negatīvie saskaitāmie, ar zilu – kopsumma) bez patēriņa grafika optimizācijas.



4.9. att. Modelēto naudas plūsmas pozīciju histogrammas (ar sarkanu – pozitīvie saskaitāmie, ar zaļu – negatīvie saskaitāmie, ar zilu – kopsumma) ar patēriņa grafika optimizāciju.

4.5. Kopsavilkums

Izstrādātais uz Montekarlo imitācijām balstītais *DR* ekonomiskās novērtēšanas rīks *DR Assess* ir noderīgs, lai sniegtu sākotnējo novērtējumu par potenciālajām priekšrocībām, ko vadāmas slodzes īpašnieks varētu gūt, piedaloties energosistēmas balansēšanā caur tiešo *DR* un papildus – arī optimizējot savu patēriņa grafiku, balstoties uz nākamās dienas tirgus cenām (proti, caur netiešo *DR*). Tomēr izstrādātajam modelim ir nepieciešama diezgan detalizēta informācija par *DR* resursa tehniskajām īpašībām, jo īpaši attiecībā uz tā pieejamo elastīgumu ar stundas izšķirtspēju. Kopumā rezultāti ir atkarīgi no izmantotajiem pieņēmumiem, tāpēc tie jāvērtē kopsakarā ar ieejas datiem.

DR ekonomiskā novērtējuma modelis ļauj arī pētīt ieguvumus no tiešās *DR* pa komponentiem – atlīdzība par balansēšanu, ieguvumi no energoefektivitātes uzlabojumiem (vai samazinājuma) un stundas cenu svārstībām, ja tiek izmantots dinamisks mazumtirdzniecības tarifs. Lai gan pēdējie divi komponenti atsevišķos gadījumos radīja negatīvu ietekmi, tomēr naudas plūsmas summa visos gadījumos saglabājās pozitīva, un tādējādi *DR* aktīvu īpašnieks var gūt finansiālu labumu.

Gadījumizpētes rezultāti par **mājsaimniecības *DR*** daļību **balansēšanas tirgū** liecina, ka elektriskajām termoakumulācijas ierīcēm nepieciešamās papildu investīcijas (lai tās varētu piedalīties *DR* sniegšanā) iespējams atgūt, bet tikai tad, ja vairāk nekā 50 % no slodzes samazināšanas atlīdzības tiek nodoti *DR* aktīva īpašniekam. Stohastiskie modelēšanas rezultāti faktiski liecina, ka pat pie 100 % atlīdzības pastāv neliela varbūtība, ka atmaksāšanās periods varētu pārsniegt aktīva kalpošanas ilgumu. Tomēr realitātē pilnīga atlīdzības novirzīšana *DR* resursa īpašniekam ir maz ticama, jo arī agregatoram ir nepieciešami stimuli tā darbībai.

Turklāt gadījumizpēte par **tiešās un netiešās *DR*** vienlaikus īstenošanu, izmantojot viedās elektriskās termoakumulācijas ierīces, ļauj secināt, ka papildu netiešās *DR* izmantošana, optimizējot patēriņa grafiku pēc tirgus cenām, neierobežo tiešās *DR* rentabilitāti. Lai gan *DR* aktivizāciju rādītāji un naudas plūsmas komponenti mainās, kopējais ieguvums abos gadījumos ir līdzīgs. Turklāt netiešā *DR* pati par sevi rada vērā ņemamu papildu ieguvumu, veicinot viedās elektriskās termoakumulācijas kopējo ienesīgumu. Tika arī parādīts, kā rīku *DR Assess* var izmantot, lai noteiktu vēlamās tirgus pieteikumu cenas daļībai balansēšanas tirgū ar tiešo *DR*. Noskaidrots, ka slodzes samazināšanai nav noteikti nepieciešami cenas ierobežojumi, ja vien *DR* mainīgās *OPEX* ir niecīgas.

Visbeidzot, reālistiskākai *DR* ekonomiskā izdevīguma novērtēšanai būtu nepieciešama gandrīz pilnīga informācija par līgumnosacījumiem starp *DR* resursu īpašnieku, agregatoru, balansēšanas pakalpojuma sniedzēju, PSO un citām potenciāli iesaistītajām pusēm. Tomēr normatīvais un tirgus regulējums *DR* agregatoriem Latvijā vēl tiek izstrādāts. Šajā nolūkā rīks ļauj modelēt dažādus iestatījumus, kas ļauj veikt pētījumus par konkrētam gadījumam vispiemērotāko biznesa modeli. To varētu izmantot arī politikas veidotāji, lai analizētu dažādu regulatīvo nosacījumu iespējamo ietekmi uz iesaistītajām pusēm. Turpmākajos pētījumos *DR* novērtēšanas modelis varētu tikt paplašināts, lai apsvērtu arī citus potenciālos tirgus un tiešās *DR* veidus, kuros var piedalīties mājsaimniecību lietotāji apkopotā veidā, jo pašlaik modelis ir vērsts tikai uz balansēšanas tirgu ar *mFRR* produktu.

SECINĀJUMI

1. Patēriņa reakcijas sniegto ieguvumu novērtējums un balansēšanas procesa optimizācijas rezultāti apstiprina promocijas darba hipotēzi. Darbā pierādīts, ka piedāvātie risinājumi spēj palielināt energosistēmas elastību un uzlabot tās darbības efektivitāti.
2. Izstrādātā metodoloģija un lietojumprogramma *AOF parameter search*, kas optimizē balansēšanas resursu aktivizāciju kopējā Baltijas balansēšanas tirgus ietvaros, ļauj ievērojami samazināt Baltijas zonas kontroles kļūdu, tādējādi veicinot Baltijas energosistēmu izmaksu efektivitāti un enerģētisko neatkarību.
3. Energosistēmas mēroga un galalietotāju ieguvumi no patēriņa reakcijas izmantošanas ir novērtēti, par piemēru izmantojot viedo elektrisko termoakumulāciju (*SETS*) kā novatorisku tehnoloģiju ar attālinātu patēriņa vadību. Rezultāti liecina, ka, salīdzinot ar tradicionālo (rezistīvo) elektroapkuri, *SETS* var nodrošināt izmaksu ietaupījumu gan Latvijas energosistēmai kopumā, gan galalietotājiem individuāli, kur lielākā daļa vērtības izriet no *SETS* viedās termoakumulācijas spējām.
4. Kā izpētīts promocijas darbā, no *SETS* var gūt arī papildu labumus, tos izmantojot energosistēmas rezervju nodrošināšanā. Tomēr sagaidāms, ka nākotnē šie ieguvumi skaitliski samazināsies līdz ar Latvijas un Igaunijas starpsavienojumu uzlabošanu un papildu akumulācijas jaudu ieviešanu Baltijas energosistēmā.
5. Pieņemot, ka Latvijā notiek apkures daļēja elektrifikācija, potenciālos sadales tīkla pārslodzes riskus var ievērojami mazināt ar koordinētu *SETS* vadību, kā tas parādīts reprezentatīvas sadales tīkla shēmas modelēšanā. Tas ļauj arī samazināt sadales tīkla zudumu izmaksas un elektroenerģijas rēķinus galalietotājiem.
6. Neraugoties uz ieguvumiem, kas konstatēti Latvijas gadījumizpētē, konkrētās aplūkojamās tehnoloģijas (*SETS*) investīciju izmaksas joprojām ir pārāk augstas, lai galalietotājam būtu pozitīva kopējā naudas plūsma. Tādēļ, lai šī konkrētā tehnoloģija kļūtu finansiāli pievilcīga lietotājiem, to ieviešanai būtu jāizveido jauni biznesa modeļi (piemēram, uz pakalpojumiem balstīti) un jārod jauni ieņēmumu avoti (piemēram, jaudas maksājumi par *DR* nodrošināšanu).
7. Izstrādātais uz Montekarlo imitācijām balstītais rīks *DR Assess* sniedz varbūtisku novērtējumu par *DR* pakalpojuma ekonomisko izdevīgumu no *DR* resursa īpašnieka viedokļa. Tas ļauj ievērot nenoteiktības elektroenerģijas tirgū un var tikt piemērots dažādiem *DR* aktīvu veidiem, ja zināms to elastīguma profils. Šis rīks, kas spēj analizēt gan netiešās, gan tiešās *DR* ietekmi, var būt īpaši noderīgs potenciālajiem Baltijas balansēšanas tirgus dalībniekiem, sniedzot tiem ticamu izmaksu un ieguvumu novērtējumu.
8. Promocijas darbā ar rīku *DR Assess* veiktie gadījumizpētes piemēri fokusēti uz mājsaimniecības līmeņa patēriņa reakciju. Tika pierādīts, ka tās rentabilitāte ir ļoti atkarīga no atlīdzības daļas, ko agregators novirza *DR* resursa īpašniekam, bet vēl jo vairāk to ietekmē konkrēta *DR* resursa elastīguma iestatījumi. Turklāt secināts, ka netieša *DR* sniedz papildu ieguvumus, ja to īsteno kombinācijā ar tiešo *DR*.
9. Turpmākajos pētījumos būtu jāanalizē iespējamie papildu ienākumu avoti no *DR*, lai tā kļūtu pievilcīgāka, un jāpēta jauni potenciālie tirgus mehānismi, kuros būtu lietderīga *DR* izmantošana. Turklāt *DR* potenciāla izpēte jāturpina, ietverot arī rūpnieciskus lietotājus.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] “Memorandum of Understanding on the Baltic Energy Market Interconnection Plan,” 2009. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2009_bemip_mou_signed.pdf. [Accessed: 18-Sep-2018].
- [2] “Baltic Energy Market Interconnection Plan. Final report,” 2009. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2009_11_25_hlg_report_170609_0.pdf. [Accessed: 18-Sep-2018].
- [3] BEMIP, “Baltic Energy Market Interconnection Plan. 5th progress report,” 2013. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20140225_5rd_bemip_progress_report.pdf. [Accessed: 25-Apr-2018].
- [4] Arturs Purvins; Gianluca Fulli; Catalin Felix Covrig, “The Baltic Power System between East and West Interconnections,” 2016.
- [5] Augstsprieguma tīkls AS, “Technical scenario for Baltic grid synchronisation approved in Brussels,” 2018. [Online]. Available: <http://ast.lv/en/events/technical-scenario-baltic-grid-synchronisation-approved-brussels>. [Accessed: 18-Sep-2018].
- [6] Augstsprieguma tīkls AS, “Baltic TSOs launch a common Baltic balancing market from 2018,” 2017. [Online]. Available: <http://www.ast.lv/en/events/baltic-tsos-launch-common-baltic-balancing-market-2018>. [Accessed: 02-Feb-2018].
- [7] G. Junghans, A. Silis, K. Marcina, and K. Ertmanis, “Role of Balancing Markets in Dealing with Future Challenges of System Adequacy Caused by Energy Transmission,” *Latv. J. Phys. Tech. Sci.*, vol. 57, no. 3, pp. 48–56, Jun. 2020.
- [8] H. Holttinen, A. Tuohy, M. Milligan, V. Silva, S. Müller, and L. Soder, “The Flexibility Workout,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 11, no. 6, pp. 53–62, 2013.
- [9] N. O’Connell, P. Pinson, H. Madsen, and M. O’Malley, “Benefits and challenges of electrical demand response: A critical review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 686–699, Nov. 2014.
- [10] N. Good, K. A. Ellis, and P. Mancarella, “Review and classification of barriers and enablers of demand response in the smart grid,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, pp. 57–72, May 2017.
- [11] Smart Grid Task Force, “Regulatory Recommendations for the Deployment of Flexibility - EG3 REPORT,” 2015.
- [12] N. G. Paterakis, O. Erdinç, and J. P. S. Catalão, “An overview of Demand Response: Key-elements and international experience,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, pp. 871–891, 2017.
- [13] CIGRE, *Short-term flexibility in power systems: drivers and solutions*. Paris, 2020.
- [14] SEDC, “Explicit Demand Response in Europe Mapping the Markets 2017,” 2017.
- [15] M. Muratori, B.-A. Schuelke-Leech, and G. Rizzoni, “Role of residential demand response in modern electricity markets,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 33, pp. 546–553, May 2014.
- [16] J.-H. Kim and A. Shcherbakova, “Common failures of demand response,” *Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 873–880, Feb. 2011.
- [17] M. Shafie-khah, P. Siano, J. Aghaei, M. A. S. Masoum, F. Li, and J. P. S. Catalao, “Comprehensive Review of the Recent Advances in Industrial and Commercial DR,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 15, no. 7, pp. 3757–3771, Jul. 2019.
- [18] C. A. Cardoso, J. Torriti, and M. Lorincz, “Making demand side response happen: A review of barriers in commercial and public organisations,” *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 64, p. 101443, Jun. 2020.

- [19] B. Dupont, K. Dietrich, C. De Jonghe, A. Ramos, and R. Belmans, "Impact of residential demand response on power system operation: A Belgian case study," *Appl. Energy*, vol. 122, pp. 1–10, Jun. 2014.
- [20] F. Shariatzadeh, P. Mandal, and A. K. Srivastava, "Demand response for sustainable energy systems: A review, application and implementation strategy," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 343–350, May 2015.
- [21] S. Paiho *et al.*, "Increasing flexibility of Finnish energy systems—A review of potential technologies and means," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 43, pp. 509–523, Nov. 2018.
- [22] M. Barbero, C. Corchero, L. Canals Casals, L. Igualada, and F.-J. Heredia, "Critical evaluation of European balancing markets to enable the participation of Demand Aggregators," *Appl. Energy*, vol. 264, p. 114707, Apr. 2020.
- [23] P. Kohlhepp, H. Harb, H. Wolisz, S. Waczowicz, D. Müller, and V. Hagenmeyer, "Large-scale grid integration of residential thermal energy storages as demand-side flexibility resource: A review of international field studies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 101, pp. 527–547, Mar. 2019.
- [24] "Feasibility study regarding cooperation between the Nordic and the Baltic power systems within the Nordic ENTSO-E pilot project on electricity balancing," 2014. [Online]. Available: http://www.ast.lv/files/ast_files/balansesana/STUDY_REPORT-Nordic-Baltic_cooperation_in_Electricity_Balancing_112014_final.pdf.
- [25] Pöyry Management Consulting (UK) Ltd, "Baltic's balance management model study and harmonisation plan towards EU energy markets model (including Nordic-Baltic balancing cooperation). A report to Elering," 2016. [Online]. Available: https://elering.ee/sites/default/files/attachments/Pöyry_uuring.pdf.
- [26] Augstsprieguma tīkls AS, "Annual statement of transmission system operator for the year 2016," 2017. [Online]. Available: http://ast.lv/files/ast_files/gadaparskzinoj/TSO_Annual_Statement_2016.pdf. [Accessed: 28-Apr-2018].
- [27] European Commission, *Commission Regulation (EU) 2017/2195 of 23 November 2017 establishing a guideline on electricity balancing*. 2017.
- [28] A. McDonald, "Thermal Storage Device," US 2015/0055941 (A1), 2015.
- [29] J.-M. Durand, M. J. Duarte, and P. Clerens, "Joint EASE/EERA recommendations for a European Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030," 2013.
- [30] G. Fraisse, C. Viardot, O. Lafabrie, and G. Achard, "Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy," *Energy Build.*, vol. 34, no. 10, pp. 1017–1031, Nov. 2002.
- [31] C. P. Underwood, "An improved lumped parameter method for building thermal modelling," *Energy Build.*, vol. 79, pp. 191–201, Aug. 2014.
- [32] A. P. Ramallo-González, M. E. Eames, and D. A. Coley, "Lumped parameter models for building thermal modelling: An analytic approach to simplifying complex multi-layered constructions," *Energy Build.*, vol. 60, pp. 174–184, May 2013.
- [33] M. M. Gouda, S. Danaher, and C. P. Underwood, "Building thermal model reduction using nonlinear constrained optimization," *Build. Environ.*, vol. 37, no. 12, pp. 1255–1265, Dec. 2002.
- [34] N. Good, L. Zhang, A. Navarro-Espinosa, and P. Mancarella, "High resolution modelling of multi-energy domestic demand profiles," *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 193–210, 2015.
- [35] A. Rabl, "Parameter Estimation in Buildings: Methods for Dynamic Analysis of Measured Energy Use," *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 110, no. 1, pp. 52–66, 1988.
- [36] G. Strbac, "Demand side management: Benefits and challenges," *Energy Policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4419–4426, 2008.

- [37] N. Ritter *et al.*, “H2020 RealValue D6.2 Market review report: socio-economic & housing trends in selected countries,” 2016. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5ad302011&appId=PPGMS>. [Accessed: 29-Jun-2020].
- [38] AS “Sadales tīkls,” “AS ‘Sadales tīkls’ gada pārskats 2016,” 2017. [Online]. Available: https://www.sadalestikls.lv/files/newnode/parskati/ST__2016_gada_parskats.pdf.
- [39] D. Bride and A. Zvaigzne, “Electricity Market Development in Latvia,” *J. Soc. Sci.*, vol. 1, no. 8, pp. 5–19, 2016.
- [40] European Commission, “Europe leads the global clean energy transition: Commission welcomes ambitious agreement on further renewable energy development in the EU,” 2018.
- [41] T. J. Hammons, “Integrating renewable energy sources into European grids,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 30, no. 8, pp. 462–475, Oct. 2008.
- [42] J. a. P. Lopes, N. Hatzargyriou, J. Mutale, P. Djapic, and N. Jenkins, “Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 77, no. 9, pp. 1189–1203, Jul. 2007.
- [43] SEDC, “Explicit and Implicit Demand-Side Flexibility Complementary Approaches for an Efficient Energy System Explicit and Implicit Demand-Side Flexibility: Complementary Approaches for an Efficient Energy System,” no. September, 2016.
- [44] M. H. Albadi and E. F. El-Saadany, “A summary of demand response in electricity markets,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 11, pp. 1989–1996, Nov. 2008.
- [45] M. H. Albadi and E. F. El-Saadany, “Demand Response in Electricity Markets: An Overview,” in *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007, pp. 1–5.
- [46] N. Prügler, “Economic potential of demand response at household level—Are Central-European market conditions sufficient?,” *Energy Policy*, vol. 60, pp. 487–498, Sep. 2013.
- [47] M. Behrangrad, “A review of demand side management business models in the electricity market,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 270–283, Jul. 2015.
- [48] L. Gkatzikis and I. Koutsopoulos, “The Role of Aggregators in Smart Grid Demand Response Markets,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 7, pp. 1247–1257, 2013.
- [49] A. Rautiainen *et al.*, “Attractiveness of demand response in the Nordic electricity market – Present state and future prospects,” in *2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 2017, pp. 1–6.
- [50] L. Sadovica, K. Marcina, V. Lavrinovics, and G. Junghans, “Facilitating energy system flexibility by demand response in the baltics — Choice of the market model,” in *2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2017, pp. 1–6.
- [51] Augstsprieguma tīkls AS, Elering AS, and Litgrid UAB, “Demand response through aggregation - a harmonized approach in Baltic region,” 2017.
- [52] M. Muratori and G. Rizzoni, “Residential Demand Response: Dynamic Energy Management and Time-Varying Electricity Pricing,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 2, pp. 1108–1117, 2016.
- [53] H. C. Gils, “Economic potential for future demand response in Germany – Modeling approach and case study,” *Appl. Energy*, vol. 162, pp. 401–415, 2016.
- [54] F. Wang, H. Xu, T. Xu, K. Li, M. Shafie-khah, and J. P. S. Catalão, “The values of market-based demand response on improving power system reliability under extreme circumstances,” *Appl. Energy*, vol. 193, pp. 220–231, May 2017.
- [55] G. Bianchini, M. Casini, A. Vicino, and D. Zarrilli, “Demand-response in building heating systems: A Model Predictive Control approach,” *Appl. Energy*, vol. 168, pp. 159–170, 2016.

- [56] A. Arteconi, D. Patteeuw, K. Bruninx, E. Delarue, W. D'haeseleer, and L. Helsen, "Active demand response with electric heating systems: Impact of market penetration," *Appl. Energy*, vol. 177, pp. 636–648, 2016.
- [57] F. De Ridder, M. Hommelberg, and E. Peeters, "Demand side integration: four potential business cases and an analysis of the 2020 situation," *Eur. Trans. Electr. Power*, vol. 21, no. 6, pp. 1902–1913, Sep. 2011.
- [58] E. Moreno, O. A. Gonzalez, and A. Pavas, "Demand flexibility assessment for residential customers," in *2017 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, 2017, pp. 1–5.
- [59] B. Neupane, L. Šikšnys, and T. B. Pedersen, "Generation and Evaluation of Flex-Offers from Flexible Electrical Devices," *Proc. Eighth Int. Conf. Futur. Energy Syst. - e-Energy '17*, pp. 143–156, 2017.
- [60] Z. Yahia and A. Pradhan, "Optimal load scheduling of household appliances considering consumer preferences: An experimental analysis," *Energy*, vol. 163, pp. 15–26, 2018.
- [61] Z. Ma, J. Billanes, and B. Jørgensen, "Aggregation Potentials for Buildings—Business Models of Demand Response and Virtual Power Plants," *Energies*, vol. 10, no. 10, p. 1646, Oct. 2017.
- [62] M. Brolin, "Aggregator trading and demand dispatch under price and load uncertainty," in *2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 2016, pp. 1–6.
- [63] D. T. Nguyen, M. Negnevitsky, and M. De Groot, "Modeling load recovery impact for demand response applications," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1216–1225, 2013.
- [64] M. Vallés, A. Bello, J. Reneses, and P. Frías, "Probabilistic characterization of electricity consumer responsiveness to economic incentives," *Appl. Energy*, vol. 216, no. September 2017, pp. 296–310, 2018.
- [65] H. Janssen, "Monte-Carlo based uncertainty analysis: Sampling efficiency and sampling convergence," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 109, pp. 123–132, 2013.
- [66] "MATLAB." The MathWorks Inc, Natick, Massachusetts.
- [67] J. L. Mathieu, M. Kamgarpour, J. Lygeros, G. Andersson, and D. S. Callaway, "Arbitraging Intraday Wholesale Energy Market Prices With Aggregations of Thermostatic Loads," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 2, pp. 763–772, Mar. 2015.
- [68] V. Trovato, F. Teng, and G. Strbac, "Value of thermostatic loads in future low-carbon Great Britain system," in *2016 Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 2016, pp. 1–7.
- [69] A. M. Mathew and R. Menon, "Assessment of demand response capability with thermostatic loads in residential sector," in *2015 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, 2015, pp. 1–5.