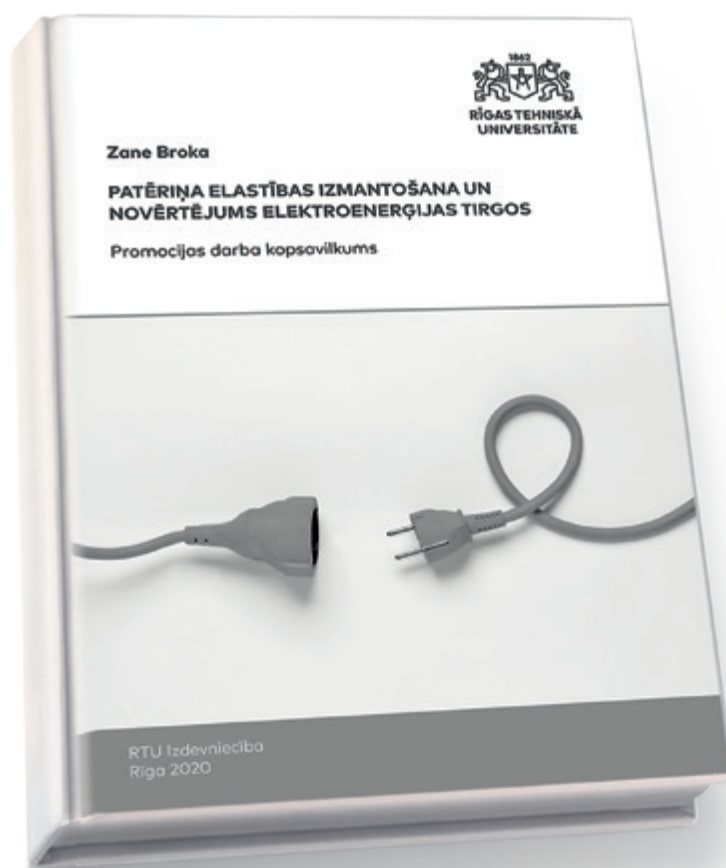


Patēriņa elastības izmantošana un novērtējums elektroenerģijas tirgos



Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas institūta pētniece Zane Broka 2020. gada 12. novembrī aizstāvēja promocijas darbu “Patēriņa elastības izmantošana un novērtējums elektroenerģijas tirgos” (darba zinātniskais vadītājs prof. Antans Sauhats). Par to gada nogalē tika saņemta Latvijas Zinātņu akadēmijas un AS “Latvenergo” gada balva jaunajiem zinātniekiem par panākumiem enerģētikā. Šajā rakstā sniegts īss ieskats veikto pētījumu tematikā, tās aktualitātē, kā arī gūtājās atziņās.

Pētījumu konteksts un aktualitāte

Līdz ar memoranda par **Baltijas enerģijas tirgus starpsavienojuma plānu** parakstīšanu 2009. gadā tika sākti rīcības plāna īstenošana, lai integrētu Baltijas elektroenerģijas tirgus vienotajā Eiropas Savienības tirgū. 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. 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 enerģosistēmas vēsturiski un vēl joprojām darbojas sinhronā režīmā ar Krievijas un Baltkrievijas enerģosistēmām (IPS/UPS). Saskaņā ar Baltkrievijas, Krievijas, Igaunijas, Latvijas

un Lietuvas pārvades sistēmu operatoru noslēgto līgumu (BRELL) primāro enerģosistēmas frekvences regulēšanu un sistēmas stabilitāti nodrošina Krievijas enerģosistēma. Baltijas valstu dalību IPS/UPS plānots pārtraukt līdz 2025. gadam, kad tiks pabeigta Baltijas enerģosistēmas sinhronizācija ar kontinentālās Eiropas tīklu.

Taču, lai stiprinātu Baltijas valstu enerģētisko neatkarību un regulēšanas pakalpojuma sniegšanā iesaistītu arvien vairāk vietējo resursu, jau vairākus gadus pirms plānotās desinhronizācijas, 2018. gadā, Latvijas, Igaunijas un Lietuvas pārvades sistēmu operatori izveidoja **kopēju Baltijas balansēšanas tirgu**, kura ietvaros notiek koordinēta balansēšanas resursu aktivizācija un apmaiņa starp trim valstīm. Pieprasījums pēc balansēšanas avotiem palielinās arī augošā pārtraukumaino ģenerācijas avotu īpatsvara dēļ. Minētie apstākļi nosaka to, ka nepieciešams uzlabot enerģosistēmas elastību, lai nodrošinātu frekvences regulēšanu

ne vien normālā, bet arī izolētā darba režīmā, ja notikusi energosistēmas dalīšana.

Energosistēmas elastību definē kā tās spēju pielāgoties slodzes un ģenerācijas svārstībām un nenoteiktībām. Mūsdienās šo balansēšanu galvenokārt nodrošina **tradicionālās elektrostacijas**; taču pastāv iespēja izmantot arī **patēriņa puses elastīgumu**, kas līdz šim nav plaši apgūts resurss. Līdz ar informācijas tehnoloģijas (IT) rīku, vadības un prognozēšanas metožu attīstību patēriņa reakcija (angļu val. *demand response* – DR) pēdējā laikā gūst arvien lielāku ievēribu kā potenciālais energosistēmas elastības avots. 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. 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. 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 māsaimniecības, gan juridiskas personas) pašreizējā vai ierastā enerģijas patēriņa pārmaiņas, kas notikušas, reaģējot uz tirgus signāliem, piemēram, laikā mainīgām elektroenerģijas cenām vai stimulojošiem maksājumiem, vai pēc atbilstoša pieteikuma akceptēšanas tirgū, ko galalietotājs iesniedzis individuāli vai caur agregatoru, lai organizētā elektroenerģijas tirgū par noteiktu cenu pārdotu patēriņa samazinājumu un / vai palielinājumu. Savukārt patēriņa reakciju definē kā galalietotāju brīvprātīgi veiktas izmaiņas no ierastā elektroenerģijas un / vai gāzes patēriņa.

No vienas puses, par šādas elastības avotiem var kalpot galalietotāji no rūpnieciskā, komerciālā vai māsaimniecību sektora, kuru elektroenerģijas patēriņam vai izkliedētajai ģenerācijai un / vai 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). Tādējādi varam izšķirt trīs galvenos ieguvumu virzienus, ko dod patēriņa reakcija:

- 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;

- 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;

- **ekonomiski ieguvumi** – samazinās elektroenerģijas ražotāju ietekme tirgū, un pazeminās elektroenerģijas vidējā cena.

Tomēr, lai izmantotu šos labumus, vispirms jāatrisina virkne izaicinājumu, kas cita starpā 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;

- **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).

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

Galvenie izaicinājumi DR ieviešanā ir atbilstošu **tirgus mehānismu** un **regulējuma** trūkums; grūtības izveidot DR un / vai tās agregatoram piemērotu **biznesa modeli**; problemātiska DR atzišana 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 tā tiktu atbilstoši ieviesta un integrēta energosistēmā.

Patēriņa reakcijas jēdziens un tās izmantošana energosistēmas elastībai ir aplūkoti virknē zinātnisko publikāciju, kurās autori analizējuši ieguvumus, izaicinājumus, šķēršļus un virzītājspēkus gan vispārīgā kontekstā, gan arī konkrētu valstu gadījumizpētē. Savā promocijas darbā veicu tādu pasākumu novērtējumu, kas varētu **palielināt energosistēmas elastību**, pateicoties dažādu veidu **patēriņa reakcijas** izmantošanai un papildus – arī uzlabojot sistēmas **balansēšanas procesu** kopumā. Tāpēc darba sākumā piedāvāta optimizēta regulēšanas rezervju aktivizācijas stratēģija, bet pēc tam veikts potenciālo ieguvumu novērtējums dažādos aspektos – ko sniegtu patēriņa reakcijas izmantošana energosistēmā.

Tā ietvaros modelēta detalizēta māsaimniecību sektorā izmantojama tehnoloģija, kas var nodrošināt patēriņa reakciju, – viedie elektriskie termoakumulācijas sildītāji. Konkrētā tehnoloģija izvēlēta tāpēc, ka tieši elektriskās apsildes iekārtas var nodrošināt ievērojamu un prognozējamu patēriņa reakcijas apjomu salīdzinājumā ar citām viedajām elektroierīcēm. 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 darba ietvaros izstrādāts plašs rīks un metožu klāsts, kas ļauj novērtēt ieguvumus no patēriņa reakcijas Baltijas energosistēmā.

Pētniecības uzdevumi

Promocijas darba izstrādes gaitā tika risināti šādi galvenie uzdevumi.

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

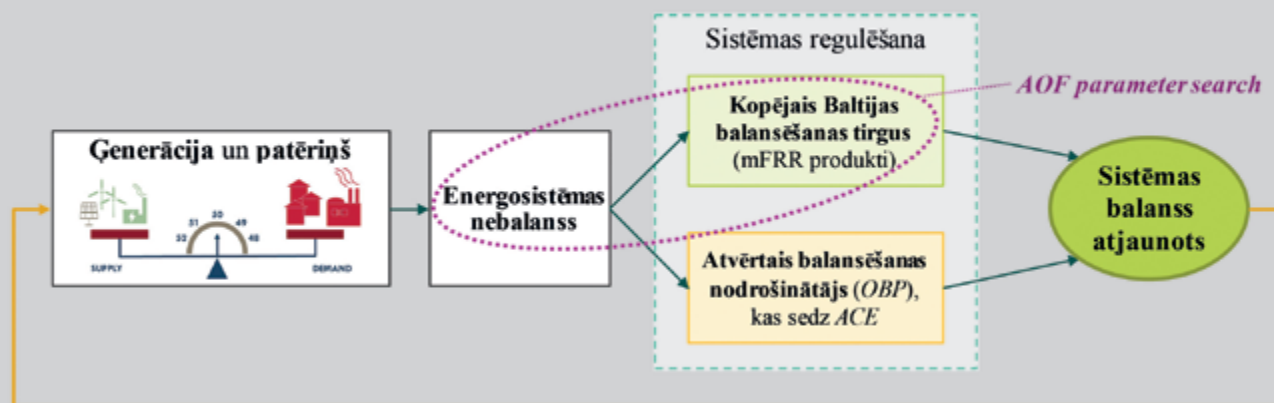
Regulēšanas rezervju optimāla aktivizācija

Lai veicinātu optimālu enerģosistēmas balansēšanas resursu aktivizāciju, izstrādāta **specializēta lietojumprogramma AOF parameter search**. Rīka izstrāde notika AS “Augstsprieguma tīkls” pasūtītā

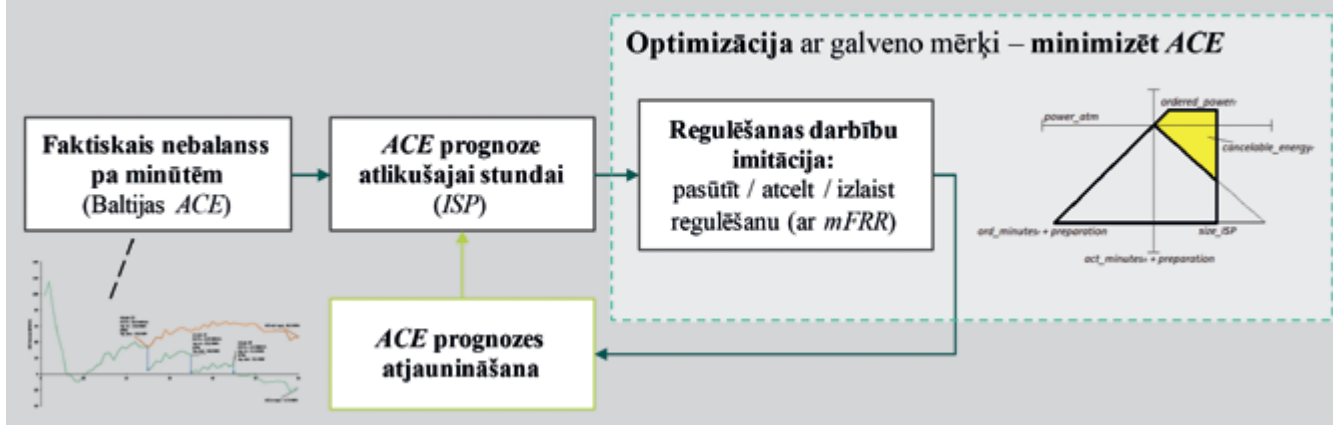
pētniecības līgumdarbā, un tā darbības tvērums (1. att.) ir regulēšanas rezervju (proti, mFRR) aktivizēšana kopējā Baltijas balansēšanas tirgus ietvaros, lai minimizētu Baltijas valstu zonas kontroles kļūdu (angļu val. *area control error* – ACE), kas jāsedz OBP. OBP ir t. s. atvērtais balansēšanas pakalpojuma sniedzējs, kas nodrošina balansēšanas enerģiju no Krievijas enerģosistēmas, izmantojot septiņas pārvades līnijas.

Rīks 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 enerģosistēmas regulēšanas procesam. AOF *parameter search* pamatā ir aktivizācijas apjoma un laika noteikšanas algoritms. Rīks īstenots kā atsevišķa lietojumprogramma dispečeriem, lai noteiktu, vai konkrētā jādā brīdī ir jāpasūta balansēšanas aktivizācija un, ja tā ir, kādā virzienā un kādā apmērā. Tā darbības princips ilustrēts 2. attēlā. Optimizētie regulēšanas parametri nodrošina **efektīvāku enerģosistēmas balansēšanu**, ietaupot gan enerģiju, gan izmaksas, un ļauj samazināt Baltijas valstu summāro nebalansu attiecībā uz t. s. atvērto balansēšanas pakalpojuma nodrošinātāju, tādējādi uzlabojot Baltijas valstu enerģētisko neatkarību.

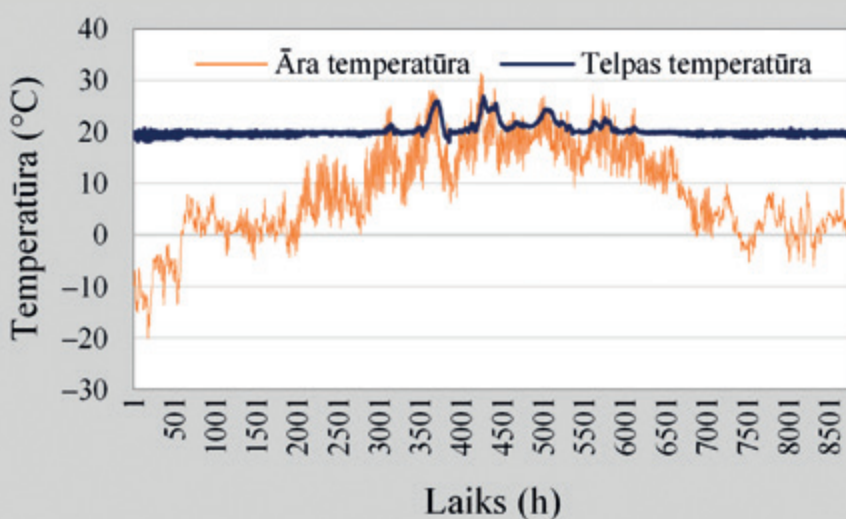
Rīka AOF parameter search loma Baltijas valstu balansēšanas procesā (1. attēls)



Vienkāršota rīka AOF parameter search darbības ilustrācija (2. attēls)



Vienģimenes koka mājas iekštelpu temperatūra
gada griezumā (3. attēls)



Patēriņa elastības modelēšana un ekonomiskais novērtējums

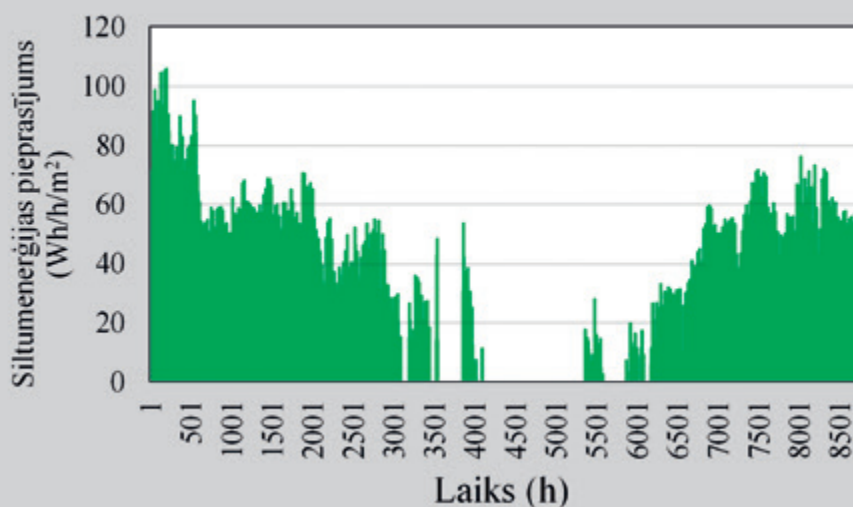
Darbā veikti pētījumi par **izmaksu un ieguvumu novērtējumu dažādiem patēriņa puses elastības resursiem**, kurus var izmantot ne tikai energosistēmas balansēšanai (kā tiešo patēriņa reakciju), bet arī citos nolūkos, piemēram, netiešai pieprasījuma reakcijai. Lai veiktu šo novērtējumu no dažādiem aspektiem 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 (4. attēlā parādīts piemērs modelētajam vienģimenes ēkas siltumenerģijas pieprasījumam gada griezumā). Tas ir būtiski, lai varētu veikt viedo elektrisko termoakumulācijas sildītāju (angļu val. *smart electric thermal storage* – SETS) izmaksu un ieguvumu novērtējumu. 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

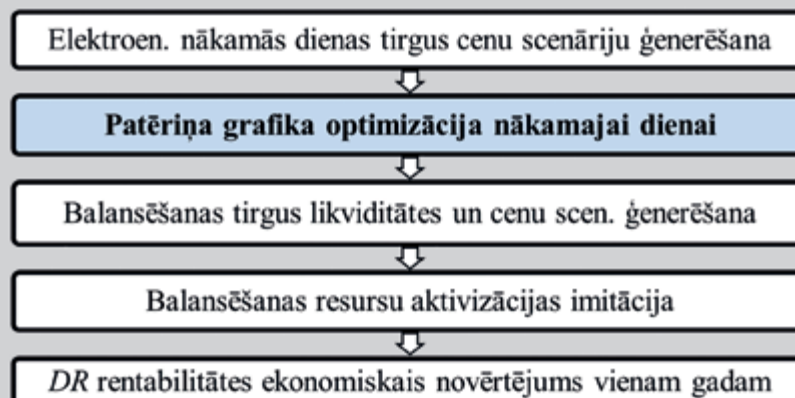
ietekmi Latvijas energosistēmā. Lai gan šāda veida apkure jau gadu desmitiem tiek izmantota vairākās Eiropas valstīs, Latvijas tirgū tā līdz šim ir bijusi teju nezināma. Tādējādi šis pētījums ir pirmais, kas sniedz ieskatu par SETS ieviešanu Latvijā. Turklāt pētījuma veikšanai tika izmantoti arī dati, kas iegūti no SETS praktiskās demonstrācijas 50 dažādās ēkās Latvijā. Iekārtu demonstrācija notika starptautiska programmas “Apvārsnis 2020” projekta *RealValue* ietvaros.

Visbeidzot, lai informētu potenciālos galalietotājus – patēriņa reakcijas pakalpojuma sniedzējus – par saistītajām izmaksām un ieguvumiem, radīta **lietojumprogramma DR Assess**. Arī šis rīks tika izstrādāts līgumdarba ietvaros pēc Latvijas PSO AS “Augstsprieguma tīkls” pasūtījuma. Šis

Vienģimenes koka mājas siltuma pieprasījums
gada griezumā (4. attēls)



DR Assess algoritma struktūra ar neobligātu netiešo DR – zilā krāsā
(5. attēls)



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 5. attēlā norādītajiem soļiem.

Ilustrācijai 6.–8. attēlā parādīti modelēšanas rezultāti hipotētiskai SETS ierīču dalībai Baltijas balansēšanas tirgū. Šeit ieguvumi atainoti, attiecinot tos uz vienu mājsaimniecību ar piecām SETS ierīcēm, taču, piedaloties balansēšanas tirgū, šīs iekārtas, visticamāk, veidotu daļa no kāda agregatora portfeļa. Protams, atainotās pozīcijas ir ļoti atkarīgas arī no tā, kādi ir agregatoru darbības noteikumi un agregatoru–lietotāju savstarpējie norēķini, taču izstrādātais rīks pieļauj arī dažādu līguma nosacījumu imitāciju. 7. un 8. attēlā atainotajā aprēķinā kā sākotnējās kapitālizmaksas pieņemtas tikai papildu investīcijas, kas nepieciešamas, lai padarītu ierīces par attālināti vadāmām (t. i., modema un citu informācijas un komunikāciju tehnoloģiju izmaksas), tātad konkrētajā piemērā tiek pieņemts, ka viedās elektriskās termoakumulācijas iekārtas mājsaimniecībā jau ir.

Gūtās atziņas un secinājumi

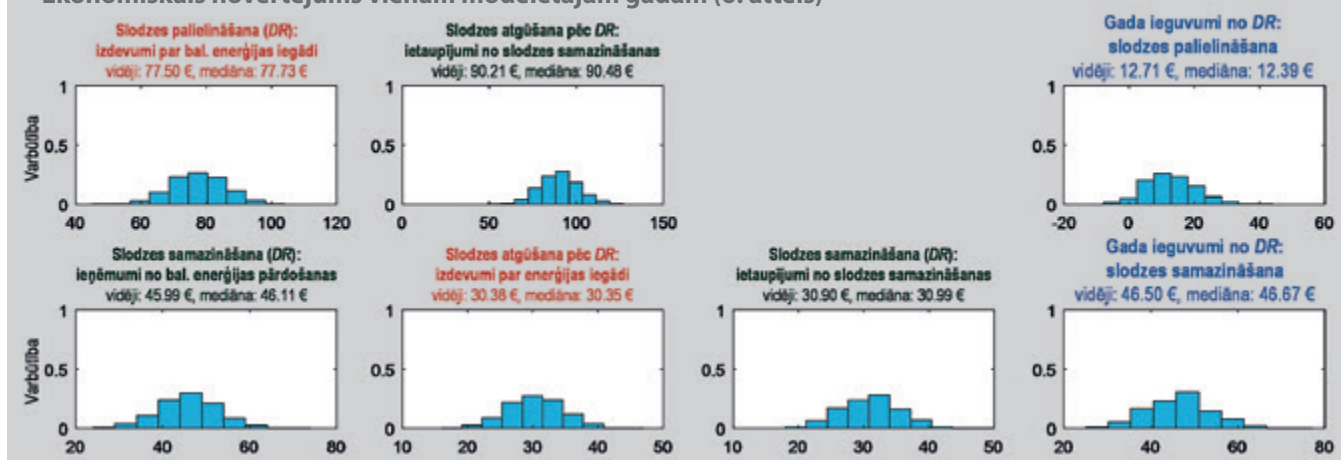
Izstrādātā metodoloģija un lietojumprogramma AOF *parameter search*, kas optimizē balansēšanas resursu aktivizāciju kopējā Baltijas balansēšanas tirgus ietvaros, ļauj ievērojami samazināt Baltijas zonas kontroles kļūdu, tādējādi veicinot Baltijas energosistēmu izmaksu efektivitāti un enerģētisko neatkarību.

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 salīdzinājumā 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.

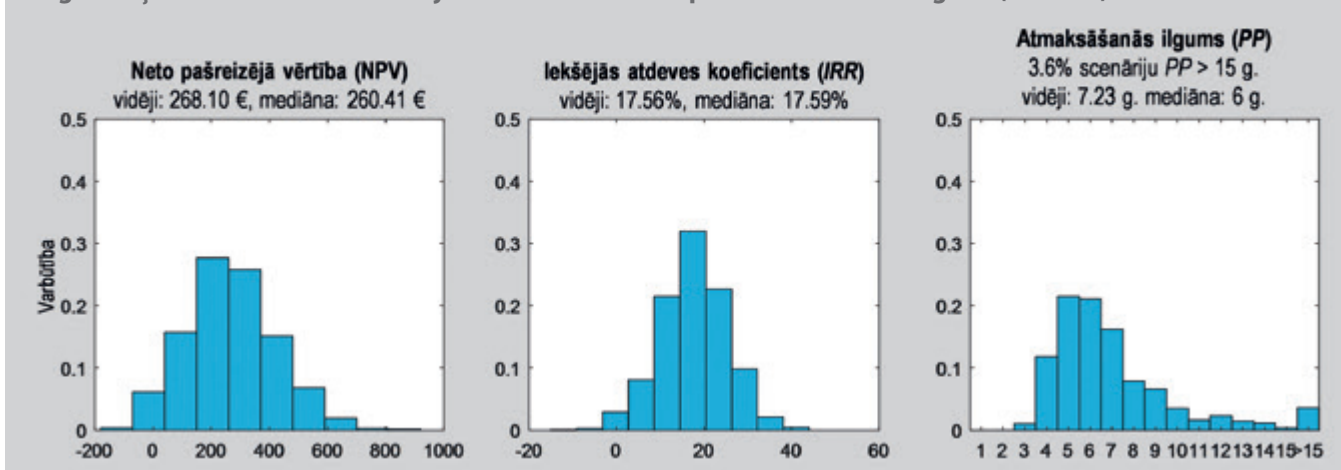
Kā izpētīts promocijas darbā, no SETS var gūt arī papildu labumus, tos izmantojot energosistēmas rezervju nodrošināšanā. Tomēr sagaidāms, ka nākotnē šie ieguvumi skaitliski samazināsies līdz ar Latvijas un Igaunijas starpsavienojumu uzlabošanu un papildu akumulācijas jaudu ieviešanu Baltijas energosistēmā.

Pieņemot, ka Latvijā notiek daļēja apkures elektrifikācija, potenciālos sadales tīkla pārslodzes riskus var ievērojami mazināt ar koordinētu SETS vadību, kā tas izriet no repre-

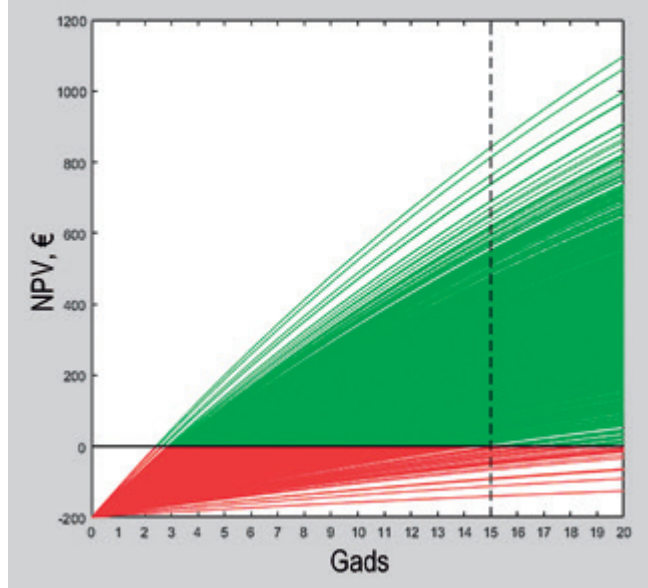
Ekonomiskais novērtējums vienam modelētajam gadam (6. attēls)



Ilgtermiņa ekonomiskais novērtējums visam aktīva kalpošanas laikam – 15 gadu (7. attēls)



Kumulatīvā naudas plūsma visos imitētajos scenārijos (8. attēls)



zentatīvas sadales tīkla shēmas modelēšanas. Tas ļauj arī pazemināt sadales tīkla zudumu izmaksas un elektroenerģijas rēķinus galalietotājiem.

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, tās ieviešanai būtu jāizveido jauni biznesa modeļi (piemēram, uz pakalpojumiem balstīti) un jārod jauni ieņēmumu avoti (piemēram, jaudas maksājumi par DR nodrošināšanu).

Izstrādātais uz Montekarlo imitācijām balstītais rīks 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.

Promocijas darbā ar rīku *DR Assess* veiktie gadījumizpētes piemēri fokusēti uz mājāsaimniecības 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.

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.

Promocijas darba izstrādes laikā tā autore piedalījies vairākos pētniecības projektos, cieši sadarbojoties ar citiem Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātes Enerģētikas institūta darbiniekiem. Autore izsaka pateicību sava darba vadītājam prof. Anta-

nam Sauhatam, kā arī institūta kolēģiem Kārlim Baltputnim, Jevgeņijam Kozadajevam, Ļubovai Petričenko un Diānai Žalostībai par sadarbību un palīdzību šo pētījumu veikšanā.

Turpmākie pētījumi

Pašlaik visaktīvākā pētniecība norit valsts pētījumu programmas (VPP) “Enerģētika” projektos, kā arī starptautiskās izpētes un inovāciju programmas “Apvārsnis 2020” projektos. Konkrēti jāizceļ VPP projekts “Latvijas energosistēmas attīstība un integrācija Eiropā (*FutureProof*)”, kura ietvaros arī tika pabeigta šajā rakstā ieskicētās disertācijas izstrāde. Šobrīd projektā norit turpmākie energosistēmas darbības un tirgus modelēšanas pētījumi, analizējot Latvijas energosistēmas attīstības scenārijus līdz pat 2050. gadam. Savukārt starptautiskajā projektā *SunHorizon* notiek gatavošanās dažādu inovatīvu individuālas energoapgādes tehnoloģiju pilotēšanai Latvijas apstākļos.

Izmantotā literatūra

- Vairāk informācijas par pētījumu var rast promocijas darba pilnajā kopsavilkumā un pilnajā tekstā (<https://ortus.rtu.lv/science/lv/publications/31252>), kā arī zinātniskajās publikācijās.
- 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.
- 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.
- 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.
- Petričenko, Ļ., 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.
- 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.
- 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.
- Broka, Z., Baltputnis, K., 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. **E&P**

Zane Broka

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