



Veronika Siliņeviča

**Elektroenerģijas pieprasījuma reakcijas
mehānisma attīstības veicināšana
ar atjaunīgo energoresursu integrāciju
un patērētāju iesaisti Latvijā**

Promocijas darba kopsavilkums zinātniskā doktora grāda
“zinātnes doktors (*Ph.D.*)” iegūšanai

Nozare – ekonomika un uzņēmējdarbība
Apakšnozare – reģionālā ekonomika

Rīga, 2022



RĪGAS STRADIŅA
UNIVERSITĀTE

Veronika Siliņeviča

ORCID 0000-0002-9395-764X

Elektroenerģijas pieprasījuma reakcijas
mehānisma attīstības veicināšana
ar atjaunīgo energoresursu integrāciju
un patērētāju iesaisti Latvijā

Promocijas darba kopsavilkums zinātniskā doktora grāda
“zinātnes doktors (*Ph.D.*)” iegūšanai

Nozare – ekonomika un uzņēmējdarbība

Apakšnozare – reģionālā ekonomika

Rīga, 2022

Promocijas darbs izstrādāts Baltijas Starptautiskajā akadēmijā, Latvijā

Promocijas darba vadītāja:

Dr. oec. profesore **Inna Stecenko**,
Transporta un sakaru institūts, Latvija

Zinātniskā konsultante:

Ph.D. **Kristīna Mahareva**,
Transporta un sakaru institūts, Latvija

Oficiālie recenzenti:

Dr. oec. docente **Anželika Berķe-Berga**,
Rīgas Stradiņa universitāte, Latvija

Dr. oec. profesore **Maija Šenfelde**,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Dr. oec. profesore **Ewa Latoszek**,
Varšavas ekonomikas skola (SGH), Polija

Promocijas darbs tiks aizstāvēts Ekonomikas un uzņēmējdarbības promocijas padomes atklātā sēdē 2022. gada 7. jūlijā plkst. 11.00 attālināti, tiešsaistes platformā *Zoom*.

Ar promocijas darbu var iepazīties RSU bibliotēkā un RSU tīmekļa vietnē:
<https://www.rsu.lv/promocijas-darbi>

Promocijas padomes sekretāre:

Dr.oec. docente **Anželika Berķe-Berga**

Saturs

Ievads	4
1. Elektroenerģijas pieprasījuma vadība atjaunīgo energoresursu integrācijas kontekstā: teorētiskais ietvars	16
1.1. Pieprasījuma reakcijas koncepcijas veidošanās	16
1.2. Elektroenerģijas PR optimizācijas modeļu analīze reģionālā agregatora ieviešanai	17
2. Pieprasījuma reakcijas ekonomiskā un institucionālā vide elektroenerģijas tirgū	21
2.1. Elektroenerģijas tirgus liberalizācijas process	21
2.2. <i>Nord Pool</i> elektroenerģijas sektora reģionālā un ekonomiskā struktūra	24
3. Latvijas elektroenerģijas nozares rādītāju tendenču analīze un elektroenerģijas vairumtirdzniecības cenas ietekmējošo faktoru analīze	29
3.1. Fizikālo parametru un cenu reālā laika mainīgo lielumu attiecības analīzes metodoloģija, kas piemērojama pieprasījuma reakcijas mehānismam Latvijas elektroenerģijas nozarē	29
3.2. Eksporta, importa un elektroenerģijas patēriņa rādītāju raksturojums un tendences Latvijā. Vēja enerģijas patēriņa raksturojums un tendences uz reģionālo pieprasījuma reakcijas agregatoru	39
4. Elektroenerģijas patēriņā regulēšanas modeļa izstrāde Latvijā, pamatojoties uz reģionālo pieprasījuma reakcijas agregatoru	55
4.1. Enerģijas lietotāju loma elektroenerģijas tirgū un to informētība Latvijā	56
4.2. Elektroenerģijas patēriņa regulēšanas divpakāpju optimizācijas metodikas modeļa izstrāde, izmantojot pieprasījuma reakcijas mehānismu	57
Nobeigums	72
Publikācijas un ziņojumi par promocijas darba tēmu	80
Izmantotā literatūra un avoti	82

Ievads

Pētījuma tēmas aktualitāte

Pamatojot promocijas darba zinātniskā doktora grāda iegūšanai aktualitāti, svarīgi izcelt pārmaiņu raksturu sabiedrībā. Ilgtspējīga attīstība un Ilgtspējīgas attīstības mērķi¹ nepārprotami ir kļuvusi par vienu no šādām pārmaiņām. Evolūcijas process kopš pirmās industriālās revolūcijas līdz pašreizējai ceturtajai industriālajai revolūcijai ir strauji palielinājis iedzīvotāju skaitu un attīstījis ražošanu. Cilvēki ir plaši izmantojuši dabas bagātības, un pakāpeniski ir pieaudzis vidē izmesto atkritumu un vidi piesārņojošo vielu apjoms. Globālo dzīvības uzturēšanas sistēmu saglabāšana ir kļuvusi arvien grūtāka un sarežģītāka straujo un nepārtraukto cilvēka izraisīto vides pārmaiņu dēļ.

Termins “ilgtspējīga attīstība” minēts 2001. gada Eiropas Savienības ilgtspējīgas attīstības stratēģijā, kas ir pirmais ES politikas dokuments, kurā sīki izklāstīti veidi, kā ES efektīvi izmantot resursus ilgtspējības nodrošināšanai, un tajā ir aicināts prasmīgāk saskaņot konkurējošās ekonomiskās, vides un sociālās jomas ilgtspējības politiku (mūsdienās konkurējošās pozīcijas aizvien noteiktāk pāriet sabalansētības pozīcijās, ko dēvē par bioekonomiku). Pirmā Vides rīcības programma gan tika pieņemta jau 1973. gadā kā ES vides politikas īstenošanas dokuments, kurā netieši tika definēta arī vides ilgtspēja. Pēdējo piecu desmitgažu laikā ES vides politika un tiesību akti ir ievērojami attīstījušies, vides politikas īstenošanai pakāpeniski kļūstot par vienu no galvenajām ES darbības jomām. Turklāt, ņemot vērā pašreizējo ģeopolitisko saspīlējumu saistībā ar Krievijas iebrukumu Ukrainā, Eiropas Komisija ierosināja dokumentu “REPowerEU:

¹ *Sustainable Development. United Nations.* <https://sdgs.un.org/goals> [Accessed: 12.08.2020.].

Kopīga Eiropas rīcība, lai panāktu pieejamāku, drošāku un ilgtspējīgāku enerģiju”²

Darba **aktualitāti** nosaka gan jauni komponenti sabiedrības un jauno tehnoloģiju attiecībās, gan jaunas būtiskas sistēmas elektroenerģijas nozarē. Tas rada nepieciešamību pēc jaunas izpratnes veidošanas par problēmas sarežģītību un daudzšķautņainību, kā arī par situācijā iesaistīto dalībnieku daudzveidību.

Elektroenerģijas tirgus noskaidrošanas galvenais princips ir sabiedrības labklājības maksimizācija. Elektroenerģijas racionāla patēriņa kontekstā, lai sabiedrība iegūtu maksimālu labumu, sociālā labklājība ir patērētāju pārpalikuma, piegādātāju pārpalikuma un pārslodzes rentes summa. Jau gadu desmitiem, diskutējot par elektroenerģijas nozares drošību, tiek uzsvērta piedāvājuma un pieprasījuma līdzsvara nozīme. Vienlaikus, pētot galvenokārt piedāvājuma potenciālu, pamatoti ir pieņemts, ka pieprasījums pēc elektroenerģijas ir neelastīgs. Tomēr, lai risinātu trīs galvenos Eiropas enerģētikas politikas uzdevumus – ilgtspējību, piegādes drošību un konkurētspēju –, vienlaikus garantējot enerģijas sadales taisnīgumu, pašreizējā izpratne par elektroenerģijas sistēmas piedāvājumu un pieprasījumu ir jāaktualizē.

Pēc elektroenerģijas tirgu liberalizācijas diskusijās uzmanība drošības jomā tiek pievērsta piedāvājuma pasākumiem. Papildus ražošanas jaudas palielināšanai būtu jāizmanto arī pieprasījums. Informācijas un komunikāciju tehnoloģiju (IKT), energoelektronikas, piemēram, viedo skaitītāju, un izklaidēto energoresursu arvien plašāka ieviešana apdraud elektroenerģijas nozares drošību, tāpēc ir nepieciešams pārvaldīts un uzraudzīts pārejas posms. Turklāt būtu jāpievēršas patērētāju lomas aktivizēšanai pārejas procesā.

² *REPowerEU: Joint European action for more affordable, secure and sustainable energy. European Commission.* https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_1511 [Accessed: 08.03.2022.].

Atvērtos elektroenerģijas tirgos pieprasījuma reakcijas izmantošana ir saistīta ar interešu konflikta risku starp dažādām pusēm. Autore vērš uzmanību uz vismaz trim dažādām dalībnieku grupām. Pirmkārt, kā minēts iepriekš, elektroenerģijas patērētājiem jau šobrīd ir samērā lielas iespējas ietekmēt savas patērētās enerģijas izmaksas, apzināti izvēloties elektroenerģijas mazumtirgotāju un tarifu plānu, veicot energoefektivitātes pasākumus un pat piedaloties dažādās pieprasījuma reakcijas programmās, lai gan ar nepamatoti lielām grūtībām. Otrkārt, pieprasījuma reakcijas mehānismu / agregatoru operatori var palielināt kopējo elektroenerģijas tirgus efektivitāti, cenšoties optimizēt savas metodes. Treškārt, politikas veidotājiem ir būtiska ietekme uz elektroenerģijas tirgus darbību un viņi var ietekmēt, kā tas iespaido elektroenerģijas galapatērētājus.

Šajā promocijas darbā izklāstītais pētījums tieši attiecas uz divām no minētajām dalībnieku grupām – pieprasījuma reakcijas mehānismiem / agregatoriem un politikas veidotājiem. Attiecībā uz pirmajiem ir ierosinātas metodes un algoritmi, lai optimizētu to līdzdalību elektroenerģijas aktuāltirgū. Attiecībā uz otrajiem tiek īstenots lēmumu pieņemšanas atbalsts novērtējuma un ieteikumu veidā saistībā ar jaunu uzņēmējdarbības modeļu – agregatora uzņēmējdarbībā – ietekmes realizāciju elektroenerģijas tirgū un attiecīgi tās atbalsta iespējām. Šo darbību kopīgā iezīme ir mērķis – sociālās labklājības maksimizācija, lai gan no dažādām perspektīvām. Kaut gan prosumeru kustība Latvijā ir agrīnā attīstības stadijā, tiek pievērsta uzmanība arī aktīvo elektroenerģijas patērētāju / prosumeru informēšanai.

Autore ir uzņēmusies uzdevumu izpētīt pieprasījuma reakcijas problēmu atjaunīgo energoresursu integrācijai un patērētāju iesaistei. Kā problēma tā Latvijā vēl nav risināta ne teorētiski, ne praktiski, kas uzsver izvēlētās tēmas aktualitāti. Problēmas risināšanas sarežģītība slēpjas ne tikai pieredzes trūkumā šajā jautājumā Latvijā, bet arī faktā, ka tā ir saistīta ar sociālās labklājības maksimizāciju.

Elektroenerģijas cena ietekmē gandrīz visus valsts ekonomikas aspektus, sākot no iekšzemes kopprodukta līdz pat individuālās mājsaimniecības dzīves līmenim. Enerģija ir būtisks elements gandrīz visu preču un pakalpojumu ražošanā, tāpēc enerģijas cenas ietekmē vispārējo cenu līmeni valstī kopumā. Spējot ātri sabalansēt pieprasījumu un piedāvājumu, pieprasījuma reakcijas pārvaldība var arī samazināt elektroenerģijas vairumtirdzniecības cenas, kas pēc tam rada arī zemākas mazumtirdzniecības cenas.

Izmantojot šajā darbā reģionālo ekonomiku kā galveno zinātniskās pētniecības nozari, autore piedāvā pieprasījuma reakcijas problēmas risinājumu atjaunīgo energoresursu integrācijai un patērētāju iesaistei, un ekonometrisko metožu izmantošana ļauj paplašināt reģionālās ekonomikas kā lietišķās ekonomikas daļas būtību. Turklāt šis aspekts uzsver starpdisciplināro saikni ar citām ekonomikas nozarēm.

Pieprasījuma reakcijas mehānisma attīstības problēma un īpatnības Latvijā no šāda skatpunkta Latvijas zinātnieku publikācijās līdz šim nav aplūkotas, kas apliecina pētījuma aktualitāti.

Pētījuma tēmas zinātniskās izstrādes pakāpe

Latvijā ir attīstīti visaptveroši pētījumi par enerģētikas nozares īpatnībām. To rezultāti ir izmantoti, izstrādājot Latvijas Nacionālo enerģētikas un klimata plānu (NEKP) 2021–2030 (viens no galvenajiem enerģētikas plānošanas dokumentiem Latvijā). Tā ilgtermiņa mērķis ir klimatneitrāla ekonomika, uzlabojot energoapgādes drošību un sabiedrības labklājību ilgtspējīgā, konkurētspējīgā, rentablā un uz tirgus principiem balstītā veidā. Šo dokumentu izstrādē lielu ieguldījumu snieguši šādi pētnieki: A. Blumberga, G. Bažbauers, D. Blumberga, D. Jauzems, D. Slišāne, V. Priedniece un citi.

Liels skaits zinātnieku sniedzis ieguldījumu, pētījumos izzinot un novērtējot pieprasījuma reakcijas (PR) ekonomisko potenciālu, agregatoru lomu enerģētikas transformācijā saskaņā ar jaunāko Eiropas normatīvo regulējumu; Latvijas mājsaimniecību potenciālās līdzdalības iespējas enerģijas tirgū kā prosumeram. Starp tiem ir šādi zinātnieki: A. Sauhats, M. Balodis, R. Varfolomejeva, N. Sokolovs, H. Kobans, K. Baltputnis, Z. Broka, M. Rubins, I. Pilvere, O. Linkevics, R. Petričenko, L. Sadoviča, G. Junghāns, A. Krūmiņš, A. Tamane, E. Dzelzītis, D. Lauka, A. Barisa, P. Šipkovs, K. Ļebedeva, L. Mīgla, G. Kaškarova un citi.

R. Moura, M. C. Brito aplūko patērētāju agregēšanas koncepcijas, bet neiekļauj jaunākos Eiropas normatīvos regulējumus, piemēram, Tīras enerģijas visiem eiropiešiem pakotni (*Clean Energy for all Europeans Package – CEEP*), tomēr viņi iepazīstina ar dažiem PR uzņēmējdarbības modeļu piemēriem transporta nozarē. *Okur et al.*, *Lu et al.*, *Stede et al.*, *Burger et al.* savos pētījumos piedāvā plašu aktuālās literatūras par agregatoru stratēģijām klasifikāciju, tomēr novērtētās stratēģijas nav tieši saistītas ar dažādiem iespējamiem agregatoru modeļiem, trūkst agregatoru uzņēmējdarbības modeļu taksonomijas.

Autores izvirzītā hipotēze

Elektroenerģijas pieprasījuma reakcijas mehānisma stratēģiju izstrāde atjaunīgo energoresursu integrācijai un patērētāju iesaistei Latvijā var balstīties uz reģionālā pieprasījuma reakcijas agregatora – informācijas un tehnoloģiju uzņēmuma – piemērošanu Latvijas elektroenerģijas nozarē.

Pētījuma objekts

Pieprasījuma reakcijas mehānisms enerģētikas nozarē.

Pētījuma subjekts

Elektroenerģijas pieprasījuma reakcijas pakalpojumu attīstība Latvijā, izmantojot pieprasījuma reakcijas agregatora – informācijas un tehnoloģiju uzņēmuma – tehnoloģiju Latvijas elektroenerģijas nozarē.

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir izstrādāt elektroenerģijas pieprasījuma reakcijas konceptuālo ietvaru atjaunīgo energoresursu integrācijai un patērētāju iesaistei, balstoties uz pieprasījuma reakcijas agregatora – informācijas un tehnoloģiju uzņēmuma – tehnoloģiju, Latvijas elektroenerģijas sektorā. Lai sasniegtu izvirzīto mērķi, bija nepieciešams atrisināt šādus uzdevumus:

1. Balstoties uz zinātniskās literatūras analīzi un sintēzi, salīdzināt definīcijas un pieejas, kas saistītas ar elektroenerģijas pieprasījuma pārvaldību, un sniegt teorētisko ietvaru pieprasījuma reakcijas definēšanai elektroenerģijas tirgū, kā arī izpētīt pieprasījuma reakcijas ekonomiskās un institucionālās vides ietekmi elektroenerģijas tirgū un atjaunīgo resursu integrāciju.
2. Analizēt pieprasījuma reakcijas uz pieprasījumu elektroenerģijas tirgū institucionālos un ekonomiskos aspektus, atjaunīgo energoresursu integrācijas procesu problemātiku un pašreizējo situāciju enerģijas tirgū, patērētāju lomu un jaunās iespējas.
3. Izstrādāt PR reģionālās agregatora koncepcijas ieviešanas modeli, kas ļaus risināt elektroenerģijas patēriņa samazināšanas problēmu un aktīvo patērētāju izvēles iespēju atslēgt elektroenerģiju uz kārtējo stundu, ja elektroenerģijas daudzums nav pietiekams, pat ņemot vērā tās patēriņa samazinājumu.

4. Noteikt enerģētikas nozares fizisko rādītāju, atjaunīgās enerģijas un elektroenerģijas sistēmas cenu tendences, noteikt aptuvenās formulu atkarības un determinācijas koeficientus.
5. Izstrādāt metodoloģiju visaptverošai elektroenerģijas nozares fizisko un sistēmas cenu rādītāju korelācijas un regresijas atkarību analīzei, pamatojoties uz atbilstošo klasisko matemātisko modeļu pielāgošanu.
6. Izpētīt patērētāju uzvedību, kas balstīta uz pieprasījuma reakciju, veicot kvantitatīvos pētījumus.
7. Izveidot jaunu progresīvu divpakāpju piedāvājuma un pieprasījuma bilances optimizācijas modeli, kura pirmajā posmā tiek piedāvāts risināt elektroenerģijas patēriņa samazināšanas problēmu, bet otrajā posmā – risināt optimizācijas problēmu uz laiku atslēgtu lietotāju grupu noteikšanai, reaģējot uz elektroenerģijas tirgus cenām.
8. Izstrādāt un, pamatojoties uz gadījumu izpēti, apstiprināt optimizētā modeļa metodi.

Promocijas darba pētījuma metodes

Promocijas darba pētījuma metodes, pētījuma metodoloģija, balstīta uz sistēmisko un dialektisko analīzi. Dažādos pētījuma posmos un atkarībā no uzdevumu rakstura tiek izmantotas atšķirīgas pētījuma metodes.

Pētījuma analīzes metode: zinātniskajās publikācijās un citos akadēmiskajos avotos sniegto dažādu teoriju teorētisko aspektu salīdzinošā analīze; literatūras par izvēlēto pētījuma tēmu kontentanalīze (lietota 1. nodaļā).

Statistiskā pētījuma metode: statistiskās un ekonometriskās analīzes metodes, kas izmantotas, lai novērtētu absolūto un relatīvo rādītāju dinamiku, noteiktu to sakarības, formulētu vienādojumus un noteiktu rādītāju tendences attiecīgajā novērojuma periodā (lietotas 2. nodaļā).

Novērošanas pētījuma metode: pētījums, kura pamatā ir aptauja, kas tiek veikta, izmantojot autores izstrādāto instrumentu – anketu potenciālo patērētāju aptaujāšanai (lietota 3. nodaļā).

Modelēšanas pētniecības metode: operāciju teorijas pētīšanas metode, lai formulētu un atrisinātu elektroenerģijas piedāvājuma un pieprasījuma līdzsvara kombinatoriskās optimizācijas problēmu (lietota 3. nodaļā).

Katra posma īstenošanas rezultātā tiek iegūti starpposma pētījuma rezultāti (datu apkopojumi, datu tabulas un attēli, informācijas apkopojumi, analīze, novērtējumi u. c.), kas veido pamatu nākamā pētījuma posma uzsākšanai un attīstīšanai. Tas nozīmē – katra nākamā pētījuma īstenošanas fāze balstās uz iepriekšējā pētījuma fāzes starprezultātiem.

Pētījuma ierobežojumi

Šajā darbā galvenā uzmanība pievērsta elektroenerģijas nākamās dienas tirgum *Nord Pool* reģionā, un izmantotie fizikālie parametri ir specifiski šim reģionam. Tādējādi ir nepieciešami daži pielāgojumi, lai šajā darbā iegūtos rezultātus piemērotu citiem tirgiem un jomām. Elektroenerģijas pieprasījumu un piedāvājumu un līdz ar to arī sistēmas elektroenerģijas cenas Latvijā nosaka dažādi faktori, piemēram, kurināmā struktūra, pārrobežu starpsavienojumi, tirgu savstarpējā savienošana, atjaunīgie energoresursi, tirgus piegādātāju koncentrācija, laika apstākļi u. c. Tomēr šajā darbā uzmanība pievērsta tikai dažiem no tiem, tehniskie aspekti ir aplūkoti daļēji. Tie neapšaubāmi ir svarīgi aspekti šajā pētījumā, jo elektroenerģijas tirgus attīstās tikai tad, ja tas ir tehniski iespējams. Bet disertācijā netiek piedāvāti detalizēti tehniski risinājumi pieprasījuma reakcijas mehānisma integrācijas nākotnes scenārijiem, jo šī disertācija vairāk koncentrējas uz to, kā pieprasījuma reakcijas mehānismu varētu īstenot kā DR reģionālo agregatoru. Ekonomiskie dati par 2020. un

2021. gadu netika analizēti, ņemot vērā to ierobežoto pieejamību un Covid-19 pandēmijas ietekmi.

Zinātniskās pētniecības rezultāti

Svarīgākie zinātniskie rezultāti, ko autore ieguvusi promocijas darba pētījumos.

1. Pamatojoties uz ģenēzi elektroenerģijas patēriņa pieprasījuma vadības jomā, tiek ierosināti, sistematizēti un pamatoti zinātniskās izpētes posmi par šo tēmu. Pētījuma rezultāti pierāda, ka ar elektroenerģētiku saistīto zinātnisko pētījumu attīstību ietekmē gan ārējie faktori, piemēram, ekonomiskās krīzes, informācijas tehnoloģiju izplatība, gan iekšējie faktori, piemēram, enerģijas tirgus attīstība un liberalizācija, izklaidēto un atjaunīgo energoresursu tehnoloģiju attīstība un liberalizācija, jaunu tehnoloģisko tendenču rašanās u. c.
2. Ir noteiktas enerģētikas nozares makroekonomisko un fizikālo rādītāju, atjaunīgo energoresursu un elektroenerģijas sistēmas cenu tendences, noteiktas aptuvenās formulu atkarības un determinācijas koeficienti.
3. Izstrādāta metodoloģija elektroenerģijas nozares fizisko un sistēmas cenu rādītāju korelācijas un regresijas atkarību visaptverošai analīzei, kas balstīta uz atbilstošo klasisko matemātisko modeļu adaptāciju; tiek papildināta literatūra par valsts atbalsta ietekmi uz elektroenerģijas tirgu.
4. Atbilstoši hipotēzei ir izvirzīts, izstrādāts un pamatots jauns piedāvājuma un pieprasījuma bilances divlīmeņu optimizācijas tehnikas modelis, kura pirmajā posmā tiek piedāvāts risināt elektroenerģijas patēriņa samazināšanas problēmu un otrajā

posmā – optimizācijas problēmu, kādas aktīvo patērētāju grupas slodzes būtu jānovirza, ja elektroenerģijas daudzums ir nepietiekams, tādējādi reaģējot uz elektroenerģijas tirgus cenām.

Promocijas darba praktiskā vērtība

Autores iegūtie zinātniskie rezultāti ir nozīmīgi praktiskai izmantošanai, izstrādājot valsts ilgtermiņa stratēģijas un plānus enerģētikas nozarē, akcentējot atjaunīgo energoresursu ieviešanu un elektroenerģijas galalietotāju aktīvu iesaisti. Autores izstrādātās metodes var palīdzēt uzņēmējiem efektīvi īstenot biznesa projektus ne tikai enerģētikas nozarē Latvijā un citās Eiropas Savienības valstīs.

Pētījuma laika un reģionālais ietvars

Rādītāju tendenču, aptuveno formulu atkarību un noteikšanas koeficientu aprēķins attiecīgajām diagrammām un grafikiem balstīts uz lielā apjoma datiem, kas iegūti no Latvijas pārvades sistēmas operatora AS “Augstsprieguma tīkls”, Latvijas Centrālās statistikas pārvaldes, Eiropas elektroenerģijas pārvades sistēmu operatoru tīkla (*ENTSO-E*) un elektroenerģijas biržas *Nord Pool*. Empīriskajā pētījumā izmantotie dati ir iegūti no ik stundu datiem laika posmā 2014. gada 1. janvāris – 2019. gada 31. decembris, kā arī daļēji ir izmantoti 2020. gada dati.

Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes

Aizstāvēšanai ir izvirzītas trīs galvenās tēzes.

1. Elektroenerģijas patēriņa pieprasījuma vadības zinātnisko pētījumu attīstību ietekmē gan ārējie faktori saistībā ar elektroenerģētiku, piemēram, ekonomiskās krīzes, informācijas tehnoloģiju izplatība, gan iekšējie faktori, piemēram, enerģijas tirgu attīstība, izkļedēto un

atjaunīgo energoresursu tehnoloģiju attīstība, jaunu tehnoloģisko tendenču rašanās, elektroenerģijas patērētāju un prosumeru aktivizēšanās.

2. Pieprasījuma reakcijas – agregatora pakalpojumu sniegšana jābalsta uz autora izstrādāto pētījumu metodoloģiju elektroenerģijas nozares fizisko un cenu rādītāju korelācijas un regresijas atkarību visaptverošo analīzi, pamatojoties uz atbilstošu klasisko matemātisko modeļu adaptāciju.
3. Potenciālā uzņēmuma “Reģionālais agregators” attīstība jābalsta uz autora izstrādāto un lietoto divlīmeņu piedāvājuma un pieprasījuma bilances optimizācijas metodi.

Darba struktūra

Darba struktūru nosaka pētījuma mērķis, uzdevumi un loģika. Promocijas darbs ietver anotāciju, ievadu, trīs nodaļas, secinājumus un literatūras avotus.

Ievadā ir uzsvērtā promocijas darba pētījuma tēmas aktualitāte. Tiek formulēta hipotēze, noteikti pētījuma mērķis un uzdevumi, tā priekšmets un objekts, zinātniskā novitāte un praktiskā nozīme, kā arī sniegts literatūras apskats, izpētītie avoti un izmantotās zinātniskās metodes.

Pirmajā un otrajā nodaļā autore analizē institucionālos, ekonomiskos un metodoloģiskos pamatus un to īpatnības pieprasījuma reakcijā enerģētikas sektorā, elektroenerģijas cenu faktorus, elektroenerģijas galalietotāju jauno lomu un pieprasījuma reakcijas optimizēšanas iespējas.

Trešajā nodaļā autore argumentēti analizē enerģētikas nozares makroekonomisko un fizisko rādītāju, atjaunīgo energoresursu un elektroenerģijas sistēmas cenu tendences, aprēķina aptuvenās atkarību formulas un determinācijas koeficientus; ir izstrādāta metodoloģija elektroenerģijas nozares fizisko un sistēmas cenu rādītāju korelācijas un regresijas atkarību

visaptverošai analīzei, pamatojoties uz atbilstošu klasisko matemātisko modeļu adaptāciju, tiek papildināta literatūra par valsts atbalsta ietekmi uz elektroenerģijas tirgu.

Ceturtajā nodaļā autore izvirza, izstrādā un pamato jaunu divlīmeņu piedāvājuma un pieprasījuma bilances optimizācijas tehnikas modeli, kura pirmajā posmā tiek piedāvāts risināt elektroenerģijas patēriņa samazināšanas problēmu un otrajā posmā – risināt optimizācijas problēmu, kādas aktīvo patērētāju grupas slodzes atslēgt, ja elektroenerģijas daudzums ir nepietiekams, un tādējādi reaģēt uz elektroenerģijas tirgus cenām.

Nobeigumā ir formulēti secinājumi un priekšlikumi.

1. Elektroenerģijas pieprasījuma vadība atjaunīgo energoresursu integrācijas kontekstā: teorētiskais ietvars

Promocijas darba 1. nodaļa sastāv no 2 sadaļām, 24 lappusēm, 4 attēliem un 4 tabulām.

1.1. Pieprasījuma reakcijas koncepcijas veidošanās

No promocijas darba autores viedokļa, pasaules pētījumu attīstības cēloņsakarības pieprasījuma vadības jomā ir lietderīgi izdalīt sešus galvenos posmus, kur katrā tiek risinātas aktuālas sava laika zinātniskās problēmas un vienlaikus veidojas priekšnoteikumi nākamā perioda objektīviem uzdevumiem.

1. posms – pieprasījuma svārstīguma problēmas identificēšana, zināšanu par pieprasījuma svārstīguma vadības mehānismiem sistematizēšana (1971–1980);
2. posms – elektroenerģijas pieprasījuma pārvaldības īstenošanas sākums programmu veidā (1980–1994);
3. posms – elektroenerģijas pieprasījuma vadības programmu izstrāde un īstenošana dažādās pasaules valstīs (1994–2004);
4. posms – pieprasījuma vadības modeļu integrācija elektroenerģijas tirgu sistēmā (2004–2009);
5. posms – enerģijas pieprasījuma vadības tehnoloģiju integrācija viedo tīklu koncepcijā (2009–2014);
6. posms – izklaidētās enerģijas tehnoloģiju, atjaunīgās enerģijas, elektrisko transportlīdzekļu un lietu interneta ieviešana (2014. gads – tagad).

Analizējot un sistematizējot zinātnisko pētījumu ģenēzes posmus elektroenerģijas patēriņa pieprasījuma vadības jomā, var secināt, ka zinātnisko pētījumu attīstību ietekmē gan ārējie faktori saistībā ar elektroenerģētiku, piemēram, ekonomiskās krīzes, informācijas tehnoloģiju izplatība, gan iekšējie

faktori, piemēram, enerģijas tirgu attīstība, dalīto un atjaunīgo energoresursu tehnoloģiju attīstība, jaunu tehnoloģisko tendenču parādīšanās.

1.2. Elektroenerģijas PR optimizācijas modeļu analīze reģionālā agregatora ieviešanai

Ja patērētājs pats nolemj patērēt mazāk elektroenerģijas, kad tā ir dārgāka (piemēram, maksimumstundās), vai vairāk, kad tā ir lētāka (piemēram, naktī), tas kļūst par pieprasījuma reakciju, t. i., galapatērētāji (pieprasījuma puse) reaģē uz tirgus stimuliem. Pastāv divi priekšnosacījumi:

- patērētājam ar elektroenerģijas piegādātāju jābūt noslēgtam līgumam par dinamisku elektroenerģijas cenu;
- patērētājam jābūt uzstādītam viedajam elektroenerģijas skaitītājam.

Dinamiskā elektroenerģijas tarifa līgums ar elektroenerģijas piegādātāju nozīmē, ka patērētājs par elektroenerģiju maksā pēc reāllaika elektroenerģijas biržas tirgus tarifa. Pastāv risks, ka elektroenerģijas cenas būs ļoti svārstīgas, taču tas var kļūt patērētājam ļoti izdevīgs ilgākā zemo cenu periodā. Ņemot vērā iepriekš minēto, šajā pētījumā autore izpēta PR agregatora mērķus un ekonomiskos ieguvumus, lai noteiktu optimizācijas problēmas kritērijus.

Kā minēts promocijas darba 1.1. apakšnodaļā, pieprasījuma reakcijas (PR) aktivizēšana elektroenerģijas sistēmā var būt vai nu pārtraucama, vai balstīta uz cenu. Elektroenerģijas cenu noteikšana ir svarīga metode, ar kuras palīdzību var stimulēt galalietotāju pieprasījuma reakciju, vienlaikus saglabājot brīvprātīgu izvēli. Izmaksu sadales elementu vispārējais sastāvs liberalizētā elektroenerģijas tirgus modelī (kas galvenokārt dominē Eiropā) ir izvērtēts.

Pāreja, ko veicina viedo tīklu tehnoloģijas, nodrošina arvien lielāka atjaunīgo resursu pieprasījuma stohastisku piegādi, kā arī paredz, ka elektroenerģijas patērētājiem reāllaikā jāsaņem reprezentatīva informācija par elektroenerģijas cenām, izmantojot dinamisko cenu noteikšanu.

Latvijā ne visi elektroenerģijas patērētāji ir aprīkoti ar viedajiem elektroenerģijas skaitītājiem, kas ievaddaļā tika minēts kā priekšnoteikums pieprasījuma reakcijas pakalpojumu saņemšanai. Šobrīd Latvijā aptuveni 60 % no visiem elektroenerģijas skaitītājiem ir viedie skaitītāji, bet plānots, ka līdz 2022. gadam visiem elektroenerģijas skaitītājiem vajadzēja tikt nomainītiem uz viedajiem skaitītājiem, kas nav izpildīts.

PR mehānismu optimizācija ļauj iegūt labākos iespējamus mainīgos, lai maksimizētu vai minimizētu mērķa funkcijas vērtību, ja mainīgos nosaka virkne ierobežojumu.³

Optimizācijas problēmas var iedalīt kategorijās pēc vairākiem kritērijiem. Atkarībā no mērķa funkciju un ierobežojumu rakstura (pakāpes polinoma formā) pastāv lineārā un nelineārā optimizācija. Ja vismaz viena no mērķa funkcijām un / vai ierobežojumiem ir nelineāra, problēmu uzskata par nelineāru optimizāciju. Jaukta veselu skaitļu programmēšanas problēma rāda, vai daži no mainīgajiem ir veseli skaitļi. Turklāt, pamatojoties uz iesaistīto mainīgo (deterministisko vai stohastisko) raksturu, optimizācijas problēmas var iedalīt deterministiskās un stohastiskās programmēšanas problēmās; pēdējais gadījums apraksta optimizācijas modeļus, kas attiecas uz AER, jo atjaunīgie energoresursi ir stohastiski.⁴

³ Vardakas, J. S., Zorba, N. and C. V. Verikoukis. 2014. A Survey on Demand Response Programs in Smart Grids: Pricing Methods and Optimization Algorithms, *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. c, 1–1 [Access 29.11.2020.].

⁴ Ribó-Pérez, D.; Larrosa-López, L.; Pecondón-Tricas, D.; Alcázar-Ortega, M. A 2021. Critical Review of Demand Response Products as Resource for Ancillary Services: International Experience and Policy Recommendations. *Energies*, 14, 846. <https://doi.org/10.3390/en14040846> [Accessed 28.07.2019.].

**Piedāvātā optimizācijas klasifikācija salīdzinājumā
ar literatūrā apskatītajām metodēm**

Optimizācijas mērķis	Optimizācijas metode	Aktīvo patērētāju (AP) grupas	Aktīvo patērētāju tarifi
Maksimizēt enerģijas patēriņu, pamatojoties uz AP grupu izvēli	Kombinatoriskā optimizācija (lineārā integrālo skaitļu programmēšana)	AP grupu izvēle	Cenu noteikšana reālajā laikā (nākamā diena vai nākamā stunda)

Avots: izstrādājusi autore

Būtisks vērā ņemams faktors, izstrādājot matemātiskās optimizācijas modeļus, ir to vienkāršā ieviešana un īpatnības, ko rada piemērošana konkrētai sistēmai. Citiem vārdiem, lai matemātiskajam modelim būtu praktisks lietojums, tas jārealizē reālā programmatūras rīkā, ko var izvietot agregatora operatora darba stacijā un kas ļautu to izmantot. Tādējādi pirmajā posmā, pamatojoties uz prognozētajiem datiem par elektroenerģijas trūkumu nākamajā dienā, tiek piedāvāts risināt tās patēriņa samazināšanas problēmu. Otrajā posmā tiek optimizēta to aktīvo patērētāju izvēle, kurus izslēgt kārtējai stundai, ja elektroenerģijas daudzums nav pietiekams, pat ņemot vērā tās patēriņa samazinājumu. Izstrādātajai metodoloģijai (skat. 3. nodaļu) jābalstās uz atbilstošiem matemātiskiem modeļiem, kuriem katrā posmā jāformulē atbilstošas optimizācijas problēmas.

Secinājumi

1. Autore ir veikusi retrospektīvo analīzi par elektroenerģijas pieprasījuma reakcijas zinātnisko attīstību, izstrādājot elektroenerģijas PR programmu klasifikāciju. Uz veiktā pētījuma pamata autore ir analizējusi elektroenerģijas pieprasījuma reakcijas (PR) definīcijas un klasifikācijas, izstrādājusi elektroenerģijas PR

attīstības hronoloģiju – zinātnisko pētījumu ģenēzi. To posmu analīze un sistematizācija ļauj secināt, ka zinātnisko pētījumu attīstību ietekmē gan ārējie faktori saistībā ar elektroenerģētiku, piemēram, ekonomiskās krīzes, informācijas tehnoloģiju izplatība, gan iekšējie faktori, piemēram, enerģijas tirgu attīstība, dalīto un atjaunīgo enerģijas avotu tehnoloģiju attīstība, jaunu tehnoloģisko tendenču rašanās.

2. Atjaunīgo enerģijas avotu īpatnību dēļ nav iespējams kontrolēt vai pieprasīt jaudu, kad tā ir nepieciešama. PR metožu galvenie mērķi ir maksimālās slodzes samazināšana un iespēja kontrolēt patēriņu atkarībā no ražošanas. Parasti galalietotājiem ir ļoti maz praktisku zināšanu par iespējam bīt elastīgiem un tie nepārzina iespējam pieprasījuma / patēriņa modeļus un savu rīcību tajos. Tāpēc PR programmām atsaucas mazāk dalībnieku, nekā gaidīts.
3. Dažādu elektroenerģijas patēriņa pieprasījuma vadības instrumentu, kā arī pasaules valstīs funkcionējošo pieprasījuma vadības programmu analīze ļauj konstatēt šo instrumentu un programmu būtisku diferenciaciju un specifiku valstu kontekstā. Svarīgi uzsvērt, ka 1.1. tabulā norādītās pieprasījuma samazināšanas programmas nav savstarpēji aizvietošanas un visi šie mehānismi var tikt izmantoti kompleksi.
4. Promocijas darba autore piedāvā kombinatorisko optimizāciju reģionālā PR agregatora koncepcijas ieviešanai, kas ļaus risināt elektroenerģijas patēriņa samazināšanas problēmu un otrajā posmā optimizēt atslēdzamo aktīvo patērētāju izvēli kārtējai stundai, ja elektroenerģijas daudzums ir nepietiekams, pat ņemot vērā tās patēriņa samazinājumu.

2. Pieprasījuma reakcijas ekonomiskā un institucionālā vide elektroenerģijas tirgū

Promocijas darba 2. nodaļa sastāv no 2 sadaļām, 30 lappusēm, 12 attēliem un 1 tabulas.

Šajā darba daļā, lai sasniegtu izvirzīto mērķi, tiek analizēta PR agregatoru ieviešanas ekonomiskā un institucionālā vide, atjaunīgo energoresursu ietekme uz elektroenerģijas sistēmas cenu. Vispirms autore apskata elektroenerģijas cenas īpatnības *Nord Pool* biržā, pēc tam turpina aplūkot ekonomiskos un institucionālos rādītājus PR agregatora aktivizēšanai elektroenerģijas sistēmā.

2.1. Elektroenerģijas tirgus liberalizācijas process

Eiropas enerģijas tirgi kopš 90. gadu otrās puses ir liberalizēti. Pirmajos trijos enerģētikas tiesību aktu kopumos (1996–2009) galvenā uzmanība ir pievērsta iekšējā enerģijas tirgus izveidei: konkurences ieviešanai ražošanas un piegādes jomā, nediskriminējošas piekļuves nodrošināšanai sadales un pārvades tīkliem, pārrobežu tirdzniecības uzlabošanai un pārvaldības struktūras (piemēram, valsts un starptautisko regulatoru) izveidei. Mazo enerģijas patērētāju – mājsaimniecību un mazo un vidējo uzņēmumu – stāvoklim uzmanība pievērsta tikai daļēji. Iepriekšējos regulējumos patērētāji tiek uzskatīti par pasīviem dalībniekiem, kuriem nepieciešama aizsardzība, bet jaunākajos regulējumos – vairāk par aktīviem tirgus dalībniekiem.

Elektroenerģijas vairumtirdzniecība Latvijā notiek *Nord Pool* elektroenerģijas biržā, kur Latvijas tirdzniecības zona tika atvērta 2013. gada 3. jūnijā nākamās dienas elektroenerģijas tirgum (*Elspot*) un 2013. gada 10. decembrī – tās pašas dienas tirgum (*Elba*). Tā kā gandrīz visi elektroenerģijas tirdzniecības darījumi Latvijas apgabalā tiek veikti nākamās dienas tirgū, turpmākajā analīzē aplūkots tikai *Elspot* tirgus.

Tirdzniecības apjoma ziņā *Nord Pool* ir Eiropā lielākā elektroenerģijas birža, kas pašlaik darbojas Ziemeļvalstīs (Norvēģijā, Dānijā, Zviedrijā, Somijā), Baltijas valstīs (Igaunijā, Latvijā, Lietuvā, Igaunijā), kā arī Vācijā un Apvienotajā Karalistē. *Nord Pool* pieder Ziemeļvalstu pārvades sistēmu operatoriem *Statnett SF*, *Svenska kraftnät*, *Fingrid Oyj*, *Energinet.dk* un Baltijas pārvades sistēmu operatoriem *Elering*, *Litgrid* un AS “Augstsprieguma tīkls” (AST). Lielais dalībnieku skaits nodrošina augstu tirgus likviditāti un līdz ar to arī iespējami zemākas elektroenerģijas iegādes izmaksas biržā.

Elektroenerģijas tirgus cenu, kas pazīstama arī kā *Nord Pool* sistēmas cena, nosaka atbilstoši piedāvājuma un pieprasījuma līkņu krustpunktam, kas ir tirgus līdzsvara punkts.

Lai nodrošinātu sistēmas stabilitāti, pieprasījumam un piedāvājumam pastāvīgi jābūt līdzsvarotam. Elektroenerģijas pieprasījums ir neelastīgs arī īstermiņā, kā rezultātā rodas lielas svārstības un nestabilas cenas. Nākamās dienas tirgum šīs līknes tiek veidotas dienu iepriekš, apkopojot katrai stundai atsevišķi elektroenerģijas pārdošanas un pirkšanas piedāvājumus, ko biržas dalībnieki iesnieguši saskaņā ar paziņoto cenu un apjomu.

Lai efektīvāk izmantotu Eiropas enerģētikas potenciālu, ir jāiesaista visi enerģijas tirgus dalībnieki. Jebkura uzņēmējdarbības modeļa pamatā ir patērētājs. Patērētājs ir atskaites punkts, kas nosaka uzņēmējdarbības attīstības vektoru. Mūsdienās enerģētikas nozarē notiek pārmaiņas un patērētājs vairs nav tikai atskaites punkts, bet gan pats kļūst par vektoru.

Pašlaik Eiropā plaši tiek izmantota energosistēmas decentralizācija, iesaistot sistēmas darbībā aktīvus patērētājus, iedzīvotājus un vietējās iestādes. Aktīvie patērētāji tiek definēti kā elektroenerģijas patērētāji, kas paši izmanto, uzglabā vai pārdod elektroenerģiju vai piedalās pieprasījuma maiņas un energoefektivitātes shēmās.

Latvijas elektroenerģijas tirgus kopš 2015. gada ir liberalizēts, un mājsaimniecības, kā arī juridiskie lietotāji var brīvi izvēlēties tirgotāju, vienojoties par elektroenerģijas cenu. Kopš 2013. gada elektroenerģijas tirdzniecība notiek arī *Nord Pool* biržā. Pašlaik Latvijas elektroenerģijas tirgū darbojas 38 uzņēmumi. Latvijas elektroenerģijas tirgus, tāpat kā viss Baltijas enerģijas tirgus, šobrīd ir savienots ar kopējo Eiropas enerģijas tirgu, izmantojot divus kabeļus, kas savieno Igaunijas un Somijas elektroenerģijas sistēmas: *Estlink I* ar pārvades jaudu 350 MW un *Estlink II* ar pārvades jaudu 650 MW. Lietuva un Polija ir savienota ar *LitPol Link* starpsavienojumu, kura pārvades jauda ir 500 MW. To papildina arī Lietuvas un Zviedrijas starpsavienojums *NordBalt* ar 700 MW pārvades jaudu.

Jo liberālāks ir tirgus, jo acīmredzot tas vairāk reaģē uz pieprasījuma un piedāvājuma svārstībām. Cenšoties maksimāli liberalizēt Eiropas enerģijas tirgu, Eiropas tirgus lēmumu pieņēmēji plānoja to izmantot kā līdzekli, kas nodrošinātu arvien pieaugošu, plašāku un daudzveidīgāku piedāvājumu klāstu, spiestu samazināt cenas.

Saskaņā ar 2020. gada (02.04.2020.) Ministru kabineta rīkojumu, lai palielinātu energosistēmas stabilitāti un drošību, līdz 2022. gadam ir jāizstrādā agregatoru darbības tiesiskais pamats noteikt agregatora tiesības un pienākumus, maksājumus par tā sniegtajiem pakalpojumiem un attiecības starp agregatoru un citiem sistēmas un tirgus dalībniekiem. Tam jāpalielina sistēmas balansēšanas spēja un elastība.

Augstās elektroenerģijas gala cenas rada ievērojamu izmaksu slogu mājsaimniecībām un ražošanas uzņēmumiem, tādējādi ietekmējot arī valsts konkurētspēju. Elektroenerģijas cenas nosaka dažādi faktori, piemēram, kurināmā struktūra, pārrobežu starpsavienojumi, tirgu starpsavienojumi, atjaunīgā enerģija, tirgus piegādātāju koncentrācija, laikapstākļi utt. Pašreizējā elektroenerģijas tirgus struktūra daudzus gadus ir spējusi zināmā mērā nodrošināt

konkurētspēju un zemas cenas patērētājiem. Tomēr pieaugošā izpratne par klimata pārmaiņām un valstu un starptautisko nolīgumu izstrāde, kuru mērķis ir samazināt SEG emisijas, būtiski pārveido nozari, turklāt ne vienmēr uz labu.

Ievērojot Direktīvas 2012/27/ES prasības, 2020. gada sākumā Latvijas Ministru kabinets apstiprināja pirmos noteikumus par agregatoru darbību Latvijā, nosakot agregatora attiecības ar citiem elektroenerģijas sistēmas un tirgus dalībniekiem, regulējot agregatora tiesības un pienākumus, maksājumus par agregatora sniegtajiem pakalpojumiem. Noteikumi palielina elektroenerģijas patērētāju vai viņu izvēlētu trešo personu iespējas rīkoties ar informāciju par elektroenerģijas patēriņu, lai nodrošinātu mehānismu, ar kura palīdzību var ātri koriģēt patēriņu.

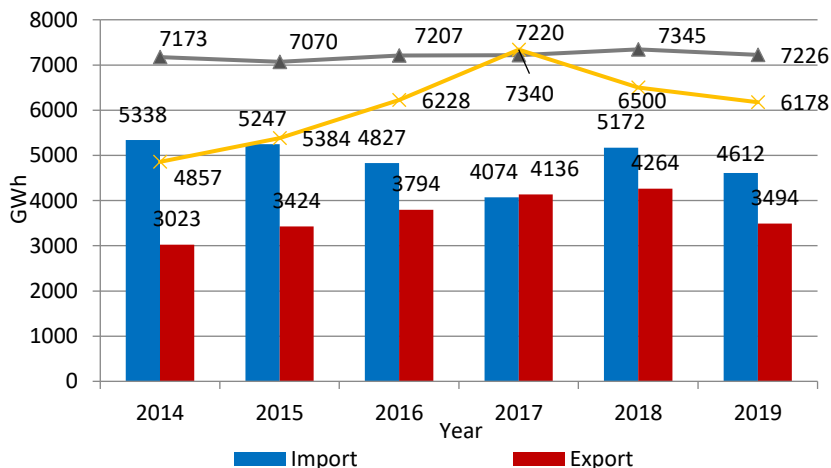
Lai detalizēti novērtētu, kādos apstākļos Latvijas tirdzniecības apgabalā veidojas īpaši augsta nākamās dienas tirgus cena, tika analizētas stundas cenas no 2016. līdz 2019. gadam (skat. 3. nodaļu). Izceltas stundas ar netipiski augstām cenām.

2.2. *Nord Pool* elektroenerģijas sektora reģionālā un ekonomiskā struktūra

Autore parāda nozares pamatrādītājus Latvijā pēdējo gadu laikā, balstoties uz statistikas datu analīzi. Iepriekšējos pētījumos un publikācijās autore jau pētījusi Latvijas enerģētikas nozares galvenos rādītājus, taču, autores skatījumā, ir vērtīgi veikt datu aktualizācijas novērošanu, jo tieši tā var redzēt aktuālākās izmaiņas, reaģēt uz tām un precīzāk prognozēt nākotni. Enerģētikas nozares vidējais devums valsts IKP nav īpaši mainījies un 2013.–2019. gadā ir 2,11 %. Latvija ir viena no tām valstīm, kas lielā mērā paļaujas uz citu valstu energoresursu importu, jo Latvija nespēj pilnībā nodrošināt nepieciešamo elektroenerģijas patēriņu.

Energoresursu ražošana un patēriņš ir nozīmīgs faktors pasaules ekonomikā. Enerģētikas nozari stimulē globālais enerģijas piedāvājums un pieprasījums. Latvija pieder pie tām valstīm, kuras ir lielā mērā atkarīgas no importētajiem energoresursiem, jo nespēj pilnībā nodrošināt nepieciešamo elektroenerģijas patēriņu. Tika noteikti elektroenerģijas importa, eksporta un patēriņa apjomi Latvijā laika posmam no 2014. līdz 2019. gadam.

Dati par Latvijas kopējo elektroenerģijas pieprasījumu, neto elektroenerģijas ražošanu, importu un eksportu laika posmā no 2014. līdz 2019. gadam ir parādīti 2.1. attēlā.



2.1. attēls. Latvijas elektroenerģijas imports, eksports, patēriņš un neto saražotā elektroenerģija 2014–2019, GWh

Avots: autore izstrādāts, izmantojot⁵

⁵ Centrālās statistikas pārvalde. *Elektroenerģijas imports, eksports* [atsauce 05.01.2021.]. Pieejams: <https://www.csb.gov.lv/lv/statistika/statistikas-temas/vide-energetika/energetika/tabulas/en010m/elektroenerģijas-razosana-imports-eksports>; Nord Pool. *Historical Market Data. Consumption*. Pieejams: <https://www.nordpoolgroup.com/historical-market-data/> [atsauce 05.01.2021.].

Situācija ar vēja elektrostaciju jaudu ir atšķirīga ne tikai Baltijas valstu kopapjomā, bet arī katras valsts apjomā. Vēja elektrostaciju uzstādītā jauda 2001. gadā bija tikai 2 MW, bet nākamajos divos gados tā ievērojami palielinājās līdz 24 MW. Vēl viens lēciens, kad uzstādītā jauda strauji palielinājās līdz 62 MW, bija 2012. gadā. To var izskaidrot ar vairāku vēja elektrostaciju ekspluatācijas perioda sākumu, piemēram, 20,07 MW uzstādītās jaudas ražotājs Ltd. *Winergy*.

Latvijas kopējā uzstādītā vēja turbīnu jauda 2019. gadā bija aptuveni 68 MW. Turpretī Igaunijā 2019. gadā uzstādītā jauda bija 310 MW, kas ir 4,5 reizes lielāka nekā Latvijā. Tomēr Lietuva ir absolūts līderis starp Baltijas valstīm ar 548 MW uzstādīto jaudu. Saskaņā ar “Nacionālo enerģētikas un klimata plānu 2021–2030. gadam”, ko sagatavojusi LR Ekonomikas ministrija, Latvija plāno celt AER īpatsvaru elektroenerģijas ražošanā, palielinot vēja ģeneratoru un saules fotoelementu uzstādīto jaudu, jo Latvijas elektroenerģijas pārvades tīkla jauda šobrīd ļauj palielināt tīklā nodotās elektroenerģijas apjomu par 800 MW.

Baltijas valstis nav izmantojušas visu potenciālu, kas apvienojumā ar ES mērķi līdz 2050. gadam panākt oglekļa neitralitāti, investīcijām, atbalsta shēmām un izsolēm viedu stratēģiju un īstenošanu var novest pie strauja atjaunīgo energoresursu, īpaši vēja un saules enerģijas jaudu, pieauguma. Saskaņā ar Latvijas Nacionālo enerģētikas un klimata plānu 2021–2030 Latvijas elektroenerģijas pārvades sistēma spēj uzņemt līdz 800 MW papildu jaudu no jaunām atjaunīgās enerģijas elektrostacijām, kas ir aptuveni trešdaļa no visām šobrīd Latvijā iegūstamajām elektriskajām jaudām.

Secinājumi

1. Darba autore analizējusi elektroenerģijas pieprasījuma reakcijas (PR) definīcijas un klasifikācijas, ko piedāvā dažādas starptautiskās organizācijas un dokumenti – ANO, EK, EP, LR likumi un MK noteikumi u. c.
2. Jo liberalizētāks ir tirgus, jo vairāk tas reaģē uz pieprasījuma un piedāvājuma svārstībām. Cenšoties maksimāli liberalizēt Eiropas enerģijas tirgu, Eiropas tirgus lēmumu pieņēmēji ir plānojuši to izmantot kā līdzekli, kas nodrošinātu arvien pieaugošu un daudzveidīgu piedāvājumu klāstu un sekmētu cenu samazināšanos.
3. Baltijas valstis nav izmantojušas visu potenciālu, kas kombinācijā ar ES mērķi līdz 2050. gadam panākt oglekļa neitralitāti, investīcijām, atbalsta shēmām un izsolēm viedo stratēģiju īstenošanu var novest pie straujas atjaunīgo energoresursu palielināšanas, jo īpaši vēja un saules jaudas izmantošanas. Saskaņā ar Latvijas Nacionālo enerģētikas un klimata plānu 2021–2030 Latvijas elektroenerģijas pārvades sistēma spēj uzņemt līdz 800 MW papildu jaudu no jaunām atjaunīgās enerģijas elektrostacijām, kas ir aptuveni trešdaļa visu šobrīd Latvijā uzstādīto elektrisko jaudu.
4. Kā minēts iepriekš, korelācija ar elektroenerģijas vairumtirdzniecības cenu *Nord Pool* Latvijas tirdzniecības apgabalā ar saražoto vēja enerģiju tiek uzskatīta par vāju. Tomēr stundās ar visaugstākajām cenām situācija varētu būt ievērojami atšķirīga.

Lai novērtētu patēriņa pārmaiņu ietekmi uz nākamās dienas elektroenerģijas cenu, autore 3. nodaļā analizē sakarības starp fundamentālajiem faktoriem un elektroenerģijas cenām Latvijā, atjaunīgo resursu, piemēram, hidroelektrostaciju un vēja enerģijas, pieejamībai vajadzētu statistiski nozīmīgi ietekmēt nākamās dienas cenas Latvijā, jo hidroelektrostaciju un vēja staciju īstermiņa marginālās izmaksas ir niecīgas.

3. Latvijas elektroenerģijas nozares rādītāju tendenču analīze un elektroenerģijas vairumtirdzniecības cenas ietekmējošo faktoru analīze

Promocijas darba 3. nodaļa sastāv no 2 sadaļām, 33 lappusēm, 8 attēliem un 23 tabulām.

3.1. Fizikālo parametru un cenu reālā laika mainīgo lielumu attiecības analīzes metodoloģija, kas piemērojama pieprasījuma reakcijas mehānismam Latvijas elektroenerģijas nozarē

Šīs analīzes mērķis ir noskaidrot, vai pastāv sakarība starp elektroenerģijas cenu un vēja ģenerācijas un Latvijas enerģētikas sektora fizikālajiem rādītājiem un, ja šāda sakarība pastāv, vai šis fakts ietekmē pieprasījuma perspektīvu un pētāmās tēmas aktualitāti. Šī uzdevuma veikšanai autore ir izvēlējusies kvantitatīvo pētījumu rezultātu analīzi.

Šajā nodaļā autore piedāvā metodoloģiju korelācijas un regresijas atkarību kompleksai analīzei starp elektroenerģijas cenu un vēja enerģijas ražošanu Latvijas elektroenerģijas tirgū, kas balstīta uz atbilstošu klasisko matemātisko modeļu adaptāciju. Metodoloģijas pamatā ir korelācijas un regresijas klasisko modeļu analīzes pielāgošana nozares statistikas rādītāju analīzei par elektroenerģijas ražošanu un importu laika posmā no 2014. līdz 2019. gadam (skat. 1. nodaļu), vidējo elektroenerģijas patēriņu stundā un vienas MWh vēja enerģijas cenu 2019. gadā, kā arī līdzīgiem rādītājiem par patēriņa maksimumstundām no plkst. 8.00 līdz 12.00. Tā kā elektroenerģijas cenu nosaka pieprasījums un piedāvājums un tādējādi tā ir endogēni noteikta tirgū, kā mainīgais lielums, kas aizstāj elektroenerģijas cenu, tiek izmantota gaidāmā vēja ģenerācija stundā. Statistiskie rādītāji ir papildināti ar detalizētu informāciju par elektroenerģijas patēriņu un vēja ģenerācijas vienības cenu vidēji dienā un

maksimumstundās (no plkst. 8.00 līdz 12.00 CET / GTM+2) katru mēnesi 2019. gadā.

Autore pamato arī vēja enerģijas rādītāju sinusoidālās atkarības no gada mēneša kā pamatmodeļa izmantošanu korelācijas pētījumā. Pierādīts, ja pētāmo datu maksimālajām un minimālajām novirzēm nav vienādas vidējās novirzes no vispārējā vidējā līmeņa, tad nepieciešams ieviest papildu pavadošos mainīgos, kas identificē šīs novirzes, kā rezultātā tiek izveidots attiecīgs modificēts modelis. Ir noteiktas ikmēneša vēja enerģijas datu regresijas atkarības. Ir sniegti arī aprēķinātie dati par iegūto modeļu validāciju. Aprēķini ir veikti, izmantojot algoritmisko valodu *MathCAD*. Izstrādātie modeļi tiek ieteikti kā analītisks rīks reālā laika rādītāju izpratnei un novērtēšanai, lai izprastu un novērtētu elektroenerģijas agregatora pieprasījuma reakcijas mehānisma biznesa modeli.

Viens no galvenajiem nodaļas uzdevumiem ir metodoloģijas izstrāde elektroenerģijas nozares fizisko un cenu rādītāju korelācijas un regresijas atkarību visaptverošai analīzei, pamatojoties uz atbilstošu klasisko matemātisko modeļu adaptāciju. Autore uzskata, ka piedāvātie adaptētie modeļi var tikt izmantoti PR mehānisma īpatnību un Latvijas reģionālā agregatora attīstības procesa izpratnē.

Bāzes regresijas modelis – klasiskais analīzes modelis

Kopumā regresija ļauj aproksimēt matemātisku sakarību starp diviem vai vairākiem mainīgajiem, ja ir zināmas to vērtības vairākos punktos. Analīzes vajadzībām apstrādātos statistikas datus parasti attēlo 3.1. tabulā redzamajā veidā, kur $V1$ un $V2$ ir savstarpēji saistīti rādītāji, kas attiecas uz vienu un to pašu pētījuma objektu un aprēķināti pieaugošos laika intervālos (i). Attiecībā uz elektroenerģijas nozari $V1$ ir fiziskie rādītāji, kas izteikti MWh, bet $V2$ ir cenu rādītāji EUR / MWh.

**Vispārīgs statistikas datu izklāsts elektroenerģijas nozares dabisko
un cenu rādītāju kompleksai analīzei**

Vektors indikatora / sērijas numurs	1	2	i	n
$V1$	$V1_1$	$V1_2$	$V1_i$	$V1_n$
$V2$	$V2_1$	$V2_2$	$V2_i$	$V2_n$

Avots: autores izstrādāts, balstoties uz⁶

Turpmākajās formulās lietotie statistikas dati ir attēloti attiecīgo matricu T_j veidā. Vidējo vērtību, dispersiju un standartnovirzi datiem, ko atspoguļo matricas T_j vektors V (V iegūst vērtību $V1$ vai $V2$), aprēķina, izmantojot parastos vienādojumus.⁷

$$E(V) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (3.1.)$$

$$D(V) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - E(V))^2 \quad (3.2.)$$

$$\sigma(V) = \sqrt{D(V)} \quad (3.3.)$$

Divu mainīgo kovariāciju, kas parādīta 3.1. tabulā, aprēķina pēc vienādojuma⁸:

$$cov(V1, V2) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V1_i V2_i - E(V1)E(V2) \quad (3.4.)$$

⁶ Seber, G. A. F. 1977. Linear regression analysis. John Wiley and Sons, New York – London – Sydney – Toronto.

⁷ Afifi, A. A., Azen S. P. 1979. *Statistical Analysis. A Computer Oriented Approach*. Academic Press, New York – San Francisco – London.

⁸ Adams, A., Bloomfield, D., Booth, Ph., England, P. 1993. *Investment Mathematic and Statistics*. Graham @ Trotman, London – Dordrecht – London.

Korelācijas koeficientu var noteikt šādi:

$$\text{corr}(V1, V2) = \frac{\text{cov}(V1, V2)}{\sigma(V1)\sigma(V2)} \quad (3.5.)$$

Vispārējais polinoma regresijas modelis⁹ paredz nejaušā mainīgā Y_i atkarību no faktoru (saistīto mainīgo, regresoru) $x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,k}$ vērtībām i -tajā novērojumā:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \dots + \beta_k x_{i,k} + Z_i, i = 1, \dots, n \quad (3.6.)$$

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ – regresijas koeficients

Z_i – nejaušs komponents ar nulles vidējo vērtību un galīgo standartnovirzi

n – novērojumu skaits

Regresijas uzdevums ir novērtēt koeficientus $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$, pamatojoties uz n novērojumiem, i -tajā novērojumā saistīto mainīgo $x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,k}$ vērtības un nejaušā mainīgā Y_i vērtība ir fiksēta.

Regresijas koeficientu $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ aplēses tiek sniegtas vektora matricas formā. Šajā sakarā aplūko šādus vektorus un matricas:

$Y = (Y_1, \dots, Y_n)^T$ – atkarīgo mainīgo kolonnu vektors (T nozīmē matricas transponēšanu);

$X = (x_{i,j})$ – saistīto mainīgo lieluma $n \times (k+1)$ matrica, kuras rindas atbilst novērojumiem, bet kolonnas – regresijas koeficientam;

$\beta = (\beta_0, \dots, \beta_k)^T$ – kolonnas vektors.

⁹ Seber, G. A. F. 1977. *Linear regression analysis*. John Wiley and Sons, New York – London – Sydney – Toronto, 3.

Regresijas koeficientu klasisko aplēsi aprēķina pēc vienādojuma ¹⁰:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (3.7.)$$

kur $(X^T X)^{-1}$ nozīmē matricu, kas ir inversā matricai $X^T X$.

Šajā gadījumā nejaušā mainīgā lieluma Y_i vērtējums ir šāds:

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{i,1} + \dots + \hat{\beta}_k x_{i,k}, i = 1, \dots, n \quad (3.8.)$$

Klasisko matemātisko modeļu pielāgošana elektroenerģijas nozares dabisko un cenu rādītāju korelācijas un regresijas atkarību analīzei

Vispirms ir izstrādāti matemātiskie modeļi elektroenerģijas nozares dabisko un cenu rādītāju analīzei saistībā ar statistikas datu apstrādi, kas sniegti tabulās ar konkrētiem dabiskajiem un cenu rādītājiem:

- elektroenerģijas ražošana un imports laika periodā no 2014. līdz 2019. gadam;
- vidējais elektroenerģijas patēriņš stundā un vienas MWh vēja enerģijas cena 2019. gadā;
- līdzīgi rādītāji par patēriņa maksimumstundām no plkst. 8.00 līdz 12.00 CET / GTM+2.

Mainīgo lielumu izvēles motivācija ir šāda. Kā minēts 1. nodaļā, PR programmu īstenošanas rezultātā var novirzīt maksimālo pieprasījumu, uzlabot sistēmas uzticamību, samazināt pārvades sastrēgumus un augsti sadārdzinātos enerģijas rēķinus, novirzot vai pārregulējot patēriņa modeļus. Tā var arī mazināt neregulāras atjaunīgās enerģijas ražošanas ietekmi, jo ieviesto atjaunīgās

¹⁰ Seber, G. A. F. 1977. *Linear regression analysis*. John Wiley and Sons, New York – London – Sydney – Toronto, 4.

enerģijas avotu jauda būs optimāli minimāla, un patērētājus var arī mudināt pašiem uzsākt atjaunīgās enerģijas ražošanu un pārdot pašu saražoto enerģijas pārpalikumu tīklam.

Aprēķinu pamatā ir dati, kas iegūti no Latvijas pārvades sistēmas operatora “Augstsprieguma tīkls”, Latvijas Centrālās statistikas pārvaldes un elektroenerģijas biržas *Nord Pool*. Empīriskajā pētījumā izmantotie dati ir iegūti no stundu datiem laikposmā 2014. gada 1. janvāris – 2019. gada 31. decembris. Visi aprēķini šeit un turpmāk veikti, izmantojot programmēšanas valodu *MathCAD*.

Aprēķinātie vēja enerģijas vidējie diennakts un maksimumstundu rādītāji ir attiecīgi 157 un 147,6 MWh; 45,3 un 55,5 EUR / MWh, atbilstoši 3.2. un 3.3. tabulai. Rādītāji nenozīmīgi atšķiras apjoma ziņā (6 %) un būtiski – cenas ziņā (18 %), turklāt maksimumstundās vidējais vēja enerģijas patēriņš ir mazāks, bet vidējā stundas cena ir augstāka.

Nākamajā posmā autore izstrādā regresijas modeli, kas apraksta 3.2. un 3.3. tabulas rādītāju atkarību no mēneša numura i . Novērojumu skaits ir mēnešu skaits, t. i., $n = 12$.

Saisītītie mainīgie jāizvēlas tā, lai iesniegto datu izlīdzināšana būtu pieņemama. Izlīdzināšanas kritērijs ir deviāciju kvadrātu summa:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (3.9.)$$

Sākotnēji bija paredzēts izmantot vispārēju polinoma regresijas modeli. (2.8. formula)¹¹:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 i^2 + \beta_1 i + \dots + \beta_k i^k + Z_i, i = 1, \dots, 12$$

¹¹ Afifi, A. A., Azen, S. P. 1979. *Statistical Analysis. A Computer Oriented Approach*. Academic Press, New York – San Francisco – London.

Tomēr rezultāti bija pilnīgi neapmierinoši. Tas ir izskaidrots monogrāfijā¹²: “Ir labi zināms, ka matrica $X^T X$ ir diezgan slikti noteikta.” Turpinot autors norāda: “Viens no veidiem, kā samazināt matricas $X^T X$ sliktās nosacītības ietekmi, ir izmantot Čebiševa polinomus...” Šī iespēja tika pārbaudīta, bet rezultāts atkal bija neapmierinošs. Turpmākajai izpētei autore pieņēma rādītāja sinusoīdas atkarību no mēneša skaitļa:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \sin\left(\frac{i-c}{6}\pi\right) + Z_i, i = 1, \dots, 12 \quad (3.10.)$$

kur c – zināms skaitlis ar iespējamām vērtībām no 0 līdz 11.

Šajā gadījumā pastāv viens saistītais mainīgais lielums $x_{i,1} = \sin\left(\frac{i-c}{6}\pi\right)$. Statistiku nosaka ar vektoru $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_{12})$, un izlīdzināšanas kritērijs ir šāds:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_{j=1}^{12} \left(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \sin\left(\frac{j-c}{6}\pi\right) - Y_i\right)^2 \quad (3.11.)$$

Tas ļauj iegūt vienkāršus novērtēšanas vienādojumus:

$$\beta_0 = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} Y_j \quad (3.12.)$$

$$\beta_1 = \left(\sum_{i=1}^{12} \sin\left(\frac{i-c}{6}\pi\right) (Y_i - \beta_0) \right) * \frac{1}{\sum_{i=1}^{12} \left(\sin\left(\frac{i-c}{6}\pi\right)\right)^2}$$

¹² Adams, A., Bloomfield, D., Booth, Ph., England, P. 1993. *Investment Mathematic and Statistics*. Graham @ Trotman, London – Dordrecht – London, 209.

Pēdējā formula izriet no tā, ka atvasinājums uz β_1 no R dod šādu sakarību:

$$\beta_0 \sum_{i=1}^{12} \sin\left(\frac{i-c}{6}\pi\right) + \beta_1 \sum_{i=1}^{12} \left(\sin\left(\frac{i-c}{6}\pi\right)\right)^2 - \sum_{i=1}^{12} Y_i \sin\left(\frac{i-c}{6}\pi\right) = 0$$

Jāuzsver, ka konstante c ir izvēlēta tā, lai kritērijs R būtu minimāls. Iegūto aplēšu piemērošana parāda, ka atsevišķas novirzes pārkāpj izlīdzināšanu. Novērtējumus var uzlabot, ieviešot papildu saistīto mainīgo $+1$ gadījumiem ar visaugstākajām vērtībām un -1 gadījumiem ar viszemākajām vērtībām.¹³ Saskaņā ar 3.2. un 3.3. tabulu visaugstākās vidējās stundas vēja ģenerētās jaudas un vidējās stundas maksimālās vēja ģenerētās jaudas vērtības ir februārī, martā un decembrī, bet viszemākās vērtības – jūnijā un augustā. Ja izmanto Būla mainīgos

$$x_{i,2} = \begin{cases} -1, & \text{ja } i = 6 \text{ or } 8, \\ 1, & \text{ja } i = 2, 3 \text{ or } 12, \\ 0, & \text{citādi,} \end{cases} \quad (3.13.)$$

kur i – mēneša numurs, tad pārveidoto regresijas modeli var uzrakstīt šādi:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \sin\left(\frac{i-c}{6}\pi\right) + \beta_2 x_{i,2} + Z_i, i = 1, \dots, 12 \quad (3.14.)$$

Modelī (3.14.) pieņemts, ka maksimālajām un minimālajām svārstībām ir vienādas vidējās novirzes no kopējās vidējās vērtības. Ja tā nav, jāievieš papildu saistītie mainīgie, lai noteiktu maksimālo un minimālo novirzi:

$$x_{i,2} = \begin{cases} -1, & \text{if } i = 6 \text{ or } 8, \\ 0, & \text{citādi,} \end{cases} \quad (3.15.)$$

¹³ Adams, A., Bloomfield, D., Booth, Ph., England, P. 1993. *Investment Mathematic and Statistics*. Graham @ Trotman, London – Dordrecht – London.

$$x_{i,3} = \begin{cases} 1, & \text{if } i = 2, 3 \text{ or } 12, \\ 0, & \text{citādi.} \end{cases} \quad (3.16.)$$

Regresijas modelis tagad izskatīsies šādi:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \sin\left(\frac{i-c}{6}\pi\right) + \beta_2 x_{i,2} + \beta_3 x_{i,3} + Z_i, i = 1, \dots, 12 \quad (3.17.)$$

Tālāk autore apsvēra regresijas modeli, kas aproksimē abas tabulas, 3.2. un 3.3. tabulu, vienlaikus. Lai to izdarītu, autore ieviesa papildu saistīto mainīgo, kas identificē aplūkojamo tabulu, un aplēses veiktas visiem 3.2. un 3.3. tabulas datiem. Tas ilustrēts, izmantojot pēdējā modeļa (3.17.) piemēru. Šeit tiek pievienots saistītais mainīgais $x_{i,4}$:

$$x_{i,4} = \begin{cases} 1, & \text{ja novērojums attiecas uz 2.1. tabulu,} \\ 0, & \text{citādi.} \end{cases} \quad (3.18.)$$

Rezultātā iegūts šāds modelis:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \sin\left(\frac{i-c}{6}\pi\right) + \beta_2 x_{i,2} + \beta_3 x_{i,3} + \beta_4 x_{i,4} + Z_i, i = 1, \dots, 12 \quad (3.19.)$$

3.2. tabula

**Faktiskie un izlīdzinātie ikmēneša dati modelim (3.17.)
un 3.2. tabulas rādītājiem**

i	Y_i	\hat{Y}_i	Y_2	\hat{Y}_2
1	171	159,36	56	49,01
2	219	219,90	47	42,00
3	222	212,64	40	41,22
4	141	139,54	44	46,94
5	135	137,60	44	46,36
6	89	67,22	45	41,61

3.2. tabulas turpinājums

i	Y_1	\hat{Y}_1	Y_2	\hat{Y}_2
7	122	144,85	49	46,36
8	58	79,78	39	42,39
9	161	159,36	49	47,71
10	159	164,67	47	48,49
11	183	166,6	45	49,06
12	224	232,46	39	42,78

3.3. tabula

**Faktiskie un izlīdzinātie ikmēneša dati modelim (3.17.)
un 3.3. tabulas rādītājiem**

i	Y_1	\hat{Y}_1	Y_2	\hat{Y}_2
1	174	167,10	64	56,77
2	211	218,00	50	45,00
3	230	203,51	43	45,63
4	118	127,51	52	58,49
5	123	116,91	57	58,95
6	76	54,26	66	63,31
7	96	116,90	61	58,95
8	47	68,74	60	62,68
9	149	142,00	67	57,86
10	153	156,49	56	57,23
11	181	167,10	48	56,77
12	213	232,45	42	44,37

Kā redzams no tabulām, izstrādātais regresijas modelis diezgan precīzi raksturo datus. R-kvadrāts ir daudz tuvāks vienībai, kas nozīmē, ka modelis ir kvalitatīvs. Turklāt reziduālās autokorelācijas trūkums norāda uz prognozes kvalitāti.

Salīdzinot abus modeļus (3.14.) un (3.17.) to praktiskai izmantošanai, var sniegt šādus ieteikumus. Ja vadās no formālā kritērija – noviržu kvadrātu summas (3.9.) –, tad priekšroka jādod modelim (3.17.). Tomēr ekspertu analīze liecina, ka modeļa (2.14.) sniegtie rezultāti ir loģiski pamatotāki. Šajā sakarā praktiskai izmantošanai ieteicams izmantot modeli (3.14.).

Šādi rezultāti var būt vērtīgs ieguldījums analīzei par kompensācijas nepieciešamību starp agregatoriem un bilances atbildīgajām pusēm vai pamats turpmākai analīzei politikas veidotājiem, apsverot valsts atbalsta nepieciešamību, lai paātrinātu pakalpojuma ieviešanu.

3.2. Eksporta, importa un elektroenerģijas patēriņa rādītāju raksturojums un tendences Latvijā. Vēja enerģijas patēriņa raksturojums un tendences

Kā minēts iepriekš, enerģijas tirgos ar augstu atjaunīgo energoresursu izplatības līmeni ir lielāka iespēja saskarties ar cenu svārstībām vai nepastāvību, kas daļēji skaidrojams ar atjaunīgo energoresursu stohastisko raksturu. Latvijas elektroenerģijas tirgus ir lielisks šāda tirgus piemērs, jo vairāk nekā 40 % Latvijas elektroenerģijas ražošanas pamatā ir hidroenerģija, kas izaicina Latvijas elektroenerģijas tirgus *spot* cenu prognozi.

Šajā promocijas darba daļā autore identificē kopējā eksporta, importa, kopējā valūtas apgrozījuma un elektroenerģijas patēriņa tendences Latvijā, kā arī detalizēti pēta atjaunīgo energoresursu elektroenerģijas patēriņa rādītājus un tendences 2014.–2019. gadā. Papildus tiek aplūkoti vēja elektroenerģijas izmantošanas rādītāji gan kopumā par novērojamo periodu, gan ik mēnesi par 2019. gadu. Pētījuma rezultāti apstiprina Latvijas plānu īstenošanas pamatotību, lai palielinātu gan kopējo elektroenerģijas patēriņu, gan atjaunīgo energoresursu īpatsvaru tajā. Vienlaikus koronavīrusa pandēmija jau ir sākusi radīt negatīvas sekas elektroenerģijas patēriņam citās ES valstīs, bet Latviju līdz šim tas skāris

mazāk. Tomēr šīs sekas neizbēgami liks koriģēt Latvijas elektroenerģijas plānus, lai palielinātu elektroenerģijas ražošanā un patēriņā atjaunīgo energoresursu, tostarp vēja enerģijas, īpatsvaru, neskatoties uz tās cenu pieauguma tendenci. Autore, izmantojot *Excel Trendline* rīkus, iegūst rādītāju tendences, aptuveno formulu atkarības un determinācijas koeficientus attiecīgajām diagrammām un grafikiem.

Pētījuma motivācija

Latvijas enerģētikas nozares attīstības tendences, rādītāji un perspektīvas saistībā ar klimata pārmaiņām nākamajā desmitgadē atspoguļotas Latvijas Nacionālajā enerģētikas un klimata plānā 2021.–2030. gadam.

Autore izvirzījusi uzdevumu analizēt aplūkojamo rādītāju dinamiku un tendences posmā no 2015. līdz 2019. gadam – periodā, kas noslēdzas, no vienas puses, ar Eiropas Savienības stratēģisko lēmumu pieņemšanu cīņā pret kaitīgo izmešu nonākšanu atmosfērā un globālo pāreju uz elektroenerģijas ražošanu, izmantojot atjaunīgos energoresursus, un, no otras puses, ar koronavīrusa pandēmijas uzliesmojumu.

Elektroenerģijas ražošanas apjoma palielināšanās no atjaunīgiem avotiem var notikt, tikai pateicoties vēja enerģētikai, jo Daugavas HES kaskādes hidroelektrostaciju ražošanas iespējas ir ierobežotas tās konstrukcijas īpatnību dēļ. Iegūtie rezultāti kalpo par pamatu turpmāk analizēto rādītāju tendenču noteikšanai un atbilstošu praktisko ieteikumu izstrādei.

Rādītāju tendenču, aptuveno formulu atkarību un noteikšanas koeficientu aprēķini attiecīgajām diagrammām un grafikiem balstīti uz datiem, kas iegūti no Latvijas pārvades sistēmas operatora “Augstsprieguma tīkls”, Latvijas Centrālās statistikas pārvaldes un elektroenerģijas biržas *Nord Pool*. Empīriskajā pētījumā izmantotie dati ir iegūti no stundu datiem laikposmā 2014. gada 1. janvāris – 2019. gada 31. decembris.

Rādītāju izmaiņu tendences, sakarību aproksimējošas formulas un determinācijas koeficientus attiecīgajām diagrammām un grafikiem autore ieguvusi, izmantojot tendenču līkņu izveides rīku programmā *Excel*. Tendences atspoguļo statistikas vai aprēķināto rādītāju pieauguma vai krituma dinamiku un var tikt izmantotas šo rādītāju prognozēšanai (kvantitatīvajai, bet ne kvalitatīvajai) neilgam laikposmam, parasti vienam gadam. Aproksimācijas sakarības, kas ļauj kvalitatīvi novērtēt tendenču virzību, tiek ņemtas tikai no lineārās regresijas vienādojumiem, kas novērojumiem $X_i Y_i$ izskatās šādi:

$$Y = bX + a \quad (3.20.)$$

kur koeficienti a un b – novērtējums pēc mazāko kvadrātu metodes.

Lineārās regresijas modelim ar vienu parametru X determinācijas koeficients, kas apzīmēts ar R^2 , ir vienāds ar parastā korelācijas koeficienta starp novērtējamiem un novērojamiem lielumiem X un Y kvadrātu¹⁴. Novērtējot regresijas modeļus, koeficienta R^2 vērtība tiek interpretēta kā modeļa atbilstība attēlotajiem datiem. Šī rādītāja vērtība var būt robežās no 0 līdz 1. Ja sakarības nav, rādītājs ir vienāds ar 0, bet, ja tā ir, – ar 1. Jo tuvāk R^2 vērtība ir 1, jo spēcīgāka ir sakarība.

Vairumā diagrammu ar vienu vai diviem rādītājiem formulas un vērtības R^2 tiek attēlotas grafiski. Ja diagrammās ir atspoguļoti vairāk nekā divi rādītāji vai ir nepieciešami papildu paskaidrojumi un precizējumi, tendenču sakarību formulas ir iekļautas atbilstīgās tabulās. Tendенču izvēlēs pamatojums, izņemot determinācijas koeficientu izmantošanu, darbā nav izklāstīts, jo svarīgākais

¹⁴ Abdey, J. 2018. *Data Analysis for Management Programme*, Module 6 Unit 1, London School of Economics and Political Science, UK, 8–16.

uzdevums ir identificēt tendenču virzību. Aplūkojamo rādītāju aproksimācijas un prognozēšanas modeļu izvēles padziļinātāka pamatošana nav šī darba uzdevums un prasa atsevišķu pētījumu.

Ekstrapolācijas metode, izmantojot aproksimējošās sakarības, kas iegūtas ar tendenču līkņu izveides rīka palīdzību programmā *Excel*, tiek lietota katram gadam, lai izveidotu novērtējošu prognozi kārtējam gadam, veicot iepriekšējā gada rādītāja korekciju. Ekstrapolācijas tendenču datu salīdzinājums ar aktuālā gada faktiskajiem datiem apliecina šādas pieejas pamatotību, jo vairumā gadījumu atšķirības nepārsniedz 5 %. Atsevišķās diagrammās ir veikta tajās atspoguļoto datu ekstrapolācija 2020. gadam. Tālāka prognozēšana, kas pārsniedz vienu gadu, ir atsevišķs uzdevums, kāds šajā promocijas darbā nav izvirzīts.

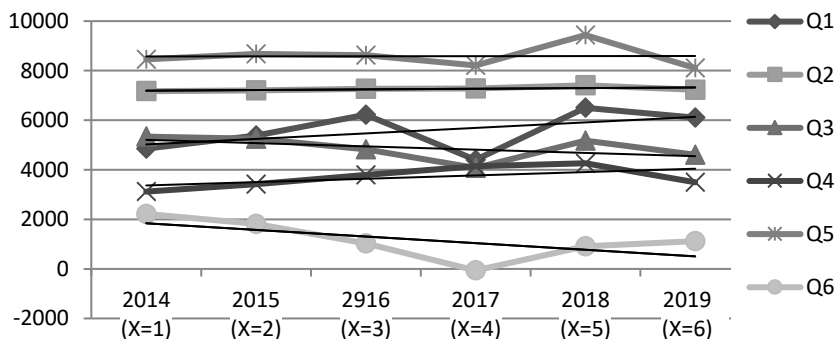
Vidējā diennakts elektroenerģijas ražošana un patēriņš Latvijā ir atkarīgs no daudziem faktoriem, tāpēc Latvija veic gan elektroenerģijas importu, gan eksportu, pērkot un pārdodot to *Nord Pool* elektroenerģijas biržā. Latvija elektroenerģiju importē galvenokārt naktīs un brīvdienās, kad tirgū tā ir lētāka, kas ļauj šajā laikā samazināt ūdens patēriņu Daugavas HES kaskādes ūdenskrātuvēs un uzkrātās rezerves izmantot ražošanai maksimumstundās. Elektroenerģijas tirdzniecība starp Baltijas valstīm un citām Eiropas valstīm pēdējo četru gadu laikā ir dubultojusies.

Elektroenerģijas statistisko rādītāju dinamika Latvijā MWh laika posmā no 2014. līdz 2019. gadam ir atspoguļota 3.4. tabulā un 3.1. attēlā. Ieviesti šādi vidējo stundu apjomu (MWh) apzīmējumi: ražošana ($Q1$), patēriņš ($Q2$), imports ($Q3$), eksports ($Q4$), kopējais maiņas apgrozījums ($Q5$) (imports + eksports: $Q5 = Q2 + Q3$) un importa pārsniegums pār eksportu ($Q6$) ($Q6 = Q3 - Q4$).

**Elektroenerģijas ražošanas, imports, eksports
un patēriņš Latvijā 2014.–2019. gadā**

Indikators MWh / (Gads)	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Kopējā neto saražotā elektroenerģija (Q1)	4857	5384	6228	4401	6500	6108
Piegādes iekšējam tirgum, patēriņš (Q2)	7172	7201	7263	7278	7408	7226
Imports (Q3)	5338	5247	4827	4074	5172	4612
Eksports (Q4)	3119	3424	3794	4136	4264	3494
Imports + eksports kopā (Q5)	8457	8671	8621	8210	9436	8106
Imports – eksports (Q6)	2219	1823	1033	(62)	908	1118

Avots: autore izstrādāts, pamatojoties uz Latvijas Centrālās statistikas pārvaldes datiem¹⁵



**3.1. attēls. Elektroenerģijas ražošanas, importa, eksporta un patēriņa
dinamika Latvijā 2014.–2019. gadā**

Avots: autore izstrādāts, pamatojoties uz Latvijas Centrālās statistikas pārvaldes datiem

¹⁵ Centrālās statistikas pārvalde. *Elektroenerģijas imports, eksports* [atsauce 05.01.2021.]. Pieejams: <https://www.csb.gov.lv/lv/statistika/statistikas-temas/vide-energetika/energetika/tabulas/en010m/elektroenerģijas-razosana-imports-eksports>; Nord Pool. *Historical Market Data. Consumption*. Pieejams: <https://www.nordpoolgroup.com/historical-market-data/> [atsauce 05.01.2021.].

Dati 3.4. tabulā un 3.1. attēlā liecina, ka, samazinoties Daugavas HES kaskādē saražotās elektroenerģijas apjomam, kas saistīts ar ūdens līmeņa kritumu ūdenskrātuvē, palielinās Latvijas elektroenerģijas imports. Attiecīgi elektroenerģijas eksports ievērojami palielinās, palielinoties saražotās elektroenerģijas daudzumam Daugavas HES kaskādē, palielinoties ūdens pieplūdumam ūdenskrātuvē. Novērotajā periodā tikai 2017. gadā eksporta apjoms $Q_4 = 4136$ MWh nedaudz pārsniedza elektroenerģijas importa apjomu $Q_3 = 4074$ MWh.

3.5. tabulā parādītas vidējo stundas rādītāju Q_i , tendenču līknes Q_{ti} minimālās, vidējās un maksimālās vērtības, kā arī koeficientu R^2 un R vērtības. No 3.4. tabulas un 3.1. attēla izriet, ka gada elektroenerģijas patēriņš Latvijā praktiski nemainās un ir vidēji 7258 MWh, 2017. gadā sasniedzot maksimālo vērtību 7408 MWh un 2019. gadā samazinoties līdz 7226 MWh.

3.5. tabula

Minimālās, vidējās un maksimālās izlases rādītāju Q_i vērtības un to Q_{ti} tendences vienādojumi

Indikators	Q_i min	Q_i max	Q_i vid	Tendences līkne	R^2	R
Kopējā neto saražotā elektroenerģija (Q_1)	4401	6500	5580	$Q_{t1} = 222,17X + 4802,1,1$	0,2471	0,5
Piegādes iekšējam tirgum, patēriņš (Q_2)	7172	7408	7258	$Q_{t2} = 25,886X + 7167,4$	0,339	0,58
Imports (Q_3)	4074	5338	4878	$Q_{t3} = -131,66X + 5339,1$	0,2629	0,51
Eksports (Q_4)	3119	4264	3705	$Q_{t4} = 0,135,34X + 3231,5$	0,3294	0,57
Imports + eksports kopā (Q_5)	8106	9436	8584	$Q_{t5} = 3,6857X + 8570,6$	0,0002	0,014
Imports – eksports (Q_6)	(62)	2219	1173	$Q_{t6} = -267X + 2107,7$	0,398	0,63

Avots: autore izstrādāts

Jāuzsver, ka šo rādītāju statistikas datu un lineāro tendenču vienādojumu sakarība (saskaņā ar Čedoka skalu), ko izsaka ar koeficientiem R^2 , ir no vājas ($Qt1$, $Qt3$) līdz mērenai ($Qt2$, $Qt4$, $Qt6$). Šos vienādojumus var izmantot attiecīgo rādītāju īstermiņa “aproximācijai” nākamajam gadam, bet ne precīzai novērtēšanai, jo regresijas modeļiem ar koeficientiem $R^2 < 1$ ir maza praktiskā vērtība. Elektroenerģijas ražošanas ($Qt1$), patēriņa ($Qt2$) un eksporta ($Qt4$) tendences ir augšupejošas. Elektroenerģijas importa ($Qt3$) un importa pārsnieguma pār eksportu ($Qt6$) tendencēm ir lejupvērst raksturs, kas liecina par lēnas, bet sarūkošas Latvijas atkarības dinamikas no elektroenerģijas importa. Elektroenerģijas biržas apgrozījuma ($Qt5$) tendencei ir neitrāls raksturs ar praktiski nulles koeficientu R^2 , un attiecīgo vienādojumu nevar izmantot īstermiņa “aptuvenai” šā rādītāja prognozei.

Pētījumā¹⁶ tiek norādīts, ka Baltijas valstis ir tehniski spējīgas nodrošināt nepieciešamo elektroenerģiju, taču komerciālu apsvērumu dēļ bieži vien ir izdevīgāk to importēt, jo oglekļa dioksīda emisijas kvotu iegāde ir dārga un Rīgā nav pietiekamas siltuma slodzes, lai lielās dabasgāzes elektrostacijas varētu darboties ekonomiski izdevīgā koģenerācijas režīmā.

Autore apskata HES un VES saražotās elektroenerģijas kopējā īpatsvara izmaiņu dinamiku no kopējā saražotās elektroenerģijas apjoma 2014.–2019. gadā Latvijā. 3.6. tabulā sniegti dati par Latvijā saražotās elektroenerģijas īpatsvaru (%) (bez pašpatēriņa un zudumiem) no atjaunīgajiem energoresursiem, kas ir HES un VES, kurus autore aprēķinājusi, izmantojot AS “Augstsprieguma tīkls”, Latvijas elektroenerģijas tirgus pārskata statistikas datus. Kopējais HES un VES īpatsvars pēc gadiem ir parādīts 3.2. attēlā.

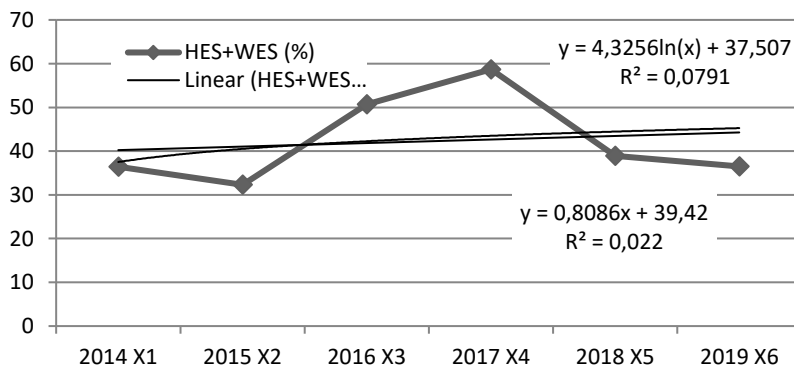
¹⁶ Prokhorova, R. 2020. AS Covid-19 izraisa pieprasījuma samazinājumu. *Elektroenerģijas tirgus apskats*. Izdevums Nr. 104/ 2020. gada aprīlis. https://latvenergo.lv/storage/app/media/uploaded-files/ETA_apr_2020.pdf

Latvijā saražotās elektroenerģijas īpatsvars HES un VES 2014–2019

Indikators (%)	2014	2015	2016	2017	2018	2019
HES (%)	34	30	50	58	37	34
VES (%)	2,4	2,3	0,7	0,7	1,9	2,5
HES + VES (%)	36,4	32,3	50,7	58,7	38,9	36,5

Avots: autores veidots, pamatojoties uz AS “Augstsprieguma tīkls” datiem. Latvijas elektroenerģijas tirgus pārskats

3.2. attēlā parādīta HES un VES saražotās elektroenerģijas kopējā īpatsvara izmaiņu dinamika no kopējā saražotās elektroenerģijas apjoma Latvijā aplūkojamajā periodā. Šā rādītāja lineārajai tendencei (apakšējā līnija 3.2. attēlā), kā arī logaritmiskajai tendencei novērotajā periodā ir neitrāls raksturs ar tikko manāmu pieaugumu, bet ar zemiem determinācijas koeficientiem – attiecīgi $R^2 = 0,022$ un $0,0791$.

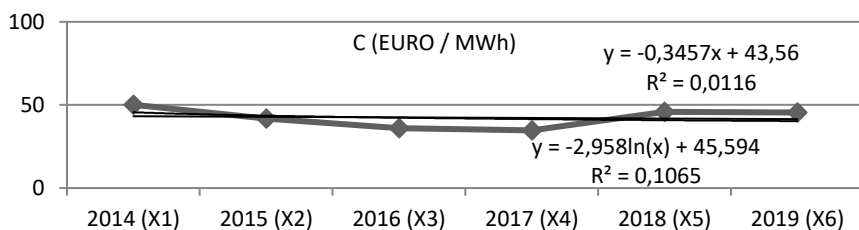


3.2. attēls. HES un VES īpatsvara dinamika kopējā saražotās elektroenerģijas īpatsvarā Latvijā

Avots: autores veidots, pamatojoties uz AS “Augstsprieguma tīkls” datiem. Latvijas elektroenerģijas tirgus pārskats

No 3.6. tabulas un 3.2. attēla izriet: pirmkārt, elektroenerģijas ražošanas no AER īpatsvars šajos gados vidēji bija 42,25 % ar maksimālo vērtību 58,7 % 2017. gadā un kritumu 2018. un 2019. gadā; otrkārt, gan kopējais īpatsvars, gan tā komponenti ir neprognozējami, tāpēc šo tendenci kvalitatīvāk var noteikt no 2020. un 2021. gada statistikas datiem. Saskaņā ar Latvijas Nacionālo enerģētikas un klimata plānu 2021.–2030. gadam atjaunīgo energoresursu īpatsvaram enerģijas galapatēriņā 2020. gadā, 2022. gadā, 2025. gadā, 2027. gadā un 2030. gadā ir jāpalielinās (%) attiecīgi līdz 40,95; 41,25; 42,5; 43,75 un 45.

Lai samazinātu riskus, palielinātu peļņu un plānotu, elektroenerģijas tirgus dalībniekiem ir svarīgi prognozēt nākotnes cenas. Šajā daļā analizēti dati par Latvijas cenu zonu *Nord Pool* elektroenerģijas tirgū. Datu kopu veido vēsturiskās stundas elektroenerģijas cenas (EUR / MWh) no 2014. gada 1. janvāra līdz 2019. gada 31. decembrim. 3.3. attēlā parādīta vienas MWh patērētās elektroenerģijas vidējo cenu (C) izmaiņu dinamika Latvijā (*European Network of Transmission System Operators for Electricity 2020*).



3.3. attēls. Vienas MWh cenu dinamika elektroenerģijas patērētājiem Latvijā, 2014.–2019. gads

Avots: autores veidots, pamatojoties uz *European Network of Transmission System Operators for Electricity 2020*¹⁷

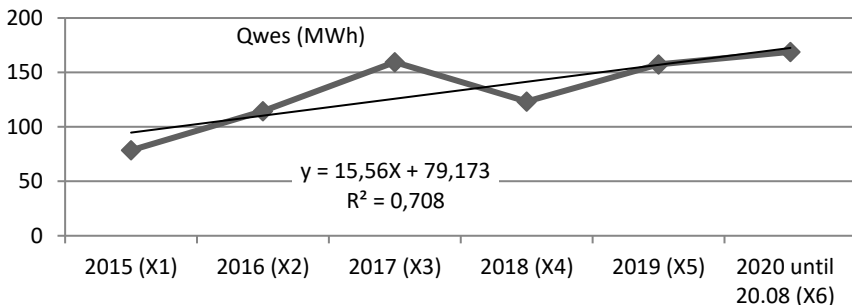
¹⁷ *European Network of Transmission System Operators for Electricity*. URL: <https://www.entsoe.eu> [Accessed 05.08.2020.].

Laika posmā no 2014. līdz 2015. gadam minimālās (C_{min}), maksimālās (C_{max}) un vidējās (C_{mdl}) cenas rādītāji ir attiecīgi 34,7 (2017. gadā), 50,1 (2014. gadā) un 42,35 EUR / MWh. Lineārā regresija ar ļoti zemu determinācijas koeficientu $R^2 = 0,0116$ liecina par neitrālu šī rādītāja tendenci ar tikko pamanāmu lejupvērstu tendenci. Logaritmiskā regresija ar augstāku koeficientu $R^2 = 0,1065$ sniedz lielāku pārliecību par attiecīgā rādītāja lejupslīdes tendenci. Vidējā cena 2018. gadā elektroenerģijas biržā Latvijas tirdzniecības zonā bija 46,28 EUR / MWh, bet vidējā dienas cena svārstījās no 11,99 līdz 89,45 EUR / MWh.

Vēja enerģijas patēriņa raksturojums un tendences

Situācija ar vēja elektrostaciju jaudu ir atšķirīga ne tikai Baltijas valstu kopējos, bet arī katras valsts apjomos. 3.4 un 3.5. attēlā attiecīgi parādīta vēja enerģijas plānotā patēriņa Q_{wes} (MWh) statistikas rādītāju dinamika nākamajai dienai un tās cenas C_{wes} (EURO / MWh) *Nord Pool* biržā Latvijai. Novērojums aptver laika posmu no 2015. gada līdz 2020. gada 20. augustam.

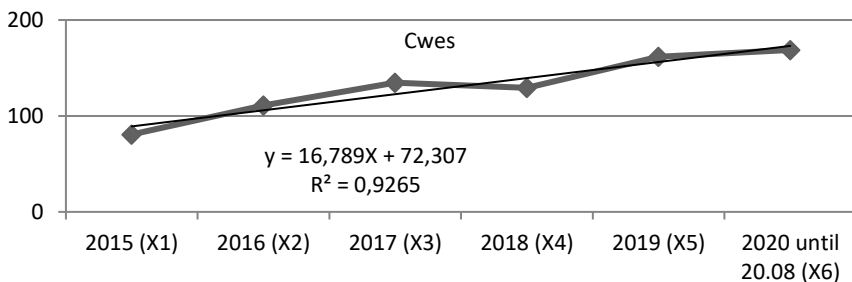
Q_{wes} rādītāja tendencei (ar koeficientu $R^2 = 0,7$), kas arī parādīta 3.4. attēlā, ir skaidri izteikts augošs raksturs ar augstu sakarības stiprumu ar statistikas datiem, un tā norāda uz vēja enerģijas patēriņa stabilu ikgadēju pieaugumu Latvijā.



3.4. attēls. **Plānotā vēja enerģijas patēriņa dinamika nākamajai dienai Latvijā 2015.–2020. gadā**

Avots: autores veidots, pamatojoties uz *Nord Pool. Market Data 2020*

Savukārt 3.5. attēlā redzama *Cwes* rādītāja augšupejošā tendence, ko parāda vienādojums ar augstu $R^2 = 0,9$ vērtību, un tas liecina par ievērojamu vienas MWh patērētās vēja enerģijas cenas pieaugumu Latvijā. Pēdējo piecu gadu laikā šīs cenas ir vidēji divkārtšojušās. 3.4. un 3.5. attēlā sniegto datu salīdzinājums par periodu no 2015. līdz 2019. gadam sniedz priekšstatu, ka, pirmkārt, attiecīgās tendences ir vērstas dažādos virzienos; otrkārt, vidējās patērētās vēja elektroenerģijas cenas (123,5 EUR / MWh) ir trīs reizes augstākas nekā vidējās no visām ES patērētās elektroenerģijas cenām (40,8 EUR / MWh). Šādi rādītāji pagaidām vēl nav par labu vēja enerģijai, un tās attīstības gaitā ir jāsaprot ekonomiskais un vides aizsardzības pamatojums.



3.5. attēls. Nākamajai dienai plānotās vēja enerģijas patēriņa cenu dinamika *Nord Pool* biržā Latvijā 2015.–2020. gadā

Avots: autores veidots, pamatojoties uz *Nord Pool. Market Data 2020*

Turpinājumā autore sīkāk analizē savus aprēķinātos, uz statistikas datiem balstītos patērētās vēja enerģijas rādītājus 2019. gadā maksimumstundās no plkst. 8.00 līdz 12.00.

3.7. tabulā attēloti autores aprēķinātie rādītāji par iepriekšējā dienā plānotās patērējamās vēja elektroenerģijas daudzumu un tās cenām *Nord Pool* biržā attiecīgajā mēnesī (MWh, EUR / MWh):

- \hat{W} , \hat{C} – stundas vidējā vērtība;
- \hat{W}_p , \hat{C}_{wp} – vidējās vērtības maksimumstundās no plkst. 8.00 līdz 12.00.

3.7. tabula

Aprēķinātie vēja enerģijas patēriņa rādītāji Latvijā, 2019

Mēnesis	\hat{W}	\hat{C}	\hat{W}_p	\hat{C}_{wp}
Janvāris	171	57	174	64
Februāris	219	47	211	50
Marts	222	40	230	43
Aprīlis	141	44	118	52
Maijs	135	44	123	57
Jūnijs	89	45	76	66

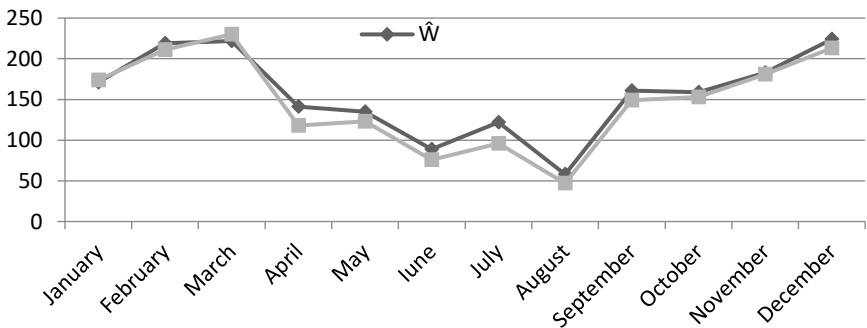
3.7. tabulas turpinājums

Mēnesis	\hat{W}	\hat{C}	\hat{W}_p	\hat{C}_{Wp}
Jūlijs	122	49	96	61
Augusts	58	39	47	60
Septembris	161	49	149	67
Oktobris	159	47	153	56
Novembris	183	45	181	48
Decembris	224	39	213	42

Avots: autores veidots, pamatojoties uz *Nord Pool. Market Data 2020*

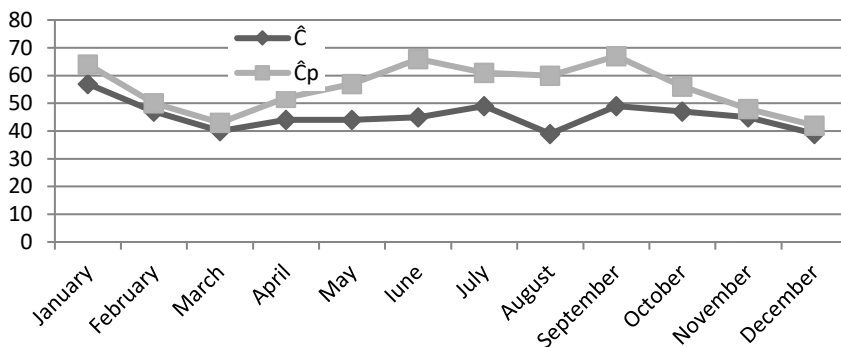
Diagrammas, kas attēlo \hat{W} , \hat{W}_p (MWh) un \hat{C} , \hat{C}_{Wp} (EUR / MWh) mēneša izmaiņu dinamiku, ir parādītas 3.6. un 3.7. attēlā.

Rādītāju \hat{W} un \hat{W}_p grafiki (3.6. attēls) gandrīz atkārtoti viens otru ar tuvām mēneša vērtībām un tuvām vidējām vērtībām 157 un 148 (MWh), kas norāda, ka maksimuma periodi gandrīz neietekmē patērētās vēja enerģijas tendences izmaiņas. Vienlaikus šo rādītāju tendenci būtiski ietekmē gada siltākie mēneši – no aprīļa līdz septembrim, kuros ir zemākās vērtības, bet augstākās – pārējos mēnešos.



3.6. attēls. Rādītāju \hat{W} un \hat{W}_p vidējo stundas vērtību dinamika (MWh), 2019

Avots: autores veidots, pamatojoties uz *Nord Pool. Market Data 2020*



3.7. attēls. Rādītāju \hat{C} un \hat{C}_{wp} vidējo stundas vērtību dinamika (MWh), 2019

Avots: autores veidots, pamatojoties uz *Nord Pool. Market Data 2020*

\hat{C} un \hat{C}_{wp} rādītāju diagrammas (3.7. attēls) arī ir līdzīgas. Kopumā rādītāju vērtības maksimumstundās (\hat{C}_{wp}) ir augstākas nekā mēneša vidējās stundas vērtības. To vidējās vērtības 45 un 55 (EUR / MWh) atšķiras tikai par 18 %.

Secinājumi

1. Elektroenerģijas ražošanas, patēriņa un eksporta tendences Latvijā ir vājas, bet augšupejošas. Importa un importa pārsnieguma pār elektroenerģijas eksportu tendences ir lejupvērstas, kas liecina par Latvijas lēnas, bet sarūkošas atkarības dinamiku no elektroenerģijas importa. Nevar izmantot īstermiņa “aproximāciju” šā rādītāja prognozei.
2. Plānotā vēja enerģijas patēriņa tendence nākamajai dienai Latvijā ir ar skaidri izteiktu augšupvērstu raksturu, tai ir stipri augsta saistība ar statistikas datiem (koeficients $R^2 = 0,7$) un tā norāda uz vēja enerģijas patēriņa vienmērīgu ikgadēju pieaugumu Latvijā, kas atbilst izvirzītajiem mērķiem palielināt AER īpatsvaru enerģijas gala patēriņā, kam līdz 2030. gadam vajadzētu pieaugt un sasniegt

īpatsvaru līdz 45 %. Vienlaikus vienas MWh (Latvijā patērētās vēja enerģijas ar augstu $R^2 = 0,7$ vērtību) cenas pieauguma tendence nesakrīt ar tās patēriņa tendenci. Šis apstāklis, kā arī koronavīrusa pandēmijas sekas var likt koriģēt plānus elektroenerģijas patēriņa palielināšanai no AER, kas prasīs detalizēti izvērtēt vēja enerģijas importa apjomu un, iespējams, īstenot pasākumus šīs enerģijas ražošanas jaudu palielināšanai Latvijā.

3. Autore pamatojusi sinusoīdas vēja enerģijas rādītāju atkarības no gada mēneša kā pamatmodeļa korelācijas pētījumā. Pierādīts, ja pētāmo datu maksimālajām un minimālajām novirzēm nav vienādas vidējās novirzes no vispārējā vidējā līmeņa, tad nepieciešams papildus ieviest pavadošos mainīgos, kas identificē šīs novirzes, kā rezultātā tiek izveidots attiecīgs modificēts modelis. Ir noteiktas ikmēneša vēja enerģijas datu regresijas atkarības. Tāpat ir sniegti aprēķinātie dati par iegūto modeļu validāciju.
4. Izstrādājot vēja enerģijas gada un mēneša (2019) datu statistiskās analīzes metodoloģiju, tiek konstatēts, ka praktiskai lietošanai jāizmanto analīzes metodes, kas sniedz ne tikai labus kvalitātes kritērijus, bet arī loģiskai nozīmei atbilstošas aplūkoto rādītāju vērtības. Polinoma regresija ir izrādījies neefektīvs instruments elektroenerģijas pieprasījuma prognozēšanai. Viena no tā galvenajām stiprajām pusēm irniecīgais aprēķināšanas laiks, kas nepieciešams prognožu veikšanai, daudz nezaudējot precizitātes ziņā.

5. Polinomu regresija ir izrādījusies neefektīvs instruments mēneša statistikas datu analīzei, kas deva neapmierinošus rezultātus, tāpēc ieteicams izmantot attiecīgo rādītāju sinusoīdās atkarības modeli no mēneša numura.
6. Lai gan citas modifikācijas (x komponents un laikrindu filtrēšana) nedeva konsekventi labvēlīgu efektu visā datu kopā, bija dienas, kad to iekļaušana palīdzēja uzlabot precizitāti. Tādējādi ieteicams izveidot modeli, kas automātiski izvēlas pazīmes, kuras prognozēšanas programmai būtu jāņem vērā pirms katras dienas prognozes.
7. Izstrādātos modeļus ieteicams izmantot kā analītiskus rīkus elektroenerģijas agregatora attīstībai Latvijā.

4. Elektroenerģijas patēriņā regulēšanas modeļa izstrāde Latvijā, pamatojoties uz reģionālo pieprasījuma reakcijas agregatoru

Promocijas darba 4. nodaļa sastāv no 2 sadaļām, 33 lappusēm, 7 attēliem un 19 tabulām.

Iepriekš veiktā analīze 1., 2. un 3. nodaļā norāda uz nepieciešamību izveidot modeli, kā regulēt elektroenerģijas patēriņu, izmantojot pieprasījuma reakciju (PR) un klientu iesaisti. Pieprasījuma reakcija tiek uzskatīta par būtisku līdzekli, ko var izmantot, lai samazinātu patērētāju elektroenerģijas patēriņu, ja rodas neparedzēti gadījumi, kas izjauc piedāvājuma un pieprasījuma līdzsvaru. PR tiek ieviests kā tarifs vai programma, lai motivētu galalietotājus reaģēt uz elektroenerģijas cenu izmaiņām vai uz stimulējošiem maksājumiem, kas paredzēti, lai rosinātu mazāku elektroenerģijas patēriņu, kad ir apdraudēta sistēmas stabilitāte vai kad vairumtirdzniecības tirgū ir augstas cenas.

Šīs nodaļas mērķis tāpēc ir izstrādāt divpakāpju optimizācijas metodoloģijas modeli elektroenerģijas patēriņa regulēšanai, izmantojot pieprasījuma reakciju.

Lai īstenotu šo mērķi, ir nepieciešams:

- analizēt elektroenerģijas patērētāju uzvedības potenciālu līdzdalībai pieprasījuma reakcijas agregatorā, veicot kvantitatīvu patērētāju izpēti Latvijā;
- ieteikt divpakāpju piedāvājuma un pieprasījuma līdzsvara optimizāciju, kur pirmajā posmā tiek piedāvāts risināt elektroenerģijas patēriņa samazināšanas problēmu, bet otrajā posmā – risināt optimizācijas problēmu, kuras aktīvo patērētāju grupas slodzes atslēgt, ja elektroenerģijas daudzums nav pietiekams, tātad reaģējot uz elektroenerģijas tirgus cenām.

Autore vispirms veic elektroenerģijas patērētāju vietas un lomas izpēti elektroenerģijas tirgū.

4.1. Enerģijas lietotāju loma elektroenerģijas tirgū un to informētība Latvijā

Lai noskaidrotu projekta teorētiskās daļas atbilstību konkrētajām prakses vajadzībām, ir lietderīgi veikt kvantitatīvo pētījumu starp prosumeriem – labāki prosumera definīcijas izpratnei, priekšstatam par prosumeru izmantotās un saražotās enerģijas, apkures veidiem un citiem faktoriem.

Šīs analīzes mērķis ir izpētīt Latvijas elektroenerģijas patērētāju informētības līmeni par prosumerismu, apmierināt vēlmi iesaistīties šajā procesā tiem cilvēkiem, kuri labi pārzina šī termina saturu, un apzināt galvenos elektroenerģijas patēriņa faktorus, kas var to veicināt.

Aptaujā varēja piedalīties ikviens interesents, tomēr izlase nebija pietiekami reprezentatīva Latvijas iedzīvotājiem, jo mērķis galvenokārt bija uzzināt Latvijas elektroenerģijas patērētāju informētības līmeni par prosumerismu, līdz ar to arī potenciālu iesaistīties pieprasījuma reakcijā Latvijā. Reprezentatīvie dati ļautu veikt detalizētu analīzi par dažādu patērētāju tipu vēlmi un motīviem iesaistīties pieprasījuma reakcijā. Tādējādi šī aptauja ir pakļauta tādai pašai pašselekcijas neobjektivitātei, kas tika konstatēta citās aptaujās un pilotprojektos par pieprasījuma reakciju vai enerģētikas jautājumiem kopumā.

Metodoloģijas daļā tiek izmantota kvantitatīvā metode, kas ir lietderīga, lai iegūtu respondentu viedokli, izmantojot kvantitatīvos datus. Sākotnēji tika sagatavota anketa kā viens no pētniecības kvantitatīvās metodes instrumentiem. Tā tika nosūtīta nejaušiem respondentiem, izmantojot sociālo mediju kanālus. Pēdējā posmā tika iegūtas atbildes no 108 respondentiem. Pēc intervēšanas patērētāju atbildes tika kodētas un ievietotas *Excel* failā, vēlāk tās pārnesot uz

SPSS programmu. Lai iegūtu ticamības koeficientu, tika izmantots Kronbaha alfa tests (ar vērtību, kuras modulis ir no 0 līdz 1, un kas tiek veikts, izmantojot SPSS programmas).

Uzticamības koeficients ir svarīgs kritērijs testa rezultātu novērtēšanai. Tas ir precizitātes rādītājs, ar kādu tiek veikta kādas pazīmes pārbaude. Aprēķinos tika izmantota SPSS programma, Kronbaha alfa tests ar moduļa vērtību starp 0 un 1.

Standarta Kronbaha alfa koeficients α_{st} tiek aprēķināts pēc šāda vienādojuma:

$$\alpha_{st} = \frac{N \cdot \bar{r}}{1 + (N - 1) \cdot \bar{r}} \quad (4.1.)$$

4.2. Elektroenerģijas patēriņa regulēšanas divpakāpju optimizācijas metodikas modeļa izstrāde, izmantojot pieprasījuma reakcijas mehānismu

Pētījuma motivācija

Straujā atjaunīgo energoresursu attīstība un to integrācija energosistēmā, pieaugošās mūsdienu nozares ar augstu digitalizācijas pakāpi prasības energoapgādes kvalitātei, kā arī enerģijas taupīšanas tehnoloģiju plaša ieviešana diktē nepieciešamību radikāli atjaunot enerģotīklu ekonomiku, plaši attīstot viedos tīklus. Vieds elektrotīkls tiek uzskatīts par pilnībā integrētu, pašregulējošu un pašatjaunojošu energosistēmu ar tīkla topoloģiju, kurā ietilpst visi elektroenerģijas ražošanas avoti, maģistrālie un sadales tīkli un visu veidu elektroenerģijas patērētāji, kurus reāllaikā kontrolē vienots informācijas un vadības ierīču un sistēmu tīkls. Viena no viedā tīkla koncepcijas galvenajām funkcionālajām iezīmēm ir motivācija aktīvai gala lietotāja uzvedībai, ar ko saprot iespēju patērētājiem patstāvīgi mainīt saņemtās elektroenerģijas apjomu un funkcionālās īpašības, pamatojoties uz savām vajadzībām un energosistēmas

iespējām, izmantojot informāciju par cenu, piegādājamās elektroenerģijas apjoma, uzticamības, kvalitātes u. c. raksturlielumiem.¹⁸

Optimizējot patēriņu, augstākas pīķa vērtības tiek apgrieztas, bet zemākas ielejas aizpildītas, mainot elektroierīču un enerģijas patēriņa grafiku laika periodā, reaģējot uz pieprasījuma reakcijas PR signālu.¹⁹

Optimizācijas mērķi

Pieprasījuma reakcijas mehānisma optimizācija ļauj iegūt labākos iespējamajos mainīgos lielumus, lai maksimizētu vai minimizētu mērķa funkcijas vērtību, ar nosacījumu, ka mainīgie lielumi ir noteikti ar ierobežojumiem.²⁰

Tādējādi pirmajā posmā, pamatojoties uz prognozētajiem datiem par elektroenerģijas trūkumu nākamajā dienā, tiek piedāvāts risināt tās patēriņa samazināšanas problēmu. Otrajā posmā tiek optimizēta to aktīvo patērētāju izvēle, kurus paredzēts atslēgt kārtējai stundai, ja elektroenerģijas daudzums nav pietiekams, pat ņemot vērā tās patēriņa samazinājumu. Izstrādātā metodoloģija balstās uz atbilstošiem matemātiskiem modeļiem, kuriem katrā posmā ir formulētas atbilstošas optimizācijas problēmas. Ir doti piemēri problēmu risināšanai ar precīzām un aptuvenām metodēm. Izstrādātie modeļi tiek ieteikti reģionālajam PR agregatoram izmantošanai attiecīgajā *online* programmatūrā elektroenerģijas pieprasījuma un piedāvājuma sabalansēšanai.

¹⁸ ANEC and BEUC, 2011. Position on Energy Efficiency. Joint ANEC BEUC position paper on the Commissions Communication Energy Efficiency Plan 2011. Retrieved from <http://www.becu.org/publications/2011-00397-01-e.pdf> [Accessed on 21.09.20.].

¹⁹ *Ibid.*

²⁰ Vardakas, J. S., Zorba, N. and Verikoukis, C. V. 2014. A Survey on Demand Response Programs in Smart Grids: Pricing Methods and Optimization Algorithms. *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. c, 1.

Pasaules praksē galvenais risinājums elektroenerģijas mazumtirdzniecības tirgus patērētāju iesaistīšanai pieprasījuma vadībā (PV) ir specializētu organizāciju – pieprasījuma vadības agregatoru (PVA) – izveide, kuru komercdarbība ir pieprasījuma reakcijas pakalpojumu sniegšana. IT PVA ir svarīgi izmantot atbilstošus analītiskos rīkus, ar kuriem būtu iespējams veikt optimizācijas aprēķinus, lai noteiktu gan iepirktās elektroenerģijas, gan īslaicīgi atslēgtās elektroenerģijas daudzumu. Tādējādi tiek iegūtas divas optimizācijas problēmas:

- 1) elektroenerģijas patēriņa samazināšanas apjoma optimizācija tās trūkuma gadījumā;
- 2) uz laiku atslēgtu lietotāju grupu noteikšana (plānošana) elektroenerģijas trūkuma gadījumā.

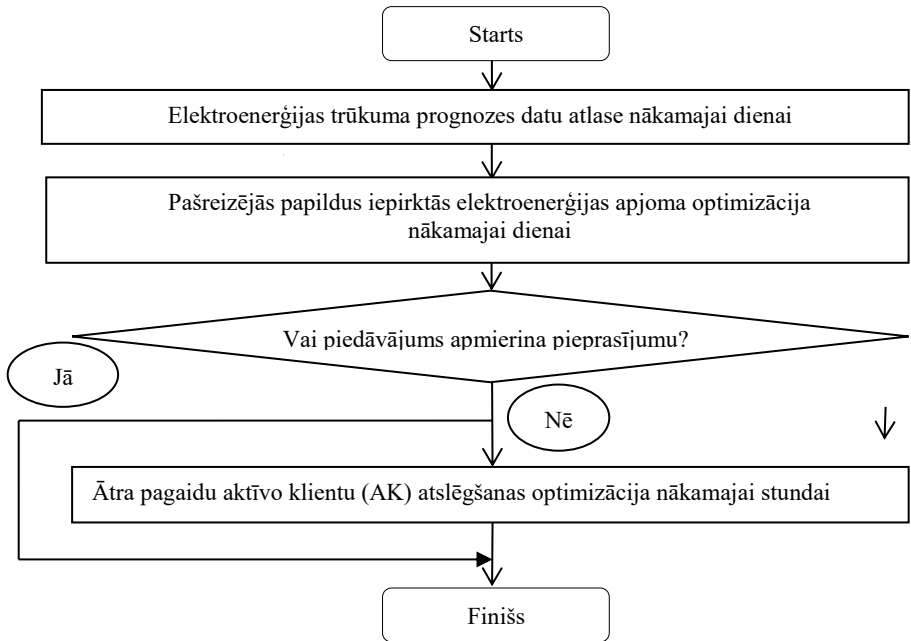
Lai atrisinātu problēmas, ir jāizstrādā atbilstoši matemātiskie modeļi un to lietošanas metodes, kas tiek piemērotas, pamatojoties uz prognozējamo informāciju par elektroenerģijas trūkuma apjomu un tās iepirkšanas izmaksām.

Šis pētījums ir veltīts atbilstošu PR modeļu izstrādei un to validācijai, ko ar šādu pieeju var uzskatīt par inovatīvu aplūkojamajā jomā.

Patērētās enerģijas piedāvājuma un pieprasījuma līdzsvara optimālas regulēšanas problēmu risināšanas posmi

Latvijā, tāpat kā daudzās citās ES valstīs, elektroenerģijas vidējā diennakts ražošana un patēriņš atkarībā no daudziem faktoriem parasti nav sabalansēts, tāpēc Latvija gan importē, gan eksportē elektroenerģiju, pērkot un pārdodot to *Nord Pool* elektroenerģijas biržā. Elektroenerģijas pārdošana un pirkšana notiek ar bidiem – vienreizējiem pieteikumiem dienā biržai uz nākamo dienu pirms tirdzniecības sākuma, nosakot iztrūkstošo enerģijas patēriņa daudzumu megavatstundās (MWh). Cenu par vienu tirgotās elektroenerģijas MWh nosaka *Nord Pool* elektroenerģijas birža. Tiek piedāvāts risināt operatīvo

stundu enerģijas patēriņa optimizācijas problēmas enerģijas iespējamā iztrūkuma gadījumā divos posmos (4.1. attēls). Pirmajā posmā, pamatojoties uz datiem par enerģijas trūkuma prognozi, tiek optimizēts papildus iepirktās elektroenerģijas daudzums nākamajai dienai. Prognozes dati vienmēr ir varbūtēji, tāpēc ir diezgan ticami pieņemt, ka ar iepriekšējā dienā pabeigto papildu enerģijas iepirkumu var nepietikt noteiktās kārtējās dienas stundās un papildu iepirkums šajā dienā vairs nav iespējams. Tāpēc ir jārisina otrā posma uzdevums – optimizēt ik stundu maiņstrāvas atslēgšanas gadījumu skaitu, veidu un reģionālo izvietojumu. Jāņem vērā, ka pirmais uzdevums tiek risināts visam reģionam (valstij), pamatojoties uz enerģijas patēriņu diennaktī, bet otrais uzdevums – katrai kārtējai enerģijas trūkuma stundai.



4.1. attēls. Divu posmu procedūras algoritma struktūra optimālai patērētās elektroenerģijas piedāvājuma un pieprasījuma bilances regulēšanai nākamajai dienai

Avots: izveidojusi autore

a. Aktuālā papildus iepirtās elektroenerģijas daudzuma optimizācijas problēma nākamajai dienai ar prognozi par tās trūkumu

Saskaņā ar statistikas datiem (skat. 1. nodaļu) Latvijā elektroenerģijas importa pārsvars pār eksportu, t. i., tā iztrūkums, 2019. gadā bija vidēji 1118 MWh un aptuveni 3,06 MWh dienā, kas ir aptuveni 18 % no gada patēriņa – 6108 MWh. Kopumā importa apjoms bija 4612 MWh un aptuveni 12,6 MWh dienā.

Pašreizējās iepirkuma cenas (c) par 1 MWh svārstās no 1 līdz 487 (EUR / MWh) un vidēji $\hat{c} = 155,6$ EUR / MWh. Vienlaikus elektroenerģijas pārdošanas cena (z) dažādiem patērētāju veidiem Latvijā (mājsaimniecībām, lauksaimniecībai, rūpniecības uzņēmumiem u. c.) ir vienmēr konstanta visas dienas garumā un vidēji \hat{z} EUR / MWh. Tādējādi trūkstošās elektroenerģijas iegāde elektroenerģijas biržā visos gadījumos ir izdevīga, ja $\hat{z} \geq c$ un kopējā iepirkuma cena $C(i)$ i MWh ($i = 1, 2, \dots, n$) lineāri atkarīga no c , t. i., $C(i) = ic$, kur c ir paredzamā 1 MWh cenas vērtība biržā nākamajā dienā. Ja $C(i)$ ir nelineāri atkarīga no c , $C(i)$ vērtība, palielinoties i , var izrādīties pārāk liela. Tāpēc šādos gadījumos tiek ierosināts optimizēt biržā iepirktais elektroenerģijas apjomu (i), par kritēriju ņemot vienādojumu:

$$Q = \max \sum_{i=1}^n [i\hat{z} - C(i, c)] \leq 0 \quad (4.2.),$$

kur

i – prognozētais MWh elektroenerģijas iztrūkums nākamajā dienā

\hat{z} – Latvijā patērētājiem piegādātās elektroenerģijas 1 MWh vidējā cena (vietējā tirgū elektroenerģijas cena dienas laikā nemainās)

$i\hat{z}$ – izmaksas, kas rodas, pārdodot biržā papildus iepirkto elektroenerģiju Latvijas patērētājiem i MWh

c – prognozētā 1 MWh cena nākamajā dienā biržā

$C(i, c)$ – papildus iepirktais elektroenerģijas i MWh izmaksu nelineārā funkcija par cenu c elektroenerģijas biržā *Nord Pool* Latvijas tirdzniecības zonā

Tādējādi ir ieteicams iegādāties tikai tās i MWh elektroenerģijas, kurām ir izpildīta nevienlīdzība $\max Q \leq 0$. Jebkurā gadījumā lēmums par papildu iepirkumu paliek agregatora ziņā, kurš pieņem lēmumu, pamatojoties ne tikai uz ekonomiskiem, bet arī citiem apsvērumiem.

Gadījuma izpēte

Formulētā optimizācijas problēma (4.2. vienādojums) ir diezgan vienkārša. Autore sniedz tās risinājumu, izmantojot piemēru, kas izriet no šādiem apsvērumiem:

1. Saskaņā ar statistikas datiem (skat. 1. nodaļu) Latvijā elektroenerģijas importa pārsniegums pār eksportu, t. i., tā deficīts, 2019. gadā bija vidēji 1118 MWh un aptuveni 3,06 MWh dienā. Tādējādi aptuvenā indeksa n vērtība nepārsniedz 10 MWh.
2. Cena \hat{z} tiek uzskatīta par nemainīgu un vienādu ar 150 EUR / MWh, pamatojoties uz cenu 0,15 EUR par 1 kilovatstundu.
3. Vienas MWh s cena biržā var ievērojami atšķirties. Konkrēti, laika posmā 01.01.2019.–20.08.2019. šī cena svārstījās no 1 līdz 484 EUR/MWh. Piemēram, tiek izvēlēta atkarība $C(i,c) = c^{i/2}$ ar sākotnējo $c = 5$ EUR / MWh.

Aprēķinātie piemēra dati un iegūtais rezultāts ir parādīts 4.1. tabulā.

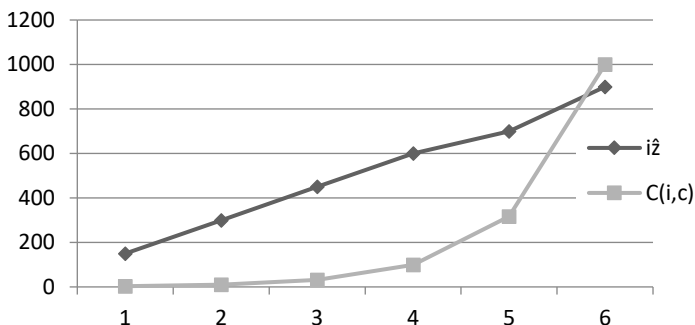
4.1. tabula

Aktuālā papildus iepirktais elektroenerģijas apjoma optimizācijas problēma nākamajai dienai ar tās deficīta prognozi (formula 4.2.)

I	$i\hat{z}$	$C(i,c)$	Q
1	150	3,2	146,8
2	300	10	290
3	450	31,6	418,4
4	600	100	500
5	750	316,2	433,8
6	900	1000	(-)100

Avots: izstrādājusi autore

Atkarību $i\hat{z}$ un $C(i,c)$ grafiki parādīti 4.2. attēlā.



4.2. attēls. Aktuālā papildus iepirktais elektroenerģijas apjoma optimizācijas problēma nākamajai dienai ar tās deficīta prognozi

Avots: autores izveidots

Aprēķina piemērs rāda, ka ar dotajiem sākotnējiem datiem 6 MWh iegāde biržā nav rentabla, jo Q kritērijs iegūst negatīvu vērtību ($Q = -100$). Šīs problēmas praktiskajā piemērošanā ir svarīgi precīzi novērtēt funkcionālo atkarību $C(i, c)$. Ar lineāru atkarību $C(i, c)$ uzdevuma formulējumam 4.2. formā nav jēgas, jo jebkuram n atkarībā no attiecības \hat{z} un c tiks izpildītas nevienādības $Q > 0$ vai $Q < 0$.

b. Atvienoto aktīvo elektroenerģijas patērētāju grupu operatīvās darbības optimizācijas uzdevums nākamajai stundai elektroenerģijas trūkuma gadījumā

Kā aprakstīts 1.2. apakšnodaļā, aktīvo elektroenerģijas patērētāju grupu operatīvās izvēles uz atvienošanu no elektroenerģijas optimizāciju var veikt, izmantojot operāciju pētīšanas teoriju uzdevuma par “mugursomu” (*Knapsack*) tā nostādne (4.3.) ar sākotnējiem nosacījumiem (4.4.). Gadījumā, ja patērētāji vēlas saglabāt noteiktus patēriņa paradumus maksimumstundās un nemainīt patēriņa uzvedību, tad viņiem ir jābūt gataviem par to maksāt. Tomēr, ja aktīvie patērētāji nolemj nepārsniegt budžetu / iegūt peļņu, tad viņiem jāmaina enerģijas

patēriņš un jāizslēdz dažas ierīces / iekārtas un jāpārceļ patēriņš uz maksimumstundām.

Kombinatoriskās optimizācijas metodoloģija – “mugursomas problēma” (*Knapsack Problem*)

Operāciju pētīšanas teorija “mugursomas problēma” ir ļoti vienkāršs netriviāls integrālo skaitļu programmēšanas modelis ar binārajiem mainīgajiem, un tā ir klasiska maksimizācijas problēmas forma, kas tiek pētīta jau gadsimtiem ilgi. Lai gan šai metodei ir tikai viens ierobežojums un pozitīvs koeficients, šo vienkāršo programmu uzskata par sarežģītu. Problēma ieguvusi savu nosaukumu salīdzinājumā ar situāciju, kādā nonāk alpīnists, kad tas ir nolēmis sakravāt savu mugursomu (*Knapsack*), lai uzkāptu kalnā, bet viņa mugursomas ietilpība ir ierobežota, tāpēc ir rūpīgi jāizvēlas priekšmeti, ņemot vērā to vērtību un svaru.²¹

Svarīgs uzdevums pašreizējā elektroenerģijas deficīta apstākļos ir matemātiskā modeļa izvēle elektroenerģijas sadalījumam starp dažādu grupu patērētājiem un reģioniem, kuros šīs grupas ir pārstāvētas, un atslēgtās elektroenerģijas apjoma noteikšana katrā no grupām. Protams, šādi modeļi ir agregatora, kas regulē elektroenerģijas pieprasījuma un patēriņa līdzsvaru, komercnoslēpums un parasti netiek publicēti. Vienu no pieejām šādas problēmas formulēšanai var vienkāršot līdz integrālo skaitļu optimizācijas problēmai “mugursomas problēma”, kuras mērķis ir no dotās elementu kopas ar īpašībām “izmaksas” un “svars” atlasīt elementu apakškopu ar maksimālajām kopējām izmaksām, vienlaikus ievērojot ierobežojumu attiecībā uz kopējo svaru.²²

²¹ Sianaki, O. A. 2015. *Intelligent Decision Support System for Energy Management in Demand Response Programs and Residential and Industrial Sectors of the Smart Grid*. [Accessed on 05.07.21.]

²² Silvano Martelo, Paolo Toth. 1990. *Knapsack problems*. B – Great Britain: Wiley, 306 c. – ISBN 0-471-92420-2. [Accessed on 05.07.21.]

Dažādiem mērķiem pastāv dažādi šī uzdevuma varianti. Konkrēti, darbos ^{23, 24} šīs problēmas modifikācijas tiek izmantotas tūrisma nozarē.

Lai maksimizētu kopējo peļņu, bināro KP var formulēt kā lineāru veselu skaitļu programmēšanu šādi: jāatrod Bula kopa $X = \{x_j\}$, lai

$$F = \max \sum_{j=1}^m w_j z_j \quad (4.3.)$$

ar šādiem ierobežojumiem:

$$\sum_{j=1}^m w_j x_j \leq W \quad (4.4.),$$

kur

j – aktīvo klientu grupa ar vienādu tarifu plānu (mājsaimniecības, rūpniecība, lauksaimniecība, transports, uzņēmējdarbība utt.) attiecīgajā teritoriālajā vienībā (pilsēta, novads, pašvaldība utt.)

$x_j = 1$, ja patērētāju grupa j kārtējā stundā neizslēdzas no elektroenerģijas patēriņa (grupa ir “ievietota mugursomā”) un $x_j = 0$ – citādi (atslēdzas no elektroenerģijas patēriņa kārtējā stundā (grupa “neietilpst mugursomā”)

w_j – attiecīgajā stundā patērētās elektroenerģijas daudzums MWh patērētāju grupai j

z_j – elektroenerģijas tirgus cena (EUR / MWh) attiecīgajai patērētāju grupai;

m – maksimālais patērētāju grupu skaits ar dažādiem tarifu plāniem (dažādi tarifi par elektroenerģijas vienību)

W – kārtējā stundā sadalītās elektroenerģijas daudzums MWh visām patērētāju grupām

²³ Rebezova, M. 2013. A Modification of the Knapsack Problem Taking into Account the Effect of the Interaction Between the Items. *Automatic Control and Computer Sciences*, Vol. 47, № 2, Allerton Press, Inc. 107–112. ISSN 0146-4116. [Accessed on 05.07.21.]

²⁴ Mahareva, K. 2019. Concept of creation and analysis of competitiveness regional NDC-aggregator company. *Vestnik Cankt-Peterburgskogo Universiteta Grazdanskoy Aviacii*. (In Russian languages), № 1 (22). [Accessed on 05.07.21.]

Autore ir veikusi atslēgto aktīvo klientu grupu optimizācijas matemātiskā modeļa validāciju nākamajai stundai elektroenerģijas trūkuma gadījumā. Lai pārbaudītu modeļa darbību, modeļa validācija tiek veikta uz abstrakta skaitliskā piemēra, kurā: W – kārtējā stundā sadalītās elektroenerģijas daudzums MWh visām patērētāju grupām; j – aktīvo patērētāju grupa ar vienādu tarifu plānu (mājsaimniecības, rūpniecība, lauksaimniecība, transports, uzņēmējdarbība u. c.) attiecīgajā teritoriālajā vienībā (pilsēta, novads utt.).

Autore aplūko precīzās un eirētiskās metodes vajadzīgās problēmas risināšanai, izmantojot izsmeļošās meklēšanas metodes un “alkatīgās” metodes piemērus $W = 10$ (MWh) un citiem 4.2. tabulā dotajiem sākotnējiem datiem.

Lai atrisinātu problēmu, ņemot vērā visus nosacījumus, pārbaudītu un apstiprinātu rezultātu, tiek izmantota *MathCAD* programmatūra, īstenojot visu iespējamo (4.3.) vienādojuma problēmas risinājumu meklēšanu ar ierobežojumiem un nosacījumiem (4.4.), iegūstot maksimālo peļņu F ar dažādas cenas z vērtību.

4.2. tabula

**Sākotnējo datu piemērs problēmas risināšanai formulējumā
(Vien. 4.3., 4.4.)**

j	w_j (MWh)	z_j (EUR)	F
1	5	120	480
2	4	130	520
3	3	250	750
4	1	300	300

Avots: autore izstrādāts

No 4.2. tabulas izriet, ka pieprasījums pēc elektroenerģijas pašreizējā stundā pārsniedz patēriņu. ($\sum_{j=1}^m w_j = 13, > 10$). Līdz ar to ir nepieciešams atrisināt optimizācijas problēmu, izvēloties aktīvo klientu grupas (x), kurām jābūt laika ziņā iesaistītām no elektroenerģijas patēriņa.

4.3. tabulā ir parādītas visas iespējamās mainīgo x_j vērtību kombinācijas, atbilstošās grupu kopas un kritērija F vērtības, lai atrisinātu problēmu ar izsmeltošās meklēšanas metodi. Neatdalāmu maiņstrāvas maiņstrāvas grupu kopas var būt vai nu katra grupa atsevišķi (kas acīmredzami nav optimāla), vai citas divu vai trīs grupu kombinācijas, kurās kopējais pieprasījums pēc elektroenerģijas ($\sum_{j=1}^m w_j \leq 10$). Ja grupa sastāv tikai no viena patērētāja vai grupu kombinācija patērē > 10 MWh elektroenerģijas, tad aprēķinātie dati par to 4.3. tabulā nav norādīti (-).

4.3. tabula

Piemērs problēmas risināšanai formulējumā (4.3., 4.4.)

x_1	x_2	x_3	x_4	Set of x_j	$\sum_{j=1}^m w_j$	F
0	0	0	0	{0}	-	-
0	0	0	1	{4}	-	-
0	0	1	0	{3}	-	-
0	0	1	1	{3, 4}	4	1050
0	1	0	0	{2}	-	-
0	1	0	1	{2, 4}	5	820
0	1	1	0	{2, 3}	7	1270
0	1	1	1	{2, 3, 4}	8	1570
1	0	0	0	{1}	-	-
1	0	0	1	{1, 4}	6	780
1	0	1	0	{1, 3}	6	1230
1	0	1	1	{1, 3, 4}	9	1530

4.3. tabulas turpinājums

x_1	x_2	x_3	x_4	Set of x_j	$\sum_{j=1}^m w_j$	F
1	1	0	0	{1, 2}	9	1000
1	1	0	1	{1, 2, 4}	10	1300
1	1	1	0	{1, 2, 3}	–	–
1	1	1	1	{1, 2, 3, 4}	–	–

Avots: autore izstrādāts

Nulle matricās nozīmē, ka šai klientu grupai nav atbilstošu iespēju. No aprēķinātajiem datiem izriet, ka kritērija peļņas maksimālā vērtība $F = 1570$, ja tiks apmierināts elektroenerģijas pieprasījums kārtējā stundā, būs grupām {2, 3, 4} un grupa {1} tiks izslēgta.

Patērētāju grupu specifiskā vērtība (no 4.3. tabulas) ir norādīta 4.4. tabulā. Tālāk formulējumā (4.3., 4.4.) minētās problēmas turpmākajam risinājumam ar “alkatīgo” metodi.

4.4. tabula

Konkrēti patērētāja vērtības dati aplūkojamam piemēram

J	1	2	3	4
z_j / w_j	24	32,5	83,3	300

Avots: autore izstrādāts

No pieļaujāmām grupu kombinācijām, kurās ir iespējams apmierināt pieprasījumu pēc elektroenerģijas, autore izdala kombinācijas {1, 2, 4}, {1, 3, 4}, {1, 3, 4}, {2, 3, 4}, kuru kopējā īpatsvara vērtība ir norādīta 4.5. tabulā.

Konkrēti patērētāja vērtības dati aplūkojamam piemēram

Grupu kopas	{1, 2, 4}	{1, 3, 4}	{2, 3, 4}
z_j / w_j	356,5	407,3	415,8

Avots: autore izstrādāts

Šajā gadījumā arī izslēgšanas grupa būs grupa {1}, jo maksimālā vienības vērtība (415,8) būs tad, ja tiks apmierināts pieprasījums pēc kombinācijas grupām {2, 3, 4}. Piemērā uzdevuma risinājums ar precīzu metodi (izsmelošā meklēšana) un aptuvenu metodi (“alkatības” metode) sakrīt. Šī sakritība ir pilnīgi iespējama nelielam AC grupu skaitam. Praksē AC grupu skaits var būt desmiti un simti, jo, piemēram, mājsaimniecības ar dažādiem elektroenerģijas patēriņa tarifu plāniem var tikt sadalītas desmitos grupu u.tml. Tāpēc reģionālajam agregatoram vajadzētu būt lietojumprogrammu pakotnēm vai tiešsaistes kalkulatoriem formulējumā (4.3., 4.4.) minētās problēmas risināšanai gan ar precīzām, gan aptuvenām metodēm, no kurām visvieglāk izmantojama ir “brutālā” meklēšanas un “alkatības” metode, ņemot vērā problēmas sarežģītību.

Secinājumi

1. Latvijā trūkst elektroenerģijas aptuveni 18 % gada patēriņa, tāpēc agregatora svarīgākais uzdevums ir patērētāju pieprasījuma un piedāvājuma, patēriņa līdzsvara regulēšanas problēma, kuras risināšanai autore piedāvā divpakāpju optimizācijas procedūru kā elektroenerģijas apjomu, kas iepirkts nākamajai dienai *Nord Pool* biržā Latvijas tirdzniecības zonā, un to grupu izvēli, kuras agregators atslēdz trūkuma gadījumā elektroenerģijas patēriņa kārtējās stundās. Katram posmam izstrādāts problēmas formulējums un piedāvātas metodes to risināšanai ar deterministiskiem

sākotnējiem datiem. Izstrādātās metodoloģijas attīstība nākotnē ir paredzēta ar nejausiem sākotnējiem datiem.

2. “Mugursomas problēmas” (*Knapsack Problem*) risinājums ar eksakto metodi (izsmeļošā meklēšana) un aptuveno metodi (“alkatīgā”, *greedy* metode) sakrīt. Šī sakritība ir pilnīgi iespējama nelielam skaitam aktīvo patērētāju grupu. Praksē aktīvo patērētāju grupu skaits var būt desmiti un simti, jo, piemēram, mājsaimniecības ar dažādiem elektroenerģijas patēriņa tarifu plāniem var tikt sadalītas desmitos grupu. Tāpēc reģionālajam agregatoram jābūt lietojumprogrammu pakotnēm vai tiešsaistes kalkulatoriem formulējumā (4.2., 4.3. vienādojums) minētās problēmas risināšanai gan ar precīzām, gan aptuvenām metodēm, no kurām visvieglāk izmantot “brutālās” meklēšanas un “alkatīgo” metodi, ņemot vērā problēmas sarežģītību.
3. Aptaujā piedalījušos respondentu informētības līmenis par prosumerismu ir samērā augsts. Lai gan autore pieļauj, ka tie, kuri nav pazīstami ar terminu “prosumerisms”, neturpināja aizpildīt anketu.

Nobeigums

Enerģētikas nozares un tās segmentu attīstība, tostarp atjaunīgo energoresursu izplatība un ietekme, elektroenerģijas tirgus cenas loma un vieta visām patērētāju kategorijām un Latvijas ekonomikai kopumā ir prioritārs valdības uzdevums. Tas ir atspoguļots Latvijas Republikas Saeimas, Ministru kabineta, Ekonomikas ministrijas un citu LR ministriju un iestāžu veidotās pamatnostādnēs un politikas dokumentos ar rezultātos balstītu konsekventu uzraudzību valsts līmenī un, protams, visas ES līmenī. Šajos dokumentos ir izvirzīti mērķi, noteiktas stratēģijas un pasākumi nozares pārveidošanai, bet gandrīz nav pievērsta uzmanība IT tehnoloģiju attīstībai ar mērķi regulēt elektroenerģijas pieprasījumu.

Promocijas darba pētījuma aktualitāti apliecina autores izstrādātā elektroenerģijas pieprasījuma pakalpojumu attīstības koncepcija Latvijā uz reģionālā agregatora darbības pamatiem.

Ir formulēti **galvenie secinājumi kā pētījuma rezultāti**.

Pētījuma rezultāti

1. Elektroenerģijas pieprasījuma reakcijas (PR) vadības teorētiski metodoloģisko un zinātnisko aspektu analīze atklāj, ka atjaunīgo energoresursu dabas dēļ nav iespējams kontrolēt vai pieprasīt elektroenerģijas jaudu, kad tā ir nepieciešama. PR metožu galvenie mērķi ir maksimālās slodzes samazināšana un iespēja kontrolēt patēriņu atbilstoši elektroenerģijas ģenerācijai. Parasti elektroenerģijas galalietotājiem ir ļoti maz praktisku zināšanu par iespējamo rīcības elastīgumu, jo tie nepārzina savus patēriņa paradumus. Tāpēc PR programmās dalībnieki iesaistās ar mazāku atsaucību, nekā gaidīts.

2. Programmatisko dokumentu un likumdošanas avotu analīze liecina, ka, jo liberalizētāks ir tirgus, jo vairāk tas reaģē uz pieprasījuma un piedāvājuma svārstībām. Cenšoties maksimāli liberalizēt Eiropas enerģijas tirgu, Eiropas tirgus lēmumu pieņēmēji plāno to izmantot kā instrumentu, kam jānodrošina arvien pieaugošs un daudzveidīgs piedāvājumu klāsts, kas vienlaikus sekmētu cenu samazināšanu. Autore veiktā analīze atklāj, ka elektroenerģijas tirgus cenas ir ļoti svārstīgas.
3. Analizējot dažādus elektroenerģijas patēriņa pieprasījuma reakcijas vadības instrumentus, kā arī pasaules valstīs funkcionējošās pieprasījuma reakcijas vadības programmas, atklājas šo instrumentu un programmu būtiska diferenciācija un specifika valstu kontekstā. Autore secina, ka 1.1. tabulā (optimizācijas klasifikācija) norādītās patēriņa samazināšanas programmas nav savstarpēji aizvietošanas un visi šie mehānismi var tikt izmantoti kompleksi. Šī izpratne tiek atspoguļota un pamatota arī pētījumā, izstrādājot elektroenerģijas pieprasījuma reakcijas vadības modeli agregatoram Latvijā.
4. Balstoties uz līdzšinējo pētījumu ģenēzi elektroenerģijas patēriņa pieprasījuma vadības jomā, tiek ierosināti, sistematizēti un pamatoti šīs problēmas zinātniskās izpētes posmi. Pētījuma rezultāti pierāda, ka elektroenerģētikas zinātnisko pētījumu attīstību ietekmē kā ārējie faktori, piemēram, ekonomiskās krīzes, informācijas un komunikācijas tehnoloģiju izplatība, tā arī iekšējie faktori, piemēram, enerģijas tirgus attīstība un liberalizācija, izkļiedēto un atjaunīgo energoresursu tehnoloģijas, jaunu tehnoloģisko tendenču rašanās u. c.

5. Ir četras galvenās faktoru grupas, kas ietekmē vēja enerģijas tehnoloģiju ieviešanu Latvijā (izņemot finanšu resursu pieejamību investīcijām):
 - normatīvā vide;
 - politiskā vide;
 - iedzīvotāju attieksme;
 - teritorijas pieejamība.
6. Līdz šim Baltijas valstis nav izmantojušas visu potenciālu, kas saistībā ar ES mērķi līdz 2050. gadam panākt oglekļa neitralitāti, investīcijām, atbalsta shēmām un izolēm viedo stratēģiju īstenošanu var novest pie tā, ka strauji pieaugs atjaunīgo energoresursu, īpaši vēja un saules enerģijas, jaudas. Saskaņā ar Latvijas Nacionālo enerģētikas un klimata plānu 2021–2030 Latvijas elektroenerģijas pārvades sistēma spēj nodrošināt līdz 800 MW papildu jaudu uzņemšanu no jaunām atjaunīgās enerģijas elektrostacijām, kas ir aptuveni trešdaļa no visām šobrīd Latvijā uzstādītajām elektriskajām jaudām.
7. Promocijas darba autore piedāvā kombinatoriskās optimizācijas modeli reģionālā pieprasījuma reakcijas agregatora koncepcijas īstenošanai, kas pirmajā posmā ļaus risināt elektroenerģijas patēriņa samazināšanas problēmu un otrajā posmā optimizēt aktīvo patērētāju izvēli, kurus patērētājus atslēgt uz kārtējo stundu, ja elektroenerģijas daudzums nav pietiekams, pat ņemot vērā elektroenerģijas patēriņa samazinājumu.
8. Elektroenerģijas ražošanas, patēriņa un eksporta tendences Latvijā ir vājas, bet augšupejošas. Importa un importa pārsvara pār elektroenerģijas eksportu tendencēm ir lejupvērstis raksturs, kas

liecina par Latvijas dinamiku lēnai, bet pamazām sarūkošai atkarībai no elektroenerģijas importa.

9. Plānotā vēja enerģijas patēriņa tendence nākamajai dienai Latvijā ir ar skaidri izteiktu augšupvērstu raksturu, ar augstu piesaisti un atbilstību statistikas datiem (koeficients $R^2 = 0,7$) un norāda uz vēja enerģijas patēriņa vienmērīgu ikgadēju pieaugumu Latvijā, kas atbilst izvirzītajiem mērķiem palielināt īpatsvaru enerģijas gala patēriņā, kurā līdz 2030. gadam AER vajadzētu pieaugt un tajā sasniegt līdz 45 % īpatsvaru. Vienlaikus vienas MWh (Latvijā patērētās vēja enerģijas ar augstu $R^2 = 0,7$ vērtību) cenas pieauguma tendence nesakrīt ar tās patēriņa tendenci. Šis apstāklis, kā arī koronavīrusa pandēmijas sekas var likt koriģēt plānus elektroenerģijas patēriņa palielināšanai no AER, kas prasīs detalizēti vērtēt vēja enerģijas importa apjomu un, iespējams, īstenot pasākumus šīs enerģijas ražošanas jaudu palielināšanai Latvijā.
10. Izstrādājot vēja enerģijas gada (dati par 2019. gadu) un mēneša datu statistiskās analīzes metodoloģiju, tiek konstatēts, ka praktiskai izmantošanai jālieto analīzes metodes, kas sniedz ne tikai labus kvalitātes kritērijus, bet arī loģikai atbilstošas aplūkoto rādītāju vērtības. Polinoma regresija ir izrādījusies efektīvs instruments elektroenerģijas pieprasījuma prognozēšanai. Viena no tās galvenajām priekšrocībām ir nenozīmīgais skaitļošanas laiks, kas nepieciešams prognožu veikšanai, daudz nezaudējot precizitātes ziņā. Turklāt prognozēšanas modeli var uzlabot ar noteiktām modifikācijām, no kurām visdaudzsološākā ir modeļa atlieku, kas vidēji aprēķinātas pa diennakts stundām, atņemšana.

11. Vēja jaudas maksimuma un elektroenerģijas cenas maksimumu laikā polinoma regresija apliecinājās kā neefektīvs instruments, kas mēneša statistikas datu analīzei deva neapmierinošus rezultātus, tāpēc ieteicams izmantot attiecīgo rādītāju sinusoīdas atkarības modeli no mēneša kārtas numura.
12. Lai gan citas modifikācijas (x komponents un laikrindu filtrēšana) nedeva konsekventi labvēlīgu efektu visā datu kopā, bija dienas, kad to iekļaušana palīdzēja uzlabot precizitāti. Tādējādi ieteicams izveidot modeli, kas automātiski izvēlas pazīmes, kuras prognozēšanas programmai būtu jāņem vērā pirms katras dienas prognozes. Turklāt tajā būtu jāapsver automātiska mācību kopas lieluma izvēle, jo vēja maksimuma laikā optimālajam apskates periodam ir tendence mainīties.
13. Tika izvirzīts uzdevums un piedāvāts uzlabots reģionālā elektroenerģijas agregatora optimizācijas ekonomiskais un matemātiskais modelis, kas vērsts uz elektrostaciju un elektroenerģijas patērētāju izmaksu samazināšanu. Pētījumi atklāj, ka Latvijā šāda pakalpojuma nav. Lai gan institucionāli viss ir gatavs, tehnoloģiski nepieciešams attīstīt elektroenerģijas viedo tīklu un uzstādīt viedos skaitītājus. Optimizācijas uzdevuma risināšanas metode ir pārbaudīta validācijas gadījuma pētījumos ar programmatūru *MathCAD* un pierāda tās piemērotību un efektivitāti.
14. Latvijā trūkst elektroenerģijas aptuveni 18 % gada patēriņa, tāpēc agregatora svarīgākais uzdevums ir patērētāju pieprasījuma un piedāvājuma līdzsvara regulēšana elektroenerģijas patēriņā. Šīs problēmas risināšanai autore piedāvā divpakāpju optimizācijas procedūru kā elektroenerģijas apjomu, kas iepirkts nākamajai dienai

Nord Pool biržā Latvijas tirdzniecības zonā; un to grupu izvēli, kuras agregators atslēdz elektroenerģijas trūkuma gadījumā tās patēriņa kārtējās stundās. Katram posmam ir izstrādāts problēmas formulējums un aplūkotas metodes tās risināšanai ar deterministiskiem sākotnējiem datiem. Izstrādātās metodoloģijas attīstība nākotnē ir paredzēta ar nejausiem sākotnējiem datiem.

15. “Mugursomas problēmas” (*Knapsack Problem*) risinājums ar eksakto metodi (izsmeļošā meklēšana) un aptuveno metodi (“alkatīgā”, *greedy*, metode) sakrīt. Šī sakritība ir pilnīgi iespējama nelielam skaitam aktīvo patērētāju grupu. Praksē aktīvo patērētāju grupu skaits var būt desmiti un simti, jo, piemēram, māsaiņniecības ar dažādiem elektroenerģijas patēriņa tarifu plāniem var tikt sadalītas desmitos grupu. Tāpēc reģionālajam agregatoram jābūt lietojumprogrammu pakotnēm vai tiešsaistes kalkulatoriem formulējumā (4.2., 4.3. vienādojums) minētās problēmas risināšanai gan ar precīzām, gan aptuvenām metodēm, no kurām visvieglāk izmantot “brutālās” meklēšanas un “alkatīgo” metodi, ņemot vērā problēmas sarežģītību.
16. Aptaujā piedalījušos respondentu informētības līmenis par prosumerismu ir samērā augsts. Lai gan autore pieļauj, ka tie, kuri nav pazīstami ar terminu “prosumerisms”, gluži vienkārši neturpināja aizpildīt anketu.

Svarīgi uzsvērt, ka elektroenerģijas patērētāju uzvedība liecina par Latvijas patērētāju lielo potenciālu piedalīties elektroenerģijas ražošanas un pārdošanas tirgū. Tas nozīmē potenciālu piedalīties elektroenerģijas pieprasījuma reakcijas agregācijā.

Tādējādi autores izvirzītā hipotēze ir pierādīta, mērķis un uzdevumi ir izpildīti.

Rekomendācijas

Pamatojoties uz darba gaitā izdarītajiem secinājumiem, autore formulēja šādus priekšlikumus Latvijas valsts struktūrām, Latvijas izglītības valsts iestādēm, Latvijas augstskolām, uzņēmumiem.

Latvijas Republikas Izglītības ministrijai: Ņemot vērā, ka Latvijā ir diezgan kvalitatīvas studiju programmas par ilgtspējīgu attīstību ekonomiskajā, psiholoģiskajā, vides un uzņēmējdarbības izglītībā, darba autore iesaka izstrādāt un iekļaut “elektrības prosumerisma” koncepciju gan vidējā, gan augstākajā izglītībā.

Latvijas Republikas Ekonomikas ministrijai: Ieteicams noteikt viedā tīkla attīstības prioritāti Latvijā un pabeigt mājsaimniecību nodrošināšanu ar viedajiem skaitītājiem. Tas ļauj pēc 2025. gada nekavējoties iesaistīt elektroenerģijas patērētājus pieprasījuma reakcijas agregācijā.

Latvijas Republikas Centrālajai statistikas pārvaldei: Atzīstot paketes “Tīra enerģija visiem eiropiešiem” (CEEP) pārejas procesu aktualitāti Latvijā, precizēt “elektroenerģijas prosumerisma” un “elektroenerģijas aktīva patērētāja” definīciju enerģētikas sektorā, iekļaujot tajā mijiedarbības novērtēšanas sistēmu starp patērēto elektroenerģiju un vidējo rēķinu mājsaimniecībām – prosumeriem. Tas nodrošinās iespēju pētīt patērētāju uzvedību un lietotāju dzīvesveidu.

Latvijas Republikas augstākajām iestādēm: Promocijas darba autore piedāvā Latvijā ieviest paplašinātu inteligēnto lēmumu atbalsta sistēmu (IDSS), lai izveidotu unikālu enerģijas patēriņa profilu ģimenes locekļiem: salīdzinot elektrosistēmu ar telekomunikāciju un multimediju sistēmu, īpaši mobilo tīklu, šīs sistēmas lietotāji saņemtu datus par savu patēriņu reāllaikā. Turklāt mobilo tīklu pakalpojumu sniedzēji var informēt savus lietotājus par pārmērīga patēriņa tendencēm un piedāvāt viņiem piemērotākus pakalpojumus, pamatojoties uz lietotāja patēriņa profilu. Lai viedo tīklu papildinātu ar šādu inteligenci,

ierosinātajai inteligēntajai lēmumu atbalsta sistēmai jāspēj pētīt lietotāju uzvedību un dzīvesveidu.

Uzņēmumiem, kas plāno piedāvāt elektroenerģijas PR pakalpojumus Latvijā: Piedāvātās “mugursomas” metodes paplašināšana līdz stohastiskajai var nodrošināt aptuvenu enerģijas patēriņa nākotnes tendenču aproksimāciju reģionālajam agregatoram.

Publikācijas un ziņojumi par promocijas darbu tēmu

1. Silinevicha, V. 2021. Characteristics and Trends of Indicators of Export, Import, and Electricity Consumption in Latvia. Wind Power Consumption Characteristics and Trends. *Baltic Journal of Economic Studies*, 7(4), 188–195. <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2021-7-4-188-195>. **Web of Science**.
2. Silinevicha, V and Viskuba, K. 2021. Renewable Energy Sources in the Baltic States and New Business Approach of the Sector, *Vilnius University Open Series*, 120–127, doi: 10.15388/VGISC.2021.16. **ERIH PLUS**.
3. Silinevicha, V., Stecenko, I., Viskuba, K. 2020. Political, Economic, Social and Technological Perspectives of Aggregator of Demand Response for Renewable Integration, *Acta STING*, vol 4, Brno 16–32, e-ISSN 1805-6873. **ERIH PLUS**.
4. Silinevicha, V. & Viskuba, K. 2020. Wind Farm Project Results and Innovative Business Models. *Humanities & Social Sciences Latvia*, 28 (1), 5–29. <https://doi.org/10.22364/hssl.28.1.01>. **Web of Science**.
5. Silinevicha, V., Kalinina, K. 2017. Energy Security Issues of the Baltic States. *Science Horizons*, 1(5) |2018, 175–190. ISSN 2587-618X. VAC.
6. Silinevicha, V., Kalinina, K. 2017. Entrepreneurship of Eco-system and Its Transformation, Using the Example of Republic of Egypt, *Advances in Economics and Business* Vol. 5 (3), 155–166, DOI: 10.13189/aeb.2017.050304, ISSN: 2331-5075. **EBSCO**.
7. Silinevicha, V., Kalinina, K. 2017. The Development of the Evaluation System of Factors, Influencing on the Organization for the Prevention of Risks of its Activity in the Market in any Field of Activity, using PEST – Analysis. *Professional Studies: Theory and Practice* 2017 / 3 (18), 44–51, ISSN 2424-5321. **EBSCO**.
8. Silinevicha, V. 2017. Customer behaviour-based demand response model. “Transformational Processes in Law, Regional Economics and Economic Policies: Topical Economic, Political and Legal Issues”. Baltic International Academy, Riga, December 8, 231–235. ISBN 978-9984-47-143-3.
9. Silinevicha, V. 2011. Renewable energy regional policies: Instruments to design an energy strategy. Starptautiska zinātniska konference “Eiropas Savienības nacionālās un reģionālās ekonomikas: “Baltijas jūras valstu stratēģijas *Nordic-Baltic-8*””. Varšava, ISBN 978-9984-47-058-0.

Piedalīšanās starptautiskajās zinātniskajās konferencēs

1. V. Silinevicha, 14th Prof. Vladas Gronskas International Scientific Conference, Renewable energy sources in the Baltic countries and new business approaches of the sector, Kaunas Faculty of Vilniaus University, Lithuania, 3th of December 2019.

2. V. Silinevicha, VIII International Scientific Conference Transformational Processes in Law, Regional Economics and Economic Policies: Topical Economic, Political and Legal Issues, Institutional aspects of electricity Demand Response Baltic International Academy, December 13, 2019.
3. V. Silinevicha, XXIII. ročníku mezinárodní odborné konference DANĚ – TEORIE A PRAXE. Political, Economic, Social and Technological Perspectives of Aggregator of Demand Response for Renewable Integration, 10th December, 2020 Brno, Czech Republic.
4. V. Silinevicha, VI International Conference Geopolitical aspect of relations: Russia-West, Wind power influence to wholesale energy prices in Latvia, Humanities University in Siedlce, Poland. November 14–15, 2019 (Baltic International Academy).
5. V. Silinevicha, IX International Conference of Young Researchers and Students “A Time of Challenges and Opportunities: problems, solutions, perspectives”, Economical framework of electricity Demand Side Management, 17–18 May, 2019 Baltic International Academy, Rīga Stradiņš University, Daugavpils University, Riga, Latvia.
6. V. Silinevicha, VII International Scientific Conference, The transformation process of law, the regional economics and economic policy: topical economic and political and legal issues, Peculiarities of wholesale of electricity on the Nord Pool exchange for Latvia; 7th of December, 2018, Baltic International Academy, Rīga Stradiņš University, Daugavpils University, Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny Siedlcech, National University of Kharkiv, Riga, Latvia.
7. V. Silinevicha, VIII International Practical Scientific Conference for Young Researchers and Students Conference “Time of Challenges and Opportunities: problems, solutions, perspectives”, Main stages of the development of the concept of electricity demand response, 17–18 May 2018, Baltic International Academy, Rīga Stradiņš University, Daugavpils University, Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcech, National University of Kharkiv, Riga, Latvia.
8. V. Silinevicha, VII International Scientific and Practical Meeting of Young Researchers and Students Conference “Time of Challenges and Opportunities, Perspectives”, Energy security peculiarities in Latvia, 11–12 May 2017, Baltic International Academy Riga.
9. V. Silinevicha, IV International Scientific Practical Conference, The transformation process of law, the regional economy and economic policy: the relevant economic and political and legal issues, Support mechanisms for RES in Latvia, 10th of December, 2016, The Baltic International Academy, Rīga Stradiņš University, Daugavpils University, University college of Administration and Social Studies, Riga, Latvia.
10. V. Silinevicha, I international Symposium on Eurasia energy issues, Izmir University, Turkey, Energy security issues of the Baltic States; 28–30 May 2015, Izmir, Turkey.

Izmantotā literatūra un avoti

ES un Latvijas Republikas tiesību akti

Normatīvie akti, publicētie dokumenti

1. European Commission. 2015. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions Delivering a New Deal for Energy Consumers. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0339> [Accessed 20.10.2019.].
2. European Commission. (2016a, November 30). Clean Energy for All Europeans – unlocking Europe’s growth potential. Retrieved from EC Press releases database website: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-16-4009_en.htm [Accessed 20.10.2019.].
3. European Commission. (2016b, November 30). Commission proposes new rules for consumer centred clean energy transition. Retrieved from EC Energy News website: <https://ec.europa.eu/energy/en/news/commission-proposes-new-rules-consumer-centred-clean-energy-transition> [Accessed 10.04.2019.].
4. European Commission. (2017a). Third Report on the State of the Energy Union (Communication No. COM (2017) 688 final). Retrieved from https://ec.europa.eu/commission/publications/third-report-state-energy-union_en [Accessed 10.04.2019.].
5. Latvian Ministry of Economics: Permits for the Introduction of New Electricity Generation Facilities. Available online: https://www.em.gov.lv/lv/nozares_politika/atjaunojama_energija_un_kogeneracija/atlaujas_jaunu_elektroen_ergijas_razosanas_iekartu_ieviesanai/ (Accessed on 4 December 2020).

Grāmatas

6. Seber, G. A. F. 1977. *Linear regression analysis*. John Wiley and Sons, New York – London – Sydney – Toronto.
7. Afifi, A. A., Azen, S. P. 1979. *Statistical Analysis. A Computer Oriented Approach*. Academic Press, New York–San Francisco–London.
8. Adams, A., Bloomfield, D., Booth, Ph., England, P. 1993. *Investment Mathematic and Statistics*. Graham @ Trotman, London–Dordrecht–London.
9. Martello, S., Toth, P. 1990. *Knapsack problems: algorithms and computer implementations*. John Wiley & Sons Ltd. C. 29,50. – 296 c. – ISBN 0-471-92420-2.
10. Davis, I. (ed.) 1991. *Handbook of Genetic Algorithms*. New York: Van Nostrand Reinhold.

Periodiskie izdevumi

11. ANEC and BEUC, 2011. Position on Energy Efficiency. Joint ANEC BEUC position paper on the Commissions Communication Energy Efficiency Plan 2011. Retrieved from <http://www.becu.org/publications/2011-00397-01-e.pdf> [Accessed on 21.09.20.].
12. Bogdanovičs, R.; Borodinecs, A.; Zajacs, A.; Šteinerte, K. 2018. Review of Heat Pumps Application Potential in Cold Climate. *Adv. Intell. Syst. Comput.*, 543–554. [Accessed on 5 January 2021].
13. Eid, Ch., Reneses, J., Frías, P., Hakvoort, R. 2013. Challenges for Electricity Distribution Tariff Design in the Smart Grid era: a Conceptual Approach [Access 29.11.2020.].
14. Gelazanskas, L. 2014. Demand side management in smart grid: A review and proposals for future direction, Elsevier, *Sustainable Cities and Society*, vol. 11, 22–30.
15. Gellings, C. W. 1985. The concept of demand-side management for electric utilities, *Proceedings of the IEEE*, 73 (10), 1468–1470. CrossRef.
16. Jan Stede, Karin Arnold, Christa Dufter, Georg Holtz, Serafin von Roon, Jörn C. Richstein, 2020. The role of aggregators in facilitating industrial demand response: Evidence from Germany, *Energy Policy*, Volume 147, 111893, ISSN 0301-4215, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111893>. [Accessed on 29 August 2021].
17. Knaut, A., Paulus, S. 2016. Hourly price elasticity pattern of electricity demand in the German day-ahead market, *EWI Working Paper*, No. 16/07, Institute of Energy Economics at the University of Cologne (EWI), Köln.
18. Lebedeva, K.; Krumins, A.; Tamane, A.; Dzelzitis, E. 2021. Analysis of Latvian Households' Potential Participation in the Energy Market as Prosumers. *Clean Technol.*, 3, 437–449. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol3020025> [Accessed on 5 January 2021].
19. Vesnic-Alujevic, L., Breitegger, M., Guimarães Pereira, Â. 2016. What smart grids tell about innovation narratives in the European Union: Hopes, imaginaries and policy, *Energy Research & Social Science*, Volume 12, 16–26, ISSN 2214-6296, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.11.011> [Accessed on 21.09.20.].
20. Mahareva, K. 2019. Concept of creation and analysis of competitiveness regional NDC-aggregator company. *Vestnik Cankt-Peterburgskogo Universiteta Grazdanskoi Aviacioni*. (In Russian languages), № 1 (22). [Accessed on 05.07.21.].
21. Prokhorova, R. 2020. AS Covid-19 izraisa pieprasījuma samazinājumu. *Elektroenerģijas tirgus apskats*. Izdevums Nr. 104/ 2020. gada aprīlis. https://latvenergo.lv/storage/app/media/uploaded-files/ETA_apr_2020.pdf [Accessed on 7 August 2020].

22. Rebezova, M. 2013 A Modification of the Knapsack Problem Taking into Account the Effect of the Interaction Between the Items. *Automatic Control and Computer Sciences*, Vol. 47, № 2, Allerton Press, Inc. 107–112. ISSN 0146-4116. [Accessed on 05.07.21.].
23. Ribó-Pérez, D. Larrosa-López, L., Pecondón-Tricas, D. and Alcázar-Ortega, M. A. 2021. Critical Review of Demand Response Products as Resource for Ancillary Services: International Experience and Policy Recommendations. *Energies*, 14, 846. [https:// doi.org/10.3390/en14040846](https://doi.org/10.3390/en14040846) [Accessed 28.07.2019.].
24. Sianaki, O. A. 2015. Intelligent Decision Support System for Energy Management in Demand Response Programs and Residential and Industrial Sectors of the Smart Grid. [Accessed on 05.07.21.].
25. Teimourzadeh, B., Payam, E. and Mehdi, M. 2012. Customer behavior based demand response model. *Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting (PES '12)*. 1–7. 10.1109/PESGM.2012.6345101. [Accessed 11.08.2020.].

Interneta resursi

26. Central Statistical Bureau of Latvia: Electricity Production, Imports, Exports and Consumption. Available online: <https://stat.gov.lv/en/statistics-themes/business-sectors/energy> [Accessed on 18 March 2020] European Network of Transmission System Operators for Electricity. URL:<https://www.entsoe.eu> [Accessed 25.09.2020].
27. Nord Pool. Market Data. URL: <https://www.nordpoolgroup.com/> [Accessed 22.11.2020.].
28. Nord Pool maximum NTC: [Online]. Available at: <https://www.nordpoolspot.com/globalassets/download-center/tso/max-ntc.pdf> [Accessed 12.10.2019.].