

Edgars Kudurs

ELEKTROENERĢIJAS AKUMULĀCIJA CEĻĀ UZ ILGTSPĒJU

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Edgars Kudurs

Doktora studiju programmas “Vides inženierija” doktorants

**ELEKTROENERĢIJAS AKUMULĀCIJA CEĻĀ
UZ ILGTSPĒJU**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
profesore *Dr. habil. sc. ing.*
DAGNIJA BLUMBERGA

RTU Izdevniecība
Rīga 2024

Kudurs E. Elektroenerģijas akumulācija ceļā uz ilgtspēju. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU, 2024. 53 lpp.

Publicēts saskaņā ar RTU promocijas padomes "RTU P-19" 2024. gada 2. februāra lēmumu, protokols Nr. 187.

PATEICĪBAS

Šis darbs ir tapis pateicoties daudzu cilvēku atbalstam. Lielākais paldies manai promocijas darba vadītājai profesorei *Dr. habil. sc. ing.* Dagnijai Blumbergai par veltīto laiku, apbrīnojamo pacietību darbā ar mani, kā arī motivēšanu grūtākos brīžos! Šādas darba vadītājas studentam būt bija liels gods.

Esmu pateicīgs arī Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta (VASSI) kolektīvam. Daudz vietas aizņemtu šeit visus uzskaitīt. Ļoti novērtēju gan palīdzības, gan padomus un uzmundrinājumus. VASSI komanda ir spēcīga ne tikai ar zināšanām un pieredzi, bet arī ar cilvēcīgo attieksmi.

Tāpat esmu pateicīgs arī saviem radniekiem, jo īpaši dzīvesbiedrei Lindai, kā arī draugiem par atbalstu un iedrošināšanu.

<https://doi.org/10.7250/9789934370410>
ISBN 978-9934-37-041-0 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 25. aprīlī plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 116. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Gatis Bažbauers,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr. sc. ing.* Edmunds Teirumnieks,
Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmija, Latvija

Emeritētais profesors *Ph. D. Andres Sūrde*,
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

APSTIPRINĀJUMS

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

Edgars Kudurs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir izstrādāts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 23 attēli, 12 tabulu, kopā 164 lappuses. Literatūras sarakstā ir 82 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Viena no Eiropas Savienības prioritātēm pēdējās pāris desmitgades ir klimata neitralitāte, tajā skaitā mērķis panākt oglekļneitralitāti līdz 2050. gadam, kā arī nodrošināt enerģētisko pašpietiekamību. Viens no galvenajiem izaicinājumiem ir pāreja uz atjaunojamiem energoresursiem. Elektroenerģijai, kas iegūta no atjaunojamiem enerģijas avotiem, piemēram, saules un vēja enerģijas, ir sezonāls raksturs, kas nevar paredzami un stabili nodrošināt nepieciešamo elektroenerģijas patēriņu un segt maksimālās slodzes. Arī tā sauktā “energoresursu krīze” patlaban ir ļoti aktuāla problēma, kas pastiprina globālo nepieciešamību palielināt atjaunojamo energoresursu īpatsvaru kopējā primāro energoresursu bilancē. Ir vairāki virzieni un veidi, kā to veicināt. Viedie tīkli ar plašiem starpvalstu enerģijas pārvades starpsavienojumiem, energokopienas, plānveida ražošana ar atbilstošiem politikas instrumentiem, enerģijas akumulācija u. c. Šis izaicinājums ir novērojams visos patēriņa līmeņos, sākot no mājsaimniecībām kā decentralizēti atjaunojamās enerģijas ražotājām, beidzot ar reģionālu līmeni, kam jānodrošina efektīva un saimnieciski pamatota elektroapgāde. Autors uzskata, ka elektroenerģijas uzglabāšana ir atslēga ātrākai un veiksmīgākai pārejai uz atjaunojamiem energoresursiem elektroapgādē. Patlaban elektroenerģijas uzglabāšanas ieviešanas temps Eiropā ir neapmierinoši lēns. To ietekmē vairāki faktori, un ir nepieciešams paātrināt tempu un palielināt apjomus, lai veicinātu 100 % pāreju uz atjaunojamiem energoresursiem, paplašinātu atjaunojamās enerģijas izmantošanas praksi un palīdzētu uzlabot patērētāju dzīves kvalitāti. Svarīgs faktors ir būtiski samazināt ietekmi uz vidi un klimata pārmaiņām. Enerģijas akumulācijas risinājumu pieejamība pastāvīgi pieaug, un tehnoloģisko inovāciju līmenis strauji attīstās. Tāpēc ir vērtīgi pētīt un meklēt veidus, kā uzkrāt elektroenerģiju, lai veicinātu tās pieejamību no privātmājām līdz valsts un – plašāk – Eiropas mērogā.

Promocijas darba mērķis ir izprast tehnoloģiskās iespējas elektroenerģijas uzglabāšanai, kā arī noskaidrot, kā un kādi faktori ietekmē šo tehnoloģiju ieviešanu, tai skaitā – pētīt enerģijas akumulācijas iespējas, kas ļautu enerģētikas sistēmai un ekonomikai virzīties uz energoneatkarību, ieskaitot dažādas ekonomikas apakšnozares, uzņēmumus, pašvaldības un arī mājsaimniecību enerģijas patērētājus, sasniegt klimatneitralitātes mērķus.

Promocijas darbs ir balstīts zinātniskajās publikācijās, kas izstrādātas doktorantūras studiju laikā.

SATURS

PATEICĪBAS	2
ANOTĀCIJA	4
Ievads	6
Promocijas darba aktualitāte	6
Promocijas darba mērķis un uzdevumi	6
Promocijas darba hipotēze	7
Promocijas darba zinātniskā novitāte.....	7
Promocijas darba praktiskais nozīmīgums.....	8
Promocijas darba aprobācija	8
Promocijas darba struktūra.....	10
1. Metodika	12
1.1. Daudzkritēriju analīze, <i>TOPSIS</i> metode.....	12
1.2. Sistēmdinamikas modelēšana	15
Sistēmdinamikas modelis elektroenerģijas uzkrāšanas prognozēšanai mājsaimniecībās.....	16
Sistēmdinamikas modeļa simulācija hibrīdai energosistēmai mājsaimniecībā.....	24
1.3. Algoritms datu apkopošanai un kritiskai analīzei, aprēķiniem un prognozēšanai	29
1.4. Tehniski ekonomiskā analīze elektroenerģijas akumulācijas risinājumiem uzņēmumiem	30
Dati un pieņēmumi. Situācijas raksturojums.....	30
Matemātiskie vienādojumi	33
2. Rezultāti	35
2.1. Daudzkritēriju analīze ar <i>TOPSIS</i> metodi.....	35
2.2. Sistēmdinamikas modelēšana.....	37
Sistēmdinamikas modeļa elektroenerģijas uzkrāšanas prakses prognozēšanai mājsaimniecībās rezultāti	37
Sistēmdinamikas modeļa simulācijas hibrīdai energosistēmai mājsaimniecībā rezultāti.....	39
2.3. Algoritms datu apkopošanai un kritiskai analīzei, aprēķiniem un prognozēšanai	45
2.4. Tehniski ekonomiskās analīze uzņēmumiem	48
Jutīguma analīze scenārijiem, kuri katrā no alternatīvām ir ar zemāko bruto atpelnīšanās periodu.....	51
Secinājumi.....	53
Ieteikumi	53

IEVADS

Promocijas darba aktualitāte

Eiropas Savienības Zaļais kurss vedina dalībvalstis klimatneitralitātes virzienā arī enerģētikas sektorā, nosakot atjaunojamo energoresursu īpatsvara pieaugumu. Šajā gadījumā galvenā nozīme būs tādu sezonāla rakstura atjaunojamo energoresursu izmantošanai kā saules un vēja enerģija. Aizvietojot fosilos energoresursus, tas, no vienas puses, ļautu samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas gaisā un mazināt ietekmi uz klimata pārmaiņām, bet, no otras puses, ienestu būtiskas izmaiņas energoapgādes sistēmā, kad daļa energoavotu elektroenerģiju un siltumenerģiju ražotu periodiski – ar pārtraukumiem.

Tas nozīmē, ka energosistēmu pārvaldībai jāvedina uz būtiskām pārmaiņām ne tikai enerģijas ražotāja, bet arī energopārvades un it īpaši enerģijas lietotāja pusē.

Lai nodrošinātu enerģijas lietotāja laikā mainīgu energopieprasījumu, par svarīgu energosistēmas elementu kļūst enerģijas akumulācija. Patlaban svarīga ir pāreja no mikroakumulātoriem un miniakumulātoriem nelielo elektroierīču līmenī uz lielām akumulācijas stacijām, kas ļautu nodrošināt elektroenerģijas pieprasījumu nelielam elektroenerģijas patērētājam, piemēram, mājsaimniecībai, vidējam un lielam lietotājam – uzņēmumam vai pašvaldībai, iesaistot enerģijas akumulācijas izmantošanu arī reģionu un valsts līmenī.

Akumulācijas sistēmu attīstība pasaulē notiek strauji, turklāt inovācijas attīstās dažādos virzienos – ne tikai atsevišķu tehnoloģisko iekārtu līmenī, bet arī dažādu akumulācijas sistēmu izveidē, kad elektroenerģija tiek pārvērsta produktos ar augstu pievienotu vērtību, piemēram, e-degvielā, ūdeņradī, biometānā u. c.

Promocijas darbs veltīts specifiski izvēlētu akumulācijas veidu potenciāla analīzei un to attīstības modelēšanai.

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izprast tehnoloģiskās iespējas elektroenerģijas uzglabāšanai, kā arī noskaidrot, kā un kādi faktori ietekmē šo tehnoloģiju ieviešanu, tai skaitā – pētīt enerģijas akumulācijas iespējas, kas ļautu enerģētikas sistēmai un ekonomikai virzīties uz energoneatkarību, ieskaitot dažādas ekonomikas apakšnozares, uzņēmumus, pašvaldības un arī mājsaimniecību enerģijas patērētājus, sasniegt klimatneitralitātes mērķus.

Lai sasniegtu promocijas darba mērķus, noteikti vairāki uzdevumi.

1. Izveidot dažādas datubāzes, kas balstās zinātniskajā literatūrā atrastajos akumulācijas indikatoros un praktisku piemēru rezultātos:
 - dažādu akumulācijas tehnoloģisko risinājumu inženiertehniskie, ekonomiskie, vides un klimata raksturlielumi;
 - hidroelektrostaciju darbības datu kopas.
2. Izvēlēties enerģijas akumulācijas izmantošanas vērtēšanas kritērijus un noteikt to svarīgumu.

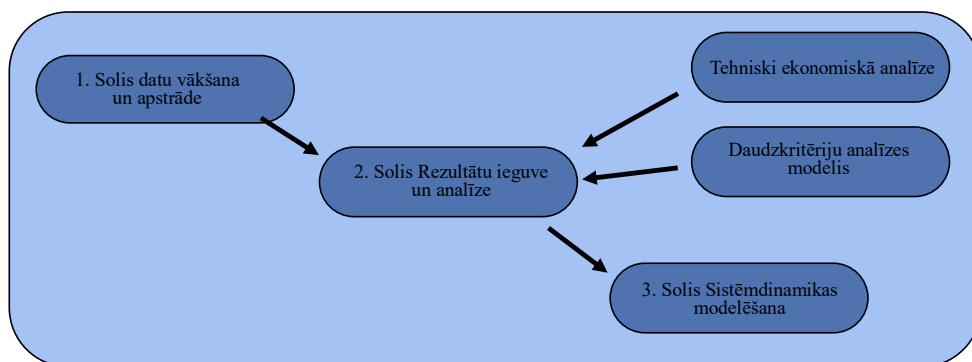
3. Veikt enerģijas akumulācijas labāko inovatīvo tehnoloģisko risinājumu vērtēšanu un prioritizēšanu divām enerģijas uzkrāšanas metodēm atsevišķi: (i) akumulācijas iekārtām; (ii) akumulācijas sistēmām.
4. Veikt enerģijas akumulācijas alternatīvu iespēju tehniski ekonomisko pamatojumu.
5. Veikt mājsaimniecības enerģijas akumulācijas sistēmas darbības modelēšanu, izveidojot sistēmdinamikas (SD) modeli:
 - mājsaimniecības energoapgādes sistēmai ar vienkāršu enerģijas akumulāciju;
 - mājsaimniecības energoapgādes sistēmai ar hibrīdu akumulāciju.
6. Veikt hidroelektrostaciju ūdenskrātuvju akumulācijas iespēju analīzi, lai integrētu vēja elektroenerģijas pārpalikumus.

Promocijas darba hipotēze

Inovatīvu enerģijas akumulācijas sistēmu attīstība ir atkarīga no atjaunojamo energoresursu īpatsvara izmaiņām visu līmeņu energoapgādes sistēmās.

Promocijas darba zinātniskā novitāte

Lai īstenotu promocijas darba mērķus, veikta zinātniskā izpēte, kas balstās pakāpeniskuma principā – no vienkāršākā uz sarežģītāko. Promocijas darbā izmantotas metodikas redzamas 1. attēlā.



1. att. Darbā izmantotās metodikas.

Pētniecības gaitā izstrādātas un pielāgotās metodikas un modeļi enerģijas akumulācijas iespēju analīzei.

1. Balstoties zinātniskās literatūras analīzē, savākti inženiertehniskie, ekonomiskie, vides un klimata dati par dažādām enerģijas akumulācijas iekārtām un sistēmām un izveidota datubāze.
2. Iegūti un analizēti dati par dažādu atjaunojamās enerģijas avotu darbību atšķirīgos laika periodos un klimatiskajos apstākļos.
3. Izmantojot *TOPSIS* un *AHP* daudzkritēriju analīzes modeļi, izvērtētas un ranžētas gan enerģijas akumulācijas iekārtas, gan sistēmas.

4. Balstoties datu analīzē, sagatavota bāzes scenārija metodika AER elektroenerģijas akumulācijai, un metodika aprobežta dažādu scenāriju tehniski ekonomiskajai analīzei.
5. Izveidota klasteru metode hidroelektrostaciju (HES) funkciju paplašināšanai, akumulācijai izmantojot ūdenskrātuves vēja elektroenerģijas pārpalikumu.
6. Izveidoti divi sistēmdinamikas modeļi enerģijas akumulācijas integrēšanai mājsaimniecību energoapgādes sistēmā.

Promocijas darba praktiskais nozīmīgums

Pētniecības procesā iegūtās atziņas ir iespējams izmantot dažādās elektroenerģijas lietotāju iekārtās un sistēmās, sākot no mājsaimniecības līdz reģionālajam un valstiskajam līmenim.

Enerģijas akumulācijas sistēmu attīstība norit strauji, un liela nozīme ir zinātniskajām inovācijām un to praktiskajam lietojumam. Jebkuram enerģijas lietotājam noder promocijas darbā veikta enerģijas akumulācijas klasifikācija un tās sarindošana, ņemot vērā labāko risinājumu raksturlielumus, izmantojot daudzkritēriju analīzes metodi.

1. Elektroenerģijas un siltumenerģijas akumulācijai ir būtiska nozīme mājsaimniecības energoapgādes sistēmā. Promocijas darbā izveidotie sistēmdinamikas modeļi sniedz atbildes mājsaimniecību enerģijas patēriņam par enerģijas akumulācijas ieviešanas virzieniem (vienīgi akumulācija vai hibrīda akumulācija) un to izdevīgumu.

2. Promocijas darbā paveiktais uzņēmumu un pašvaldību līmenī ar tajā aprakstīto akumulācijas attīstības scenāriju izstrādi un plašā akumulācijas tehnoloģisko risinājumu (inženiertehniskas iekārtas vai akumulācijas sistēmas) klāsta analīzi dos iespēju nelieliem, vidējiem un lieliem enerģijas lietotājiem vērtēt enerģijas akumulācijas sistēmas vietu energoapgādes sistēmā.

3. Nacionālās enerģētikas politikas izstrādātājiem aktuāls ir jautājums par vēja elektroenerģijas pārpalikumu izmantošanu valsts līmenī. Promocijas darbā piedāvātais klasteris vēja elektroenerģijas un hidroenerģijas sabalansēšanai – uzkrāt sezonālo elektroenerģiju hidroelektrostaciju ūdenskrātuvēs – ieskicē nacionāla līmeņa alternatīvu iespēju.

Promocijas darba aprobācija

Zinātniskās publikācijas

1. Kudurs, E., Atvare, E., Dolge, K., Blumberga, D. Ranking of Electricity Accumulation Possibilities: Multicriteria Analysis. *Applied Sciences*, 2023, Vol. 13, No. 13, Article number 7349. e-ISSN 2076-3417. Pieejams: doi:10.3390/app13137349.
2. Brencē, K., Kudurs, E., Valters, K., Blumberga, D. Twinned Renewable Energy Accumulation: Case of Wind and Hydro Energy. *Environmental and Climate Technologies*, 2023, Vol. 27, No. 1, 696.–710. lpp. ISSN 1691-5208. e-ISSN 2255-8837. Pieejams: doi:10.2478/rtuct-2023-0051.
3. Atvare, E., Grāvelsiņš, A., Kudurs, E., Rozakis, S., Blumberga, D. When the Household Becomes Environmentally Friendly-Dynamic Simulation of Hybrid Energy System's

- Feasibility. *Environments*, 2023, Vol. 10, No. 9, Article number 164. e-ISSN 2076-3298. Available from: doi:10.3390/environments10090164.
4. Grāvelsiņš, A., Atvare, E., Kudurs, E., Kubule, A., Blumberga, D. System Dynamics Model of Decentralized Household Electricity Storage Implementation: Case Study of Latvia. *Smart Cities*, 2023, Vol. 6, No. 5, pp. 2553–2573. ISSN 2624-6511. Available from: doi:10.3390/smartcities6050115.

Zinātniskās konferencēs

Atvare, E., Kudurs, E., Dolge, K., Blumberga, D. Ranking of Electricity Accumulation Possibilities: Multicriteria Analysis. *CONNECT 2023: XVI International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies: 2023*.

Citas zinātniskās publikācijas

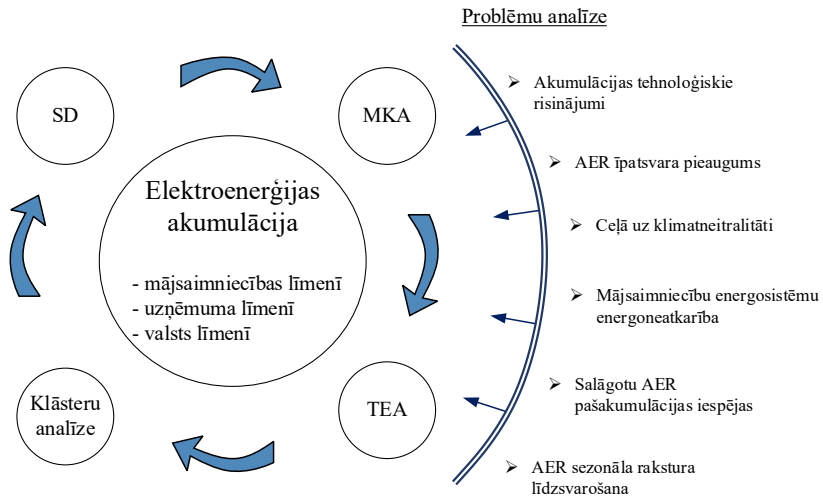
1. Edgars, K., Tukulis, A., Arnis, D., Blumberga, D. Are Industries Open for Renewable Energy?. *Environmental and Climate Technologies*, 2020, Vol. 24, No. 3, 447.–456. lpp. ISSN 1691-5208. e-ISSN 2255-8837. Pieejams: doi:10.2478/rtuect-2020-0115.
2. Blumberga, D., Balode, L., Bumbiere, K., Indzere, Z., Kudurs, E., Spalviņš, K., Vēciņa, A., Tamane, A. Zivju apstrādes efektivitātes ceļvedis. Rīga: RTU Izdevniecība, 2021. 243 lpp. ISBN 978-9934-22-595-6. Pieejams: doi:10.7250/9789934225963.
3. Vamža, I., Valters, K., Dzalbs, A., Kudurs, E., Blumberga, D. Criteria for Choosing Thermal Packaging for Temperature Sensitive Goods Transportation. *Environmental and Climate Technologies*, 2021, Vol. 25, No. 1, 382.–391. lpp. ISSN 1691-5208. e-ISSN 2255-8837. Pieejams: doi:10.2478/rtuect-2021-0028.
4. Čerdancova, L., Dolge, K., Kudurs, E., Blumberga, D. Energy Efficiency Benchmark in Textile Manufacturing Companies. *Environmental and Climate Technologies*, 2021, Vol. 25, No. 1, 331.–342. lpp. ISSN 1691-5208. e-ISSN 2255-8837. Pieejams: doi:10.2478/rtuect-2021-0024.
5. Valtere, M., Kalēja, D., Kudurs, E., Kalnbaļķīte, A., Terjaņika, V., Zlaugotne, B., Pubule, J., Blumberga, D. The Versatility of the Bioeconomy. Sustainability Aspects of the Use of Bran. *Environmental and Climate Technologies*, 2022, Vol. 26, No. 1, 658.–669. lpp. e-ISSN 2255-8837. Pieejams: doi:10.2478/rtuect-2022-0050.
6. Atvare, E., Kudurs, E., Blumberga, D. Differences in Commercialization Policies of Innovations. Customer Perspective. *Environmental and Climate Technologies*, 2022, Vol. 26, No. 1, 1020.–1031. lpp. e-ISSN 2255-8837. Pieejams: doi:10.2478/rtuect-2022-0076.
7. Pakere, I., Dolge, K., Freimanis, R., Kudurs, E., Blumberga, D. Optimizing Energy Independence for Achieving Climate Neutrality Goals. No: *9th International Conference on Smart Energy Systems: Book of Abstracts*, Dānija, Copenhagen, 12.–13. septembris, 2023. Aalborg: Aalborg University, 2023, 273.–274. lpp.
8. Blumberga, D., Bohvalovs, Ģ., Pakere, I., Kudurs, E., Laktuka, K., Blumberga, A. How to Integrate Carbon Farming in Smart District Heating Energy Systems?. No: *9th*

- International Conference on Smart Energy Systems: Book of Abstracts, Dānija, Copenhagen, 12.–13. septembris, 2023. Aalborg: Aalborg University, 2023, 250.–251. lpp.
9. Blumberga, A., Pakere, I., Bohvalovs, Ģ., Kudurs, E., Blumberga, D. When does Energy Island Transfer to Energy Community?. No: *9th International Conference on Smart Energy Systems: Book of Abstracts*, Dānija, Copenhagen, 12.–13. septembris, 2023. Aalborg: Aalborg University, 2023, 207.–208. lpp.

Promocijas darba struktūra

Promocijas darba izpēte ir virzīta uz enerģijas akumulācijas sistēmu ieviešanas problēmu uzstādījumiem un to analīzi. Aplūkotas sešas problēmas.

1. Energoapgādes sistēmā arvien vairāk fosilos energoresursus aizvieto atjaunojami energoresursi (AER), turklāt samazinās arī visu ar degšanas procesu saistīto resursu īpatsvars. Šeit liela nozīme būs enerģijas akumulācijai.
2. Akumulācijas sistēmu tehnoloģiski risinājumi strauji attīstās, un arvien lielāka ir inovāciju ietekme.
3. Visas Eiropas Savienības dalībvalstis ir apņēmušas sasniegt klimatneitralitāti jau 2050. gadā, un to nebūs iespējams veikt bez pārejas uz atjaunojamiem energoresursiem un enerģijas akumulācijas risinājumiem.
4. Mājsaimniecības energosistēmas var būt gan lielas energosistēmas sastāvdaļa, gan izveidoties par energokopienas komponenti, gan arī kļūt maza energoneatkarīga energosistēma. Viss ir atkarīgs no akumulācijas sistēmas attīstības un izvietojuma.
5. Arvien biežāk tiek aplūkota atjaunojamo energoresursu izvēle, lai salāgotu pašakumulācijas iespējas, apsverot hidroelektrostaciju ūdenskrātuvju akumulācijas iespējas.
6. Pārejot uz sezonāla rakstura atjaunojamiem energoresursiem (saule un vējš), svarīgi ir vienlaikus analizēt iespējas pagarināt elektroenerģijas ražošanas ilgumu diennakts, mēneša un gada griezumā, piemēram, attīstīt tehnoloģisko risinājumu ar augstāk novietotiem vēja ģeneratoriem.



2. att. Promocijas darba struktūra.

Promocijas darba struktūra redzama 2. attēlā.

Promocijas darbā pētīta enerģijas (vairāk elektroenerģijas) akumulācija dažādos valsts ekonomikas sektoros, sākot no nacionālā līmeņa, pašvaldības un uzņēmumu lietotāju un beidzot ar mājsaimniecības sektoru un individuālu enerģijas patērētāju.

Akumulācijas sistēmas risinājumi un iespējas analizēti ar dažādām metodikām: multikritēriju analīzi (MKA), tehniski ekonomisko analīzi (TEA), datu kopas klāsterēšanas analīzi un sistēmdinamikas modelēšanu.

1. METODIKA

1.1. Daudzkritēriju analīze, *TOPSIS* metode

Šajā pētījumā tika izmantota *TOPSIS*, daudzkritēriju analīze (*MCDA*), lai noteiktu labāko risinājumu starp elektroenerģijas uzglabāšanas tehnoloģijām.

Daudzkritēriju lēmumu analīze (*MCDA*) ir daudzpakāpju process, kas sastāv no metožu kopuma, lai pārredzamā un konsekventā veidā strukturētu un formalizētu lēmumu pieņemšanas procesus. *MCDA* metodoloģiju var uzskatīt par nelineāru rekursīvu procesu, kas ietver četrus soļus:

- lēmumu problēmas strukturēšana;
- preferenču formulēšana un modelēšana;
- alternatīvu novērtējumu (preferenču) apkopošana;
- ieteikumu sniegšana.

Novērtējot *MCDA* alternatīvas, ir svarīgi definēt kritērijus, kas ietekmē problēmu. Populārākie *MCDA* ir ekonomiskie, vides un sociālie kritēriji.

MCDA tiek izmantota, lai pieņemtu lēmumus un analizētu mērķu atbilstību, izmantojot dažādu informāciju un datus – kvalitatīvos un kvantitatīvos, fizisko un sociālo zinātņu datus, kā arī no politiku un ētiku, lai novērtētu problēmu risinājumus. Problēmu risināšanai var izmantot dažādas *MCDA* metodes, un tās var sakārtot pēc vairākiem parametriem un to modeļa veida.

TOPSIS ir pasūtījumu izvēles metode, kas balstīta līdzībās ar ideāliem risinājumiem. Tas izriet no nobīdītā ideālā punkta jēdziena, no kura kompromisa risinājumam ir visīsākais attālums. *TOPSIS* galvenās priekšrocības ir bezgalīga skaita kritēriju un alternatīvu identificēšana ar salīdzinoši vienkāršu aprēķina metodi. Turklāt, lai izmantotu šo metodi, nav nepieciešama īpaša programmatūra vai īpašas programmēšanas metodes.

TOPSIS rezultāti sniedz alternatīvu salīdzinājumu noderīgā un viegli saprotamā formātā. Novērtēšanai jāizvēlas alternatīvas, kas tiek vērtētas pēc četriem kritērijiem – tehnoloģiskā, ekonomiskā, vides un sociālā. Pirmais solis, izmantojot *TOPSIS* metodi, ir lēmumu matricas normalizācija, kam seko normalizētās lēmumu matricas labākā un sliktākā risinājuma aprēķināšana. Labākais risinājums atbilst katra kritērija vēlamā līmeņa teorētiskajam variantam, savukārt sliktākais risinājums atbilst katra kritērija vismazāk vēlamā līmeņa teorētiskajam variantam. Visbeidzot tiek aprēķināts katras alternatīvas attālums, kas tālāk ļauj iegūt ranžēšanas alternatīvu tuvuma koeficientu. Alternatīvas ierindojas no labākās līdz sliktākajai. Šajā pētījumā izmantotās *TOPSIS* metodes vienādojumi ir aprakstīti turpmāk.

- a) Normalizētās matricas vērtību var iegūt, reizinot normalizēto vērtību un svaru.
- b) Attālumu katrai ideālai un neideālai alternatīvai var aprēķināt, summējot svērto kritēriju vērtību kvadrātus.
- c) Tuvuma koeficients (C_a) parāda attālumu līdz neideālajam risinājumam, ko nosaka ar vienādojumu, dalot attālumu līdz neideālajam risinājumam ar attālumu summu līdz risinājumam, kas nav ideāls.

Lai iegūtu precīzākus rezultātus, enerģijas uzglabāšanas tehnoloģijas tika salīdzinātas divās grupās. Novērtējot tehnoloģiju mērogojamību un tehniskos parametrus, tika noteikts, ka vienā grupā tiks salīdzinātas svina-skābes, litija jonu, plūsmas un nātrija-sēra baterijas, savukārt otrā grupā – literatūrā apskatītās uzglabāšanas sistēmas, adiabatiskās saspīestā gaisa enerģijas uzglabāšanas sistēmas, diabātiskās saspīestā gaisa enerģijas uzglabāšanas sistēmas, hidroelektrostaciju akumulācija, sūkņēšanas siltuma elektroenerģijas akumulācijas tehnoloģijas, ūdeņraža enerģijas uzglabāšana zaļā amonjaka uzglabāšanas tehnoloģijas. Akumulatoriem tika noteikti deviņi salīdzināšanas kritēriji, savukārt uzglabāšanas sistēmām – astoņi kritēriji, neizvērtējot jaudas blīvumu. Kritēriju noteikšanā tika ņemti vērā tehnoloģiskie, ekonomiskie, vides un sociālie aspekti. Izveidotās matricas, definētie kritēriji un piešķirtās vērtības redzamas 1.1. un 1.2. tabulā.

1.1. tabula

Pārskats par izvēlētajiem kritērijiem akumulatoriem

Apzīmējums	Kritērijs	A1 Svina-skābes baterija	A2 Litija jonu baterija	A3 Plūsmas baterija	A4 Nātrija-sēra baterija
C1	Investīcijas, EUR/kWh	150	450	250	375
C2	Jaudas blīvums, W/kg	75	260	130	150
C3	Cikli, skaits	1750	5000	4500	4500
C4	Darbības ilgums, gadi	10	17,5	30	17,5
C5	Reakcijas laiks, s	0,003	0,003	0,003	0,003
C6	Efektivitāte, %	80	94	72,5	75
C7	Klimata ietekmes faktors, kgCO ₂ eq/kWh	0,2	0,175	0,183	0,67
C8	Tehnoloģiskā gatavība (1–5)	3	4	2	3
C9	Sociālais faktors (1–5)	2	3	1	2

Lielākā daļa skaitlisko vērtību matricā tika iegūtas pēc literatūras analīzes, pieņemot, ka vidējās vērtības ir dotajā diapazonā. Savukārt tehnoloģiskās gatavības un sociālo faktoru kritēriji tika noteikti, pamatojoties uz literatūras analīzē atrodamo informāciju, kā arī tika veikta nozares ekspertu aptauja. Šajā gadījumā kritēriji tika noteikti piecu punktu skalā, piešķirot vērtības no zemākā (1) līdz augstākajam (5). Attiecīgi enerģijas uzglabāšanas tehnoloģiju sociālais faktors tika novērtēts, pamatojoties uz to ietekmi uz ilgtspējīgu attīstību, ņemot vērā veicinošos un kavējošos faktorus, kā arī līdzdalības dimensiju un labās prakses piemērus enerģijas uzkrāšanas integrēšanai praksē. Jo pozitīvāk tehnoloģija tika novērtēta, ņemot vērā tās ietekmi uz ilgtspējīgu attīstību un komercializācijas potenciālu, jo augstāka ir piešķirtā vērtība. Tehnoloģiskā gatavība tika novērtēta, pamatojoties uz akumulatora tehnisko briedumu vai tā tuvumu plašākai komercializācijai. Attiecīgi – jo vairāk attīstīta tehnoloģija un plašāka tās pieejamība tirgū, jo augstāks vērtējums tika piešķirts. Akumulatoru investīcijas tika salīdzinātas kā īpatnējās akumulatoru investīciju izmaksas uz kWh. Jaudas blīvuma kritērijs nosaka akumulatora spēju atbrīvot enerģiju noteiktā brīdī. Akumulācijas risinājumi ar lielāku jaudas blīvumu var darbināt lielākas elektriskās slodzes ierīces. Ciklu skaits ir saistīts ar kalpošanas laiku un efektivitāti, jo šis parametrs apraksta uzlādes/izlādes ciklu skaitu, ko akumulators var nodrošināt pirms veikspējas pasliktināšanās. Reakcijas laika parametrs

raksturo laiku, kas nepieciešams, lai sistēma nodrošinātu enerģiju ar pilnu nominālo jaudu. Lai gan šis parametrs novērotajām baterijām ir vienāds, tas ir svarīgāks, lai salīdzinātu enerģijas uzkrāšanas sistēmas. Līdzīgi kā kritērijs, tika ierosināts arī klimata ietekmes

faktors, kas šajā gadījumā raksturo radīto emisiju intensitāti, ja tiek uzglabāta atjaunojamā enerģija.

1.2. tabula

Pārskats par izvēlētajiem kritērijiem uzkrāšanas sistēmām

Kritērijs	A5 Adiabātiskā Saspiestā Gaisa	A6 Diabātiskā Saspiestā Gaisa	A7 Hidro- elektro	A8 Sūkņēšanas siltuma	A9 Ūdenradis	A10 Zaļais amoniaks
C1 Investīcijas, EUR/kWh	1600	800	3400	350	750	2900
C2 Cikli, skaits	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	15000	10 ⁶	10 ⁶
C3 Darbības ilgums, gadi	30	30	80	25	17,5	30
C4 Reakcijas laiks, s	180	180	0,003	2	60	1
C5 Efektivitāte, %	70	55	77,5	72,5	30	52,5
C6 Klimata ietekmes faktors, kgCO ₂ eq/kWh	0,15	0,185	0,165	0,175	0,1137	0,003
C7 Tehnoloģiskā gatavība (1–5)	2	3	4,5	1	2	1
C8 Sociālais faktors (1–5)	2	2	3	2	5	5

Enerģijas uzkrāšanas sistēmas matrica balstījās arī uz kritērijiem, pieņēmumiem un avotiem, kas aprakstīti akumulatora matricā. Tomēr jaudas blīvuma kritērijs šeit netika novērtēts. Ņemot vērā sistēmu dažādās sastāvdaļas, šo parametru nav iespējams salīdzināt atsevišķi. Savukārt ekonomiskais aspekts šajā matricā tika noteikts kā kapitālizdevumi uz kW, ņemot vērā, ka tos galvenokārt uztver kā ilgtermiņa izdevumus. Izmantojot *TOPSIS* metodi, visiem kritērijiem tika piešķirti vienādi svāri 0,111, novērtējot akumulatora kritērijus, un 0,125, analizējot uzglabāšanas sistēmas kritērijus. Šis ir subjektīvs autora pieņēmums, lai izvairītos no kļūdām svēršanas procesā, jo šajā gadījumā, analizējot uzglabāšanas tehnoloģijas, nav iespējams atšķirt kritēriju nozīmi.

Pēc *TOPSIS* analīzes tika veikta jutīguma analīze, lai novērtētu iegūto rezultātu izmaiņas atkarībā no kritērijiem vai svāra izmaiņu noteikšanas, ņemot vērā ietekmējošos faktoros.

Jutīguma analīze ir pētniecības metode, kas nosaka, kā dažādi matemātisko modeļu nenoteiktības avoti veicina modeļa vispārējo nenoteiktību. Šo metodi izmanto noteiktās robežās, kas ir atkarīgas no viena vai vairākiem ievades mainīgajiem lielumiem. Jutīguma analīze bieži tiek izmantota biznesa pasaulē un ekonomikā. To parasti izmanto finanšu analītiķi un ekonomisti.

Lai noteiktu alternatīvo piešķirumu ietekmi uz *TOPSIS* metodes rezultātiem, tiek noteikta vienādu alternatīvu nozīme. Sākotnēji atsvari tiek iestatīti uz $w = 1/n$ (kur n ir ietekmējošo parametru skaits). Svaru, kas ir pakļauts izmaiņām, nosaka, reizinot svāra izmaiņas ar

vienveidīgu variāciju koeficientu, kas summējas līdz 1. Citu svaru sadalījums tiek mainīts, saskaņā ar 1. vienādojumu.

$$w_{k21} = w_{k31} = \frac{(1-w_{k11})}{n-1}, \quad (1)$$

kur

w_{kxx} – svars, kas var mainīties;

n – ietekmīgo parametru skaits.

Alternatīvu sākotnējie svāri tiek aizstāti ar jauniegūtajiem svāriem *TOPSIS* matricā, un pieeja tiek atkārtota ar visu noteikto kritēriju rezultātiem. Šajā darbā katram kritērijam tika veikta jutīguma analīze, mainot svāra vērtības no 0,1 līdz 0,9.

1.2. Sistēmdinamikas modelēšana

Līdz šim uzglabāšanas tehnoloģiju integrācija mājsaimniecībās Latvijā ir tuvu nullei. Trūkst apkopotu datu par īstenotajiem enerģijas uzkrāšanas projektiem. Līdz ar to ir jāanalizē arī elektroenerģijas uzkrāšanas ieviešanas Latvijas mājsaimniecībās rentabilitāte.

Ilgspējīgas enerģētikas sektora attīstībai ir nepieciešama izpratne par elektroenerģijas uzglabāšanas potenciālu, kas ir būtiska sastāvdaļa, lai izveidotu videi draudzīgu enerģētikas infrastruktūru. Tika izmantoti SD modeļi, lai analizētu elektroenerģijas akumulācijas sistēmu dinamisko uzvedību.

SD nodrošina holistisku sistēmu sarežģītu savstarpējo savienojumu izpēti sarežģītās sistēmās, ļaujot niansēti pārbaudīt atgriezeniskās saites cilpas, laika aizkavi un nelineāras attiecības. SD teorija balstās attiecību izpētē starp sistēmas uzvedību un pamatā esošo sistēmas struktūru. Tas nozīmē, ka, analizējot sistēmas struktūru, veidojas dziļāka izpratne par sistēmas uzvedības cēloņiem. Pēc autora domām, to vislabāk ir iespējams izdarīt ar SD. Jau gadu desmitiem (SD) modelēšana tiek izmantota energosistēmu pētījumos. SD modeļos var ņemt vērā četrus galvenos faktoros, ko citas modelēšanas metodes bieži ignorē: materiālu un informācijas aizkavēšanās; nelineāras attiecības, cēloņsakarība, nevis korelācija; atsauksmes sistēmā.

Darba turpinājumā atspoguļoti divi izstrādātie atsevišķi SD. Viens izmantots par bāzes modeli, lai prognozētu elektroenerģijas akumulācijas risinājumu izplatību mājsaimniecībās, pētot faktoros, kas ietekmē lēmumu pieņemšanu. Otrs – kā gadījuma analīze, kur tika pētīts ekonomiskais pamatojums akumulācijas izmantošanai mājsaimniecībās, izgaismojot finansiālos apsvērumus un ietekmi, integrējot enerģijas akumulācijas risinājumus mājsaimniecībās.

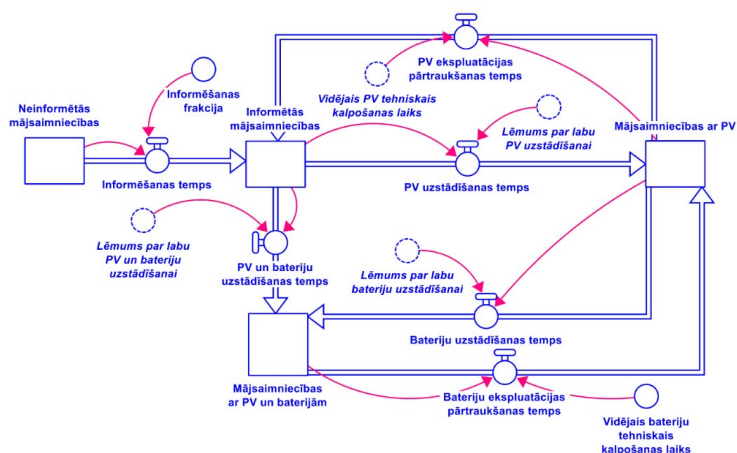
Šīs metodoloģijas nodaļas mērķis ir sniegt būtisku ieguldījumu notiekošajā diskursā par ilgtspējīgas enerģētikas vides veidošanu, izmantojot teorētisko pamatu un praktisko lietojumu sintēzi.

tehnoloģiju izplatības ierosinātājs. Mājsaimniecības, kas nav informētas, nevar pieņemt lēmumu, un tikai informētas mājsaimniecības var to darīt. Cēloņsakarības cilpas diagrammā ir redzami vairāki attīstības ceļi, ieskaitot iespēju uzstādīt tikai PV paneļus vai kombinētu PV un akumulatoru uzglabāšanas sistēmu. Lēmums tiek pieņemts, salīdzinot ekonomiskos ieguvumus, tostarp ieguvumus no katras sistēmas izvēles. Akumulatora uzstādīšanas lēmumu var pieņemt gan informētas mājsaimniecības, gan tās, kurās jau ir uzstādīti PV paneļi. Tehnoloģijas kalpošanas laika ierobežojumu dēļ ekspluatācijas pārtraukšanas izmaksas tiek iekļautas difūzijas procesa modelēšanā. Katrai tehnoloģijai ir savs kalpošanas laiks. Pēc ekspluatācijas pārtraukšanas mājsaimniecības var izvēlēties nākamo risinājumu.

SD modeļa struktūra tika izveidota, balstoties pamatprincipos, kas redzami cēloņsakarības cilpas diagrammā (1.1. att.).

Modeļa struktūra

Dinamiskās hipotēzes rezultātā Latvijas gadījuma izpētei tika izveidots SD modelis, kas paredz akumulatoru uzglabāšanas ieviešanu privātajās mājsaimniecībās. Visi ievadparametri, piemēram, saules starojums, elektroenerģijas cena, mājsaimniecību skaits u. c. izmantotie parametri, bija specifiski tieši Latvijai.



1.2. att. PV un akumulatora uzglabāšanas difūzijas apakšmodelis.

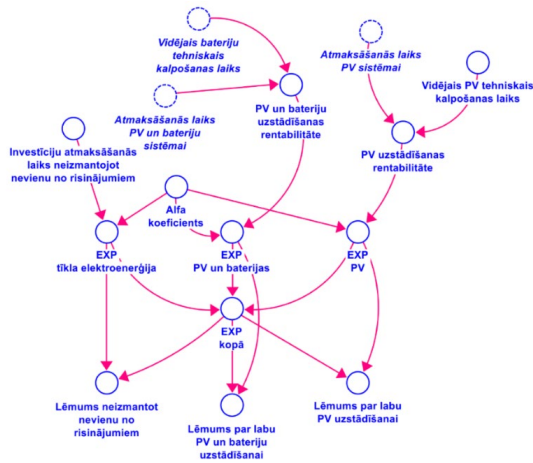
Modeļa parametru skaitliskās vērtības ir balstītas pieņēmumos, kas iegūti, analizējot statistikas datubāzes, elektroenerģijas tirgus datus, kā arī citus avotus. Modeļa struktūras centrālā daļa redzama 1.2. attēlā. Šī struktūras daļa atspoguļo galveno PV un akumulatoru sistēmas uzstādīšanas dinamiku. Svarīgs parametrs šī modeļa attīstībā ir kopējais privāto mājsaimniecību (vienģimenes ēku) skaits Latvijā. Šajā pētījumā saules PV un akumulatoru uzglabāšanas sistēmas uzstādīšana tiek izvērtēta un prognozēta vienģimenes ēkām ar PV un akumulatoru sistēmām. Balstoties statistikas datubāzē, Latvijā ir ap 200 000 privātmāju mājsaimniecību. Inventarizācijā “Neinformētas mājsaimniecības” aprakstītas tās

mājsaimniecības, kas vēl ir jāinformē par alternatīvām elektroenerģijas pašražošanai un uzkrāšanai. Kad mājsaimniecība saņem pietiekamu informāciju, tā pāriet no “neinformētas mājsaimniecības” uz “informētas mājsaimniecības” krājumu un ir gatava pieņemt lēmumu par mikroģenerāciju un uzglabāšanas īstenošanu. Šos krājumus ietekmē informācijas ātrums, kas ir atkarīgs no informējošās frakcijas, un modelī tiek pieņemts, ka tas ir 0,1. Neinformētu mājsaimniecību informēšanas rādītāju iegūst, reizinot neinformētās mājsaimniecības skaitu ar informācijas frakciju, kas apraksta ātrumu, kādā neinformētas mājsaimniecības tiek informētas par minētajām tehnoloģijām.

Attiecīgi mājsaimniecības, kas iegūst informāciju un sāk izvērtēt *PV* vai akumulatoru uzstādīšanu, pieņem lēmumu uzstādīt vienu no iespējam (*PV*, akumulatorus vai abas) vai saglabāt pašreizējo tīkla pieslēgumu bez papildu tehnoloģijām. Izejošās plūsmas raksturo informēto mājsaimniecību kopējo skaitu un attiecīgi pieņemto lēmumu. Plūsma “*PV* uzstādīšanas ātrums” modelī tiek iegūta, reizinot informēto mājsaimniecību skaitu ar investīciju lēmums jeb lēmumu skaitu par labu uzstādīšanai konkrētā risinājumā. Izejošā plūsma “*PV* un akumulatora uzstādīšanas ātrums” tiek noteikta arī saskaņā ar to pašu principu.

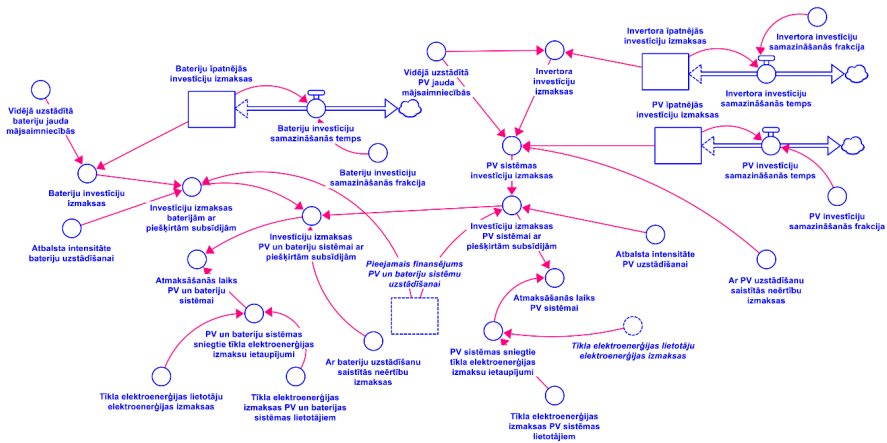
Modelis ietver arī plūsmu “Akumulatora uzstādīšanas ātrums”, kas apraksta mājsaimniecību skaitu, kas nolēmj uzstādīt akumulatoru, kad *PV* jau ir uzstādīti iepriekš, vai atkārtoti uzstādīt akumulatoru, jo akumulatora darbības laiks ir īsāks nekā *PV* sistēmas ilgums.

Krājumā “Mājsaimniecības ar *PV*” aprakstītas tās mājsaimniecības, kas ir uzstādījušas tikai *PV* paneļus. No otras puses, krājums “Mājsaimniecības ar *PV* un baterijām” apraksta tās mājsaimniecības, kas ir ne tikai uzstādījušas *PV*, bet arī pievienojušas akumulatoru. Šādu mājsaimniecību skaits publiski pieejamos datos patlaban nav uzskaitīts un analizēts. Tika pieņemts, ka šis skaitlis ir minimāls, kā sākotnējo vērtību nosakot piecas mājsaimniecības. Abus šos krājumus ietekmē arī aizplūde, kas raksturo tehnoloģijas amortizācijas laiku, ko ietekmē tehnoloģijas vidējais kalpošanas laiks. Tas nozīmē, ka pēc tehnoloģijas tehniskā kalpošanas laika beigām mājsaimniecība atgriežas iepriekšējā krājumā. Bateriju tehniskais kalpošanas laiks ir īsāks nekā *PV* darbmūžs, tāpēc mājsaimniecības ar *PV* un akumulatoriem pāriet uz krājumu “Mājsaimniecības ar *PV*” pēc bateriju tehniskā darbmūža beigām, jo tām joprojām ir strādājoši *PV*. Pēc tam tās atkal var pieņemt lēmumu par bateriju uzstādīšanu. “Mājsaimniecības ar *PV*” pēc *PV* tehniskā darbmūža beigām atgriežas krājumā “Informētas mājsaimniecības” un atkal var pieņemt lēmumu par *PV* vai *PV* un bateriju uzstādīšanu. Plūsmu “*PV* ekspluatācijas pārtraukšanas ātrums” nosaka, dalot mājsaimniecību skaitu, kurām ir specifiski tehnoloģiskie risinājumi ar konkrētās tehnoloģijas (*PV* vai akumulatora) tehnisko kalpošanas laiku (gados). Plūsma “Bateriju ekspluatācijas pārtraukšanas ātrums” arī tiek noteikta pēc identiska principa.



1.3. att. Lēmumu pieņemšanas apakšmodelis.

Lēmums par *PV* vai akumulatora sistēmas uzstādīšanu modelī tiek pieņemts, pamatojoties uz katras sistēmas atpelnišanos. 1.3. attēlā redzama modeļa struktūra, kas atbild par lēmumu pieņemšanu. Lai sistēma būtu pievilcīga, atmaksāšanās laikam jābūt mazākam par konkrētās tehnoloģijas kalpošanas laiku. Pretējā gadījumā izvēli par labu konkrētās tehnoloģijas uzstādīšanai izdarīs tikai tie, kuriem finansiālais aspekts nav izšķirošs. Lēmums par tehnoloģijas izvēli tiek aprēķināts, izmantojot “*logistic*” funkciju, kurā tiek salīdzināta visu risinājumu atpelnišanās, iekļaujot arī situāciju, kad netiek uzstādīts nekas.



1.4. att. Atmaksāšanās laika aprēķināšanas apakšmodelis.

Lēmumus par *PV* un akumulatoru sistēmu uzstādīšanu lielā mērā ietekmē nepieciešamo ieguldījumu apjoms un tehnoloģiju uzstādīšanas atmaksāšanās laiks. Investīciju izmaksas ir atkarīgas no tehnoloģijas uzstādītās jaudas. Arī atmaksāšanās laiku ietekmē piešķirtās subsīdijas un atbalsta intensitāte. No otras puses, atmaksāšanās laiku ietekmē nepieciešamie ieguldījumi tehnoloģijas uzstādīšanai, kā arī elektroenerģijas izmaksu ietaupījums. Šo

ietekmējošo parametru apakšmodelis redzams 1.4. attēlā. Atmaksāšanās laiku, ja saules paneļi tiek uzstādīti mājāsaimniecībai, nosaka *PV* paneļu investīciju izmaksas un elektroenerģijas izmaksu ietaupījums, ko attiecīgi nosaka, salīdzinot gada elektroenerģijas izmaksas ar tīkla pieslēgumu un elektroenerģijas izmaksas ar uzstādītajiem saules paneļiem. Elektroenerģijas izmaksas tīkla elektroenerģijas lietotājiem, tīkla elektroenerģijas izmaksas *PV* sistēmai un tīkla elektroenerģijas izmaksas *PV* un akumulatoru sistēmai tika aprēķinātas, izmantojot iepriekš izstrādātu modeli. Šajā pētījumā tika pieņemts, ka elektroenerģijas cena ir nemainīga visā simulācijas periodā, tāpēc tika pieņemts, ka arī tīkla elektroenerģijas izmaksas visām trim sistēmām ir nemainīgas visas simulācijas laikā. Sistēmas ar akumulāciju atmaksāšanās laiku ietekmē arī elektroenerģijas izmaksu un investīciju izmaksu ietaupījums, un to nosaka pēc tā paša principa. Bruto atmaksāšanās laiku aprēķina, dalot gala izmaksas (ietver subsīdijas, ja tādas ir piešķirtas) ar ietaupījumu, kas panākts, izmantojot specifisku tehnoloģiju. Iepriekš minētais krājums “Pieejamais finansējums *PV* un akumulatoru uzstādīšanai” nāk no apakšmodeļa ar saistītām plūsmām un parametriem. Krājumā pieejamo atbalsta apjomu ietekmē arī ienākošās finansējuma plūsmas piešķirums, kas raksturo plānoto papildu finansējumu. Pēc Ekonomikas ministrijas datiem, atbalsts tiek plānots 20 miljonu EUR apmērā, tomēr atsevišķs finansējums pieejams arī no Klimata un enerģētikas ministrijas un Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrijas. Savukārt krājumā esošo summu samazina izejošā plūsma “Fondu izlietojuma koeficients”, kas raksturo īstenoto energoefektivitātes projektu ietvaros piešķirto atbalstu. Ņemot vērā to, ka SD modelis apraksta prognozējošo situāciju, modelis neietver visus iespējamus izņēmuma gadījumus, kā arī parametri ir balstīti pieņēmumos.

Ievades dati un pieņēmumi

Šajā apakšnodaļā aprakstīti būtiskākie ievades dati un pieņēmumi, kas izmantoti SD modelī. Attiecīgie dati par tehnoloģijām tiek ņemti no tehnoloģiju katalogiem. Informācija par tehnoloģiju vidējām jaudām tiek ņemta no statistikas un zinātniskās literatūras. Informācija par mājāsaimniecībām tiek ņemta no statistikas datubāzēm. Būtiskākā informācija, kas izmantota sistēmas dinamikas modelī, apkopota 1.3. tabulā. Šie dati atspoguļo pašreizējo sistēmas situāciju un tiek izmantoti kā sākotnējās vērtības scenāriju modelēšanas modelī.

1.3. tabula

Modeļa ievades parametri

Parametrs	Vērtība	Vienība
<i>PV</i> ieguldījumu izmaksas (ar uzstādīšanu)	1100	EUR/kW
Invertora ieguldījumu izmaksas	100	EUR/kW
Akumulatora investīciju izmaksas	800	EUR/kWh
Vidējā uzstādītā mājāsaimniecības <i>PV</i> jauda	8	KWp
Vidējā uzstādītā sadzīves akumulatora ietilpība	5	kWh
Vidējais <i>PV</i> tehniskais kalpošanas laiks	35	Gadi
Vidējais akumulatora tehniskais kalpošanas laiks	20	Gadi
Vienģimenes mājāsaimniecības	198 541	skaits
Mājāsaimniecību ar <i>PV</i>	11 764	skaits

Vēsturiskie elektroenerģijas momenta cenu dati tika ņemti no *NordPool* datubāzes par 2013.–2022. gadu, lai novērtētu elektroenerģijas tūlītējās cenas izmaiņas un izlemtu par labāko vērtību, ko izmantot akumulatoru difūzijas prognožu simulācijai. Tika salīdzinātas gada vidējās vērtības. Vēsturiskie dati liecina (1.4. tab.), ka no 2013. līdz 2020. gadam ir vērojamas elektroenerģijas cenu svārstības, tomēr cena saglabājas 34 EUR līdz 50 EUR par megavatstundu. Tas ir atkarīgs arī no importētās elektroenerģijas cenas. 2021. un 2022. gads sistēmai nāca ar vairākiem satricinājumiem. Ņemot vērā to, ka Latvija vēsturiski lielāko daļu dabasgāzes importēja no Krievijas, dabasgāzes cenu kāpums pēc Ukrainas un Krievijas konflikta postoši ietekmēja enerģētikas nozari un gada vidējā elektroenerģijas cena sasniedza vēl nebijušu līmeni – 227 EUR par megavatstundu. Autors uzskata, ka, ņemot vērā daudzus vēja un saules enerģijas projektus dažādās attīstības stadijās, apvienojumā ar dabasgāzes importētāju diversifikāciju reģionā elektrības cenas samazināsies. Pētījuma vajadzībām tiek pieņemts, ka elektroenerģijas bāzes cena ilgtermiņā būs 2013.–2020. gada līmenī, nevis 2021. vai 2022. gada līmenī.

1.4. tabula

NordPool gada vidējā elektroenerģijas cena Latvijai

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Vidējā elektroenerģijas cena, EUR/MWh	48,40	50,12	41,85	36,10	34,68	49,90	46,28	34,07	88,77	226,92

Nav informācijas par to, cik daudz mājsaimniecību līdz šim ir uzstādījušas akumulatoru sistēmas, tāpēc tiek pieņemts, ka tās ir piecas un vidējā elektroenerģijas cena būs nemainīga visā simulācijas laikā. Pašreizējā pētījuma mērķis ir pārbaudīt modeļa struktūru, nevis prognozēt elektroenerģijas cenu izmaiņas, tāpēc cena tika noteikta kā nemainīga. Attiecībā uz subsīdijām tika pieņemts, ka visiem subsīdiju scenārijiem simulācijas sākumā tiks piešķirti 20 miljoni EUR (pamatojoties uz valsts plāniem) un ik pēc pieciem gadiem tiks piešķirtas jaunas finanses 20 miljonu EUR līmenī.

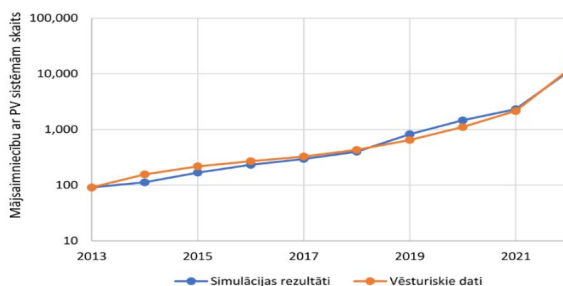
Modeļa validācija

Lai veidotu pārliecību par modeli, ir jāveic vairāki modeļa validācijas testi. Neviens modelis precīzi neatbilst reālajam modelējamajam objektam vai sistēmai, tāpēc absolūti uzticamu modeļu nav. Modeļi tiek uzskatīti par uzticamiem un derīgiem, ja tos var izmantot ar pārliecību, taču vispirms ir skaidri jādefinē modeļa mērķis.

Sistēmas dinamikas modeļa pārbaudes vai apstiprināšanas mērķis ir noteikt modeļa struktūras derīgumu. Tiek novērtēta arī modeļa reālās uzvedības reproducēšanas precizitāte, taču tas ir jēgpilni tikai tad, ja jau ir pietiekama pārliecība par modeļa struktūru. Tādējādi vispārējā loģiskā validācijas secība ir vispirms pārbaudīt struktūras derīgumu un pēc tam, kad modeļa struktūra tiek uzverta kā adekvāta, sākt pārbaudīt uzvedības precizitāti. Šī secība tika izmantota arī šajā pētījumā.

Struktūras un parametru pārbaude tika veikta, konsultējoties ar enerģētikas ekspertiem un analizējot zinātnisko literatūru, lai pārliecinātos, ka izveidotā modeļa struktūra atbilst vispārpieņemtiem principiem un ka visiem parametriem reālajā sistēmā ir atbilstošs elements. SD sakņojas inženierzinātņu teorijā, tāpēc SD modeļiem ir jānodrošina izmēru konsekvence. Dimensiju konsekvenes tests sniedza modeļa vienādojumos izmantoto parametru izmēru analīzi. Šis tests ļāva pārliecināties, ka nevienā no vienādojumiem nav iekļuvusi nejauša kļūda. Tika veikts ekstremālu apstākļu tests, lai pārliecinātos, ka modelis darbosies atbilstošā veidā pat tad, ja vērtības būs ārpus kopējā diapazona.

Tika veikti arī uzvedības validācijas testi, lai novērtētu, vai modelis var attēlot reālās dzīves sistēmas uzvedību. Lai novērtētu pietiekamību, modeļa rezultāti tika salīdzināti ar vēsturiskajiem datiem par *PV* integrāciju Latvijas mājāsaimniecībās. Kā redzams 1.5. attēlā, modelis ļoti labi raksturo *PV* integrācijas vēsturisko attīstību. Lai gan simulētie rezultāti precīzi neatbilst vēsturiskajai attīstībai, kopējā tendence ir ļoti līdzīga, un tas vairo uzticību modelim.



1.5. att. Modeļa validācija ar vēsturiskajiem datiem *PV* uzstādīšanai.

Akumulatoru ieviešanas vēsturisko attīstības tendenci nevar salīdzināt, jo līdz šim akumulatoru uzstādīšana mājāsaimniecībās Latvijā tikpat kā nav notikusi, tāpēc nav iespējams salīdzināt. Pamatojoties uz vēsturiskajām akumulatoru cenām, tehnoloģiju parametriem un elektroenerģijas cenām, modeļa rezultāti parādīja, ka laika posmā no 2013. līdz 2022. gadam praktiski netika uzstādītas akumulatoru sistēmas, jo lielākoties atmaksāšanās laiks bija daudz lielāks nekā akumulatora kalpošanas laiks. Tas arī izskaidro, kāpēc šajā periodā Latvijā gandrīz nebija uzstādītas bateriju sistēmas.

Scenāriju definēšana

Šajā apakšnodaļā analizēti pētījumā izmantotie scenāriji, aprakstot, kāds politikas pasākums tika izvēlēts testēšanai un kādi jutīguma parametri tika izvēlēti.

Pētījuma galvenais mērķis bija izveidot un validēt sistēmas dinamikas modeli, kas ļauj prognozēt *PV* un akumulatoru sistēmu ieviešanu nākotnē. Lai pārbaudītu apstiprināto modeli, tas tika papildināts ar vienu politikas pasākumu – subsīdijām. Pētījuma galvenais mērķis bija izveidot un apstiprināt SD modeļa pamatstruktūru, nevis analizēt un novērtēt optimālo veidu, kā veicināt akumulatoru uzglabāšanas difūziju mājāsaimniecību sektorā, tāpēc tika pārbaudīts tikai viens politikas pasākums. Nākotnē pētniecības modeli var papildināt ar papildu politikas instrumentiem, lai pārbaudītu to ietekmi uz akumulatoru sistēmu integrāciju mājāsaimniecībās.

Šajā pētījumā tika izstrādāti četri atsevišķi scenāriji. Pamatscenārijs raksturo sistēmu, kurā netiek īstenotas nekādas papildu rīcībpolitikas, izņemot tās, kas jau pastāv pašreizējā energosistēmā. Tas galvenokārt ir saistīts ar neto uzskaiti mājsaimniecībām, kas ir uzstādījušas PV sistēmas. Tas būtībā nozīmē, ka sadales tīkls darbojas kā krātuve. Priekšrocība ir zemāka elektroenerģijas cena, atgūstot saules enerģijas pārpalikumu. Kad uzkrātais saules enerģijas pārpalikums tiek izņemts atpakaļ no tīkla, pilna elektroenerģijas tarifa vietā jāmaksā tikai sadales sistēmas operatora tarifs. Tas tiek ņemts vērā, aprēķinot katras sistēmas izmaksas (tikai tīkla elektroenerģija, PV, akumulators, PV un akumulators).

Ir trīs atsevišķi subsīdiju scenāriji (1.5. tab.). Katrs no tiem ietver jau esošo politiku, kas minēta iepriekš, un papildus nodrošina subsīdijas konkrētu tehnoloģiju ieviešanai. Galvenā atšķirība starp scenārijiem ir tehnoloģija, kas saņem subsīdijas, un pieejamā finansiālā atbalsta apjoms. Scenārijiem, kuros subsīdijas saņem tikai viena tehnoloģija, finansējuma apjoms ir 20 miljoni EUR ik pēc pieciem gadiem, savukārt, kad abas tehnoloģijas saņem subsīdijas, 20 miljoni EUR tiek piešķirti atsevišķi katrai tehnoloģijas ieviešanai.

1.5. tabula

Scenārija apraksts, tehnoloģija, kas saņem subsīdijas

Scenārijs	PV	Akumulatori	Finansējums, M EUR	Atbalsta intensitāte, %
1. scenārijs			0	0
2. scenārijs	X		20	50
3. scenārijs		X	20	50
4. scenārijs	X	X	2 × 20	50

Jutīguma analīze

Lai pārbaudītu modeļa jutīgumu pret dažādu parametru izmaiņām, tika veikta jutīguma analīze. Elektroenerģijas tarifs, akumulatora tehniskais kalpošanas laiks, akumulatora sākotnējās investīcijas un akumulatora investīciju samazinājuma daļa tika izvēlēti kā četri parametri, kas visvairāk ietekmē modeļa rezultātus. 1.6. tabulā parādīti intervāli, kas pārbaudīti jutīguma analīzē. Jutīguma analīzes rezultāti tiek parādīti rezultātu sadaļā. Jutīguma analīze tika veikta katram parametram atsevišķi. Parametriem, kas apkopoti 1.4. tabulā, tika pārbaudīts konkrētais intervāls, citiem parametriem tika izmantotas 1.3. tabulā norādītās vērtības.

1.6. tabula

Jutīguma analīzes parametri

Parametrs	Mērvienība	Zemākā vērtība	Lielākā vērtība
Elektroenerģijas tarifs	EUR/MWh	30	150
Akumulatora tehniskais kalpošanas laiks	Gadi	10	30
Akumulatora sākotnējie ieguldījumi	EUR/kWh	600	1000
Akumulatora investīciju samazināšanas frakcija	%/gadā	0,5	3

Sistēmdinamikas modeļa simulācija hibrīdai energosistēmai mājāsaimniecībā

Izpētes modeļa struktūra

Mājāsaimniecību elektroenerģijas patēriņš ir dinamiska problēma. Tāpēc, lai novērtētu enerģijas uzkrāšanas sistēmu uzstādīšanas rentabilitāti privātajās mājāsaimniecībās Latvijā, tika izmantota SD modelēšanas metode. Kā minēts, kopumā SD modeļa izstrādes process ietver vairākus secīgus soļus. Šie soļi ietver problēmas formulēšanu, kas ir dinamisku hipotēžu identificēšana, kas izskaidro problēmas cēloņus, modeļa formulēšanu un simulāciju, kas nozīmē modeļa testēšanu, lai novērtētu tās atbilstību reālajai situācijai, kā arī politikas formulēšanu un secinājumu formulēšanu.

Šajā pētījumā tika izstrādāts ikstundas patēriņa modelis, lai analizētu elektroenerģijas izmaksas: (1) standarta tīklam pieslēgtai sistēmai; (2) saules paneļu sistēmai ar neto uzskaiti; (3) tīklam pieslēgtai sistēmai ar uzstādītu akumulatoru; (4) tīklam pieslēgtai sistēmai ar kombinētu *PV* un akumulatora uzglabāšanas sistēmu. Modelēšana tika veikta, izmantojot *Stella Architect* programmatūru.

Modeļa mērķis ir noteikt bateriju uzglabāšanas sistēmas uzstādīšanas rentabilitāti, ņemot vērā mājāsaimniecības kopējo elektroenerģijas patēriņa profilu. *PV* sistēmas algoritms ar neto uzskaiti mājāsaimniecībai darbojas pēc šāda principa – kad saules paneļi rada vairāk enerģijas, nekā sadzīves tehnika var nekavējoties patērēt, elektroenerģijas pārpalikums tiek automātiski ievadīts koplietošanas tīklā. Tīklā ievadītās elektroenerģijas daudzumu var kreditēt un izmantot, lai kompensētu patēriņu vēlāk atskaites gada laikā. Tomēr neto uzskaites pārskata perioda beigās uzkrātais elektroenerģijas pārpalikums tiek atiestatīts, un tiek sākta jauna uzskaites bilance. Savukārt, pievienojot akumulatoru saražotās enerģijas uzkrāšanai iepriekšminētajai sistēmai, ir iespējams nodrošināt lielāku neatkarību no tīkla savienojuma, kā arī gūt ekonomisku labumu, efektīvi izmantojot akumulatora iespējas. Šajā sistēmā, kad tiek saražots vairāk enerģijas nekā mājāsaimniecība var patērēt jebkurā brīdī, elektroenerģijas pārpalikums galvenokārt tiek uzkrāts akumulatorā, un tas sistēmā notiek automātiski. Šajā gadījumā elektroenerģijas iegāde no tīkla ir nepieciešama tikai brīžos, kad no *PV* sistēmas ir nepietiekama enerģijas ražošana un nepietiekama akumulatora padeve, lai segtu slodzi. Modelis ietver arī to, ka akumulatoru rentablākai izmantošanai var uzlādēt no tīkla, kad tas ir ekonomiski pamatoti.

Modeļa komponenti un parametri

Galvenie faktori, kas ietekmē elektroenerģijas izmaksas un mājāsaimniecību patēriņa profilus dažādām sistēmām, SD modelī tiek attēloti kā dažādi elementi – krājumi, plūsmas un atgriezeniskās saites cilpas. Šo elementu vērtības tiek definētas, izmantojot matemātiskus vienādojumus un konstantes. Dinamiskās sistēmas ikstundas modelī tiek pieņemts, ka mājāsaimniecību patēriņa profils ir balstīts ievades datos, kas iegūti no 2021. gadā izstrādātā SD modeļa, lai pētītu agregatoru potenciālu samazināt atjaunojamās enerģijas pārpalikumu Latvijā. Modelis paredz ikstundas elektroenerģijas cenas, pamatojoties uz 2021. gada vēsturiskajiem rādītājiem *NordPool* elektroenerģijas tirgū, uzskatot, ka tās norāda elektroenerģijas cenu

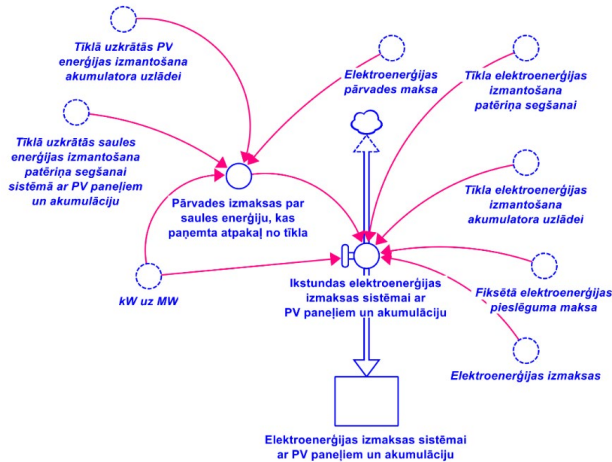
tendences nākamajā desmitgadē. Lai gan elektroenerģijas un gāzes cenas patlaban ir kritušās, salīdzinot ar 2022. gadu, šie pieņēmumi vienmēr ir tik būtiski, jo gaidāmas izmaiņas sadales sistēmas pakalpojumu tarīfos – inflācijas dēļ palielināsies tarifu maksa klientiem, palielināsies arī pārvades tarīfs, kā arī jāņem vērā ģeopolitiskie apstākļi un ilgtermiņa nākotnes prognozes. Turklāt, lai noteiktu modeļa rezultātu jutīgumu no ievades datiem, izstrādes process ietver salīdzinājumu ar 2019. un 2022. gada ikstundas elektroenerģijas cenu datiem.

Modelī tiek izveidotas atsevišķas SD struktūras visiem analizētajiem mājsaimniecības elektroenerģijas sistēmas variantiem: (1) standarta tīklam pieslēgtai sistēmai; (2) PV sistēmai ar neto uzskaiti; (3) tīklam pieslēgtai sistēmai ar integrētu akumulatora enerģijas uzkrāšanu; (4) tīklam pieslēgtai sistēmai ar PV un integrētu akumulatora enerģijas uzkrāšanu. Šie varianti ir balstīti līdzīgās pamatstruktūrās, tāpēc metodoloģijas apakšnodaļā detalizēti aplūkota tikai ceturrtā sistēma (kā visaptverošākā, kurā aplūktas visas iespējamās apakšsistēmas).

Lai noteiktu elektroenerģijas izmaksas, kas radušās konkrētajā mājsaimniecības profilā, elektroenerģijai, kas iepirkta, izmantojot tīkla pieslēgumu, tiek izmantots NordPool ikstundas cenas tarīfs 2021. gadam. Tiek ņemta vērā arī fiksētā elektroenerģijas pieslēguma maksa, kas saskaņā ar sadales operatora datiem ir 3,87 EUR/mēnesī attiecīgajam mājsaimniecības profilam. Modelis ietver arī elektroenerģijas pārdošanas maksu (2,68 EUR/MWh), elektroenerģijas pārvades maksu (40,76 EUR/MWh) un PVN elektroenerģijai (21 %). Šīs vērtības tiek pieņemtas, balstoties ekvivalento mājsaimniecību profilu izmaksās Latvijā konkrētajā periodā saskaņā ar tādu elektroenerģijas komersantu kā *Elektrum*, *Enefit* u. c. tirgus piedāvājumiem.

Akumulatora izmērs ir būtisks sistēmas parametrs. Kā uzsver Zhang Z. u. c., pārāk bieža izlāde zemā līmenī vai, gluži pretēji, pārāk reta pilna uzlāde abos gadījumos izraisa sistēmas kalpošanas laika saīsināšanos. Akumulatora ietilpības noteikšanai tiek veikta papildu modeļa optimizācija. Izvērtējot uzstādīto PV paneļu daudzumu un jaudu pēc iegūtajiem optimizācijas rezultātiem, tiek secināts, ka konkrētajai mājsaimniecībai optimāli ir uzstādīt akumulatoru ar 5 kWh elektroenerģijas jaudu, lai segtu nakts slodzi. Tiek ņemts vērā arī tīklā nodotais elektroenerģijas daudzums dienā. Pamatojoties uz autora izstrādātajiem iepriekšējiem pētījumiem, kuros tika salīdzinātas dažādas uzkrāšanas alternatīvas, modelis ietver litija jonu akumulatoru kā labāko risinājumu elektroenerģijas uzglabāšanai mājsaimniecībās. Modelī ir iekļauti vairāki akumulatoru tehnoloģiskie parametri, piemēram, uzlādes/izlādes efektivitāte, vidējais kalpošanas laiks un enerģijas uzglabāšanas ilgums.

SD modeļa struktūrā mājsaimniecības saules paneļu un litija jonu akumulatoru sistēmas kopējās elektroenerģijas izmaksas ir aprakstītas krājumā: elektroenerģijas izmaksas ar saules paneļiem un akumulatoru (1.6. att.). Šīs izmaksas ietekmē ienākošā plūsma, t. i., ikstundas izmaksas par elektroenerģiju ar fotoelementu un akumulatoru, kas ir atkarīgas no elektroenerģijas tarifa, fiksētās elektroenerģijas pieslēguma maksas, saules enerģijas, kas tiek paņemta atpakaļ no tīkla, piegādes (pārvades) izmaksām un elektroenerģijas daudzuma, kas izmantots no tīkla, lai uzlādētu akumulatoru un segtu patēriņu.



1.6. att. Elektroenerģijas izmaksu apakšmodelis sistēmai ar saules paneļiem un akumulatoru.

Ikstundas elektroenerģijas izmaksas sistēmai ar *PV* un akumulatoru nosaka 2. vienādojums.

$$EC_h = C_{connect.} + (EA_{cons.} + EA_{accum.}) \cdot \frac{C_{electr.}}{Coeff_{transf.}} + C_{deliv.}, \quad (2)$$

kur

EC_h – ikstundas izmaksas par elektrību ar *PV* un akumulatoru, EUR/h;

$C_{connect.}$ – fiksēta elektroenerģijas pieslēguma maksa, EUR/h;

$EA_{cons.}$ – tīkla elektroenerģijas izmantošana, lai segtu patēriņu, kW;

$EA_{accum.}$ – izmantojot elektroenerģiju no tīkla, lai uzlādētu akumulatoru, kW;

$C_{electr.}$ – elektroenerģijas tarifs, EUR/MWh;

$Coeff_{transf.}$ – transformācijas koeficients no kW uz MW, kW/MW;

$C_{deliv.}$ – no tīkla atgūtās saules enerģijas piegādes izmaksas, EUR/h.

Elektroenerģijas daudzumu, ko izmanto no tīkla, lai segtu akumulatora uzlādi par izdevīgākām cenām, nosaka 3. vienādojums. Kā minēts iepriekš, akumulators tiek uzlādēts no tīkla, ja piecu stundu laikā netiek izpildīts zemākās cenas nosacījums, ņemot vērā arī pieejamo akumulatora uzlādes jaudu, un uzkrātā saules enerģija ir pietiekama, lai veiktu akumulatora uzlādi.

$$EA_{accum.} = IF (N_{lowest\ price} = 0) THEN 0 ELSE (J_{network} \cdot N_{PV}), \quad (3)$$

kur

$EA_{accum.}$ – izmantojot elektroenerģiju no tīkla, lai uzlādētu akumulatoru, kW;

$N_{lowest\ price}$ – zemākās cenas nosacījums akumulatora uzlādei no tīkla;

$J_{network}$ – pieejamā akumulatora uzlādes jauda, uzlādei izmantojot elektroenerģiju, kas ņemta no tīkla, kW;

N_{PV} – *PV* enerģijas pietiekamības nosacījums akumulatora uzlādēšanai no tīkla.

No tīkla (no uzkrāšanas) atgūtās saules enerģijas piegādes izmaksas ietekmē atgūtais elektroenerģijas daudzums mājsaimniecības tūlītējam patēriņam, uzkrātās elektroenerģijas

daudzums, kas izmantots akumulatora uzlādēšanai, un elektroenerģijas pārvades maksa (kā minēts iepriekš, 40,76 EUR/MWh). Kopējās piegādes izmaksas par uzkrātās saules enerģijas izņemšanu no tīkla modelī attēlotas 4. vienādojumā.

$$C_{deliv.} = (U_{network} + EA_{PV\ accum.}) \cdot \frac{C_{transm.}}{Coef_{transf.}}, \quad (4)$$

kur

$C_{deliv.}$ – piegāde (no tīkla atgūtās saules enerģijas pārvades izmaksas, EUR/h);

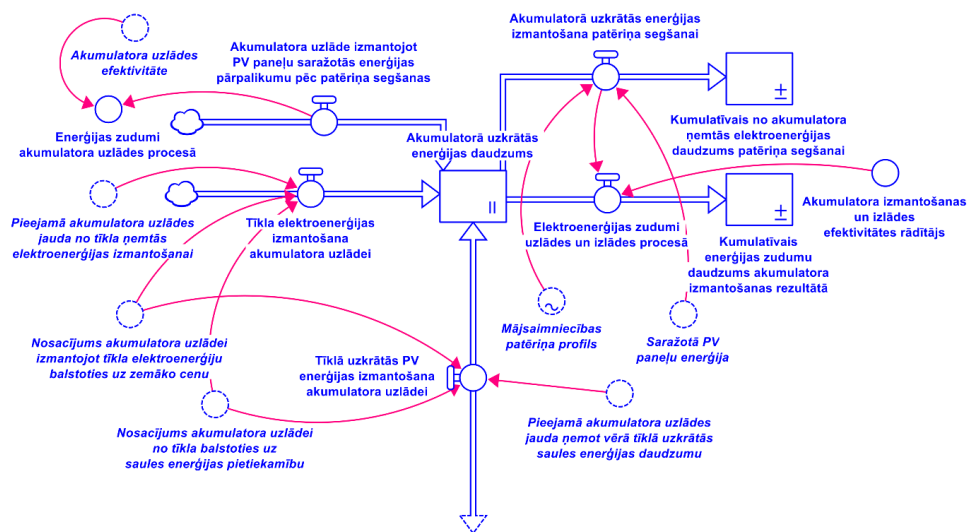
$U_{network}$ – uzkrātās saules enerģijas daudzums, kas patērēts no tīkla, kW;

$EA_{PV\ accum.}$ – izmantojot tīklā uzkrāto PV elektroenerģiju, lai uzlādētu akumulatoru, kW;

$C_{transm.}$ – elektroenerģijas pārvades maksa, EUR/MWh;

$Coef_{transf.}$ – transformācijas koeficients no kW uz MW, kW/MW.

Tālāk tika noteikts katrai gada stundai uzkrātās enerģijas daudzums, kas parādīts apakšmodelī (akumulatorā uzkrātās enerģijas daudzums, 1.7. att.). Turklāt, ņemot vērā tīklā uzkrāto saules enerģijas daudzumu, modelis ietver to, ka pieejamo akumulatora uzlādes jaudu ietekmē akumulatora uzlādes efektivitāte, kas, pamatojoties uz literatūrā atrodamajiem datiem, tika pieņemta 0,98.



1.7. att. Daļa no apakšmodeļa. Akumulatorā uzkrātās enerģijas daudzums.

Krājumus, kas atspoguļo akumulatorā uzkrātās enerģijas daudzumu, ietekmē plūsma, kas raksturo akumulatora uzlādes frakciju, izmantojot saules paneļu enerģijas pārpalikumu pēc mājsaimniecības patēriņa segšanas. Šī plūsma ir atkarīga no pieejamās akumulatora uzlādes jaudas, ņemot vērā saules paneļu enerģijas pārpalikuma pieejamību pēc patēriņa pārklājuma. Turklāt krājumus ietekmē ienākošā plūsma, kas apraksta elektroenerģijas daudzumu, kas tiek izmantots akumulatora uzlādēšanai no tīkla. Tādējādi akumulators galvenokārt tiek uzlādēts, pamatojoties uz saules enerģijas pietiekamību un pieejamo akumulatora uzlādes jaudu. Pēc tam

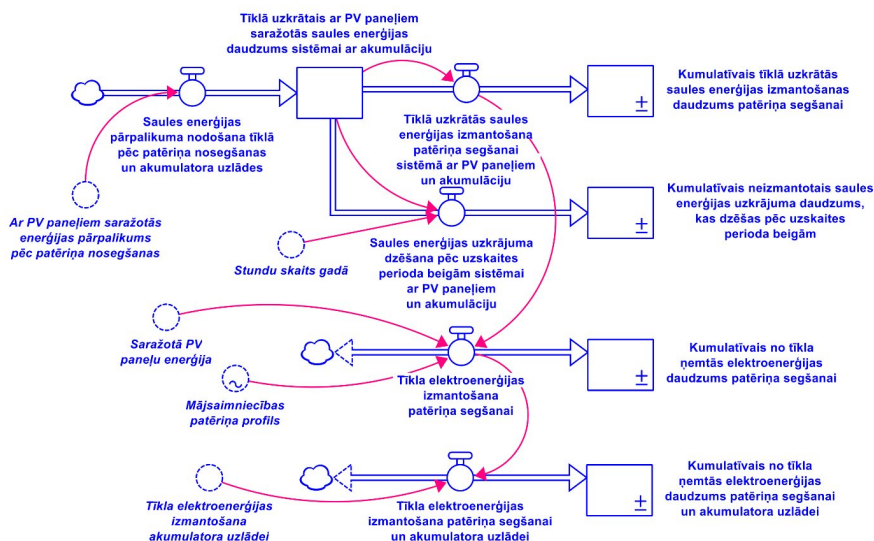
tas tiek uzlādēts, izgūstot uzkrāto enerģiju no tīkla, un, visbeidzot, kad tas ir ekonomiski pamatoti, akumulators tiek uzlādēts no tīkla.

Uzkrātā saules paneļu enerģija, kas uzkrāta tīklā un ko izmanto akumulatora uzlādēšanai, arī ir ienākošā plūsma, un tās ietekmi var raksturot līdzīgi kā iepriekšējās plūsmas. Tomēr šajā gadījumā pieejamās tīkla elektroenerģijas vietā uzkrātās enerģijas daudzums ir atkarīgs no tīklā uzkrātā saules enerģijas daudzuma.

Akumulatorā uzkrāto enerģijas daudzumu ietekmē arī izejošās plūsmas. Uzkrātās enerģijas daudzums akumulatorā samazinās, ja patēriņš tiek segts, izmantojot akumulatorā uzkrāto enerģiju.

Elektroenerģijas zudumi ietekmē arī uzkrātās un pārnestās enerģijas daudzumu, kas modelī tika aprakstīts kā izejošā plūsma no akumulatorā uzkrātā enerģijas daudzuma.

Vispārējais apakšmodelis, kas apraksta saules paneļu un enerģijas uzkrāšanas sistēmu, ietekmē arī tīklā ievadītās un uzglabātās saules paneļu enerģijas frakciju. Šī modeļa daļa redzama 1.8. attēlā.



1.8. att. Saules paneļu pārpalikuma uzkrāšanās tīklā apakšmodelis un tā turpmāka izmantošana.

Krājumus, t. i., saules paneļu enerģiju, kas tiek pārvadīta tīklā ar uzglabāšanas sistēmu, ietekmē iepriekš aprakstītā plūsma, t. i., uzkrātā saules paneļu enerģija, kas uzkrāta tīklā un ko izmanto akumulatora uzlādēšanai, kā arī ienākošā plūsma, kas veido lieko enerģiju, kas pārvadīta tīklā pēc patēriņa un akumulatora uzlādes, ņemot vērā arī elektroenerģijas zudumus.

Tīklā uzkrātās enerģijas apjomu ietekmē arī izejošās plūsmas. Šajā apakšmodelī tīklā uzkrāto enerģiju izmanto, lai apmierinātu mājsaimniecības patēriņu, ko atspoguļo plūsma, t. i., saules enerģijas daudzums, kas ņemts no tīkla patēriņam PV sistēmā ar uzglabāšanu.

Saules paneļu un elektroenerģijas akumulācijas sistēmas apakšmodelī ir ņemts vērā arī uzglabāšanas degradācijas koeficients uzskaites perioda beigās, kas raksturo zaudētās enerģijas

daudzumu. Šajā apakšmodelī šo aspektu raksturo plūsma, t. i., uzglabāšanas degradācija uzskaites perioda beigās saules paneļu sistēmai ar uzglabāšanu, ko ietekmē stundu skaita parametrs gadā, kā arī tīklā pārvadītās saules paneļu enerģijas apjoms.

1.3. Algoritms datu apkopošanai un kritiskai analīzei, aprēķiniem un prognozēšanai

Lai raksturotu pašreizējo energoapgādes sistēmu Latvijā, tika kritiski pārskatīta un analizēta zinātniskā literatūra, ziņojumi, politikas plāni, attīstības tendences un nākotnes prognozes. Lai izpētītu sakarības starp laikapstākļiem un elektroenerģijas ražošanas intensitāti, tika izmantotas analītiskās metodes, apkopojot un interpretējot no oficiālajām datubāzēm iegūtos datus. Tika izmantotas arī klasteru analīzes metodes un aprakstošās analīzes metodes, piemēram, vidējā aritmētiskā pieeja un procentuālais sadalījums.

Valsts energoapgādes sistēmu raksturoja pieejamā vietējā elektroenerģijas ražošanas jauda, kopējais valsts elektroenerģijas patēriņš un pieejamie energoresursi (fosilais kurināmais un atjaunojamie energoresursi). Lai novērtētu no atjaunojamiem energoresursiem (saules, ūdens, vēja) saražotās elektroenerģijas uzkrāšanos, bija jāizvērtē pašreizējā kopējā uzstādītā ģenerācijas jauda, kopējā saražotā elektroenerģija un tās sadalījums pa avotiem. Lai noteiktu elektroenerģijas pārpalikumu, tika aprēķināta saražotās elektroenerģijas bilance pret patēriņu. Elektroenerģijas bilance tika izvērtēta dažādos laika intervālos, lai noteiktu elektroenerģijas uzkrāšanas potenciālu Latvijā.

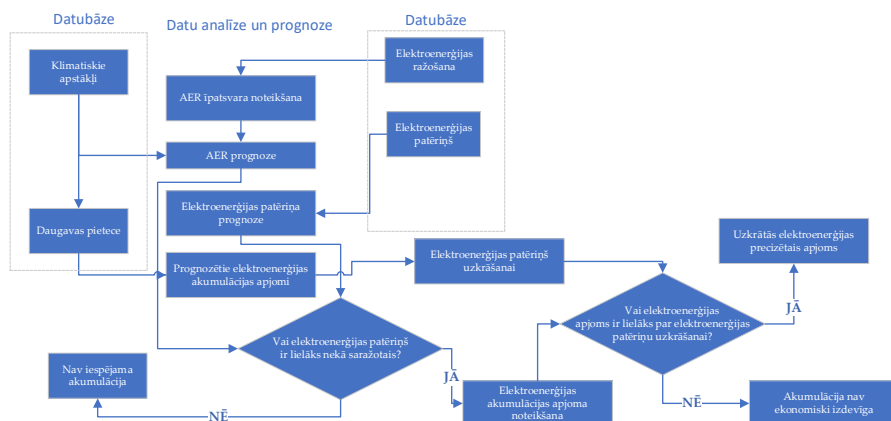
Lai raksturotu Latvijas energoapgādes sistēmu, kā ievades datu avoti tika izmantoti Centrālās statistikas pārvaldes, AS “Latvenergo”, AS “Augstsprieguma tīkls” (elektroenerģijas tirgus pārskati) dati un Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra (LVĢMC) laikapstākļu novērojumi un pētījumi.

Veicot novērtējumu, analīzi un aprēķinus, tika izmantoti šādi ievades dati:

- Latvijas elektroenerģijas ražošanas jaudas sadalījumā pa enerģijas avotiem (gadā) – informācija par dažādu veidu elektroenerģijas ražošanas avotu uzstādītajām jaudām Latvijā. Šie dati sniedz pārskatu par valsts elektroenerģijas ražošanas potenciālu no katra enerģijas avota;
- kopējā Latvijā saražotā elektroenerģija – dati par kopējo Latvijā saražoto elektroenerģiju, kas mērīti dažādos laika intervālos, tai skaitā gada, mēneša, dienas un stundas līmenī;
- kopējais elektroenerģijas patēriņš Latvijā – statistikas dati par kopējo elektroenerģijas patēriņu Latvijā, ko mēra dažādos laika intervālos, tai skaitā gada, mēneša, dienas un stundas līmenī. Šie dati atspoguļo elektroenerģijas pieprasījumu valstī noteiktos laika periodos;
- AER energoresursu saražotās elektroenerģijas īpatsvars saražotajā elektroenerģijā.
- Daugavas caurplūdums (m^3/s) – dati par Daugavas caurplūdumu, kas ir nozīmīgs hidroelektroenerģijas ražošanai;
- vēja ātrums (m/s) – dati par vidējo vēja ātrumu Latvijā, lai novērtētu enerģijas ražošanu, izmantojot vēju.

Latvijas elektroenerģijas ražošanas profila izvērtējums sākas ar esošās ražošanas jaudas novērtējumu, apskatot galvenos elektroenerģijas ražošanas avotus un to potenciālu Latvijā. Ņemot vērā gan ES, gan Latvijas klimatneitralitātes mērķus, bija nepieciešams veikt energoapgādes izvērtējumu no atjaunojamo energoresursu izmantošanas perspektīvas, izvērtējot AER īpatsvaru Latvijas kopējā elektroenerģijas patēriņā un tā potenciālo pieaugumu nākotnē. Ņemot vērā to, ka AER pēc būtības ir periodiski, bija svarīgi izvērtēt arī elektroenerģijas uzkrāšanas iespējas pārprodukcijas periodos, lai apmierinātu Latvijas elektroenerģijas patēriņu. Latvijas energoapgādes novērtējums tika veikts pēc šādas metodikas (1.9. att.):

- 1) Latvijas esošās AER jaudas un ražošanas novērtējums, balstoties klimatiskajos apstākļos;
- 2) AER īpatsvars (%) elektroenerģijas ražošanā;
- 3) elektroenerģijas ražošanas un patēriņa tendences Latvijā pa gadalaikiem, darba dienām un nedēļas nogalēm, kā arī stundu svārstībām;
- 4) no AER saražotās elektroenerģijas pārpalikuma uzkrāšanas iespējas;
- 5) nākotnes iespējas un prognozes AER jaudas palielināšanai un elektroenerģijas ražošanai, kā arī nākotnes elektroenerģijas uzkrāšanas potenciāls Latvijā teritorijā.



1.9. att. Elektroenerģijas ražošana un patēriņš, klimatiskie apstākļi un Daugavas plūsmas datu analīzes algoritms, lai novērtētu elektroenerģijas pārpalikuma potenciālu Latvijā.

1.4. Tehniski ekonomiskā analīze elektroenerģijas akumulācijas risinājumiem uzņēmumiem

Dati un pieņēmumi. Situācijas raksturojums

Elektroenerģijas akumulācijas sistēmu uzstādīšana uzņēmumos, kuru pamatmērķis ir peļņas gūšana no saimnieciskās darbības, visbiežāk tiek izvērtēta no ekonomiskā, drošības un ilgtspējīga biznesa viedokļa. Šajā pētījumā tiek analizēta un izvērtēta investīciju projekta atpelnīšanās. Darba gaitā tika definēts pētījuma jautājums, vai šādiem projektiem bruto

atpelnīšanās periods ir 10 gadu robežās ar un bez atbalsta. Šāds termiņš pieņemts, balstoties līdzīgu tehnoloģisko investīciju projektu biznesa plānos, piemēram, saules elektrostacijas. Svarīgs faktors pieņemtajam periodam ir arī tas, ka ESS tehnoloģijas strauji attīstās, kas dinamiskā uzņēmējdarbības vidē neļauj investēt projektos ar garāku atpelnīšanās periodu. Lai veiktu šādu analīzi, ir jāņem vērā raksturlielumu kopums, kas dotu rezultātu ar augstu precizitātes pakāpi. Pētījumā ir izmantoti gan tehnoloģiskie un kapitālieguldījumu parametri, gan arī elektroenerģijas publiskā tīkla un biznesa iestatījumu lielumi. Tehnoloģija ir izvēlēta, balstoties iepriekš izstrādātā daudzkritēriju analīzes modeļa rezultātos – litija jonu akumulatori kā pamats elektroenerģijas akumulācijas sistēmām. Šis pētījums attiecas uz elektroenerģijas tirgus apstākļiem Latvijas teritorijā, taču, mainoties parametru vērtībām, ir izmantojams arī citās valstīs. Pētījumā netiek ņemti vērā peļņas scenāriji no AS “AST” balansēšanas pakalpojumiem. Hibrīdu sistēmu gadījumos arī netiek ņemti vērā zaļās izcelsmes sertifikātu pārdošanas mehānismi.

Elektroenerģijas akumulācijas risinājumu izmantošanas atpelnīšanās perioda aprēķina modelim izmantoti dažādi ietekmējošie parametri. Šie raksturlielumi tiek iedalīti divās grupās (1.10. att.).

1. Konstantie parametri, kas biznesa modelī ir nemainīgi un mainās reti

- 1.1. Saules paneļu saražotās elektroenerģijas invertoru konversijas un sistēmu zudumi un/vai lietderības koeficienti.
- 1.2. Litija ESS līdzstrāvas “turp-atpakaļ” konversijas un sistēmu zudumi un/vai lietderības koeficienti.
- 1.3. 0,4kV zema sprieguma (ZS) – 20kV vidēja sprieguma (VS) konversijas lietderība ar kabeļu zudumiem.
- 1.4. Periods – nedēļu skaits gadā.
- 1.5. Elektroenerģijas tirgotāja komisija gan par pirktu, gan arī par pārdoto elektroenerģiju.
- 1.6. AS “Sadales tīkli” elektroenerģijas ražotāju tarifs (par eksportēto jaudu).
- 1.7. AS “Sadales tīkli” līnijas jaudas uzturēšana.
- 1.8. AS “Sadales tīkli” līnijas pārvades tarifi.

2. Mainīgie parametri

- 2.1. Darba dienu skaits gadā.
- 2.2. Maksimumstundu (dārgu) skaits dienā.
- 2.3. Dienas (bāzes) stundu skaits dienā.
- 2.4. Elektroenerģijas bāzes cena pieņemta (diena).
- 2.5. Litija ESS izmaksas (līdzstrāvas daļa, montāžu, dabas resursu nodoklis).
- 2.6. Litija ESS izmaksas liela mēroga > 2,5 MWh (20/40 ft konteineri).
- 2.7. Litija ESS līdzstrāvas – 0,4 kV zema sprieguma konversijas mezglu izmaksas
- 2.8. Litija LFP “B” šķiras šūnu ESS resursi 0–100 % DoD.
- 2.9. ST 20kV jaunu pieslēgumu izmaksas (pieņemums no pieredzes).
- 2.10. 0,4 kV ZS – 20 kV mezglu (apakšstacijas + kabeļi) izbūves izmaksas.
- 2.11. Finansējums grants.
- 2.12. Finansējums līdzdalība.
- 2.13. Finansējums kredīta procentu likme.
- 2.14. Nakts (lētu) stundu skaits dienā.
- 2.15. Brīvdienu un svētku dienu skaits gadā.
- 2.16. Elektroenerģijas cena maksimumstundās.
- 2.17. Elektroenerģijas cena naktī.
- 2.18. Ievadaizsardzības aparāta pieprasītais nomināls.
- 2.19. Elektroenerģijas cena brīvdienās un svētku dienās (izņemot svētdienu vakarus).
- 2.20. Finansējums kredīts.
- 2.21. C faktors, ko izmanto, lai izteiktu akumulatoru uzlādes un izlādes ātrumu, 0,125–0,5 C
- 2.22. Litija LFP “B” šķiras ESS ciklu 0–20 % līdz 80–100 %

1.10. att. Tehniski ekonomiskās analīzes parametri.

Risinājumu alternatīvas. Pētījuma laikā tika konstatēts, ka nav vienas universālas alternatīvas, tāpēc tika izvirzīti četri alternatīvu raksturojoši pieņēmumi, kas precīzi atspoguļotu uzstādītā jautājuma rezultātu.

1. Elektroenerģijas patērētāja lielums.
2. Elektroenerģijas patērētāji ar un bez saules elektrostacijas.
3. Akumulētā elektroenerģija tiek izmantota pašpatēriņam, hibrīdi vai tikai peļņas nolūkos.
4. Elektroenerģijas akumulatoru izlādes ciklu skaits dienā.

Ņemot vērā šos pieņēmumus, tika izstrādātas astoņas alternatīvas ar vairākiem apakšscenārijiem, lai jautājumu pētītu pēc iespējas plašāk. Kopumā aprēķinos 22 scenārijos izmantotas astoņas alternatīvas.

1. un 2. alternatīva – mazi un vidēji elektroenerģijas patērētāji ar pieslēguma jaudu 11–500 kW, deviņu stundu darbalaiks piecas dienas nedēļā, lielle elektroenerģijas patērētāji ar jaudu virs 500 kW, videspieguma pieslēgums, deviņu stundu darbalaiks piecas dienas nedēļā.

- 1.1. Maksimumstundu kompensācija.
- 1.2. Maksimumstundu un elektroenerģijas patērētāja pīķu kompensācija.
- 1.3. Dienas stundu kompensācija.
- 1.4. Dienas stundu un pīķu kompensācija.

3. un 4. alternatīva – mazi un vidēji elektroenerģijas patērētāji ar pieslēguma jaudu 11–500 kW, deviņu stundu darbalaiks piecas dienas nedēļā ar uzstādītiem B tipa saules paneļiem bez eksporta jaudas un lielle elektroenerģijas patērētāji ar jaudu virs 500 kW, videspieguma pieslēgums, deviņu stundu darbalaiks piecas dienas nedēļā ar uzstādītiem C tipa saules paneļiem bez eksporta jaudas.

- 3.1. Maksimumstundu kompensācija.
- 3.2. Maksimumstundu un elektroenerģijas patērētāja pīķu kompensācija.

5. un 6. alternatīva – mazi un vidēji elektroenerģijas patērētāji ar pieslēguma jaudu 11–500 kW, deviņu stundu darbalaiks piecas dienas nedēļā ar uzstādītiem B tipa saules paneļiem ar pilnu eksporta jaudu kā balansējošs hibrīds un lielle elektroenerģijas patērētāji ar jaudu virs 500 kW, videspieguma pieslēgums, deviņu stundu darbalaiks piecas dienas nedēļā ar uzstādītiem C tipa saules paneļiem ar pilnu eksporta jaudu kā balansējošs hibrīds.

- 6.1. Maksimumstundu kompensācija un elektroenerģijas pārdošana.
- 6.2. Maksimumstundu, elektroenerģijas patērētāja pīķu kompensācija un elektroenerģijas pārdošana.
- 6.3. Maksimumstundu kompensācija un visu stundu elektroenerģijas pārdošana.
- 6.4. Maksimumstundu, elektroenerģijas patērētāja pīķu kompensācija un visu h elektrības pārdošana.

7. un 8. alternatīva – liela balansējoša saules elektrostacija ar pieslēguma jaudu virs 500 kW ar esošu izbūvētu pieslēgumu (aprēķini veikti ārpus saules projekta peļņas

no saražotās enerģijas) un liela ESS ar jaudu virs 500 kW, atsevišķi stāvoša ar jaunu elektroenerģijas pieslēgumu.

7.1. Maksimumstundu laikā elektroenerģijas pārdošana.

7.2. Maksimumstundu laikā elektroenerģijas pārdošana ar tehnoloģijai saudzīgāku lietošanas profilu.

Uzskaitītās astoņas alternatīvas atšķiras pēc vairākiem parametriem, kas būtiski ietekmē kopējo projekta mērķi un bruto atpelnišanās periodu. Liela atšķirība veidojās pie elektroenerģijas patērētāja lieluma, jo būtiski mainās izdevumu un ieņēmumu parametri. Šajā pētījumā elektroenerģijas pieslēguma jaudas robežšķirtne ir 500 kW. Tie, kas ir zem, ir mazie un vidējie patērētāji, virs 500 kW – lielle patērētāji. Tas ir dalīts ar nolūku atšķirt, kuriem visbiežāk būs lielākas un kuriem mazākas elektroenerģijas akumulācijas sistēmas, jo tas tiešā veidā ietekmē kapitālieguldījumus. Tāpat tika izceltas atsevišķas alternatīvas, lai parādītu, kuros gadījumos uzņēmums gūst ietaupījumus no uzstādītās akumulācijas sistēmas, kuros gadījumos ietaupījumus un daļēji arī ieņēmumus no pārdotās elektroenerģijas, un kuros gadījumos gūst ieņēmumus no saimnieciskās darbības, uzkrājot lētās biržas stundās un tirgojot dārgākās, tādējādi pelnot no arbitražas. Tad, kad iespējamās alternatīvas ir iedalītas pēc patērētāja lieluma (projekta mērķis – pelnīt vai gūt ietaupījumus, vai darboties hibrīdi), tālāk katrai alternatīvai ir jāizvērtē arī dažādi scenāriji, tāpēc kopumā tika apskatīti 22 scenāriji. Kopējais scenāriju skaits ir lielāks, taču šajā pētījumā neminētajiem bruto atpelnišanās periods var pārsniegt pat 50 gadu. Scenāriji tika vērtēti pēc esošā valsts elektroenerģijas patēriņa īpatnībām, piemēram, no rītiem un vakaros četras stundas elektroenerģija tiek patērēta krietni vairāk nekā dienas vidū, tāpēc šajās stundās cena par to var pārsniegt arī 100 % pret dienas cenu un vairāk, savukārt nakts laikā elektroenerģijas patēriņš ir viszemākais, un nereti elektroenerģijas cena pat ir negatīva. Vēl viens aspekts alternatīvām, kur atpelnišanos veido no patērētājam gūtajiem ietaupījumiem, ir ievadaizsardzības aparāta pieprasītā nomināla samazinājums.

Matemātiskie vienādojumi

Aprēķini veikti, izmantojot vienādojumus, kas ietver inženiertehniskus un ekonomiskus parametrus.

1. Elektroenerģijas akumulācijas sistēmas kapitālieguldījumus nosaka ar vienādojumu, kurā tiek sareizināta nepieciešamā akumulatora kapacitāte ar bāzes kapitālieguldījumu referenci no izvirzītajiem parametriem. Izvēlētās elektroenerģijas akumulācijas sistēmas kapitālieguldījumi = izvēlēto stundu skaits dienā X pieslēguma jauda X pieslēguma utilizācijas intensitāte X (elektroenerģijas akumulācijas sistēmas kapitālieguldījumi uz 1 MWh + elektroenerģijas akumulācijas sistēmas konversijas mezgla kapitālieguldījumi uz 1 MWh /) + pieslēguma izmaksas.
2. Elektroenerģijas akumulācijas sistēmas iegūtos finansiālos ietaupījumus vai ieņēmumus gadā nosaka ar vienādojumu, kurā tiek saskaitīti kopā visi projektā uzstādītie ietaupījumi un/vai ieņēmumu mērķi. Tie var būt gan maksimumstundās, gan pīķa

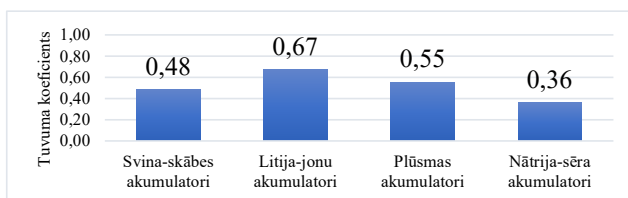
stundās, gan ievadaizsardzības aparāta pieprasītā nomināla samazinājums, gan dienas stundās, gan arī visās stundās. Šajā pētījumā alternatīvām, kuras ir ar uzņēmuma pašpatēriņu, izmaksu daļa par ST sadales tarifu un pārvades tarifu, kā arī vienādojumā pie ieņēmumiem ir iekļauta enerģijas tirgotāja komisija, jo ST šīs izmaksas aprēķina automātiski. Vērtības iegūst atkarībā no projekta mērķa, taču ar universālu vienādojumu

3. Izmaksas, kas saistītas ar elektroenerģijas akumulācijas sistēmas pieslēgumu elektroenerģijas koplietošanas tīklam, nosaka, saskaitot kopā pieslēguma jaudas uzturēšanu, ST elektroenerģijas ražotāju tarifu, ST pārvades tarifu un enerģijas tirgotāja komisiju. Šīs vērtības iegūst atkarībā no projekta mērķa, katru no minētajiem parametriem reizinot ar pieslēguma jaudu, un izmanto, ja tas piemērojams konkrētajam projektam.
4. Bruto atmaksas periodu nosaka, elektroenerģijas akumulācijas sistēmas kapitālieguldījumus dalot ar ieņēmumiem un/vai ietaupījumiem un atņemot izmaksas.

2. REZULTĀTI

2.1. Daudzkritēriju analīze ar *TOPSIS* metodi

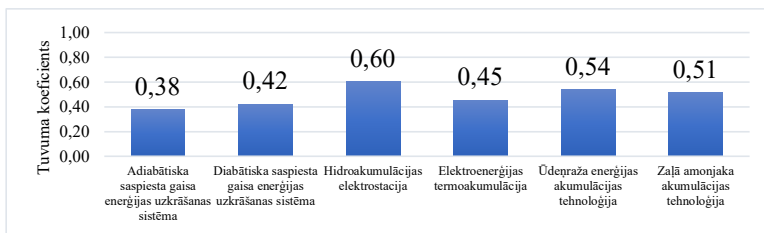
Pēc daudzkritēriju analīzes, izmantojot *TOPSIS* metodi un nosakot vienādu svērto svaru 0,111, iegūtie rezultāti alternatīvām baterijām parādīti 2.1. attēlā.



2.1. att. Akumulatora *TOPSIS MCDA* analīzes rezultāti.

Tika noteikts, ka starp četriem analizētajiem bateriju veidiem litija jonu baterijas ir vistuvāk ideālajam variantam ar tuvuma koeficientu 0,67. Lai gan ieguldījumi litija jonu akumulatorā (EUR/kWh) ir visaugstākie starp salīdzinātajiem akumulatoriem, šo parametru atsver tā lielais jaudas blīvums, kas ir aptuveni divreiz lielāks nekā citām alternatīvām, kā arī ievērojami augstā efektivitāte un uzlādes/izlādes ciklu skaits, kas tiek uzskatīti par primārajiem aspektiem šādu rezultātu sasniegšanai. Ir svarīgi atzīmēt, ka arī litija jonu bateriju sociālais faktors un tehnoloģiskā gatavība ir novērtēti visaugstāk. Tāpēc litija jonu akumulatori tiek uzskatīti par vispotenciālāko risinājumu enerģijas uzkrāšanai mūsdienās. Pēc tam ar ideālā scenārija tuvuma koeficientu 0,55 tiek sarindotas plūsmas baterijas. Šo akumulatoru galvenās priekšrocības ir to ilga kalpošanas laiks un lielais uzlādes/izlādes ciklu skaits, kas nodrošina augstu jaudas blīvumu, vienlaikus saglabājot salīdzinoši zemas ieguldījumu izmaksas. Attiecīgi svina-skābes (0,48) un nātrija-sēra (0,36) baterijas ir saņēmušas zemāku novērtējumu. Šādus rezultātus galvenokārt ietekmē to salīdzinoši zems jaudas blīvums un ekspluatācijas laiks. Turklāt šo bateriju ietekme uz klimata pārmaiņām ($\text{kgCO}_2\text{eq/kg}$) ir lielāka nekā pārējām divām baterijām. Tomēr pat bateriju veidi ar zemākiem reitingiem netiek uzskatīti par nekonkurētspējīgiem enerģijas uzglabāšanas tehnoloģiju tirgū. Saskaņā ar konkrētiem parametriem, kas galvenokārt var atšķirties atkarībā no tehnoloģiskajām vajadzībām un individuālajiem uzskatiem, plūsmas akumulatori, svina-skābes akumulatori un nātrija-sēra akumulatori, turpinot attīstīt savu inovācijas potenciālu, var nodrošināt efektīvu enerģijas uzkrāšanu, veicinot globālu pāreju uz atjaunojamo resursu izmantošanu.

Līdzīgi, veicot daudzkritēriju lēmumu analīzi, izmantojot *TOPSIS* metodi un nosakot vienādu svērto vērtību 0,125, rezultāti, kas iegūti par enerģijas uzkrāšanas sistēmu alternatīvām, parādīti 2.2. attēlā.



2.2. att. Akumulācijas sistēmas *TOPSIS MCDA* analīzes rezultāti.

Starp salīdzinātajām sešām enerģijas akumulācijas sistēmām tika konstatēts, ka hidroelektrostacija ir tuvākais risinājums ideālajai atjaunojamās enerģijas uzglabāšanas tehnoloģijai, sasniedzot tuvuma koeficientu 0,60. Šis rezultāts galvenokārt tika iegūts tāpēc, ka tā ir visattīstītākā uzglabāšanas sistēma starp aplūkotajām, jo elektroenerģijas uzkrāšana ir iespējama arī hidroelektrostacijās, tāpēc lieli kapitālizdevumi nav nepieciešami. Arī ekspluatācijas laiks ir ievērojami ilgāks, sasniedzot līdz pat 80 gadiem, un efektivitāte ir visaugstākā – 77,5 %. Ūdeņraža enerģijas (0,54) un zaļā amonjaka (0,51) uzglabāšanas tehnoloģijas ir ierindotas zemāk. Saskaņā ar literatūras analīzi šīs divas enerģijas uzglabāšanas tehnoloģijas tika novērtētas arī kā visdaudzsološākās un ar augstāku pievienoto vērtību ārpus enerģētikas nozares. Tomēr kapitālizdevumi šīm uzglabāšanas sistēmām ir ievērojami lielāki, un tehnoloģiskie risinājumi joprojām ir inovāciju izstrādes procesā. Ar tuvuma koeficientu 0,47 siltuma elektroenerģijas akumulācijas tehnoloģija ir ierindota zemākā vietā, jo, lai gan kapitālizdevumi EUR/kWh ir viszemākie starp salīdzinātajām akumulācijas sistēmām, tehnoloģiskā gatavība joprojām ir demonstrējumu līmenī, līdz ar to sociālais faktors tiek novērtēts viszemāk. Vistālāk no ideālā risinājuma ir diabātiskā saspiebtā gaisa enerģijas uzglabāšanas sistēma (0,42) un adiabātiskā saspiebtā gaisa enerģijas uzglabāšanas sistēma (0,37), ņemot vērā darbības tehnoloģiskos ierobežojumus, ģeogrāfiskos ierobežojumus un to, ka saspiebtā gaisa enerģijas uzglabāšanas sistēmas infrastruktūra ir piemērota kalnu apgabaliem, kur atrodami arī pazemes krāteri. Arī reakcijas laiks abām tehnoloģijām ir ievērojami ilgāks. Tomēr starp salīdzinātajām alternatīvajām uzglabāšanas sistēmām katra no tām tiek uzskatīta par konkurētspējīgu uzglabāšanas tehnoloģiju tuvākā vai tālākā nākotnē, nodrošinot efektīvu enerģijas uzglabāšanu. Turklāt dažādas uzglabāšanas tehnoloģiju koncepcijas var pielāgot konkrētiem ģeogrāfiskajiem reģioniem un infrastruktūras problēmām.

Lai pārbaudītu rezultātus, tika veikta jutīguma analīze akumulatoru alternatīvām, izmantojot visus iepriekš minētos kritērijus. Uzkrāšanas sistēmām jutīguma analīze netika veikta, jo kritēriji pārklājas un plašāka analīze samazinātu rezultātu pārredzamību.

Ņemot vērā jutīguma analīzes rezultātus, ir iespējams noteikt katra kritērija specifisko ietekmi uz izvēlētajiem tehnoloģiskajiem risinājumiem atjaunīgās elektroenerģijas uzkrāšanai, ļaujot noteikt svarīgākos faktorus, kas maina *TOPSIS* analīzes rezultātus. Galvenie secinājumi, kas izriet no bateriju analīzes, ir šādi: litija jonu baterijas negatīvi ietekmē nepieciešamo investīciju apjomu, arī saskaņā ar ievades datiem var secināt, ka ieguldījumi EUR/kWh šajā attīstības brīdī ir aptuveni divas reizes lielāki nekā citi uzkrāšanas veidi šajā grupā un arī pēc tehnoloģijas kalpošanas laika. Tomēr to atsver fakts, ka praktiski visos citos kritērijos litija

jonu akumulatori uzrāda labākos rādītājus, attiecīgi pamatojot to priekšrocības, salīdzinot ar citām baterijām. Jāatzīmē, ka svina-skābes un nātrija-sēra baterijas gandrīz neietekmē tehnoloģiskā gatavība, jo to novatoriskais progress ir vidējs, tāpat kā sociālais faktors, tiešs ieguvums sabiedrībai, savukārt reakcijas laiks īpaši neietekmē visu veidu baterijas, jo tas ir gandrīz identisks visiem veidiem. Pēdējais redzamais ietekmējošais faktors ir nātrija-sēra bateriju ietekmes uz vidi faktors, kas savāktajos datos arī ir ievērojami augstāks.

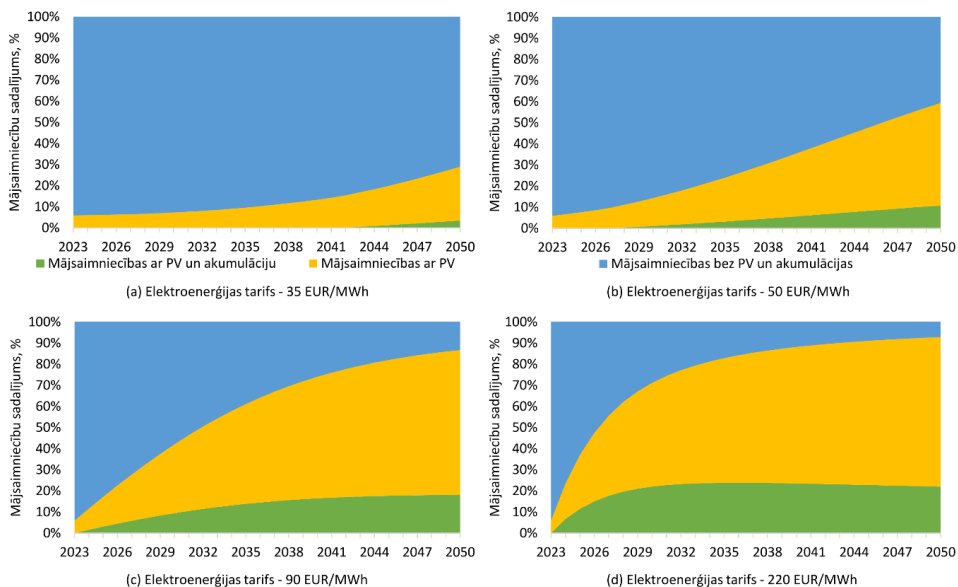
2.2. Sistēmdinamikas modeļošana

Šajā apakšnodaļā sniegti galvenie sākotnējie rezultāti, kas raksturo *PV* sistēmu un elektroenerģijas uzkrāšanas sistēmas izplatību mājsaimniecībās Latvijā līdz 2050. gadam, balstoties dažādos parametros. Tiek novērtēta būtiskāko parametru jutība, izmantojot SD modeli.

Sistēmdinamikas modeļa elektroenerģijas uzkrāšanas prakses prognozēšanai mājsaimniecībās rezultāti

Tas savā ziņā ir intuitīvs secinājums, tomēr izrādījās, ka elektroenerģijas cenai ir liela nozīme pārejā no tīkla elektrības uz *PV* un akumulatoru izmantošanu. 2.3. attēlā redzams *PV* un *PV* salīdzinājums ar akumulatoru sistēmas difūzijas līmeni pie dažādiem elektroenerģijas tarifiem. 2.3. a) attēlā redzams, ka, ja elektroenerģijas cena visā simulācijas periodā būtu 35 EUR par megavattstundu, kas ir aptuveni zemākā elektroenerģijas cena, kāda sasniegta pēdējo 10 gadu laikā, interese gan par *PV*, gan *PV* ar akumulatoru uzstādīšanu būtu ļoti zema. Interese par akumulatoriem sāktos tikai pēc 2040. gada, kad ieguldījumu izmaksas būtu pietiekami samazinātas, lai atmaksāšanās laiks būtu mazāks nekā bateriju tehniskais darbmūžs. Ir loģiski, ka ar zemām elektroenerģijas cenām *PV* un akumulatoru atmaksāšanās laiks ir pārāk ilgs, lai padarītu to par vēlamu iespēju. Modeļa rezultāti liecina, ka pie šāda elektroenerģijas cenu līmeņa 2050. gadā tikai 25,4 % no visām mājsaimniecībām būtu uzstādījušas tikai *PV* sistēmas un 3,5 % būtu uzstādījušas *PV* sistēmas, kas papildinātas ar akumulatoru uzkrāšanu. Pārējie joprojām būtu pilnībā atkarīgi no tīkla elektroenerģijas.

2.3. b) attēlā redzams, ka, ja elektroenerģijas cena visā simulācijas periodā būtu 50 EUR par megavattstundu, kas bija augstākā elektroenerģijas cena no 2013. līdz 2020. gadam, interese par *PV* un akumulatoriem būtiski pieaugtu. *PV* tehnoloģijas ieviešana iegūst vilkmi uzreiz, savukārt *PV* un akumulatoru uzstādīšana sāk pieaugt jau pirms 2030. gada. Modeļa rezultāti liecina, ka pie šāda elektroenerģijas cenu līmeņa 2050. gadā 48,6 % no visām mājsaimniecībām būtu uzstādījušas tikai *PV* sistēmas un 10,8 % būtu uzstādījušas *PV* sistēmas, kas papildinātas ar akumulatoru uzkrāšanu.



2.3. att. *PV* un akumulatoru sistēmas difūzija, pamatojoties uz elektroenerģijas tarifu.

2.3. c) attēlā redzams, ka, ja elektroenerģijas cena visā simulācijas periodā būtu 90 EUR par megawatstundu, kas 2021. gadā bija aptuvenā elektroenerģijas cena (tāda ir bijusi arī 2023. gadā), interese par *PV* un akumulatoriem būtiski pieaugtu. Modeļa rezultāti liecina, ka pie šāda elektroenerģijas cenu līmeņa 2050. gadā 68,6 % no visām mājsaimniecībām būtu uzstādījušas tikai *PV* sistēmas un 18,0 % būtu uzstādījušas *PV* sistēmas, kas papildinātas ar akumulatoru uzkrāšanu.

2.3. d) attēlā redzams, ka, ja elektroenerģijas cena visā simulācijas periodā būtu 220 EUR par megawatstundu, kas bija aptuvenā elektroenerģijas cena 2022. gadā, *PV* un akumulatoru uzstādīšanas ātrums “eksplodētu”. Tīkla elektrība ir tik dārga, ka pat akumulatoru tehnoloģijas, kas šajā brīdī joprojām ir dārgas, šķiet inenesīgākas nekā tikai tīkla elektroenerģijas izmantošana. Tikai *PV* sistēmām joprojām ir lielāka proporcijas daļa nekā *PV* ar akumulatoriem, jo kopējais ieguldījumu atmaksāšanās laiks *PV* vienmēr būs mazāks nekā *PV* sistēmai, kas papildināta ar akumulatoriem. Modeļa rezultāti liecina, ka pie šāda elektroenerģijas cenu līmeņa 2050. gadā 70,8 % no visām mājsaimniecībām būtu uzstādījušas tikai *PV* sistēmas un 22,0 % būtu uzstādījušas *PV* sistēmas, kas papildinātas ar akumulatoru uzkrāšanu. Gala rezultāti ir līdzīgi tam, ja elektrības cena ir 90 EUR par megawatstundu, tomēr sākotnējais investīciju līmenis ir ievērojami augstāks.

Ir būtiski pieminēt, ka rezultāti parāda situāciju, kad neto uzskaites sistēmas darbojas pilnīgai simulācijai visos elektroenerģijas cenu scenārijos un visas mājsaimniecības var izmantot šo sistēmu, tomēr realitātē sadales sistēmas operators, visticamāk, nespētu uzkrāt tīklā visu saules elektroenerģijas pārpalikumu, kas parādīts c) un d) scenārijos, un neto uzskaitē tiktu likvidēta, lai saglabātu tīkla stabilitāti. Tas savukārt ietekmētu *PV* un akumulatoru sistēmas integrācijas ātrumu, jo bez neto uzskaites atmaksāšanās periods palielinās un tīkla pieslēgumi

izskatās pievilcīgāki. Tomēr šajā pētījumā netiek analizēta *PV* integrācijas ātruma ietekme uz elektrotīklu un neto uzskaites sistēmu. Modelis ir jāpaplašina, lai analizētu šo efektu. Tas ir turpmāko pētījumu mērķis.

Rezultāti parāda, ka subsīdiju politikas īstenošana maina *PV* sistēmu, integrējot akumulatoru sistēmu mājāsaimniecībās. Ja subsīdijas tiek piešķirtas tikai *PV* uzstādīšanai, bet ne akumulatoru uzglabāšanai, sākotnējais pieaugums sistēmu ar *PV* un akumulatoru uzstādīšanu ir lielāks nekā pamatscenārija gadījumā, tomēr gala rezultāts ir tikai nedaudz lielāks. Sākotnējais pieaugums ir saistīts ar to, ka, subsidējot *PV* uzstādīšanu, tiek samazinātas arī sistēmas kopējās izmaksas ar *PV* un akumulatoriem, tāpēc tā ir pievilcīgāka nekā bāzes scenārijā, tomēr ilgtermiņā tikai *PV* sistēma joprojām ir pievilcīgāka nekā kombinēta sistēma. Ja tiek subsidētas tikai baterijas, sākotnējais palielinājums *PV* un akumulatoru sistēmas uzstādīšanai ir līdzīgs tam, kas paredz *PV* subsīdijas, un lielāks nekā pamatscenārijā, tomēr gala rezultāts ir labāks nekā pamatscenārijs un subsīdijas tikai *PV* scenārijam. Ja abas tehnoloģijas tiks subsidētas, paredzams, ka sākotnējais pieaugums būs lielāks nekā iepriekšējos scenārijos. Šis pieaugums notiek nevis tikai uz *PV* sistēmu rēķina, bet gan tāpēc, ka gan tikai *PV*, gan kombinētās *PV* un akumulatoru sistēmas kļūst konkurētspējīgas ar tīkla elektroenerģijas tarifu, un uzstādīšanas pieaugums notiek abās kategorijās. Tomēr gala rezultāts ir līdzīgs scenārijam ar subsīdijām tikai akumulatoriem, un, tā kā abas tehnoloģijas saņem subsīdijas, investīciju un ietaupījumu starpība starp risinājumiem joprojām ir par labu *PV* sistēmai. Pamatscenārijā 21 422 mājāsaimniecībām ir uzstādīta kombinēta *PV* un akumulatoru sistēma, savukārt scenārijā ar subsīdijām abām tehnoloģijām – 25 118 mājāsaimniecībām.

Jutīguma analīzes rezultāti

Jutīguma analīze tika veikta, lai novērtētu, kā būtiskāko parametru izmaiņas varētu ietekmēt *PV* un akumulatoru kombinēto sistēmu ieviešanu. Jutīguma analīze tika veikta sistēmai bez subsīdijām ar četriem parametriem. Elektrības cenas intervāls 30–150 EUR par MWh, tehniskais darba mūžs izvērtēts intervālā no 10–30 gadiem, sākotnējo ieguldījumu intervāls – 600–1000 EUR par kWh, akumulatora ieguldījumu samazināšanās frakcijas intervāls – 0,5–3 % gadā.

Ņemot vērā jutīguma analīzes rezultātus, autors secina, ka visiem četriem parametriem – elektroenerģijas cenai, bateriju uzglabāšanas tehniskajam kalpošanas laikam, sākotnējām investīcijām bateriju uzkrāšanā un investīcijām samazināt bateriju uzkrāšanas daļu – ir milzīga ietekme uz akumulatora uzglabāšanas iekārtu, tāpēc ir ļoti svarīgi rūpīgi apsvērt šo parametru vērtības, veicot nākotnes prognozi par akumulatoru uzglabāšanas attīstību.

Sistēmdinamikas modeļa simulācijas hibrīdai energosistēmai mājāsaimniecībā rezultāti

Šajā apakšnodaļā sniegti rezultāti, kas raksturo enerģijas uzkrāšanas sistēmas uzstādīšanas rentabilitāti mājāsaimniecībās Latvijā, ņemot vērā mājāsaimniecības kopējo elektroenerģijas patēriņa profilu.

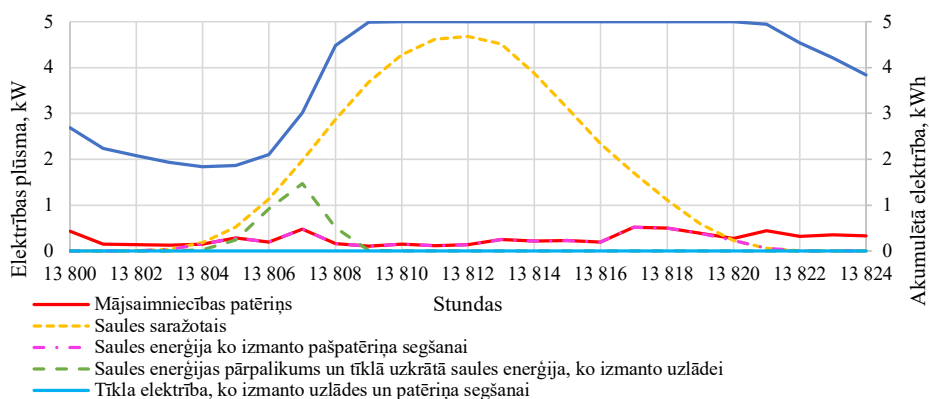
Simulējot sistēmu darbību pie *NordPool* elektroenerģijas stundas cenām 2021. gadam, tika konstatēts, ka kopējās elektroenerģijas izmaksas mājsaimniecībai, kuras kopējais gada patēriņš ir 7800 kWh/gadā un kas patērē tikai enerģiju no tīkla, ir 2663,55 EUR/gadā. Savukārt, ja tāda paša profila mājsaimniecība uzstāda saules paneļus, saražoto elektroenerģiju izmanto pašpatēriņam un izmanto tīklu kā pārpalikumu, kopējās elektroenerģijas izmaksas ir 715,82 EUR/gadā, līdz ar to ir redzams būtisks uzlabojums. Ja *PV* ir pievienots arī litija jonu akumulators un sistēma tiek izmantota efektīvi, tad mājsaimniecības elektroenerģijas izmaksas ir 639,41 EUR/gadā. Izmaksu atšķirības no SD simulācijām trīs dažādos gados apkopotas 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Elektroenerģijas izmaksu salīdzinājums

<i>NordPool</i> dati	Tīkla pieslēgums, EUR/gadā	Pievienoti <i>PV</i> paneļi, EUR/gadā	Ar pievienotu uzkrāšanas sistēmu EUR/gadā
2019	1779,78	710,14	642,18
2020	1554,06	646,98	571,34
2021	2663,55	715,82	639,41
2022	4851,32	968,97	858,02

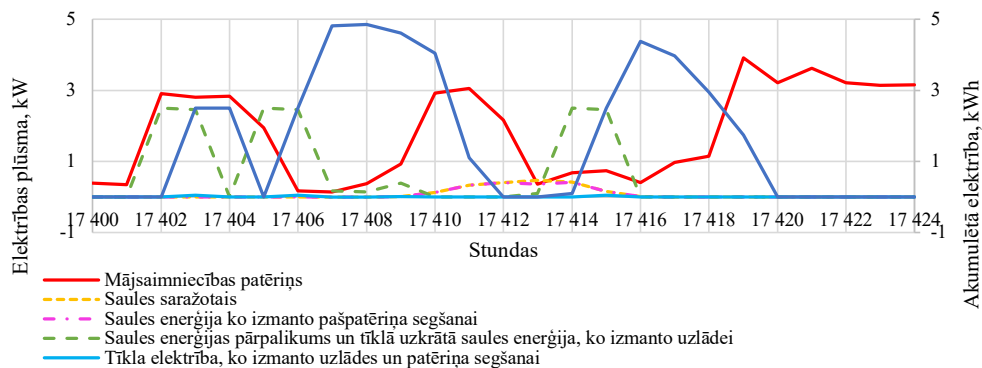
2.1. tabulā redzama būtiska atšķirība kopējās gada elektroenerģijas izmaksās atkarībā no tā, kura gada dati (*NordPool* elektroenerģijas biržas cena) simulācijā izvēlēti kā prognozētās elektroenerģijas cenas. Saskaņā ar modeli apkopotajiem rezultātiem, Latvijas gadījuma izpētei tika pārbaudīta elektroenerģijas akumulācijas ierīkošanas rentabilitāte ar esošo saules potenciālu un ikgadējo starojuma intensitāti, ņemot vērā elektroenerģijas izmaksas, kas ietekmē akumulācijas sistēmas darbības principus. Iegūtie rezultāti par iepriekš aprakstīto mājsaimniecību ar uzstādītiem *PV* un akumulatoru vienai dienai (24 h bāzei) vidējai elektroenerģijas slodzei vasaras mēnesī redzami 2.4. attēlā.



2.4. att. Enerģijas plūsmas profils sistēmai ar saules paneļiem un akumulatoru vasaras dienā.

Vasarā mājsaimniecības elektroenerģijas patēriņš ir salīdzinoši zems (sarkanā līkne 2.4. att.), tāpēc akumulatorā uzkrātās enerģijas daudzums ir pietiekams, lai segtu patēriņu nakts stundās (tumši zilā līkne 2.4. att.), savukārt dienas laikā saules paneļu sistēmas saražotās enerģijas daudzums kļūst pietiekami liels, lai ne tikai segtu mājsaimniecības patēriņu, bet arī pilnībā uzlādētu akumulatoru.

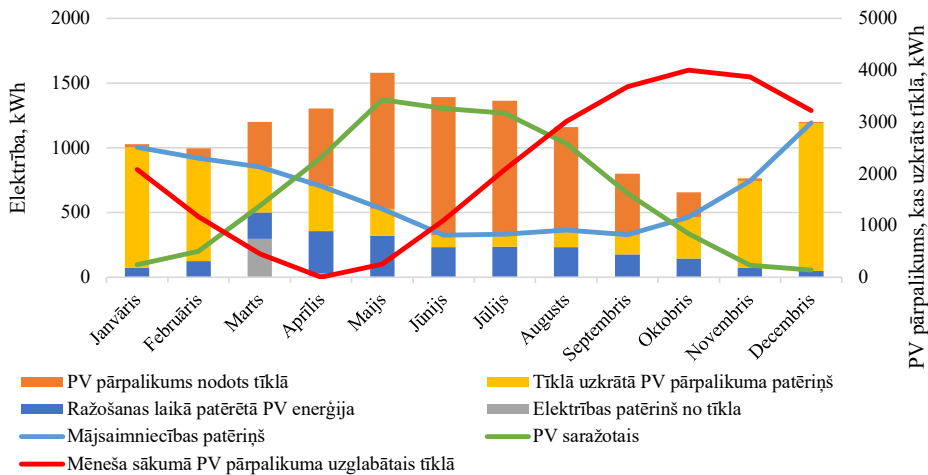
Lai pārbaudītu arī sezonālītātes ietekmi, tika analizēti dati par dienas elektroenerģijas profilu par vienu izvēlētu dienu ziemas mēnesī. Iegūtie rezultāti redzami 2.5. attēlā.



2.5. att. Ikdienas enerģijas plūsmas profils sistēmai ar PV un akumulatoru ziemas dienā.

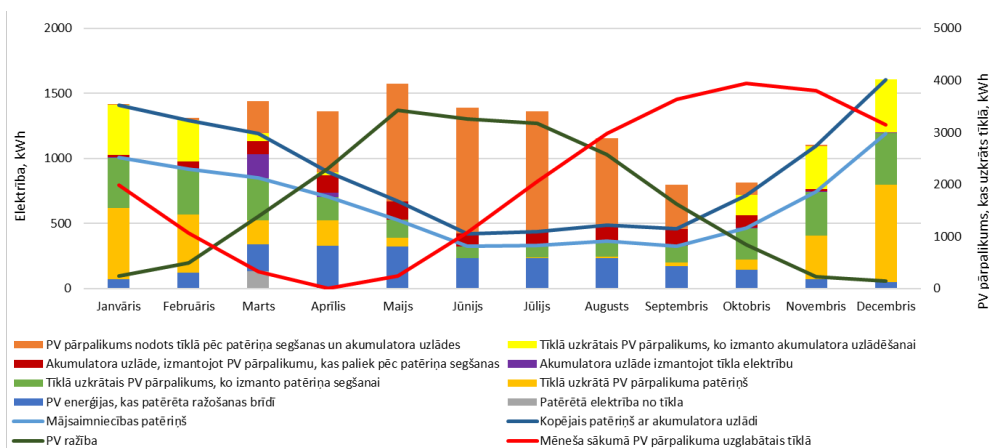
Kā redzams iegūtajā grafikā (2.5. att.), mājsaimniecību elektroenerģijas patēriņš ziemā ir salīdzinoši lielāks. Ziemas dienā enerģijas pieprasījumu daļēji sedz akumulatorā uzkrātais enerģijas daudzums (tumši zilā līkne 2.5. att.), savukārt elektroenerģijas patēriņš no tīkla, ņemot vērā šī brīža tarifu, šajā dienā ir ļoti mazs. Ziemas mēnešos akumulatora uzlādēšanai tiek izmantots saules enerģijas pārpalikums un tīklā uzkrātā saules enerģija (zaļā pārtrauktā līkne 2.5. att.). Tomēr ziemas dienā Latvijas apstākļos pēc patēriņa segšanas un akumulatora uzlādēšanas vairs nav saules enerģijas, ko nodot tīklā, jo tā tiek pilnībā patērēta. Kopumā elektroakumulācijas sistēmas uzstādīšanas rentabilitāti mājsaimniecībā Latvijā ir iespējams novērot arī ziemas periodā.

Lai iegūtu gada pārskatu un novērtētu modelēto sistēmu no ikmēneša enerģijas plūsmu viedokļa, tika apkopoti SD modeļi (izmantojot 2021. gada datus) iegūtie rezultāti. 2.6. attēlā redzams enerģijas plūsmu profils pa gada mēnešiem, ja mājsaimniecībā ir uzstādīta saules paneļu sistēma, savukārt 2.7. attēlā parādīta sistēma ar saules paneļiem un akumulatoru.



2.6. att. Ikmēneša enerģijas profils saules paneļu sistēmai.

Iegūtie rezultāti liecina, ka augstākā elektroenerģijas ražošana no saules paneļiem notiek no maija līdz augustam (zaļā līkne 2.7. att.). Zemākais elektroenerģijas patēriņš vērojams vasaras mēnešos (zilā līkne 2.7. att.). (sarkanā līkne 2.7. att.) norāda saules paneļu enerģijas daudzumu, kas katra mēneša sākumā tiek uzglabāts tīklā. Var novērot, ka, sākot no maija (jauna bilances gada sākums), šis apjoms pieaug, un augstākais uzkrājums (~ 4000 kWh) tiek sasniegts oktobrī, kas ļauj šo enerģiju izmantot līdz nākamajam aprīlim. (Diagrammā 2.7. att.) parādīts avotu sadalījums katrā mēnesī, lai segtu patēriņu. Ziemas mēnešos (no novembra līdz janvārim) lielākoties patēriņa segšanai tiek izmantots tīklā uzkrātais elektroenerģijas daudzums. Savukārt vasaras periodā, jau sākot no maija līdz augustam, saules paneļu saražotā enerģija lielākoties tiek patērēta uzreiz un tiek izmantota tikai neliela daļa no uzkrātās tīkla sistēmā. Līdzīgs ikmēneša enerģijas plūsmu profils tika iegūts gadījumam, ja ir uzstādīta saules paneļu un elektroenerģijas akumulācijas sistēma. Iegūtie rezultāti redzami 2.7. attēlā.



2.7. att. Ikmēneša enerģijas profils saules paneļu sistēmai ar akumulatoru.

Lai apkopotu iegūtos rezultātus, tika veikts visu četru analizēto sistēmu salīdzinājums, nosakot elektroenerģijas gada izmaksas no tīkla, gada ietaupījumu un katras sistēmas atmaksāšanos un gada laikā no tīkla patērētās elektroenerģijas apjomu pēc analizētajām elektroenerģijas cenām no 2019. līdz 2022. gadam. Rezultātu kopsavilkums ir redzams 2.2.–2.5. tabulā.

2.2. tabula

Dažādu sistēmu salīdzinājums ar elektroenerģijas cenu 2019. gada līmenī

2019	Tīkla elektroenerģijas gada izmaksas	Gada uzkrājums	Atmaksāšanās laiks	Patērētā tīkla elektroenerģija
	EUR/gadā	EUR/gadā	Gadi	kWh/gadā
Tīkla elektrība	889	–	–	7755,55
Saules paneļu sistēma	293	596	16,8	331,32
Akumulators	858	31	448,3	7862,27
Saules paneļu + akumulatora sistēma	260	629	22,3	372,39

Pie 2019. gada elektroenerģijas cenām ir iespējams novērot, ka brīžos, kad tīkla enerģijas izmaksas ir salīdzinoši zemas, tomēr ir iespējams ietaupīt, uzstādot *PV* sistēmu vai *PV* un akumulatoru sistēmu (2.2. tab.). Tomēr uzstādīšanas izmaksu dēļ atmaksāšanās laiks būtu ievērojami ilgs, *PV* sistēmai sasniedzot gandrīz 17 gadu un sistēmai ar pievienotu akumulatoru – 22,3 gadus, tādējādi samazinot ekonomisko pamatojumu sistēmas ieviešanai Latvijas mājāsaimniecībās. No otras puses, uzstādot tikai baterijas, ikgadējais ietaupījums par zemām elektroenerģijas cenām ir nenozīmīgs, un, ņemot vērā atmaksāšanās laiku, kas sasniedz 448,3 gadus, ir iespējams teikt, ka tikai bateriju uzstādīšana konkrētajos apstākļos ir nerentabla.

2.3. tabula

Dažādu sistēmu salīdzinājums ar elektroenerģijas cenu 2020. gada līmenī

2020	Tīkla elektroenerģijas gada izmaksas	Gada uzkrājums	Atmaksāšanās laiks	Patērētā tīkla elektroenerģija
	EUR/gadā	EUR/gadā	Gadi	kWh/gadā
Tīkla elektrība	776	–	–	7755,55
Saules paneļu sistēma	285	491	20,35	331,32
Akumulators	724	52	266,9	7857,75
Saules paneļu + akumulatora sistēma	250	526	26,6	368,78

Vēl zemāku elektroenerģijas izmaksu gadījumā, t. i., pie 2020. gada elektroenerģijas cenām, kad samazinās kopējās tīkla elektroenerģijas gada izmaksas katrā no analizētajiem sistēmas risinājumiem, ir iespējams noteikt, ka gada ietaupījums *PV* un *PV* ar akumulācijas sistēmām samazināsies, attiecīgi palielinot atmaksāšanās laiku abām sistēmām (2.3. tab.). Savukārt situācijā, kad ir tikai akumulators, ikgadējais ietaupījums palielinās un atmaksāšanās laiks samazinās, atmaksāšanās laiks joprojām ir nereāls, un scenārijs tiek definēts kā nerentabls.

2.4. tabula

Dažādu sistēmu salīdzinājums ar elektroenerģijas cenu 2021. gada līmenī

2021	Tikla elektroenerģijas gada izmaksas	Gada uzkrājums	Atmaksāšanās laiks	Patērētā tīkla elektroenerģija
	EUR/gadā	EUR/gadā	Gadi	kWh/gadā
Tikla elektrība	1331	–	–	7755,55
Saules paneļu sistēma	293	1038	9,6	331,32
Akumulators	1223	108	129,2	7862,81
Saules paneļu + akumulatora sistēma	259	1072	13,1	370,68

Gadījumos, kad elektroenerģijas izmaksas ir augstākas, piemēram, kā 2021. gada elektroenerģijas cenu gadījumā, ir iespējams panākt daudz lielāku ikgadējo ietaupījumu un pieņemamāku atmaksāšanās periodu tikai *PV* paneļu sistēmai un *PV* un akumulatoru sistēmai, sasniedzot ietaupījumu 1072 EUR/gadā un pēdējā gadījumā samazinot atmaksāšanās laiku līdz 13,1 gadam (2.4. tab.). Tas attaisno energoefektīvu risinājumu uzstādīšanas rentabilitāti mājāsaimniecībās Latvijā. Tomēr pat pie 2021. gada cenām tikai akumulatora sistēma pieņemamā periodā neatmaksājas.

2.5. tabula

Dažādu sistēmu salīdzinājums ar elektroenerģijas cenu 2022. gada līmenī

2022	Tikla elektroenerģijas gada izmaksas	Gada uzkrājums	Atmaksāšanās laiks	Patērētā tīkla elektroenerģija
	EUR/gadā	EUR/gadā	Gadi	kWh/gadā
Tikla elektrība	2425	–	–	7755,55
Saules paneļu sistēma	350	2075	4,8	331,32
Akumulators	2164	261	53,7	7860,62
Saules paneļu + akumulatora sistēma	307	2118	6,6	367,85

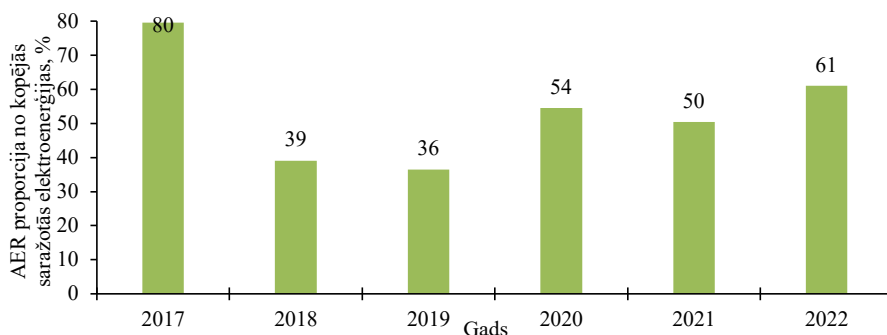
Četras iepriekšējās tabulas dati liecina par vēl vienu īpatnību – patēriņš ir lielāks scenārijā ja ir tikai akumulators sistēmā salīdzinot ar pārējiem scenārijiem. Tas ir saistīts ar akumulatora uzlādes/izlādes procesu, kurā rodas zudumi (tostarp tie, kas ir gaidstāves režīmā). Lai aptvertu to pašu mājāsaimniecības patēriņa slodzi, izmantojot sistēmu, kas paredzēta tikai akumulatoriem, ir nepieciešams vairāk elektroenerģijas. Tāda pati ietekme ir vērojama saules paneļu un akumulatoru sistēmām, salīdzinot ar sistēmām, kurās ir tikai *PV*.

Vislielākos ieguvumus var rast gadījumā, ja elektroenerģijas izmaksas ir 2022. gada cenu līmenī. Tādā gadījumā ikgadējais ietaupījums *PV* sistēmas uzstādīšanai sasniedz 2075 EUR/gadā un atmaksāšanās laiks samazinās līdz 4,8 gadiem (2.5. tab.). Pie 2022. gada elektroenerģijas cenām arī saules paneļu un akumulatoru sistēmām ikgadējais ietaupījums sasniegtu 2118 EUR/gadā, savukārt atmaksāšanās periods samazinātos līdz 6,6 gadiem, tādējādi liecinot par sistēmas uzstādīšanas rentabilitāti mājāsaimniecībās Latvijā gadījumā, ja elektroenerģijas cenas būtiski nesamazinātos, salīdzinot ar 2022. gada līmeni, vai – ilgtermiņā, ja cenas pieaugtu citu globālu ekonomikas un vides problēmu dēļ (piemēram, klimata pārmaiņas). Sistēma, kurā ir tikai akumulatori, joprojām ir sarežģīta iespēja. Lai gan

atmaksāšanās laiks samazinās, tas joprojām sasniedz 53,7 gadus, kas tiek uzskatīts par pārāk ilgu periodu, lai to uzskatītu par rentablu.

2.3. Algoritms datu apkopošanai un kritiskai analīzei, aprēķiniem un prognozēšanai

AER īpatsvars kopējā saražotajā elektroenerģijā Latvijā redzams 2.8. attēlā. Vidēji atkarībā no sezonas, kas būtiski ietekmē elektroenerģijas ražošanu no AER, Latvija no AER saražo ap 40 % līdz 50 % no kopējās nepieciešamās elektroenerģijas. Trīs Daugavas hidroelektrostaciju kaskāde nodrošina lielāko daļu no kopējās saražotās elektroenerģijas, nodrošinot Latvijas elektroenerģijas bāzes jaudu. Līdz 2021. gadam vēja enerģijas ražošanas jauda bija tikai 77–78 MW, 2022. gadā tā palielinājās līdz 136 MW, jo tika izveidots jauns vēja parks. 2022. gadā būtiski palielinājās arī saules enerģijas jauda. Saasinoties ģeopolitiskajai situācijai Eiropā, iedzīvotāji arvien vairāk apsver individuālo enerģētisko neatkarību. Turklāt Latvijas valdība ir piedāvājusi atbalstu saules paneļu uzstādīšanai mājāsaimniecībās, un tā rezultātā būtiski palielinās kopējā uzstādītā saules jauda. Patlaban saules enerģijas ražošanas jauda valstī ir gandrīz 150 MW, pēdējo trīs gadu laikā tā ir palielinājusies aptuveni deviņas reizes.

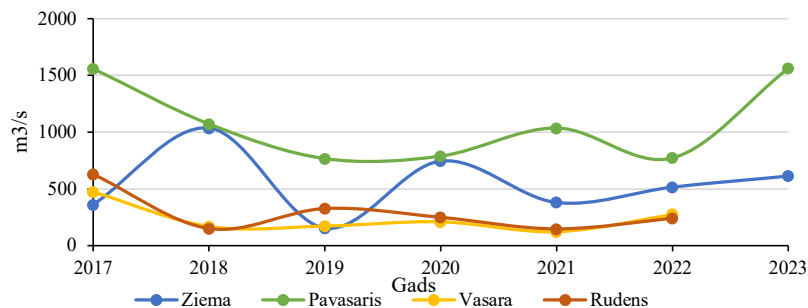


2.8. att. Atjaunīgo energoresursu īpatsvars (%) kopējā saražotajā elektroenerģijā Latvijā (2017–2022). Dati: AS “Latvenergo”.

No AER saražotās elektroenerģijas daudzums ir ļoti mainīgs atkarībā no sezonas un laika apstākļiem. Tas attiecas ne tikai uz vēja un saules enerģiju, bet arī uz hidroenerģiju. Trīs HES darbība un jauda ir atkarīga no ziemas skarbuma un Daugavas tecējuma (2.9. att.). Ja ir zems ūdens līmenis, ir mazāk resursu, no kā ražot elektroenerģiju, kas nozīmē, ka elektroenerģijas ražošana sausās vasarās Latvijā ir vairākas reizes mazāka. Savukārt pavasara atkušņa periodā vietēji ražotā elektroenerģija pilnībā apmierina pieprasījumu Latvijā.

Hidroenerģijas ražošanā ir ne tikai sezonālas, bet arī ikgadējas atšķirības. 2023. gada aprīlī trīs Daugavas hidroelektrostacijas saražoja 893 gigavattstundas (GWh) jeb aptuveni 90 % no kopējās Latvijā saražotās elektroenerģijas. Šajā mēnesī, pateicoties lielajai ūdens pieplūdei Daugavā, Latvijā tika saražots lielākais elektroenerģijas apjoms kopš 2011. gada aprīļa. 2023. gada janvārī Daugavas HES saražoja 638 GWh (69 % no kopējā valstī saražotās

elektroenerģijas apjoma). 2022. gada janvārī Daugavas HES īpatsvars kopējā saražotajā elektroenerģijā bija tikai 43 %.



2.9. att. Daugavas tecējums Jēkabpilī (m³/s) pa gadalaikiem (2017–2023). Avots: Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra (LVĢMC) dati.

Aprēķinot Latvijas gada elektroenerģijas bilanci, kas ir starpība starp saražoto un patērēto elektroenerģiju, rezultāti parāda, ka elektroenerģijas ražošanas apjoms Latvijā ir nevienmērīgs un nepietiekams, lai apmierinātu vietējo elektroenerģijas pieprasījumu (2.6. tab.). Elektroenerģijas gada bilance galvenokārt ir negatīva, kā rezultātā tā ir atkarīga no elektroenerģijas importa.

Apkopojot saražotās un patērētās elektroenerģijas apjomu pa mēnešiem un aprēķinot bilanci, tika novērota tendence, ka pavasara mēnešos pārsvarā tiek sasniegta pozitīva bilance. Lielākais elektroenerģijas ražošanas īpatsvars Latvijā nāk no trim Daugavas hidroelektrostacijām.

2.6. tabula

Latvijas elektroenerģijas bilance (GWh) pa mēnešiem (2017–2022); pozitīva bilance, un gada kopējās vērtības ir izceltas treknrakstā. Avots: AS “Latvenergo” dati

Mēnesis	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Janvāris	43,7	184,1	-107,8	-31,8	-65,7	-156,3
Februāris	-25,8	69,7	-146,2	-16,5	-40,7	-151,8
Marts	302,9	4,7	34,6	44,9	56,5	-192,9
Aprīlis	161,5	238,8	-80,9	-177,5	73,8	75,0
Maijs	12,7	-138,6	-160,7	-110,1	-46,6	-168,6
Jūnijs	-164,8	-244,1	-144,7	-52,3	-200,4	-259,2
Jūlijs	-177,8	-196,8	-198,5	-293,1	-291,3	-336,1
Augusts	-178,3	-141,4	-54,0	-173,0	-419,6	-310,9
Septembris	-39,6	-180,2	-17,5	-225,0	-265,9	-330,2
Oktobris	-14,6	-239,3	-107,8	-285,0	-335,1	-352,4
Novembris	85,0	-151,3	-42,0	-154,8	-200,1	-104,7
Decembris	59,2	-157,1	-92,5	-151,5	-37,4	-23,5
KOPĒJĀ	64,2	-951,5	-1118,1	-1625,7	-1772,5	-2311,5

Lai izvērtētu elektroenerģijas akumulācijas potenciālu, tika izmantota klasterizācijas metode, grupējot saražotos un patērētos apjomus pa sezonām un pa dienām – darba dienās un nedēļas nogalēs, vienlaikus vērtējot elektroenerģijas ražošanas un patēriņa intensitāti.

Analizēto datu rezultāti parāda, ka šobrīd elektroenerģijas patēriņš pārsniedz saražoto no AER, lai gan Daugavas hidroelektrostacijas atsevišķos periodos 2022. gada aprīlī spēja panākt pozitīvu elektroenerģijas bilanci (dati nav uzrādīti). Aplūkojot kopējo elektroenerģijas bilanci, ir daži mēneši, kad elektroenerģijas bilance Latvijā ir bijusi pozitīva (2.6. tab.). Pozitīvais līdzsvars ļauj uzglabāt lieko enerģiju ūdens rezervuāros ar *PHEES* tehnoloģiju. Šo uzkrāto enerģiju varētu izmantot laikā, kad pieprasījums pēc elektroenerģijas ir liels. Turklāt paredzams, ka nākotnē AER jaudas pieaugs, un vēja un saules enerģija būs nepieciešama, lai uzglabātu maksimālās ražošanas stundās.

Ja hidroelektroenerģija savu maksimālo potenciālu sasniedz pavasarī, tad vēja enerģijas potenciāls tiek sasniegts ziemas mēnešos, kad lielākais vidējais vēja ātrums vērojams visā Latvijas teritorijā.

2022. gadā kopējā uzstādītā vēja enerģijas jauda Latvijā sasniedza 136 MW. Ja kopējā uzstādītā jauda sasniegtu 1000 MW, saražotā elektroenerģija palielinātos septiņas reizes. Ja kopējā uzstādītā vēja enerģijas jauda 2022. gadā būtu 1000 MW, vēja enerģija ziemas periodā varētu nodrošināt aptuveni 25–30 % no Latvijas elektroenerģijas, savukārt rudenī tā varētu sasniegt 50 % un vairāk.

Aplēstais Latvijas atkrastes vēja enerģijas potenciāls ir aptuveni 15 GW. Patlaban šis potenciāls ir neizmantots. Atkrastes vēja enerģijas potenciāls, ja tas tiktu pilnībā izmantots, segtu Latvijas elektroenerģijas patēriņu daudzkārt ar pārpalikumu. Vēja enerģijas ražošanu Latvijā plānots palielināt līdz 2030. gadam. Vēja enerģijas attīstīšanai būs nepieciešamas enerģijas uzglabāšanas iekārtas. Potenciālais risinājums ir esošo Daugavas hidroelektrostaciju pārbūve, lai tajās varētu izvietot hidroelektroenerģijas akumulāciju. Augsto kapitāla izmaksu un vides apsvērumu dēļ vēlams nebūvēt hidroelektroenerģijas akumulācijas sistēmu no jauna, bet gan pielāgot jau esošās HES kaskādes. Hidroelektroenerģijas akumulācijas efektivitāte svārstās no 75 % līdz 85 %. *PHEES* ir visefektīvākā uzglabāšanas metode lielam elektroenerģijas daudzumam. Enerģiju var uzglabāt ilgu laiku, un sistēmai ir ātrs reakcijas ātrums. *PHEES* ir nodrošina AER integrēšanai un līdzsvarošanai elektrotīklā.

Daugavas HES ir lielākās hidroelektrostacijas valstī, kas elektrotīklam nodrošina lielu atjaunojamās enerģijas īpatsvaru. 2022. gadā Daugavas HES tika saražotas 2,7 TWh elektroenerģijas. Uzstādītās elektriskās jaudas ir: 908 MW (Pļaviņu HES), 402 MW (Rīgas HES) un 248 MW (Ķeguma HES). Vietas uz Daugavas no vistālāk augšup līdz lejtecei ir Pļaviņas, Ķegums un Rīga. Pēc uzstādītās jaudas Pļaviņu HES ir lielākā hidroelektrostacija Baltijas valstīs un viena no lielākajām Eiropas Savienībā. Trīs Daugavas HES uzkrāj ūdeni ūdenskrātuvēs aiz dambjiem un ražo elektrību pīķa stundās. Izņēmums ir tad, ja pavasarī upē ir plūdi un lielāka ūdens plūsma. Tad hidroelektrostacijas tiek darbinātas ar maksimālo jaudu. Ja ūdens līmenis ir pārāk augsts, drošības un vides apsvērumu dēļ tas tiek izlaists caur noplūdes vārtiem. Tādējādi HES elektroenerģijas balansēšanas iespējas pavasarī ir ierobežotas.

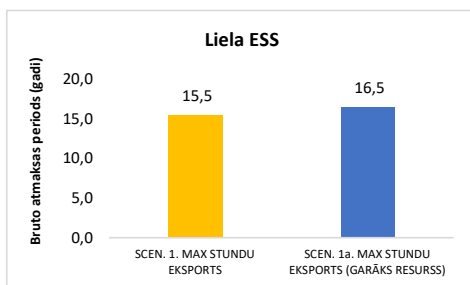
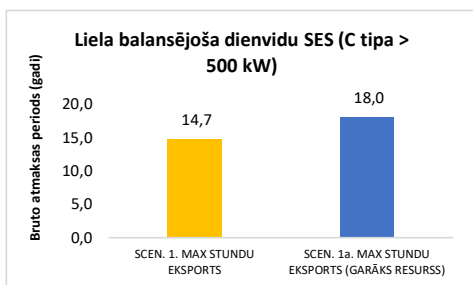
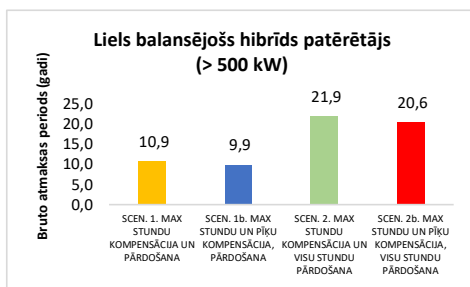
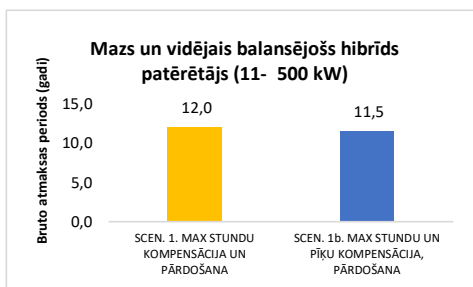
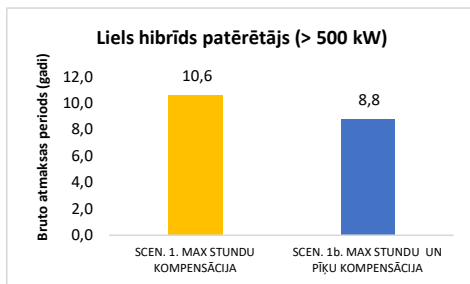
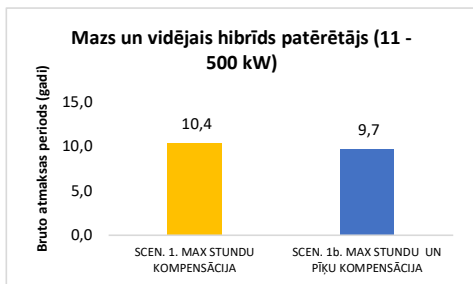
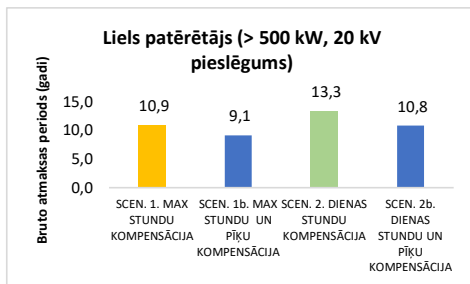
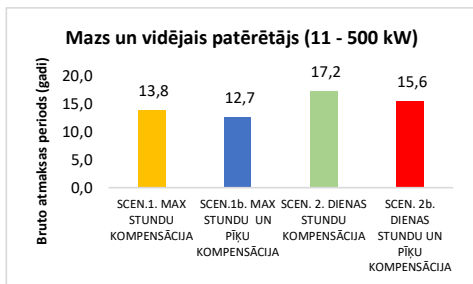
Enerģijas daudzums, ko var uzglabāt ar *PHEES* tehnoloģiju, ir atkarīgs no augstuma starpības starp rezervuāriem un ūdens daudzuma, ko var transportēt starp rezervuāriem. Pļaviņu, Ķeguma

un Rīgas HES augstums starpības/kritums ir 40 m, 14 m un 18 m, ūdenskrātuvju tilpumi ir attiecīgi 0,509 km³, 0,157 km³ un 0,339 km³. Detalizētāka tehnisko aspektu, kā arī investīciju izmaksu analīze Daugavas HES potenciālajai pielāgošanai sūkņu hidroelektroenerģijas uzkrāšanai ir ārpus šī pētījuma tvēruma.

Algoritmu rezultāti liecina, ka Latvijā ir liels vēja enerģijas attīstības potenciāls. Šo potenciālu var izmantot elektroenerģijas ražošanā mēnešos, kad hidroelektroenerģijas ražošana ir samazināta zemā ūdens līmeņa dēļ. Tas stiprinātu Latvijas elektroapgādi, samazinot atkarību no importētas enerģijas, un veicinātu klimata mērķu sasniegšanu. Hidroelektroenerģijas akumulācijas integrēšana esošajās Daugavas hidroelektrostacijās veicinātu atjaunojamās enerģijas izmantošanu. Šāda diversifikācija enerģijas ražošanā un uzglabāšanā nodrošinās gan drošību, gan ilgtspēju elektroapgādē.

2.4. Tehniski ekonomiskās analīze uzņēmumiem

2.10. attēlā redzami kopējie rezultāti visiem 22 scenārijiem no astoņām izvēlētajām alternatīvām, kas analizētas šajā pētījumā.



2.10. att. Bruto atpelnīšanās periods visām alternatīvām un visiem scenārijiem.

Autors uzskata, ka šīs tehniski ekonomiskās analīzes rezultāti varētu pārsteigt daudzus nozares ekspertus, jo patlaban valda uzskats, ka pie vidējas investīcijas zem 400 EUR/MWh elektroenerģijas akumulācija atpelnās biznesam saprotamā termiņā, kas tiek pieņemts zem 12 gadiem. Šī pētījuma jautājums ir, vai elektroenerģijas akumulācijas sistēmas atpelnās līdz

10 gadu laikā ar un bez papildu atbalsta ar sistēmu kapitālieguldījumiem zem 350 EUR/MWh mazām sistēmām un zem 300 EUR/MWh lielām sistēmām. Par atpelnīšanos ir pieņemts bruto atpelnīšanās periods, kur netiek ņemtas vērā kapitāla izmaksas, amortizācija un iekārtu degradācija. Izvēlēto sistēmu astoņas alternatīvas ir izvēlētas no reāliem dzīves apstākļiem, katrai aprēķinos izmantojot faktiskus parametru lielumus. Šī ir augsta detalizācijas pakāpe, kas ir izmantojama arī citās valstīs. Rezultātos nav attēloti pētījuma rezultāti, kas attiecas uz bankas un finanšu atbalsta instrumentu ietekmi uz projekta atpelnīšanās termiņu. Patlaban *Euribor* likmes ir augstas, un tas ietekmē šāda veida investīciju projektus.

Iegūtie dati liecina, ka bruto atpelnīšanās periods svārstās no 8,8 gadiem līdz 21,9 gadiem. Šīm svārstībām ir dažāda rakstura iezīmes, kas ir specifiskas katrai no izvēlētajām uzņēmumu īpatnībām. Minimumu no maksimuma galvenokārt atšķir akumulācijas sistēmas izvēle attiecīgā uzdevuma veikšanai. Liela hibrīda patērētāja maksimumstundu un pīķu kompensēšanai piemērota 0,25 C izlādes faktora sistēma, savukārt lielam balansējošam hibrīdam patērētājam maksimumstundu kompensācijai un visu stundu pārdošanai tika izvēlēta lēnākas uzlāde/izlādes sistēma ar 0,125 C faktoru. Līdz ar to arī nepieciešamās investīcijas palielinājās vairākas reizes. Ņemot vērā šo informāciju, autors izdara secinājumu, ka zemāks C faktors sniedz plašāku darbības diapazonu, kas var nodrošināt darbību ilgākā periodā, taču ekonomiskiem aprēķiniem tas rada lielāku kapitālieguldījumu slogu. Šajā analīzē tika pievērsta uzmanība iespējamām alternatīvām un scenārijiem, nevis biznesa loģikai. Šī metodoloģija palīdzēs uzņēmumiem gan Latvijā, gan arī ārpus tās iegūt precīzus rezultātus savu biznesa modeļu aprēķiniem.

Rezultāti atspoguļo, ka, uzstādot elektroenerģijas akumulācijas sistēmu, noteikti var samazināt atpelnīšanās periodu, ja projekta uzdevumā izvirza kā mērķi kompensēt ne tikai maksimumstundas, bet arī elektroenerģijas pašpatēriņa pīķus. Tā rezultātā patērētājs var samazināt ievadaizsardzības aparāta pieprasīto nominālu un samazināt ikmēneša elektroenerģijas rēķina pārvades tarifa daļu. Vidsprieguma abonentu piederības robežā esošiem patērētājiem ieguvums ir būtiskāks nekā zemsprieguma abonentiem, par ko liecina arī atpelnīšanās perioda starpība. Lielam hibrīdam patērētājam aprēķinos ņemot vērā ne tikai maksimumstundu kompensāciju, bet arī patērētāja pīķu kompensāciju, atpelnīšanās periods samazinās par 17 %. Konkrētajā piemērā nepieciešamo kapitālieguldījumu apmērs nemainās, taču mainās elektroenerģijas akumulācijas sistēmas lietošanas paradumi, daļēji kompensējot patērētāja pīķa nepieciešamību ar uzkrāto elektroenerģiju. Pīķa patēriņi šim uzņēmumam ir reti, tāpēc tas būtiski neietekmē akumulatoru sistēmas ilgmūžību. Tieši tādi paši rezultāti ir redzami arī starp dienas stundu un dienas stundu ar pīķa stundu kompensāciju. Taču autors secina arī to, ka kompensēt dienas stundas ir neizdevīgāk nekā kompensēt maksimumstundas, jo elektroenerģijas cenas ir zemākas dienas laikā, salīdzinot ar maksimumstundām. Tātad, ja jāizvēlas starp dienas stundām, maksimumstundām un pīķa slodzēm, tad tehniski ekonomiski pamatotāk ir kompensēt maksimumstundas un pīķa slodzes neatkarīgi no klienta profila alternatīvas.

Šī pētījuma rezultāti labi parāda, kā elektroenerģijas akumulācijas sistēma veido sinerģiju ar saules enerģiju. Var secināt, ka efektīvākais veids, kā izmantot elektroenerģijas akumulācijas sistēmu, ir uzstādīt to lielam elektroenerģijas patērētājam, kuram ir uzstādīti *PV* bez eksportam paredzētās jaudas. Šajā alternatīvā scenārijā tiek iegūts īsākais atpelnīšanās periods, jo

sistēmas kapitālieguldījumi ir salīdzinoši zemāki ar citām alternatīvām uz vienu MWh, jo lielām sistēmām īpatnējie ieguldījumi uz MWh ir zemāki nekā mazām sistēmām, kā arī tas, vai ir esošs patērētāja elektroenerģijas pieslēgums.

Ir jāatzīst, ka reālā praksē būtu vērojamas rezultātu korekcijas alternatīvās ar uzstādītiem saules paneļiem, jo ražības profils ir ar sezonālu raksturu. Tādā gadījumā ir izaicinošāk efektīvi izmantot elektroenerģijas pārpalikumus, salāgojot ar biržas cenām pie akumulatoru uzlādes, taču šīs novirzes tiktu kompensētas no ieņēmumiem par zaļās izcelsmes sertifikātiem, kas arī nav ņemti vērā šī pētījuma ietvaros.

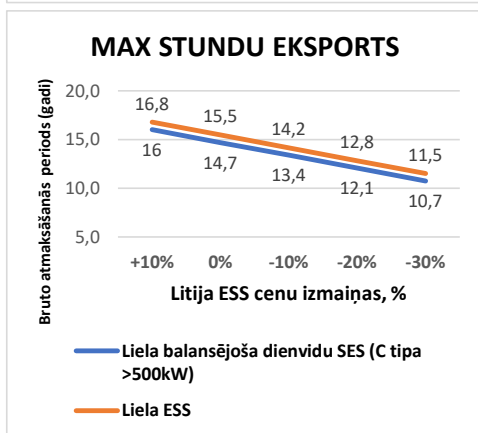
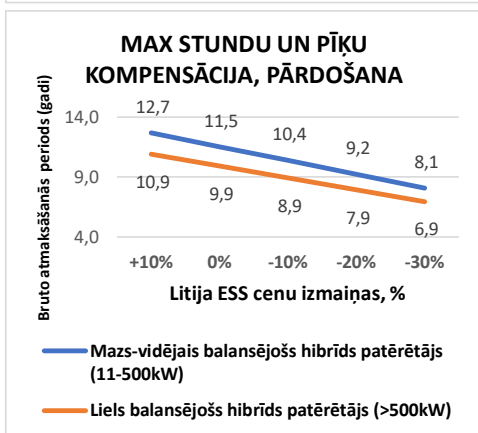
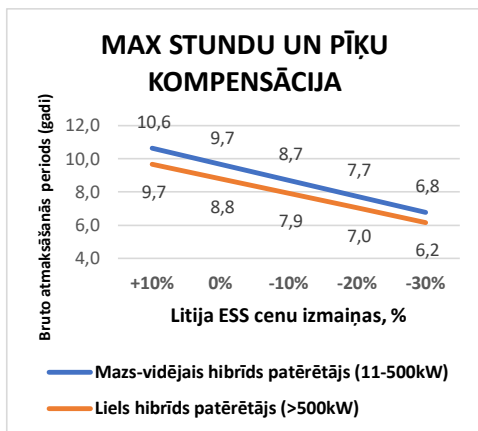
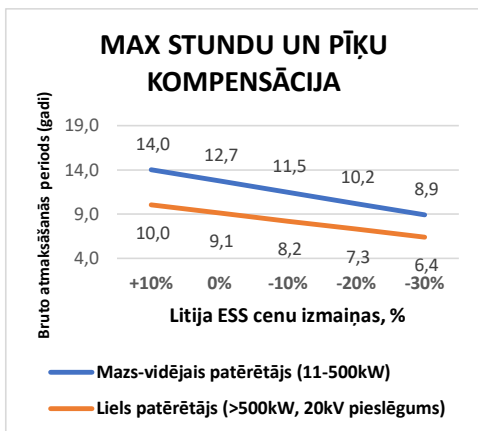
Galvenais šī pētījuma jautājums ir apstiprināts – elektroenerģijas akumulācijas sistēma uzņēmumiem atpelnās īsākā laika periodā nekā 10 gadu. Šādai sistēmai ir jābūt uzstādītai uzņēmumā ar esošu elektroenerģijas pašpatēriņu, kas vēlas kompensēt dārgās elektroenerģijas cenas un savas pīķa slodzes, kā arī šim uzņēmumam ir uzstādīti saules paneļi, un tas saražoto pārpalikumu dienas laikā uzkrāj un vakara dārgo stundu laikā pārdod elektroenerģijas tirgotājiem. Šāds risinājums viennozīmīgi ir izcils veids, kā radīt papildu enerģētisko neatkarību, būt ilgtspējīgākam, kā arī palielināt atjaunojamo energoresursu efektīvāku izmantošanu, novirzot to no dienas uz maksimumstundām, tādējādi sabalansējot kopējo elektroenerģijas tirgu.

Jutīguma analīze scenārijiem, kuri katrā no alternatīvām ir ar zemāko bruto atpelnīšanās periodu

Ņemot vērā tehnoloģiju attīstības un cenu straujo dinamiku, tika veikta jutīguma analīze scenārijiem, kas katrā no alternatīvām uzrādīja īsāko bruto atpelnīšanās periodu. Autors prognozē, ka faktori, piemēram, pieprasījuma pārsniegšana vai ģeopolitiskas svārstības, var īslaicīgi paaugstināt litija jonu elektroenerģijas uzrāšanas sistēmu cenas līdz 10 %. Nākotnē gaidāms straujš cenu samazinājums, kas var rezultēties ar cenu samazinājuma galaklientam līdz 30 %. Analīze liecina, ka šīs tehnoloģijas izplatība varētu strauji pieaugt un jau pēc 3–5 gadiem iespējams sasniegt 30 % cenu samazinājumu.

Turklāt analīze liecina, ka nākamo 2–3 gadu laikā parādīsies vairāk alternatīvu un scenāriju ar ātrāku atpelnīšanās periodu, kas bez valsts atbalsta varētu iekļauties 10 gadu robežās. Tas ietekmēs tehnoloģiju izplatību, līdzīgi kā tas noticis ar saules paneļiem. Strauju attīstību Baltijas jūras reģionā prognozē arī vēja turbīnām. Lielām brīvi stāvošām elektroenerģijas akumulācijas sistēmām un saules parkiem pievienotām akumulācijas sistēmām atpelnīšanās periods nesamazinās tik strauji kā gadījumos, kad ir esošs patērētājs, jo elektropieslēguma izmaksas nesamazinās tik strauji.

Runājot par atbalsta mehānismiem ar 30 % grantu, tie rada līdzīgu ietekmi kā 30 % cenu samazinājums. Valsts atbalsts ne tikai uzlabotu uzņēmumu situāciju, bet arī samazinātu elektroenerģijas tīklu noslodzi, piedāvājot iespējas pieslēgt jaunus elektroenerģijas patērētājus. Tas veicinātu efektīvu tīkla darbību un uzlabotu uzņēmumu konkurētspēju, samazinot elektroenerģijas sadales un pārvades tarifus. Autors secina, ka viens atbalsts varētu veicināt vairākus mērķus.



2.11. att. Jūtīguma analīze scenārijiem, kas katrā no alternatīvām ir ar zemāko bruto atpelnīšanās periodu.

SECINĀJUMI

1. Elektroenerģijas akumulācijas izvērtējums ceļā uz ilgtspējīgu energoapgādi ļauj novērtēt šos risinājumus dažādu būtisku aspektu griezumā, kas ir svarīgi ne tikai politikas veidotājiem, bet arī potenciālajiem tehnoloģiju lietotājiem.
2. Daudzkritēriju *TOPSIS* analīzes rezultāti ļauj secināt, ka pašreiz litija jona akumulatori mazākiem un hidroelektrostacijas lielākiem projektiem ir atbilstošākie elektroenerģijas akumulācijas risinājumi, sākot no mājsaimniecībām un beidzot ar valsts līmeni.
3. Viens no izveidotiem SD modeļiem ļauj analizēt elektroenerģijas akumulācijas risinājumu ieviešanas praksi Latvijā. SD modelis ir verificēts un izmantojams ne tikai Latvijā, bet arī citās valstīs. Arī otrs SD modelis, kas ļauj ērtā veidā analizēt mājsaimniecību izdevīgumu, ņemot vērā dažādus parametrus, ir izmantojams arī ārpus Latvijas. Ir skaidrs secinājums, ka uzstādīt akumulācijas risinājumus mājsaimniecībām bez saules paneļiem ir ekonomiski nepamatoti.
4. Enerģētikas nozare ir lielākā oglekļa dioksīda emisiju veicinātāja Eiropas Savienībā, un tai ir liela nozīme klimata pārmaiņu mazināšanā. Šī promocijas darba rezultāti liecina, ka potenciāls integrēt akumulācijas risinājumus uzņēmumiem ir augsts jau tagad. Izvirzītais jautājums par bruto atpelnišanās periodu tika atbildēts pozitīvi. Ir projekta mērķi, kuros atpelnišanās periods ir zem 10 gadiem arī bez valsts atbalsta. To veicina elektroenerģijas cenas un tehnoloģisko risinājumu straujš kapitālizdevumu kritums. Gaidāms, ka kritums tuvāko trīs gadu laikā pozitīvi ietekmēs daudzus potenciālos projektus.
5. Elektroenerģijas akumulācija ir kritiski nepieciešama, lai veicinātu pāreju uz atjaunojamo energoresursu izmantošanu. Ņemot vērā Latvijas un Baltijas jūras reģiona vēja potenciālu, būs neiespējami efektīvi izmantot saražoto elektrību bez atbilstošas enerģijas uzkrāšanas risinājumiem.
6. Ņemot vērā pētījuma rezultātus, autors secina, ka ar 20 miljoniem EUR piecu gadu subsīdijas tehnoloģijām ar 50 % atbalsta intensitāti patiešām nav pietiekami, lai ievērojami palielinātu kombinētās *PV* un akumulatoru sistēmas ieviešanu.
7. Elektroenerģijas akumulācijas risinājumi ļauj palielināt efektīvo spēju iegūt un patērēt atjaunojamo enerģiju un vienlaikus palielināt atjaunojamās enerģijas īpatsvaru patēriņa profilā, kā arī uzlabot elektroapgādes noturību pret dažādiem riskiem. Tas attiecas uz patērētājiem un to grupām, sākot no mājsaimniecības līdz reģionu līmenim.

IETEIKUMI

1. Paplašināt elektroenerģijas akumulācijas diskusijas sabiedrībā, lai palielinātu iedzīvotāju izpratni par aktualitāti un nepieciešamību.
2. Veidot papildu atbalsta instrumentus pētniecības iestādēm elektroenerģijas akumulācijas risinājumu un to komercializācijas sektorā.
3. Strādāt pie politiskiem risinājumiem, lai veicinātu elektroenerģijas patēriņa profila izmaiņas valsts līmenī.



Edgars Kudurs dzimis 1986. gadā Cēsīs. Rīgas Tehniskajā universitātē ieguvis būvinženiera bakalaura grādu (2018) un vides zinātņu maģistra grādu (2020). No 2008. gada piedalījies biogāzes rūpnīcas būvniecībā un saules paneļu uzstādīšanas projektos Latvijā un ārvalstīs. No 2017. līdz 2022. gadam strādājis valsts finanšu institūcijā ALTUM, ieņemot valdes priekšsēdētāja padomnieka amatu, vadījis Uzņēmumu energoefektivitātes departamentu. Patlaban konsultē uzņēmumus ilgtspējīgas attīstības jautājumos neatkarīga eksperta statusā. Zinātniskās intereses saistītas ar ilgtspējas jautājumiem.