

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte

Enerģētikas institūts

Igors Moškins

Doktora studiju programmas “Enerģētika un elektrotehnika” doktorants

**ENERGOOBJEKTU ATTĪSTĪBAS UZDEVUMU
ATRISINĀŠANA TIRGUS EKONOMIKAS UN
NENOTEIKTĪBAS APSTĀKĻOS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

profesors *Dr. habil. sc. ing.*

ANTANS SAUĻUS SAUHATS

vadošā pētniece *Dr. sc. ing.*

ĻUBOVA PETRIČENKO

RTU Izdevniecība

Rīga 2019

Moškina, I. Energoobjektu attīstības uzdevumu
atrisināšana tirgus ekonomikas un nenoteiktības
apstākļos. Promocijas darba kopsavilkums Rīga:
RTU Izdevniecība, 2019. 33 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU
P-05” (enerģētika) 2018. gada 20. decembra
lēmumu Nr. 16/14.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā “Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

Šis darbs izstrādāts ar Latvijas Zinātnes padomes projekta atbalstu “Viedās enerģētikas stratēģiskā un operatīvā vadība (*I-POWER*)” (Izp-2018/1-0066).

Šis darbs izstrādāts ar Valsts pētījumu programmas projekta “Latvijas dabasgāzes infrastruktūras attīstības tendences, izaicinājumi un risinājumi (*LAGAS*)” Nr. VPP-EM-INFRA-2018/1-0003.

ISBN 978-9934-22-264-1 (print)
978-9934-22-265-8 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2019. gada 25. aprīlī plkst. 11.00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 306. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

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

Režīmu un plānošanas dienesta projektu vadītājs *Dr. sc. ing.* Aleksandrs Ļvovs,
AS “Augstsprieguma tīkls”, Latvija

Vecākais pētnieks *Dr. sc. ing.* Arturas Klementavicius,
Lietuvas Enerģētikas institūts, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Igors Moškins (paraksts)

Datums

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, 6 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 38 attēli, 14 tabulu, kopā 126 lappuses. Literatūras sarakstā ir 145 nosaukumi.

SATURS

1. Darba vispārējais raksturojums	5
Darba aktualitāte	5
Darba hipotēze, mērķis un uzdevumi.....	6
Promocijas darba zinātniskā novitāte.....	7
Izmantotās metodes un rīki	7
Promocijas darba praktiskā nozīme	7
Autora personiskais ieguldījums.....	8
Pētījumu rezultātu aprobācija	8
Promocijas darba forma, struktūra un saturs.....	10
2. Energosistēmu un to objektu attīstības un plānošanas problēmas un risinājumi	11
3. Patērētāju–ražotāju pieslēguma elektriskajam tīklam shēmas pamatojums.....	14
Metodoloģija un izmantojamie dati	15
4. Kooperatīvā pieeja tīklu projektos	21
5. Kombinēto elektrostaciju darbības optimizēšanas iespējas, izmantojot kooperatīvo pieeju	24
Secinājumi	27
Literatūras saraksts	30

1. DARBA VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS

Darba aktualitāte

Cilvēka dzīves kvalitāte ir tieši atkarīga no enerģijas patēriņa. Vēsturiskās attīstības gaitā, iegūstot visa veida jaunus lietderīgus produktus no dabas sistēmām, tiek patērēts arvien vairāk enerģijas.

Kopš šā gadsimta sākuma elektroenerģijas patēriņš vienas lauksaimniecības produkcijas vienības ražošanai attīstītajās valstīs ir palielinājies 8–10 reizes, vienas rūpniecības produkcijas vienības ražošanai – 10–12 reizes.

Enerģijas taupīšana, palielinot patēriņa efektivitāti, faktiski noved pie tās izmantošanas apjoma palielināšanās, nevis samazināšanās – konkrētam darbības veidam ir vajadzīgs mazāks degvielas daudzums, tāpēc atbrīvotie resursi tiek izmantoti citiem mērķiem. Rezultātā palielinās ekonomiskā aktivitāte, un pieaug enerģijas resursu patēriņš.

Enerģijas nepieciešamība ir acīmredzama cilvēku normālai dzīves aktivitātei, rūpniecībai un pasaules civilizācijas attīstības turpināšanai. Enerģētikas problēma visai pasaules sabiedrībai ir ļoti aktuāla, un tā neaprobežojas tikai ar ogļu, naftas un gāzes rezervju apjoma un to ieguves, pārstrādes un izmantošanas pieauguma izmaksām. Katru gadu vides problēmas kļūst arvien aktuālākas. Mūsdienu pasaulē katrā ziņā jāpārskata enerģētikas jomas politika.

Pasaules iedzīvotāju skaita pieaugums, energoresursu ierobežotība un tiekšanās pēc mūsdienu civilizācijas piedāvātajiem labumiem ir radījuši grandioza apmēra energosistēmas [2].

Tajās ietilpst tūkstošiem ģeneratoru, transformatoru, simtiem tūkstošu kilometru elektropārvades līniju un miljoniem patērētāju. Energosistēmas darbības uzturēšanai un attīstībai jebkurā valstī ir nepieciešami milzīgi ieguldījumi. Energosistēmas darbību lielā mērā ietekmē daudzi dabas faktori: temperatūra, vēja ātrums, saules starojuma intensitāte. Darbības apstākļu izmaiņas rada nepieciešamību mainīt arī energoobjektu darbības režīmus. Daudzus faktorus nav iespējams precīzi izmērīt vai aprakstīt kā varbūtīgus lielumus, tāpēc daudzi lēmumi jāpieņem nenoteiktības apstākļos.

Tas ir viens no faktoriem, kas aktualizē virkni nopietnu ar enerģētiku saistītu problēmu:

- energoapgādes efektivitāte un pieejamība;
- energoapgādes drošums;
- ietekme uz vidi;
- ilgtspējīgums.

Minēto problēmu nopietnība ir iemesls starptautiskā līmenī pieņemtiem lēmumiem par energosistēmu restrukturizāciju un vadības sistēmas izmaiņām. Energosistēma tika sadalīta daudzās juridiski neatkarīgās, savstarpēji konkurējošās daļās. Tieši konkurence kļuvusi par vienu no galvenajiem faktoriem, kas var nodrošināt racionālu energosistēmu attīstību. Konkurences apstākļos izdzīvos uzņēmumi, kas pieņem pareizus, tehniski un ekonomiski pamatotus lēmumus. Konkurences stimulēšanai organizēti **enerģijas tirgi**.

Sistēmas sadalīšana vairākās daļās samazina vadāmo objektu izmērus, kas ir vienkāršojis vadības un lēmumu pieņemšanas modeļus un algoritmus, taču tajā pašā laikā rodas jaunas

problēmas, kas pirmām kārtām saistītas ar konkurentu darbības un tirgus nosacījumu savstarpējo ietekmi.

Vienlaikus ar sistēmu sadali daļās un izmēru samazināšanos notiek vēl viens ļoti svarīgs process – masveidīga **atjaunīgo energoresursu** ieviešana praksē. Daudzos gadījumos tiek izveidoti mazas jaudas ģeneratori, ko izvieto tuvu patērētājiem. Var apgalvot, ka izkļiedēto ģeneratoru skaits energosistēmās pieaug ārkārtīgi strauji. Atjaunīgo energoavotu izmantošanu sekmē politiskie lēmumi un dažāda veida atbalsts, ko nosaka valsts līmenī pieņemtie lēmumi.

Lai nodrošinātu konkurenci plašos reģionos un izmantotu lielas energosistēmas priekšrocības, notiek **elektrisko tīklu** attīstība. Šis process ir īpaši svarīgs Latvijai un Baltijas valstīm. Ir uzbūvētas vai tiek būvētas jaunas augstsprieguma līnijas, notiek apakšstaciju rekonstrukcija.

Apkopojot teikto, varam apgalvot, ka enerģētikas nozarē notiek būtiskas izmaiņas. Šīs izmaiņas prasa jaunu objektu būvi vai esošo rekonstrukciju. Visos gadījumos vispirms tiek izstrādāti **attiecīgi projekti**. Lēmumi, kas pieņemti projektēšanas stadijā, nosaka topošā objekta atbilstību visiem energosistēmu attīstības globālajiem mērķiem. Tāpēc pētījumi, kas velīti projektēšanas lēmumu pamatojumam, ir aktuāli un var sekmēt šo energoapgādes mērķu sasniegšanu.

Darba hipotēze, mērķis un uzdevumi

Darba hipotēze. Enegosistēmas attīstības procesa dalībnieku kooperācija var paaugstināt projektu rentabilitāti.

Darba mērķis. Darba mērķis ir juridiski neatkarīgo energosistēmas daļu darbības attīstība tirgus ekonomikas un nenoteiktības apstākļos, lai uzlabotu energoapgādes efektivitāti. Šī mērķa sasniegšanai tiek risināti šādi **uzdevumi**:

- atsevišķi darbojošos energoapgādes sistēmu daļu darbības optimizācijas pieeju un metodiku analīze projektēšanas un ekspluatācijas procesā;
- enerģētisko objektu projektu tehniski ekonomiskā pamatojuma uzdevumu atrisināšanas pieeju un metodiku analīze un attīstība;
- kooperatīvās uzvedības efektivitātes pamatojums un uzdevuma atrisināšanas algoritma sintēze;
- kooperatīvās spēļu teorijas metodes lietojuma pamatojums augstsprieguma elektropārvades līniju projektēšanā;
- peļņas paaugstināšanas un efektīvas sadalīšanas uzdevuma atrisināšanas algoritma sintēze jaudīgas saules elektrostacijas projektam, izmantojot jaunu aprēķinu un prognozēšanas modeli un kooperatīvās spēļu teorijas metodes;
- mazo HES un saules elektrostaciju kooperatīvās uzvedības efektivitātes pamatojums un attīstības uzdevumu atrisināšanas algoritma sintēze.

Promocijas darba zinātniskā novitāte

Šajā darbā veikto pētījumu zinātniskie rezultāti:

- veikta energosistēmu attīstības projektu izpildes metožu un lēmumu pieņemšanas pieeju, kurās izmantota spēļu teorija, analīze;
- pamatota kooperatīvas pieejas lietderība un efektivitāte, veidojot un realizējot elektrisko staciju, elektisko tīklu un ražotājlietotāju būves projektus. Sintēzēti attiecīgie algoritmi un detalizēti modeļi, identificēti un savākti ieejas dati un veikta modeļu verifikācija;
- pamatotas projektēšanas uzdevumu mērķa funkcijas un, izmantojot stohastisko uzdevumu nostādni, sintezēti algoritmi programmatūras aprēķinu realizēšanai;
- izmantojot ģenerācijas un patēriņa reģistrācijas datubāzes, atrisināti tehniski ekonomiska pamatojuma uzdevumu piemēri elektrisko tīklu būvniecībā, saules staciju un hidrostaciju projektēšanā.

Izmantotās metodes un rīki

Darbā izmantotas šādas pētīšanas metodes un līdzekļi:

- 1) kooperatīvo spēļu teorija un Šepli sadale;
- 2) *MatLab 2013a* interaktīvā vide: intensīvai skaitļošanai, datu analīzei un to vizuālai attēlošanai;
- 3) stohastisko procesu teorijas pieņēmumi;
- 4) *Microsoft Excel 2013* programmnodrošinājums;
- 5) stohastiskā pieeja un Montekarlo metode objektu struktūras un parametru optimizācijas uzdevuma risināšanai;
- 6) saules elektrostacijas enerģijas izstrādes un vairāku Latvijas lietotāju enerģijas pieprasījuma mērījumu datubāze.

Promocijas darba praktiskā nozīme

1. Izstrādāto matemātisko modeļu izmantošana energosistēmu attīstības projektos ļaus paaugstināt Latvijas atjaunīgo elektrības ģenerācijas avotu ražošanas darba efektivitāti elektroenerģijas tirgū. Metodiku var izmantot daudzas projektēšanas organizācijas, pārvades un sadales tīklu operatori.
2. Rekomendāciju mainīt ražotāju pieslēguma nosacījumus iespējams realizēt, Latvijas Ekonomikas ministrijai pieņemot attiecīgus lēmumus.
3. Algoritmi un metodika izmantota Eiropas kopienas finansēto projektu (*HORIZON 2020* programma) un LZP un valsts pētījumu programmu enerģētikā izpildei.
4. Piedāvāto un pamatoto ražotājlietotāju būves projektu kooperatīvo realizēšanas pieeju iespējams izmantot tūkstošiem mazjaudas saules staciju uzbūvē.
5. Izstrādāts piemērs un izrēķināts projekta ieguvums, izmantojot kooperatīvās spēļu teorijas metodes reālā Latvijas 330 kV augstsprieguma līnijas projektā “Kurzemes

loks”, kurā promocijas darba autors piedalījās no 2016. līdz 2018. gadam, veicot vadošā projektētāja pienākumus.

Autora personiskais ieguldījums

1953. gadā amerikāņu ekonomists un matemātiķis Loids Štauels Šeplijs, kurš 2012. gadā saņēma Nobela prēmiju, piedāvāja savu variantu koalīcijas spēļu risināšanai, kur katrā spēlē ir iespējams vienīgais papildu peļņas sadalījums – Šeplija vektors (*Shapley value*). Šo atklājumu tūlīt sāka plaši izmantot ekonomikā un matemātikā. Šīs pieejas izmantošanai enerģētikas uzdevumos tika veltīti M. Bočkarjovas, G. Vempera, N. Jankovska, S. Berjozkinas, R. Petričenko, H. H. Kobana (*H. H. Coban*) promocijas darbi, kas tika izstrādāti RTU EEF Enerģētikas institūtā. Šis darbs ir iepriekšminēto darbu turpinājums. Turklāt kopā ar darba vadītāju noformulēti un atrisināti jauni uzdevumi.

1. Aplūkots reāls Latvijas projekts “Kurzemes loks”, kurā izskatītas spēļu teorijas izmantošanas iespējas. Izrēķināts projekta iespējamais ieguvums, izmantojot kooperatīvo spēļu teorijas metodes, atrisinot pretrunas starp pārvades un sadales tīkliem.
2. Jaudīgas saules stacijas uzbūves un pieslēguma tīklam projekta tehniski ekonomiskā pamatojuma metodikas izstrāde.
3. Ražotājlietotāju kooperācijas iespēju pamatojums un atrisināšanas algoritms.
4. Saules elektrostaciju un hidroelektrostaciju kooperācijas iespēju novērtējums (kopā ar H. H. Čobanu).
5. Izmantota Latvijas patērētāju datubāze, ko izveidojis inženierzinātņu doktors Nauris Jankovskis.

Visi aprēķini, rezultātu analīze, aprēķinu procedūru programmēšana un pārbaude, rezultātu prezentēšana, secinājumi un apkopojumi pieder autoram personīgi.

Pētījumu rezultātu aprobācija

Publikācijas

1. I. Moshkin, S. Berjozkina, A. Sauhats. Transmission Network Development Planning by Using a Cooperative Game Theory Approach. (Publicēta zinātniskās konferences rakstu krājumā – The 7th International Conference on Electrical and Control Technologies, Kaunas, Lithuania).
2. I. Moshkin, S. Berjozkina, A. Sauhats. Solving of Power Systems Development Tasks in Market and Uncertainty Conditions. (Publicēta zinātniskās konferences rakstu krājumā – EEM 2012: 9th International Conference on the European Energy Market, Florence, Italy).
3. A. Sauhats, A. Utans, M. Silarajs, J. Kucajevs, D. Antonovs, E. Biela and I. Moshkin. Power System Dynamical Simulation Application for Out-of-Step Relay Testing. Journal of Energy and Power Engineering, ISSN1934-8975, USA.

4. I. Moshkin, A. Sauhats. Transmission and Optical Networks Creating By Using a Cooperative Game Theory Approach. (53rd International Scientific Conference of Riga Technical University, Riga, Latvia).
5. I. Moshkin, A. Sauhats. Solving District Heating Problems by Using Cooperative Game Theory Methods. 2016 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC 2016), Florence, Italy, June 6–9, 2017.
6. I. Moshkin, A. Sauhats. Solving District Heating Optimization Problems in the Market Conditions. 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga-Cesis, Latvia, October 13–14, 2016.
7. Hasan H. Coban, Igors Moskins, Antans Sauhats. The Optimization Capabilities of Combined Solar/Hydropower Plant Operation. The 4th Workshop on AIEEE'16, Vilnius, Lithuania, November 10–12, 2016.
8. I. Moshkin, J. Kucajevs. Solving Company Cooperation Tasks in the Construction of Power Transmission Lines. 17th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, Milan, Italy, June 6–9, 2017.
9. V. Oboskalov, R. Valiev, S. Gusev A. Mahnitko, I. Moshkin. An Analytical Approach for Calculations of Power System Generation Adequacy Indices (accepted for publication), 2017 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, October 12–13, 2017.
10. Antans Sauhats, Laila Zemite, Lubov Petrichenko, Igor Moshkin and Aivo Jasevics. Estimating the Economic Impacts of Net Metering Schemes for Residential PV Systems with Profiling of Power Demand, Generation, and Market Prices. *Energies* (ISSN 1996-1073; CODEN: ENERGA), 2018.
11. Lubov Petrichenko, Laila Zemite, Galina Bockarjova, Igor Moshkin, Aivo Jasevics. *Shapley value-based distribution of the costs of solar photovoltaic plant grid connection.*

Promocijas darba daļas tika prezentētas un apspriestas starptautiskās zinātniskās konferencēs

1. The 7th International Conference on Electrical and Control Technologies, Kaunas, Lithuania, 3–4 May 2012.
2. EEM 2012: 9th International Conference on the European Energy Market, Florence, Italy, 10–12 May 2012.
3. 53rd International Scientific Conference of Riga Technical University, Riga, Latvia, 11–12 October 2012.
4. 2016 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC 2016), Florence, Italy, June 6–9, 2017.
5. 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga-Cesis, Latvia, October 13–14, 2016.
6. The 4th Workshop on AIEEE'16, Vilnius, Lithuania, November 10–12, 2016.

7. 17th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, Milan, Italy, June 6–9, 2017.

Promocijas darba forma, struktūra un saturs

Promocijas darbs uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, sešas nodaļas, secinājumi un rekomendācijas, pielikums un literatūras saraksts. Darbā ir 38 attēli, 15 tabulu, kopā 118 lappuses. Literatūras sarakstā norādīti 145 izmantotās literatūras avoti.

2. ENERGOSISTĒMU UN TO OBJEKTU ATTĪSTĪBAS UN PLĀNOŠANAS PROBLĒMAS UN RISINĀJUMI

Nodaļas ievadā tiek atzīmēts, ka saistībā ar enerģijas pieprasījuma palielināšanos projektēšanas uzdevums strauji sarežģījas. Daži galvenie iemesli:

- 1) energosistēmu izmēru un to elementu skaita pieaugums; pat neliela energosistēma ietver simtiem tūkstošu elementu (ģeneratori, dažāda sprieguma līnijas, patērētāji, apakšstacijas);
- 2) pieaug prasības attiecībā uz drošumu, īpaši lielo pilsētu elektroapgādē;
- 3) pieaudzis pieejamo tehnoloģiju skaits, kas radījis nepieciešamību izskatīt jaunas attīstības alternatīvas;
- 4) enerģijas ražošana ir kļuvusi par galveno faktoru, kas ietekmē klimatu.

Projekti ir ļoti dažādi. Var projektēt elektrostacijas ar gigavatos mērāmu jaudu un nepieciešamām investīcijām miljardiem eiro apjomā. Un var projektēt kilovatos mērāmas jaudas mikroģenerāciju ar investīcijām simtos eiro. Pirmajā gadījumā projektēšanā piedalās simtiem projektētāju, otru var izpildīt viens sertificēts speciālists. Tajā pašā laikā abos robežgadījumos var definēt līdzīgus projektēšanas soļus.

1. Enerģijas apjoma un jaudas pieprasījuma aplēse.
2. Tehnoloģiju izvēle.
3. Investīciju apjoma novērtēšana.
4. Rentabilitātes novērtēšana.
5. Plānojamā objekta izveides saskaņošana ar valsts iestādēm.
6. Darbības saskaņošana ar visu energosistēmu.
7. Darbības saskaņošana ar citām inženiersistēmām (transports, komunikācijas, iespējams, gāze u. c.).
8. Ietekmes uz apkārtējo vidi novērtēšana.

Sabiedrības centieni energoapgādes efektivitātes un drošuma paaugstināšanai un ietekmes uz klimata pārmainām samazināšanai ir radījuši būtiskas izmaiņas enerģijas ražošanā [3].

1. Strauji aug atjaunojamo enerģijas avotu (AEA) skaits, jauda un īpatsvars saražotajā enerģijas daudzumā [3].
2. Pieaugusi koģenerācijas staciju loma [4], [5].

Daudzās valstīs energosistēma ir sadalīta vairākās neatkarīgās daļās, kas, no vienas puses, savstarpēji konkurē, no otras, nodrošina apmaiņu ar rezervēm, nepieciešamības gadījumā sniedz palīdzību partneriem. Lai nodrošinātu neatkarīgo enerģijas ražotāju koordināciju, izveidoti dažāda tipa enerģijas tirgi, ar kuru palīdzību tiek ieviesta zināma kārtība kopējā darbībā. Vienlaikus tirgus apstākļos veidojas mainīgas enerģijas cenas. Tādējādi ražotāji ir spiesti pielāgot enerģijas izstrādi mainīgām cenām [6].

Apkopojot atzīmētās mūsdienu energosistēmas darbības īpatnības, tiek apgalvots: energokompāniju darbība un to raksturojošie faktori, tādi kā saražotās enerģijas un izmantotā kurināmā daudzums, peļņa, ražošanas izmaksas un citi, ir mainīgi un atkarīgi no dabas faktoriem. Plānojot nākotnes energosistēmas režīmus, jāņem vērā daudzi ietekmējošie faktori

un procesi. Lai veiktu energoobjektu analīzi, ir nepieciešami ietekmējošo procesu un apskatāmo objektu matemātiskie modeļi. Tieši šādu modeļu sintēzei ir veltīta ievērojama šī darba daļa.

Lai saprastu plānošanas uzdevuma sarežģītību, tiek apskatīti galvenie grūtību avoti; atzīmēts, ka nopietnas grūtības parādās tālāk minētajās jomās: naudas plūsmas novērtēšanā, definējot daudzus mērķus un aprēķinot lielu kritēriju skaitu; ņemot vērā stohastisko procesu ietekmi; veicot optimizēšanas procedūras izvēli un realizāciju.

Atsevišķi apskatīta Šeplija [7] pieeja un ieguvuma sadalījums starp koalīcijas dalībniekiem – Šeplija vērtība. Kooperatīvas uzvedības gadījumā pastāv problēma saistībā ar peļņas sadali koalīciju dalībnieku starpā. Vienkāršais risinājums būtu iedalīt katram spēlētājam tā ieguldījumu c_i :

$$c_i = R(S \cup \{i\}) - R(S), \quad (2.1.)$$

kur

$R(S)$ – koalīcijas S peļņa;

$R(S \cup \{i\})$ – koalīcijas S peļņa, piedaloties spēlētājam i .

Taču šāda pieeja nav anonīma, t. i., spēlētāju izkārtojums ietekmē to saņemtās atlīdzības apjomu.

Spēļu teorijā Šeplija vērtība (2.2. vienādojums) apraksta vienu pieeju taisnīgai ieguvumu sadalei, izvairoties no minētā trūkuma. Taisnīga sadale tiek nodrošināta, vienīgā veidā izvēloties gadījuma izkārtojumu un piešķirot katram spēlētājam tā sagaidāmās robežizmaksas izkārtojumā. Spēlētāji var izveidot $n!$ dažādus gadījuma izkārtojumus, tāpēc varbūtība, ka kopa S tiks ierindota tieši pirms spēlētāja i , ir: $|S|! (n - 1 - |S|)! / n!$. Tādējādi spēlētāja i saņemtais papildu ieguvums ir:

$$\varphi_i = \sum_{i \notin S \subseteq N} \frac{|S|!(n-1-|S|)!}{n!} (R(S \cup \{i\}) - R(S)), \quad (2.2.)$$

kur n ir spēlētāju kopskaits;

$|S| - i$ -tās kopas S lielums, summa ietver visas N apakškopas S , kas nesatur spēlētāju i .

Visvienkāršākajā gadījumā, kad spēlē piedalās tikai divi spēlētāji, 2.2. izteiksme vienkāršojas un iegūst šādu formu:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \frac{(R(S \cup \{i\}) - R(S))}{2}. \quad (2.3.)$$

Šeplija vērtība apraksta taisnīgo (vispārpieņemto aksiomu izpratnē) [8], [2] papildu ieguvumu sadalījumu gadījumā, kad tiek veidota koalīcija. Cita starpā definīcija balstās uz pieņēmumu, ka koalīciju veidojošo spēlētāju kombinācijas ir vienādi varbūtīgas. Reālajā dzīvē šis pieņēmums var neīstenoties sakarā ar uzņēmumu – tirgus dalībnieku vadības iniciatīvas un kompetences līmeņa atšķirībām. Viens šāda veida gadījums ir aplūkots turpmāk, un ir izveidots atbilstošais ieguvuma sadalījuma algoritms. Pie tam tiek izdarīts šāds pieņēmums: starp n uzņēmumiem – kandidātiem dalībai koalīcijā – var būt viens iniciators, piemēram, j -tais uzņēmums, kas ir ierosinājis ideju veidot šo koalīciju. Šajā gadījumā koalīciju var veidot pakāpeniski, t. i., pārējie uzņēmumi pievienojas j -tajam uzņēmumam cits pēc cita. Šajā procesā iniciators var izvēlēties šādu stratēģiju: maksimālās kopējās peļņas gūšana iniciatoram brīdī,

kad tiek izveidota pilna koalīcija no n dalībniekiem. Šāda stratēģija balstās uz pārlicību, ka izvirzītais mērķis, t. i., izveidot koalīciju no n dalībniekiem, tiks sasniegts. Maksimālās peļņas meklēšanas process var balstīties uz visu iespējamo galīgās koalīcijas izveides variantu pārmeklēšanu.

Katru reizi, kad koalīcijai pievienojas jauns spēlētājs, parādās šādi divi jauni uzdevumi:

- ieguvumu sadale starp jau esošās koalīcijas dalībniekiem un tās jauno dalībnieku. Tiek uzskatīts, ka šo uzdevumu iespējams atrisināt, izmantojot Šeplija vērtību saskaņā ar 2.2. formulu;
- papildu ieguvumu sadale, kas rodas sakarā ar jauna dalībnieka pievienošanos esošajai koalīcijai, veco dalībnieku starpā. Tiek uzskatīts, ka šāda sadale būs proporcionāla garantētajai peļņai.

Apskatītajās publikācijās, kurās tiek lietota Šeplija pieeja [20]–[22], [24], [26], atzīmēts trūkums, kas kopīgs apskatītajiem rakstiem – tiek definēti kooperatīvas spēles uzdevumi, kuros koalīcijas jau ir izveidotas. Faktiski tiek definēts jautājums tikai par ieguvumu pārdali. Šī pārdale prasa ne tikai aprēķinu veikšanu, bet arī papildu mērījumus, kuru izmaksas var neattaisnot jaunās pieejas izmantošanas ieguvumus. Šāda uzdevuma nostādne neizmanto pirmo, iespējams, galveno, kooperatīvo spēļu pieejas priekšrocību: šī pieeja dod iespēju pārveidot konkurentus partneros un sasniegt jaunu, visiem izdevīgu situāciju.

Apskatīti reālajai energosistēmu projektēšanas praksei vistuvākie uzdevumi, kas formulēti G. Vempera promocijas darbā (2012. g.) [2] un kuros tiek izmantota kooperatīvo spēļu pieeja, lai atrisinātu sadales tīkla attīstības un Rīgas centralizētās siltumapgādes uzdevumus. Atzīmēts, ka šajos darbos netiek ņemti vērā mainīgie elektrības tirgus apstākļi.

3. PATĒRĒTĀJU–RAŽOTĀJU PIESLĒGUMA ELEKTRISKAJAM TĪKLAM SHĒMAS PAMATOJUMS

Pārvades un sadales elektrotīklu attīstība, jaunu ražotājlietotāju rašanās un pieslēgšanas nepieciešamība (ražotnes ar izkliedētās ģenerācijas avotiem, atjaunīgās enerģijas avotiem) rada aktuālu jautājumu par elektriskās shēmas izvēli jauno patērētāju pieslēgšanai un racionālu un taisnīgu kapitālieguldījumu sadali starp projektu dalībniekiem. Jauno enerģijas lietotāju rašanās rada izmaiņas elektriskajos tīklos.

Projekta būtība. Pieņemts, ka pieteikta ražotne (PR) ar 5 MW maksimālo patēriņa jaudu un saules paneļu ģenerāciju, kas domāta pašpatēriņa nodrošināšanai. Autonomu enerģētisko sistēmu nav iespējams izveidot ģenerācijas un patēriņa grafiku nesakritības dēļ. Ir jānodrošina jaudas apmaiņa ar elektrisko tīklu, kas pieņemtu jaudas pārpalikumu periodos, kad pieteicējs saražo vairāk enerģijas nekā patērē, un pretēji – atdod enerģiju, kad ģenerācijas apjoms ir mazāks par patēriņu. Ir zināms par iespēju izvietot PR 110 kV augstsprieguma līnijas tuvumā. Iespējami vairāki pieslēguma pamatvarianti.

1. H veida apakšstacija.
2. Vienkāršota apakšstacija.
3. 20 kV līnija uz tuvāko 110/20 kV apakšstaciju.

Katrs variants var būt realizēts dažādi, kas nozīmē daudzu apakšvariantu esamību.

Ir jāpamato un jāizvēlas:

- 1) saules stacijas jauda;
- 2) pieslēguma variants;
- 3) norēķinu starp PR saimniekiem un elektrisko tīklu operatoriem sistēma.

Spēlētāji, to izdevumi un ieguvumi. Veicot variantu salīdzināšanu, jāizvēlas to efektivitātes novērtējuma kritēriji. Pieņemsim, ka katrs spēlētājs cenšas maksimizēt savu gada peļņu. Tādējādi tā ir jāaprēķina. Par katram spēlētājam visizdevīgāko var uzskatīt variantu, kas nodrošina vismazākās projekta realizācijas un uzturēšanas izmaksas, kuras var aprēķināt dažādi. Pieņemsim, ka tīkliem tiek rēķināta papildu peļņa, ko var gūt aplūkojamā projekta realizācijas gadījumā. Projekta pieteicējam rēķināsim virtuālo peļņu, kas ir vienāda ar ieguvumiem no saules enerģijas izmantošanas. Proti, novērtēsim enerģijas izmaksu samazinājumu, izmantojot saules staciju, salīdzinājumā ar variantu, ja ražotne būtu uzbūvēta bez pašu enerģijas avota.

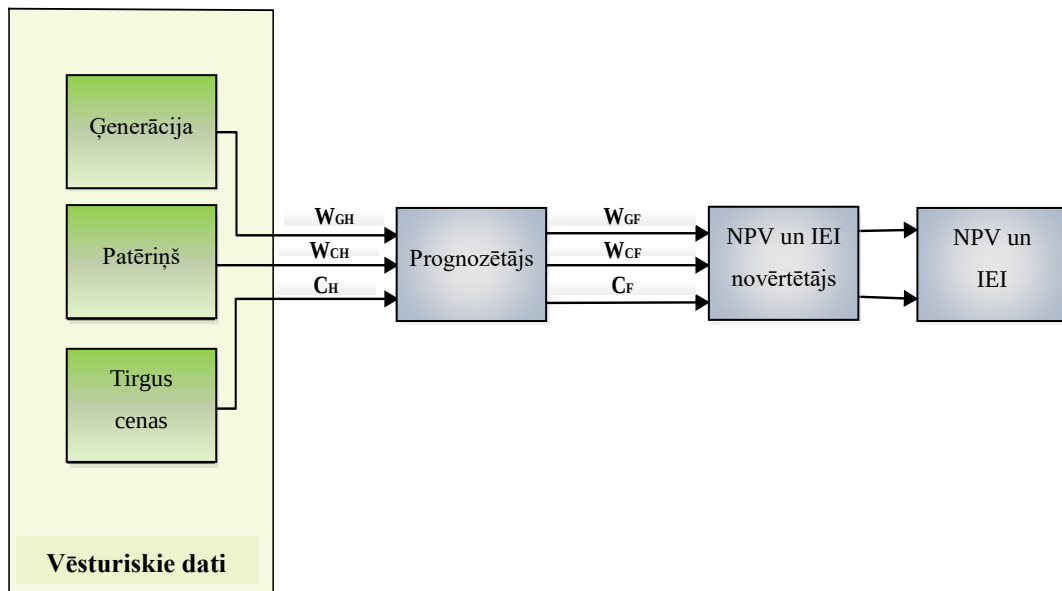
Nosakot summāros gada ieguvumus izvēlētiem alternatīviem risinājumiem, jāņem vērā pieslēguma jaudas lielums, slodzes attālumi no apakšstacijām un augstsprieguma līnijas, izmantotās zemes vērtība, iekārtu izmaksas. Izejas dati izmaksu aprēķiniem un ierobežojumu izpildes pārbaudei ir stipri atkarīgi no konkrētās situācijas, tādējādi tālāk tiks atspoguļoti izvēlēto piemēru galvenie rezultāti, izvērtējot projekta būvniecības lietderību pie dažādiem aprēķina nosacījumiem, ievērojot tehniskos ierobežojumus.

Metodoloģija un izmantojamie dati

Lai aprēķinātu efektivitātes kritērijus, ir jāapraksta procesu izmaiņas daudziem gadiem uz priekšu. Šis uzdevums rada nenoteiktību un nepieciešamību izmantot gadījuma procesu teorijas paņēmienus.

Uzdevums vienkāršojas, ja pieņem hipotēzi par stohastisko procesu stacionāro raksturu [30]. Šajā gadījumā rodas iespēja izmantot ieejas procesu aprēķinu vai mērījumu rezultātu vēsturiskos datus: ģenerāciju W_{GH} , patēriņu W_{CH} un cenu C_H . Tādā gadījumā statistiskie modeļi nav vajadzīgi [31].

Tiek izmantotas procesu prognozes, kas veiktas uz attiecīgo procesu mērījumu bāzes, lietojot tā saucamo naivo jeb modificēto prognozēšanas pieeju ģenerācijai W_{GF} , patēriņam W_{CF} un cenai C_F [33], kuras pamatā ir pieņēmums, ka nākotnē atkārtosies pagātnes procesi, kas pieļauj ņemt vērā gada vidējo cenu izmaiņu [33]. Algoritma struktūrshēma dota 3.1. attēlā.



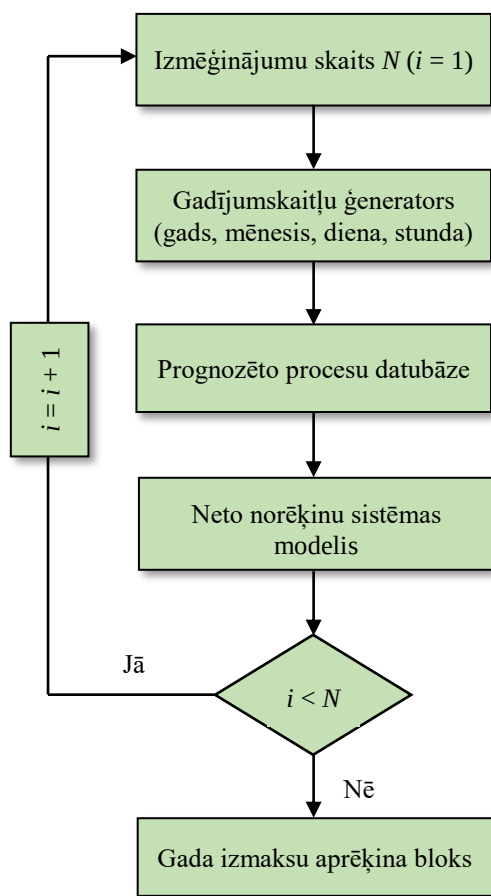
3.1. att. Procesu prognozēšanas shēmas struktūra.

Analizējamajā gadījumā, kad tiek novērtēti spēlētāju ieguvumi, ir pieejami tikai viena procesa vēsturiskie mērījumu rezultāti, proti, enerģijas tirgus cena. Lai prognozētu ģenerāciju un patēriņu, kā paraugu var izmantot citu saules staciju ģenerācijas un patēriņu mērījumu ierakstus. Tieši šī iespēja tiks izmantota šajā darbā.

Tālāk (3.2. att.) dodam ražotājlietotāju efektivitātes novērtējuma uzdevuma atrisināšanas algoritma struktūrshēmu.

Algoritmā izmantoti ikstundas (i) tīklā nodotās enerģijas W_{G+} un no tīkla saņemtās enerģijas W_{G-} ikstundas elektroenerģijas cenas C , un ikstundas elektroenerģijas patēriņa W_C mērījumi (1. bloks). Katram ražotājlietotājam energosistēma izveido atsevišķu rēķinu, kurā uzskaitīti tīklā nodotās vai no tīkla saņemtās elektroenerģijas daudzumi Exp_{store} (2. bloks) un apkopo ikstundas tirgus komponentes maksājumus. Ja konkrētā stundā saražotās enerģijas apjoms pārsniedz patēriņu un ražotājlietotājs nodod tīklā vairāk elektroenerģijas nekā saņem no tā, tad tam nepieciešams papildus maksāt tikai par fiksēto apjoma komponenti E_{FV} (3. bloks).

Ikgadējie izdevumi Exp palielinās par šo summu. Pretējā gadījumā tiek pārbaudīts Exp_{store} . Ja Exp_{store} pārsniedz pašreizējā mēneša Exp_{store} (mūsu gadījumā – iepriekšējo stundu Exp_{store}), tad dažās valstīs ražotājlīdētājam nav jāmaksā mainīgā progresīvā komponente E_{VP} šajā stundā; taču ražotājlīdētājam vienmēr jāmaksā fiksētā apjoma komponente un tirgus komponente par saņemto elektroenerģiju C_{C+} (4. bloks). Pretējā gadījumā ražotājlīdētājs maksā tādā pašā veidā kā 4. blokā vai arī maksā tikai par pašreizējās stundas mainīgās progresīvās komponentes Exp_{store} kopējo starpību E_{VP} (5. bloks). Aprēķinos pieņemam, ka ražotājlīdētājs maksā mainīgo progresīvo komponenti E_{VP-} . Ja Exp_{store} ir negatīvs vai vienāds ar nulli, ražotājlīdētājs pilnībā apmaksā no tīkla saņemto elektroenerģiju (kā parasts klients) (6. bloks). Reizi gadā šis process tiek sākts no jauna.

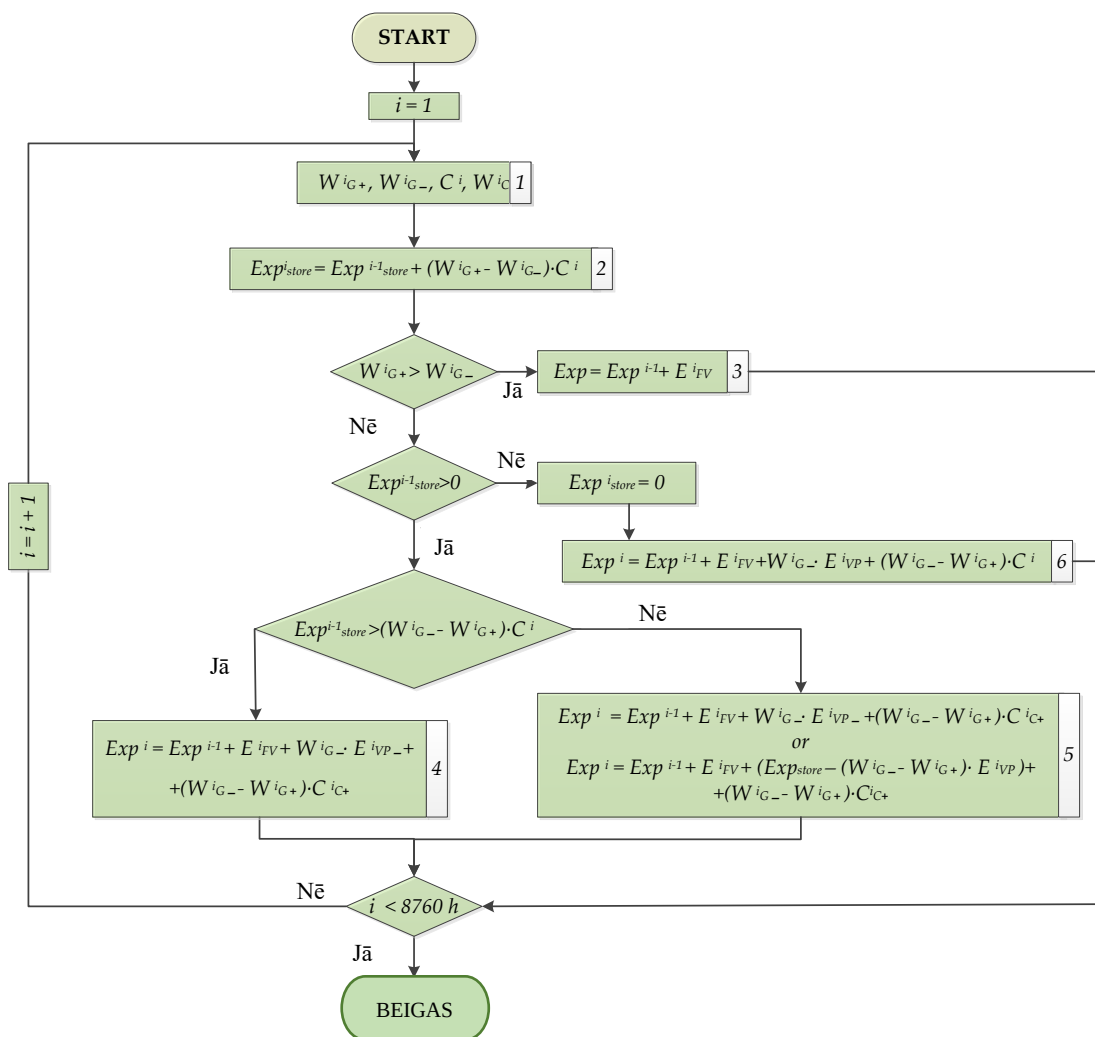


3.2. att. Algoritma struktūra.

Patērētāju rēķinos ietvertas komponentes, kas tiek maksātas, lai finansētu energosistēmas ekspluatācijas izmaksas:

- 1) fiksētā apjoma komponente (FV) balstās uz pieslēguma jaudu (kVA);
- 2) mainīgā progresīvā komponente (VP): šeit tarifs par vienu kilovatstundu pieaug, pieaugot izmērītajam patēriņam līmenim;
- 3) tirgus komponente (MC) ir vienāda ar nākamās dienas ikstundas cenu elektroenerģijas tirgū (piemēram, *NORDPOOL*) [35], [33].

Šis tarifs ir iespējams tikai ar viedajiem skaitītājiem [35]. Ja ražotājlietotājs saražo mazāku elektroenerģijas daudzumu nekā patērē (mēneša laikā), tad saskaņā ar neto sistēmu ražotājlietotāja rēķinā iekļauta fiksētā apjoma komponente un mainīgā progresīvā komponente, kur ietilpst tikai maksājums par starpību starp elektroenerģijas daudzumu, kāds saņemts no tīkla, un tīklā nodotās elektroenerģijas daudzumu. Pretējā gadījumā, kad ražotājlietotājs patērē mazāk nekā saražojis, un ir nodevis tīklā lielāku enerģijas daudzumu, nekā tas ir saņēmis no tīkla, rezultējošā starpība tiek traktēta kā energosistēmas parāds, kas tad tiek ierēķināts nākamo mēnešu rēķinos. Ikgadējo izdevumu Exp novērtēšanas algoritma struktūrshēma sniegta 3.4. attēlā.



3.4. att. Ikgadējo izdevumu novērtēšanas algoritma struktūra.

Lai izanalizētu 3.4. attēlā aprakstītās sistēmas realizējamību, nepieciešams prognozēt un modelēt ģenerācijas, elektroenerģijas ražošanas, patēriņa un elektroenerģijas cenu veidošanās tirgū korelētos gadījuma procesus.

Ievadinformācija un pieņēmumi. Gadījuma izpētei identificējam divus gadījumus:

- 1) bāzes gadījums, kad nav neto sistēmas;
- 2) gadījums, kad ir neto norēķinu sistēma.

Kā jau bija teikts, apskatāmā uzdevuma risināšana prasa trīs ieejas procesu izmaiņu laikā modelēšanu ar vienas stundas soli:

- 1) enerģijas pieprasījums: nepieciešama informācija par daudzu ražotājlietotāju enerģijas pieprasījuma profiliem; mēs izmantojam 100 dažādu nejauši izvēlētu patērētāju viedo skaitītāju ierakstus gada garumā [35];
- 2) enerģijas ražošana: potenciālo 100 ražotājlietotāju ģenerācijas modelēšanai tiek izmantoti jaunuzstādīta 2017. gada mazas jaudas saules ģeneratora ieraksti. Šie ieraksti tiek pārveidoti, mainot iekārtu jaudu ražotājlietotājiem tā, lai tiktu sasniegta gada enerģijas ģenerācijas un patēriņa bilance;
- 3) elektroenerģijas tirgus cenas: tiek izmantotas *Nord Pool* tirgus cenas; izmantojot Furjē transformāciju [36], izdalām pastāvīgo komponenti, ko definējam kā mainīgu atkarībā no plānošanas gada numura. Vidējās cenas izmaiņas tiek dotas, izmantojot publicētos rezultātus un izvēlētos scenārijus.

Veicot modelēšanu, tika ņemti vērā šādi ierobežojošie nosacījumi.

Neto pašreizējā vērtība (NPV) tiek aprēķināta diviem variantiem: 1. variants – tiek ņemts kredīts, 2. variants – netiek ņemts kredīts un tiek izmantoti ražotājlietotāju naudas ietaupījumi Exp_{store} .

NPV tiek aprēķināta, ņemot vērā ražotājlietotāja ienākumus Exp_{store} , kas tiek gūti no fotoelektriskajā tehnoloģijā saražotās elektroenerģijas.

Rezultāti. Klasiskā pieeja; tīkli un ražotājlietotājs (RL) rīkojas neatkarīgi. 3.5. attēlā parādītas RL NPV_{RL} izmaiņas laikā. Šajā aprēķinā tiek izmantotas sākotnējās investīcijas (4 500 000 eiro) bez pieslēgšanas izmaksām (1 200 000 eiro).

Plānošanas perioda pirmajos 11 gados RL izdevumi pārsniedz RL ienākumus, tāpēc NPV_{RL} raksturlīknei (zilā krāsā) piemīt negatīvs raksturs. Tomēr 12. gadā RL ienākumi pārsniedz izdevumus un NPV raksturlīkne sāk vienmērīgi pieaugt. Tikai 22. gadā RL pilnībā sāk gūt ienākumus. Atjaunojamo energoresursu (AER) iekārtas darbmužs ir 25 gadi, līdz ar to šis variants var būt pievilcīgs RL. Tāda pati situācija ir, kad nav ņemts kredīts, jo RL investīciju atmaksāšanās ilgums ir 23 gadi.

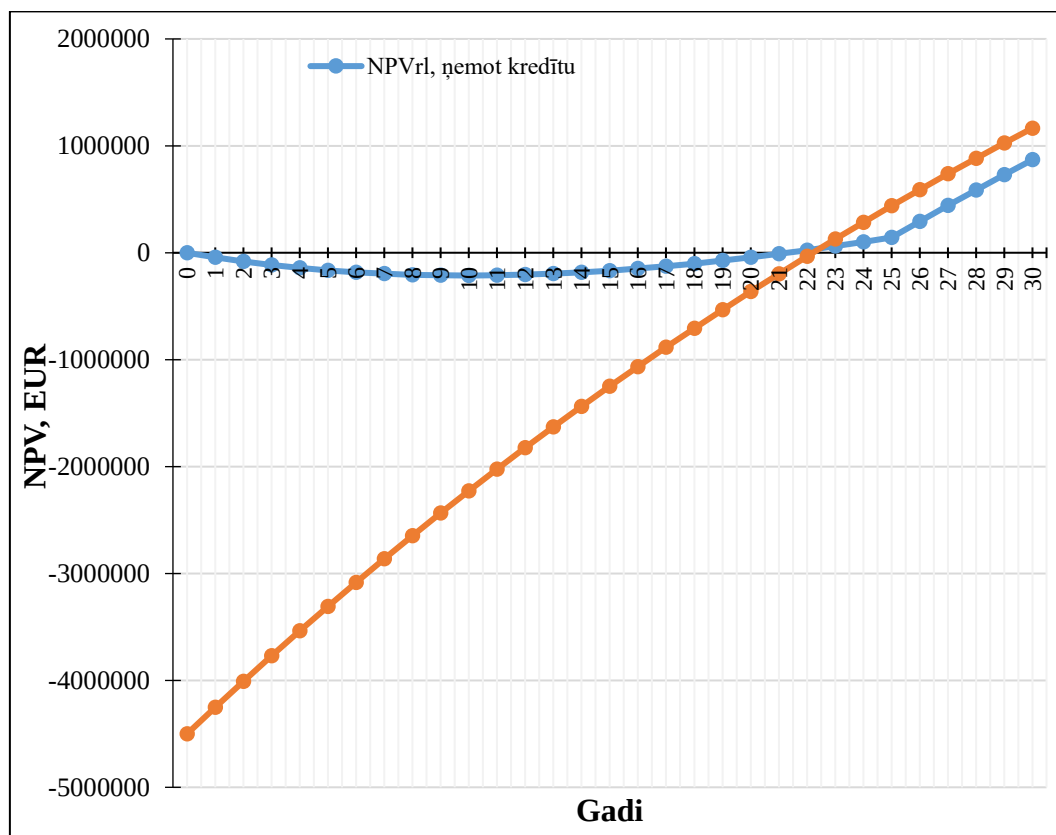
Tiek aprēķināti AST un ST operatoru ieguvumi no neto sistēmas, un tie ir vienādi ar 158 713,53 eiro. Tā ir gandrīz puse no kopējām izmaksām (2. scenārijs).

Nākamais solis ir aprēķināt NPV un atmaksāšanās periodu, ja tiek ievērotas pieslēgšanas investīcijas. Rezultāti parādīti (3.7. att.).

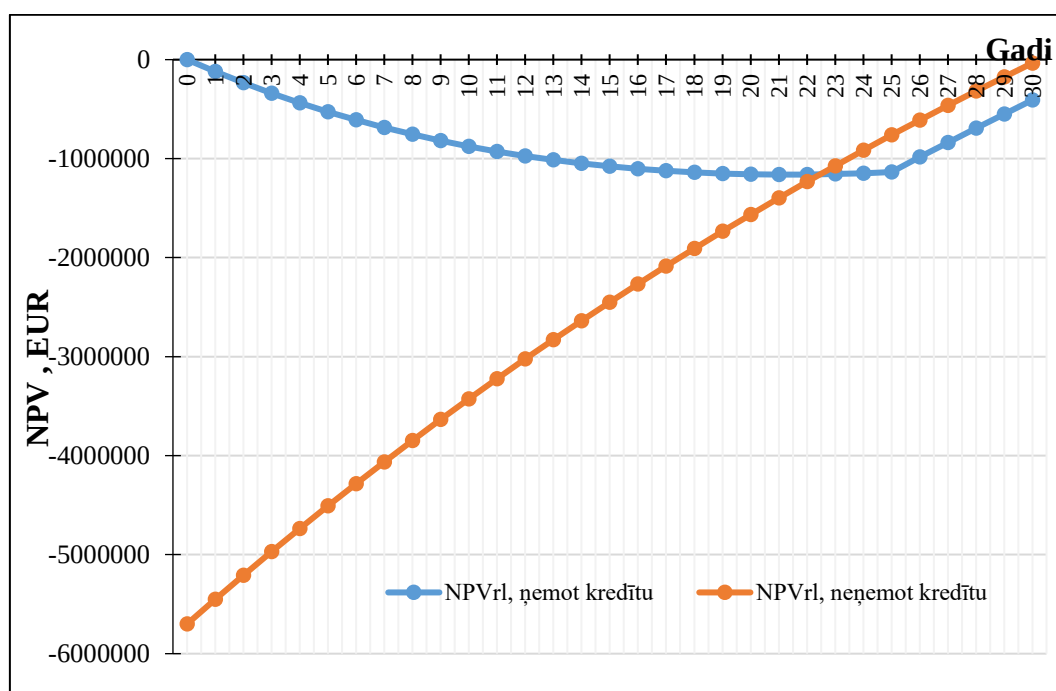
Kad RL iegulda savu naudu saules paneļu (SP) iegādē un pieslēguma izmaksu kompensēšanā, atmaksāšanās ilgums ir vairāk nekā 30 gadu (31 gads), kas ir ievērojumi garāks laiks nekā iepriekš apskatītajā gadījumā. Tas nevar sekmēt jaunu RL piesaisti. Vēl sliktāka ir situācija, kad tiek paņemts kredīts. RL izdevumi plānošanas perioda pirmajos 25 gados pārsniedz RL ienākumus, NPV_{RL} raksturlīknei (zilā krāsā) piemīt negatīvs raksturs. Tikai 26. gadā RL ienākumi pārsniedz izdevumus, un NPV raksturlīkne sāk vienmērīgi pieaugt. Taču AER iekārtas darba mūžs ir 25 gadi, līdz ar to šis variants nav pievilcīgs RL.

Šajā variantā, kad tiek ievērotas visas investīcijas, esošās neto sistēmas nosacījumi nav pielāgoti viedo tehnoloģiju izmantošanai, t. i., ražotājlietotāji netiek stimulēti uzstādīt enerģijas

izstrādes/patēriņa vadības ierīces un veikt vadību, kas varētu dot priekšrocības gan ražotājlietotājiem, gan arī energosistēmai kopumā. Vienlaikus jāatzīmē, ka projekta realizācijas gadījumā tīklu operatori gūtu ievērojumus ienākumus.



3.5. att. NPV_{RL} neto gadījumam (neieskaitot pieslēguma investīcijas).



3.7. att. NPV_{RL} neto gadījumam (ieskaitot pieslēguma investīcijas).

Tīkla operatoru un RL koalīcija. Pieņemsim, ka izklāstīto iemeslu dēļ, ja pieslēguma izmaksas tiek attiecinātas uz pieteicēju, projekts netiek realizēts. Šajā gadījumā investīcijas nav vajadzīgas. Taču arī peļņa būs vienāda ar nulli (kopīgā un katram spēlētājam atsevišķā). Tālāk pārskatīsim projekta realizācijas nosacījumus, pieņemot, ka RL un tīklu operatori izveido koalīciju. Apzināti (lai palielinātu uzskatāmību) izmantojam nedaudz vienkāršotu algoritmu (neņemam vērā diskonta likmi). Rezultātā:

RL gada peļņa ir: 252 957 eiro (novēršamās izmaksas) – 180 000 eiro (investīciju atmaksāšanās 25 gadu laikā) = 73 000 eiro.

1. ST +AST peļņa ir 158 713 eiro.
2. Koalīcijas peļņa ir apmēram 230 000 eiro.

Gadījumā, ja tiek lietots Šepļa sadalījums (sk. 2. nodaļu), varam apgalvot, ka ir taisnīgi koalīcijas peļņu sadalīt starp spēlētājiem vienādi, t. i., RL vajadzētu piemaksāt 115 000 – 73 000 = 42 000 eiro.

Piemaksu var realizēt dažādi:

- 1) palielinot tarifus, kas izraisītu Latvijas sabiedrības protestus;
- 2) samazinot pieslēguma maksu. Tas nozīmē, ka apskatītajā piemērā RL vajadzētu pilnīgi atbrīvot no pieslēguma maksas;
- 3) izsludinot konkursu pieslēgšanas licenču saņemšanai.

Otrajā gadījumā pieslēguma izmaksas jāattiecina uz tīkliem. Taču viegli redzams, ka investīciju atmaksāšanās ilgumu var uzskatīt par pieņemamu, jo tas nepārsniedz 10 gadu.

Trešais gadījums ir ļoti pievilcīgs, jo ļauj izvēlēties piesardzīgu taktiku jauno RL pieslēgumu skaita regulēšanai.

4. KOOPERATĪVĀ PIEEJA TĪKLU PROJEKTOS

Nodaļā tiek apskatīti četri jauni uzdevumi.

1. Investīciju sadale, būvējot divķēžu augstsprieguma līniju, ar nosacījumu, ka ķēdes atšķiras un pieder dažādiem uzņēmumiem.
2. Investīciju sadale ar pirmā uzdevuma nosacījumiem un gadījumā, ja līnijas trase un balsti tiek izmantoti optiskā sakaru kanāla būvei.
3. Izmaksu sadalījums, ja augstsprieguma līnijas trasē atrodas objekti, kas prasa rekonstrukciju (zemāka sprieguma līnijas, ceļi).
4. Investīciju piesaiste, plānojot vidēja sprieguma tīklu rekonstrukciju.

Uzdevumos tiek izmantoti reāli dati, kas savākti, projektējot “Kurzemes loks” elektropārvades līnijas. “Kurzemes loks” (KL) ir enerģijas infrastruktūras projekts, kas ietver 330 kV gaisvadu līnijas būvi un esošas 110 kV elektropārvades līnijas rekonstrukciju Latvijas rietumdaļā un kura galvenais mērķis ir paaugstināt kopējo elektropārvades līniju caurlaidību Kurzemes reģionā, kas līdz šim nebija iespējams. Projekts ir lielāka apjoma projekta – *NordBalt* – sastāvdaļa, kurā ietilpst arī Latvijas – Igaunijas – Zviedrijas starpsavienojumu ar mērķi uzlabot elektroapgādes drošumu Baltijas valstīs [41]. Bez tam šis risinājums ļaus samazināt sastrēgumus Kurzemes tīklā, paplašinot ierobežotās ģenerējošo jaudu attīstības iespējas Latvijā, tādas kā atjaunīgā enerģija (jaunas vēja elektrostacijas), kā arī nodrošināt jaunu lietotāju elektroietaišu pieslēgšanas potenciāla palielināšanos.

Līniju shēma dota 4.1. attēlā.

“Kurzemes loka” projekts (1. posms) tika vērtēts trīs pamatvariantos:

- 1) 110 kV gaisvadu līnija ar tēraudalumīnija vadiem; fāze ir sadalīta divos vados ($2 \times AS-240/32$), kā rezultātā šāds variants nodrošina 1210 A;
- 2) vienķēdes 330 kV gaisvadu līnija ar tēraudalumīnija vadiem; fāze ir sadalīta trīs vados ($3 \times AS-400/51$) ar uzstādīto strāvas slodzi 2475 A;
- 3) kooperatīvā ķēde, kas sastāv no vienķēdes 110 kV gaisvadu līnijas ar tēraudalumīnija vadiem; fāze ir sadalīta trīs vados ($3 \times AS-400/51$) ar uzstādīto strāvas slodzi 2475 A; kā arī 330 kV gaisvadu līnijas ar tēraudalumīnija vadu; fāze ir sadalīta divos vados ($2 \times AS-240/32$) ar uzstādīto strāvas slodzi 1210 A.

Katram variantam tika aprēķināts elektrolīniju būves izmaksu ekonomisks aspekts.

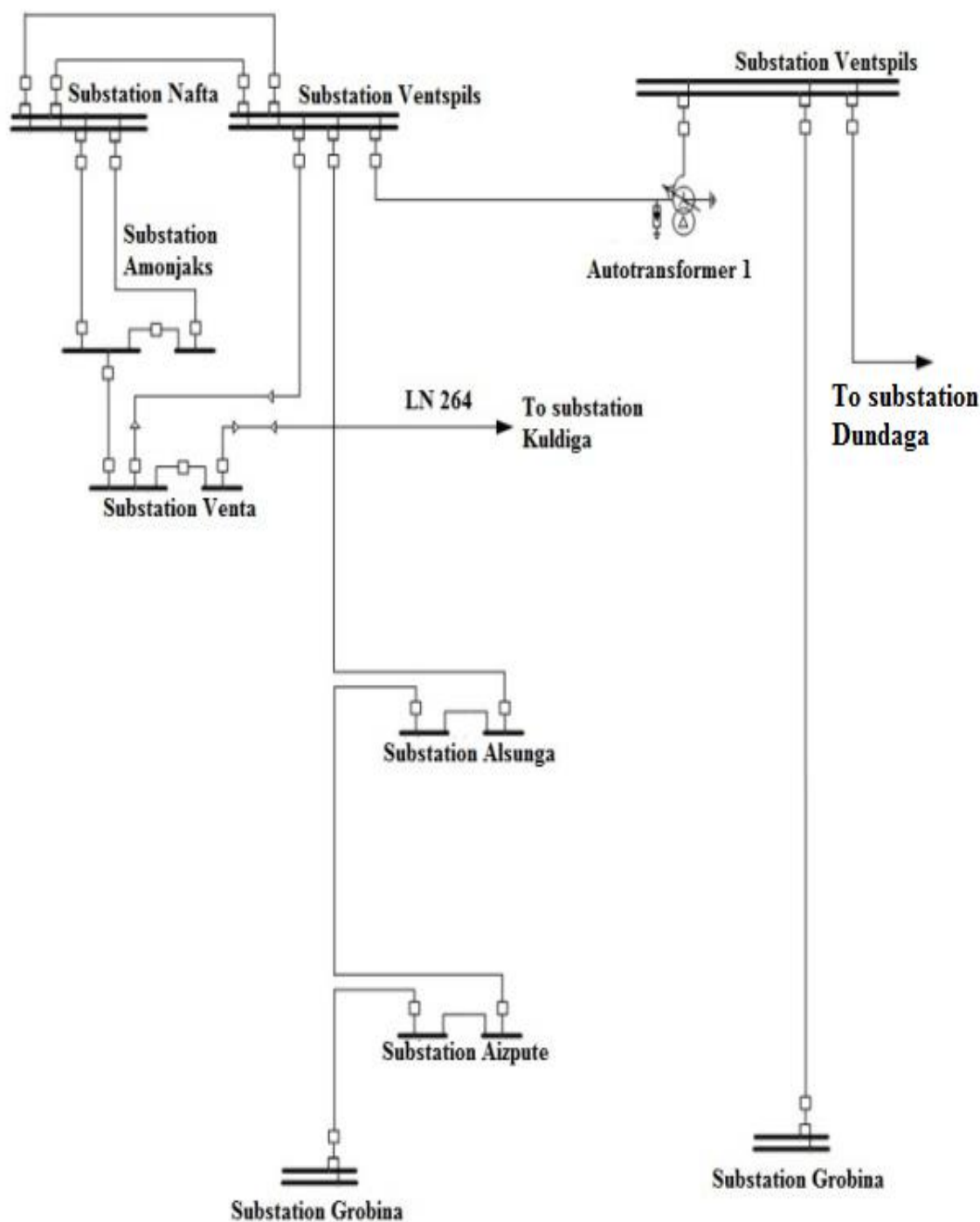
4.1. tabula

Gaisvadu līniju būves izmaksas kooperatīvas uzvedības gadījumā

	Investīcijas, orientējošā vērtība (EUR)
Uzņēmumu A un B koalīcija	29 952 795
Papildu peļņa katram uzņēmumam	7 946 641
Kopējā papildu peļņa uzņēmumiem A un B	15 893 282

The scheme of a future 110 kV system

The scheme of a future 330 kV system



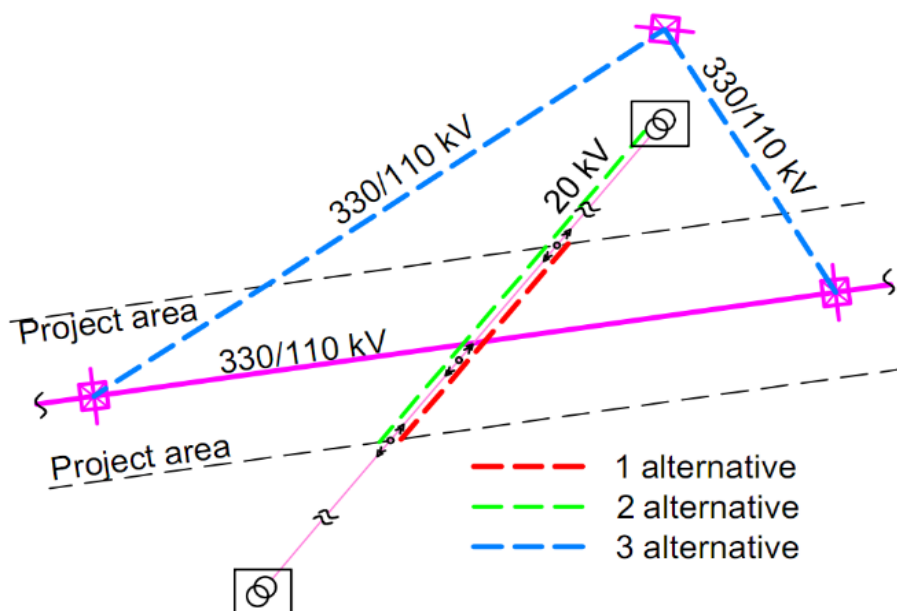
4.1. att. Nākotnes kooperatīvās ķēdes shēma, kas sastāv no 110 kV un 330 kV sistēmām.

Acīmredzams, ka kooperatīvas uzvedības gadījumā investīcijas projektā ievērojami samazinās. Tas nozīmē, ka šādas koalīcijas izveide ir racionāla un iespējama no investīciju ietaupījuma viedokļa. Atzīmēsim, ka reālajā projektā peļņa mērāma desmitos miljonu EUR.

Otrajā piemērā tiek pieņemts, ka pastāv trīs neatkarīgi uzņēmumi, no kuriem divi nodarbojas ar elektropārvades līniju izveidi, savukārt trešais uzņēmums interesējas par optiskās sakaru līnijas izveidi. Viens no elektropārvades uzņēmumiem nodarbojas ar 110 kV

elektropārvades līnijas izveidi, otrs – ar 330 kV elektropārvades līnijas izveidi. Lēmums jāpieņem, izvēloties variantus, kas ir izdevīgi katram no uzņēmumiem. Nepieciešams uzrādīt arī projekta izmaksas, kā arī katra uzņēmuma gūtais labums individuālas pieejas gadījumā, īstenojot visu projektu atsevišķi, un pārbaudīt, vai ir iespējams izveidot dažādus koalīcijas variantus. Tad pastāv uzdevums analizēt iespējas veidot koalīcijas ar citiem uzņēmumiem.

Trešajā piemērā tiek pieņemts, ka augstsprieguma elektropārvades līniju uzņēmums ir ar mieru segt izdevumus par projektēšanas darbiem, montāžu un materiāliem saistībā ar 20 kV elektropārvades līnijas posma nomaiņu zemesgabalā, ko tiešā veidā skar šī uzņēmuma 330/110 kV projekts. Taču trīs laidumus aiz pētāmās vietas atrodas transformatoru apakšstacija. Šī iemesla dēļ nav racionāli veidot nelielu daļu no 20 kV elektropārvades līnijas kā kabeļu līniju. Līdz ar to var pieņemt, ka vienā no iespējamajiem variantiem uzņēmums, kam pieder sadales tīkli, var nepiekrīst saskaņot šādu rekonstrukcijas projektu, jo tas paaugstinātu ekspluatācijas izmaksas un samazinātu līnijas drošumu kopumā. Šādā situācijā uzņēmums, kam pieder sadales tīkli, saskaņo 20 kV līnijas daļas likšanu kā kabeļlīniju tikai ar nosacījumu, ka tiks nomainīta arī līnijas daļa līdz transformatoru apakšstacijai.



4.2. att. Elektropārvades līniju rekonstrukcijas projekta shēma ar risinājumu variantiem.

Šādā gadījumā augstsprieguma tīklu uzņēmumam rodas divi citi iespējamie risinājuma varianti: pieņemt nosacījumus un veidot kabeļlīnijas veidā lielāku līnijas daļu nekā plānots vai arī projektēt šķērsojamās 20 kV elektropārvades līnijas apvadu.

Ceturtajā gadījuma izpētē apskatīta sadales tīkla plānotā rekonstrukcija. Šajā situācijā iespējama koalīcija starp tīklu un potenciālajiem enerģijas patērētājiem. Kooperācijas iespēju izmantošana dotu iespēju tīkla rekonstrukcijas investīciju segšanā pieasaistīt enerģijas lietotājus.

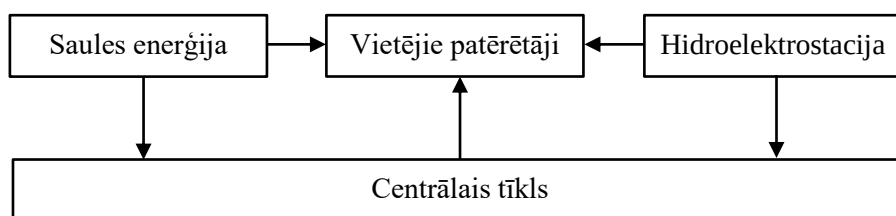
Visos četros apskatītos piemēros kooperatīvā dalībnieku uzvedība dod iespēju samazināt kapitālieguldījumus un palielināt projektu rentabilitāti.

5. KOMBINĒTO ELEKTROSTACIJU DARBĪBAS OPTIMIZĒŠANAS IESPĒJAS, IZMANTOJOT KOOPERATĪVO PIEEJU

Nodaļā tiek apskatīti divi uzdevumi.

Pirmajā uzdevumā tiek izmantots piemērs un dati, kas iegūti Turcijā (kopā ar inženierzinātņu doktoru H. H. Kobanu) [26]. Tiek apskatīta situācija, kad vietējiem patērētājiem tiek piegādāta saules enerģija, lai apmierinātu elektroenerģijas pieprasījumu. Kad ir pieejams pietiekams saules gaismas daudzums, tas tiek novirzīts uz vietējo apakšstaciju, un šajā laikā hidroelektrostacija uzkrāj ūdeni, lai pēc tam darbotos laikā, kad elektroenerģijas cena ir augstāka. Kad saules enerģija pietiekami nesedz vietējo patērētāju prasības pēc elektroenerģijas, hidroelektriskā sistēma ražo enerģiju, izmantojot rezervuārā uzkrāto ūdeni.

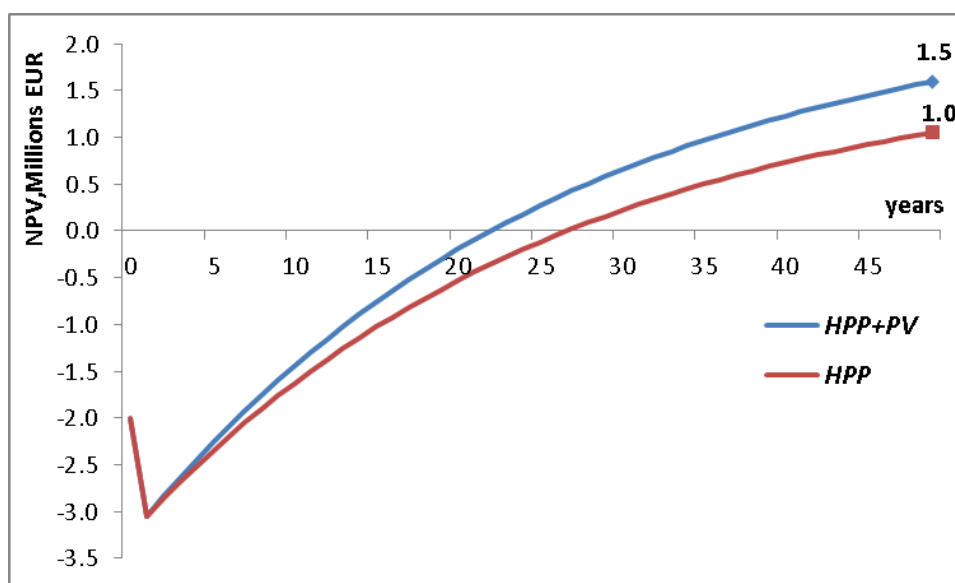
Šāds energoapgādes iekārtojums ļauj gūt papildu labumu gan ražotājiem, gan arī patērētājiem. Lai nodrošinātu taisnīgu peļņas sadali, tiek piedāvāts izmantot Šeplija vērtību.



5.1. att. Kombinētās sistēmas un enerģijas plūsmas principshēma.

5.2. attēlā ir skaidri redzama kooperācijas lietderība. Atmaksāšanās perioda ilgums, veidojot kooperāciju, samazinās apmēram par pieciem gadiem.

Jāatzīmē, ka apskatītā situācija var izveidoties arī Latvijā, attīstoties saules enerģētikai un izmantojot esošo mazo hidroelektrostaciju iespējas.



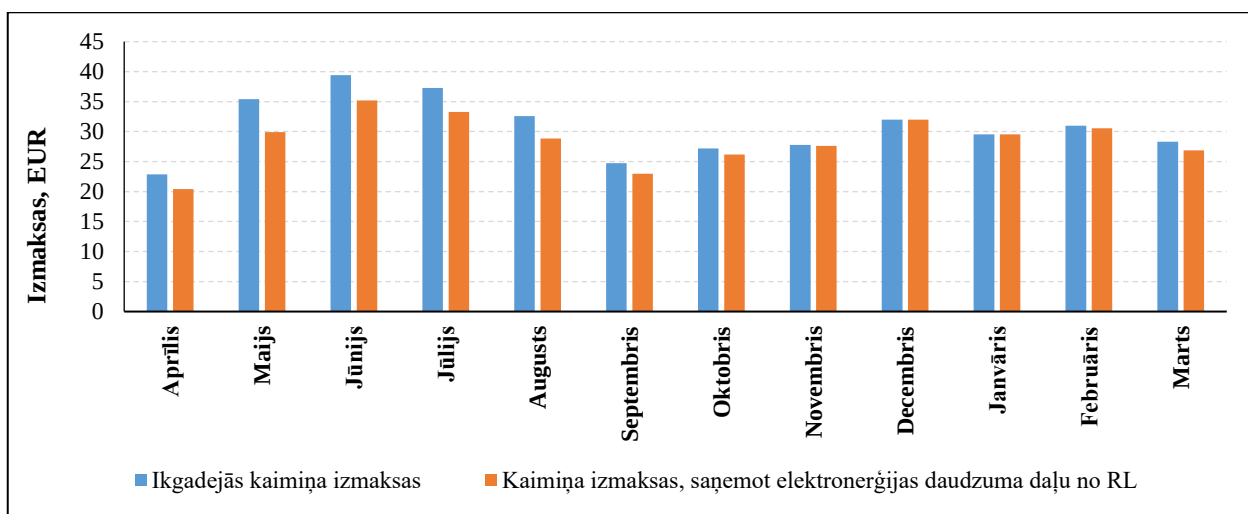
5.2. att. NPV aplēses rezultāti 49 gadu periodam.

Otrajā uzdevumā tiek apskatīta situācija, kas var izveidoties Latvijā tuvākajā nākotnē, uzstādot mazas jaudas saules ģenerāciju individuālās mājās. Tiek apskatītas kooperācijas iespējas starp kaimiņiem, no kuriem viens uzstāda Saules paneļus, savukārt otras ir gatavs daļēji to izmantot. Tika izveidoti trīs scenāriji.

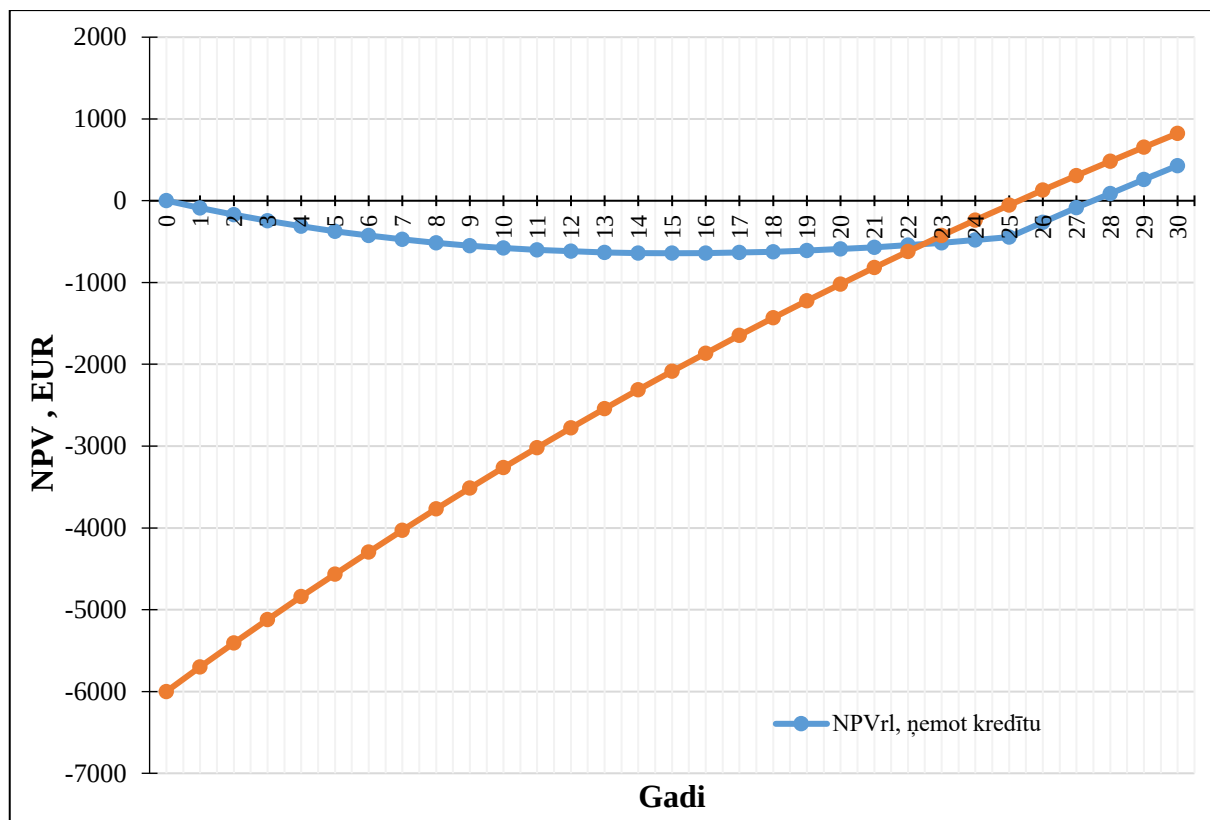
- ✓ Bāzes scenārijs: pieņemam, ka lietotājs ir pasīvais enerģijas lietotājs, enerģiju neražo un neizmanto neto norēķinu sistēmu.
- ✓ Neto sistēmas 1. scenārijs: pieņemam, ka RL nodrošina elektroenerģijas gada bilanci. RL gada laikā nodod tīklā un saņem no tīkla vienādu elektroenerģijas daudzumu.
- ✓ Neto sistēmas 2. scenārijs: pieņemam, ka RL saražotās elektroenerģijas pārpalikumu pirmām kārtām atdod kaimiņam un tikai tad tīklā. Ja rodas elektroenerģijas trūkums, tad saņem enerģiju no tīkla.

5.3. attēlā var redzēt, cik parasti par patērēto elektroenerģiju gadā maksā kaimiņš (izvēlēts nejauši no patērētāju datubāzes), kā arī 2. scenāriju, kad RL pārdod saražoto elektroenerģijas daudzumu kaimiņam par *Nord Pool* biržas cenām.

Rezultāti ļauj secināt, ka kooperācija ir iespējama un izdevīga visiem iesaistītajiem dalībniekiem. Atzīmēsim, ka kaimiņu kooperācija prasa papildu viedo uzskaiti mērījumiem par enerģijas apmaiņu starp mājām.



5.3. att. Kaimiņa mēneša maksājumi dažādos scenārijos.



5.4. att. NPV_{RL} neto gadījumam (2. scenārijs).

SECINĀJUMI

- Līdz ar enerģijas pieprasījuma palielināšanos enerģētisko objektu plānošanas uzdevums strauji sarežģījas šādu galveno iemeslu dēļ:
 - energosistēmu izmēru un to elementu skaita pieaugums; pat neliela energosistēma ietver simtiem tūkstošu elementu;
 - pieaug prasības attiecībā uz drošumu, īpaši lielo pilsētu elektroapgādē;
 - pieaudzis pieejamo tehnoloģiju skaits, kas radījis nepieciešamību izskatīt daudzas jaunas attīstības alternatīvas;
 - enerģijas ražošana ir kļuvusi par galveno faktoru, kas ietekmē klimatu.
- Visos plānošanas uzdevumos tiek definēts mērķis samazināt izmaksas. Visbiežāk izmanto kritēriju, kas raksturo naudas plūsmas neto pašreizējo vērtību (NPV).
- Ļoti nopietnas grūtības parādās naudas plūsmu aprēķinos, jo:
 - variantu skaits var būt ļoti liels;
 - naudas plūsmu ietekmē gadījuma lielumiem, piemēram, ārgaisa temperatūra, slodzes, ūdens ietece upēs u. c.;
 - naudas plūsma ir atkarīga no daudziem izvēlētiem tehnisko iekārtu parametriem;
 - definējot atmaksāšanās perioda aplēses un formulējot minimizēšanas vai maksimizēšanas uzdevumu, jāņem vērā daudzi tehniskie, juridiskie un ekoloģiskie ierobežojumi.
- Projektu izvēles kritēriju skaits var būt ļoti liels. Parādās grūti atrisināma labākā varianta izvēles problēma.
- Projektēšanas uzdevumos bieži izmanto pārlases (angl. *enumeration*) metodi, kas tiek izmantota kombinatorisko optimizācijas problēmu risināšanai tādos gadījumos, kad nav iespējas rēķināt un izmantot mērķa funkciju gradientus.
- Kritēriju novērtēšanas uzdevumu iespējams vienkāršot, pieņemot hipotēzi, ka ieejas procesi ir stacionāri un ergodiski, jo aprēķinos var izmantot vienu pietiekami ilgstošu stohastisko procesu kopas realizāciju.
- Ekonomikā plaši izmantotā Neša līdzsvara pieeja neņem vērā koalīciju izveidošanas iespēju, un var tikt pieņemti neracionāli lēmumi.
- Kooperatīvo spēļu teorijas paņēmieni var nodrošināt būtiskus ieguvumus visiem spēlētājiem gadījumos, kad ir iespējamās koalīcijas starp tiem.
- Problēmu, kas saistīta ar jauno ražotājlietotāju pieslēgšanu elektriskajam tīklam, iespējams atrisināt, izmantojot kooperatīvo spēļu teorijas paņēmienus. Šajā gadījumā rodas risinājumi, kas var vienlaikus palielināt visu spēlētāju ieguvumus un stimulēt atjaunīgo energoresursu izmantošanu Latvijā.
- Vienkāršotu apakšstaciju izbūve spēj sniegt būtisku kapitālieguldījumu ekonomiju, un to plaši izmanto daudzās pasaules valstīs (Vācijā, ASV, Somijā, Zviedrijā u. c.).
- Lēmums par RL pieslēguma shēmas un izmaksu sadalījuma izvēli vienlaikus skar pārvades tīkla, sadales tīkla, valsts un pieslēguma pieteicēja intereses, un to nesakrītība var radīt nepareizus risinājumus.

12. Vienkāršoto apakšstaciju izbūves lietderība ir atkarīga no daudziem faktoriem (slodzes lieluma, slodžu izvietojuma, attāluma no esošām apakšstacijām, vīdsprieguma tīkla konfigurācijas, elektroenerģijas cenas). Atkarībā no konkrētās situācijas par izdevīgāko var kļūt vienkāršotu apakšstaciju izbūve vai vīdsprieguma tīkla attīstība.
13. Tirgus apstākļu un slodzes izmaiņu ievērošana, pieņemot lēmumus par jauno ražotājlietotāju pieslēgšanu tīklam un pieslēguma shēmas izvēli, prasa darbietilpīgus aprēķinus, ko iespējams automatizēt, izmantojot specializēto programmatūru, ko iespējams sintezēt, iegūdot samērā nelielus līdzekļus un izmantojot šajā nodaļā izklāstīto metodiku.
14. Pieslēguma izmaksu sadali starp tīkliem un lietotājiem var veikt sludinot konkursu pieslēgšanas licenču saņemšanai.
15. Uz spēļu teoriju balstītas metodes var dot ieguldījumu pareizā lēmuma pieņemšanā par elektropārvades līniju veidošanu. Konkrēti – būtu jāizmanto kooperatīvās spēles, ņemot vērā koalīcijas izveides iespēju.
16. Piedāvātā metode tiek lietota piemērā, kas balstīts uz reālu projektu, kur plānota 330 kV un 110 kV augstsprieguma elektropārvades līniju būve. Te panākti lieliski rezultāti un augsts ienesīguma līmenis. Šī metode ir izmantojama arī dažādos citos uzdevumos, kur neatkarīgi uzņēmumi var gūt labumu, veidojot koalīciju ar citiem tirgus dalībniekiem.
17. Elektropārvades līnijas projektēšanā nepieciešams risināt uzdevumus, kas saistīti ar inženierkomunikāciju, vīdsprieguma un zemsprieguma sadales tīklu un ceļu šķērsošanu, kā arī jautājumus, kas saistīti ar privātu zemes īpašumu šķērsošanu. Šeit dažādiem tirgus dalībniekiem ir iespējami vairāki rīcības ceļi, un ir nepieciešams izvēlēties optimālos risinājumus. Izanalizējot iegūtos rezultātus, iespējams izdarīt šādu provizorisku secinājumu: tehnoloģiju attīstība, infrastruktūras uzlabošanās, kā arī tirgus nosacījumi ienes nenoteiktības faktoru un rada pamatu, lai rastos tādi apstākļi, kuros daļa uzņēmumu var gūt labumu uz citu uzņēmumu attīstības rēķina. Tādējādi vairākiem energouzņēmumiem rodas novēršamas izmaksas, kas bieži var dod jūtamu ieguldījumu, mērot procentos no pašreizējo un jauno projektu apjoma. Lai panāktu taisnīgu gūtās peļņas sadalījumu, tiek piedāvāts izmantot Šeplija vērtību. Šāda pieeja palīdz ņemt vērā vairāku projektā iesaistīto uzņēmumu izmaksas un to intereses.
18. Saules enerģijas un hidroenerģijas apvienotā sistēma lauku teritorijās tiek ieteikta kā pilnībā ienesīga investīcija. Turcijas apstākļiem izstrādāts vispārīgs optimizācijas modelis, lai atrastu optimālo kombināciju no kopienā balstītām kombinētām enerģijas sistēmām. Šis savietojamais modelis ir izmantojams atjaunīgajai enerģijas ģenerācijai jebkurā lauku apdzīvotā vietā.
19. Stacijas ir izvietotas tuvu vietējiem patērētājiem, un tām ir jāpielāgojas šo patērētāju vajadzībām un to patēriņa grafikiem. Būtu jāizmanto hidroelektrostacijas spēja akumulēt enerģiju.
20. Lai apmierinātu elektroenerģijas pieprasījumu, vietējiem patērētājiem tiek piegādāta saules enerģija. Pastāvot pietiekamam saules gaismas daudzumam, iegūtā enerģija tiek novirzīta uz vietējo apakšstaciju, un šajā laikā HES uzkrāj ūdeni, lai darbotos laikā, kad elektroenerģijas cena ir augstāka. Brīžos, kad saules enerģija pietiekamā apmērā neļauj

apmierināt vietējo patērētāju elektroenerģijas pieprasījumu, hidroelektriskā sistēma ražo enerģiju, izmantojot rezervuārā uzkrāto ūdens daudzumu.

21. Šāds energoapgādes izkārtojums ļauj gūt papildu labumu gan ražotājlietotājiem, gan arī patērētājiem. Peļņas taisnīgai sadalei iespējams izmantot Šeplija vērtību.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Krišāns, Z., Oļeiņikova, I. *Elektroenerģētisko uzņēmumu vadības pamati*. Rīga: Rīgas Tehniskā Universitāte, 2007.
2. Vempers, Guntars. *Energosistēmu attīstības projektu izvērtēšana brīvā tirgus ekonomikas apstākļos*. Promocijas darbs. Rīga 2012.
3. *Climate and Energy Package*, European Commission. 2020. [Online]. Available: http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020/index_en.html.
4. *Combined heat and power (CHP)*. [Online]. Available: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/combined-heat-and-power-chp-1/combined-heat-and-power-chp-2>. [Accessed: 03-Apr-2017].
5. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/review_of_reference_values_final_report.pdf.
6. Enerģijas biržas “Nord Pool” interneta vietne: <https://www.nordpoolgroup.com/the-power-market/>.
7. Lloyd S. Shapley. *A Value for n-person Games*. In *Contributions to the Theory of Games*, Volume II, by H.W. Kuhn and A.W. Tucker, editors. Annals of Mathematical Studies v. 28, pp. 307–317. Princeton University Press.
8. Wu, F. F., Contreras, J. *Coalition formation in transmission expansion planning*. IEEE Trans. Power Syst., vol. 14, no. 3, pp. 1144–1151, Aug. 1999. Show Context View Article Full Text: PDF (747KB).
9. DeGroot, M.H., *Optimal Statistical Decisions*, McGraw-Hill Series in Probability and Statistics, 1970.
10. Van Geert, E. *Increased Uncertainty a New Challenge for Power System Planners*. IEE Colloquium on Tools and Techniques for Dealing With Uncertainty (Digest No. 1998/200), 1998, pp. 1831–1837.
11. Neimane, V. *Towards Bayesian Solution for Network Planning Problem*. RIMAPS 2001, Porto, Portugal, September 2001.
12. Zolezzi, J. M., Rudnick, H.: *Consumers coordination and cooperation in transmission cost allocation*, Proc. of the IEEE Powertech Conf., 2003, Bologna, Italy.
13. Sore, F., Rudnick, H. and L. Zolezzi, *Definition of an Efficient Transmission System Using Cooperative Games Theory*. IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 4, pp. 1484–1492, Nov. 2006.
14. Voropai, N.I., Ivanova, E.Y. *Shapley Game for Expansion Planning of Generating Companies at Many Non-Coincident Criteria*. IEEE Transactions on Power Sy... > Volume: 21 Issue: 4. Nov. 2006.
15. Neimane, V., Andersson, G. *Distribution networks reinforcement planning: a dynamic multi-criteria approach*. Proc. IEEE Budapest Power Tech Conf., pp. 306–311, 1999.
16. Neimane, V. *On development planning of electricity distribution networks* Ph.D. dissertation, Dept. of Elec. Eng., Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001.
17. Varfolomejeva, Renata. *Elektrisko staciju režīmu plānošanas un optimizācijas aspekti tirgus ekonomikas apstākļos*. Promocijas darbs. Rīga, 2014.

18. Hemmati, Reza, Hooshmand, Rahmat Allah, Khodabakhshian, Amin. *Reliability constrained generation expansion planning with consideration of wind farms uncertainties in deregulated electricity market*. Energy Convers Manag, 76 (1) (2013), pp. 517–526.
19. Chuang, A. S., Wu, F. F., Varaiya, P. *A game-theoretic model for generation expansion planning: problem formulation and numerical comparison*. IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, no. 4, pp. 885–891, Nov. 2001. <https://ieeexplore.ieee.org/document/962441>.
20. Neimane, V., Sauhats, A., Vempers, G., Tereskina, I., Bochkarijova, G. *Approach for Power Supply System Planning Based on Cooperative Game Theory*. The 5th International Conference on the EUROPEAN ELECTRICITY MARKET – EEM 08, Lisbon, Portugal, May 28–30, 2008, ID#206.
21. Neimane, V., Sauhats, A. S., Vempers, G., Inde, J., Tereskina, I., Bockarijova G. *Allocating production Cost of CHP Plant to Heat and power, using cooperative Game Theory*. IEEE Bucharest Power Tech Conference, 2009.
22. Neimane, V., Sauhats, A. S., Vempers, G., Tereskina, I., Bočkarijova, G. *Approach for Energy Supply System Planning Based on Cooperative Game Theory*. EEM – 08, vol. 174, pp. 182–187.
23. Voropai, N. I., Ivanova, E. Y. *Multi-criteria decision analysis techniques in electric power system expansion planning*. Elect. Power Energy Syst., vol. 24, no. 1, pp. 71–78, 2001.
24. Moshkin, I., Berjozkina, S., Sauhats, A. “*Solving of Transmission Network Development Tasks in Market and Uncertainty Conditions*”. in Proc. of 9th International Conference on the European Energy Market, Florence, 2012, pp. 1–7.
25. The special program “SAPR LEP 2011” description. Modern design System. [Online]. Available: <http://www.bsapr.ru/prod/progs/element.php?ID=250> [in Russian language].
26. Hasan H. Coban, Moskins, I., Sauhats, A. *The Optimization Capabilities of Combined Solar/Hydropower Plant Operation*. The 4th Workshop on AIEEE'16, Vilnius, Lithuania, November 10–12, 2016.
27. Coban, H.H., Varfolomejeva, R., Sauhats, A. S., Umbrasko, I. *Small hydropower plants operations optimization in the market conditions*. Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 2014 IEEE 2nd Workshop on Advances in, 2014.
28. Balat H. *A renewable perspective for sustainable energy development in Turkey: The case of small hydropower plants*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006.
29. Somaraki, M. *A Feasibility Study of a Combined Wind -Hydro Power Station in Greece*, 2003, Glasgow.
30. Hsu, Y.-Y., Yang, C.-C. *Design of artificial neural networks for short-term load forecasting*. Part I: Self-organizing feature maps for day type selection. IEE Proceedings-C, Vol. 138, No. 5, September 1991, pp. 407–413.
31. De Gooijer, J. G., Hyndman, R. J. *5 Years of Time Series Forecasting*. Science Direct, International Journal of Forecasting 22 (2006), pp. 443–473.
32. NOAA (National centers for environmental information) Global forecast system (GFS). Available: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global->

- forecast-system-gfs, Accu weather. Weather online radar. Available: <https://www.accuweather.com/en/us/national/weather-radar-interactive>.
33. Business Dictionary, *Naïve forecasting – Definirion*. Available: <http://www.businessdictionary.com/definition/na-ve-forecasting.html>.
 34. Petrichenko, L., Broka, Z., Sauhats, A. S., Bezrukovs, D. *Cost-Benefit Analysis of Li-Ion Batteries in a Distribution Network*. In: European Energy Market 2018, Poland, Lodz, 27–29 June, 2018. pp. 1–5. DOI: 10.1109/EEM.2018.8469782.
 35. Jasevics, A., Zemite, L., Kunickis *Demand load control with smart meters 58th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2017 – Proceedings Volume 2017-November, 29 November 2017, Pages 1-6* DOI: 10.1109/RTUCON.2017.8124757.
 36. Sauhats, A. S., Petričenko, L., Berjozkina, S., Jankovskis, N. *Stochastic Planning of Distribution Lines*. In: *2016 13th International Conference on the European Energy Market (EEM 2016)*, Portugal, Porto, 6–9 June, 2016. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, pp.895-899. DOI:10.1109/EEM.2016.7521349.
 37. Petrichenko R., Sobolevsky D., Sauhats A. S. *Short-term forecasting of district heating demand*. IEEE 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2nd Industrial and Commercial Power Systems Europe, Italy, Palermo 2018. IEEE Xplore, SCOPUS, web of science.
 38. Weixiong, Z. “*Data Mining*”. Available: <http://www.cs.wustl.edu/~zhang/teaching/cs514/Spring11/Data-prep.pdf>.
 39. XenonStack web-page, “*Data Preprocessing and Data Wrangling in Machine Learning and Deep Learning*”. Available: <https://medium.com/@xenonstack/data-preprocessing-and-data-wrangling-in-machine-learning-and-deep-learning-2122bc8daea9>.
 40. Hanmandlu, M., Chauhan, B. K. *Load Forecasting Using Hybriid Models*. IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no 1, pp. 20–29, Feb 2011.
 41. AST Lavenergo home page. Available: http://www.latvenergo.lv/portal/page?_pageid=80,1334481&_dad=portal&_schema=P ORTAL.
 42. Sauhats, A. S., Beryozkina, S., Petrichenko, L., Neimane, V. *Stochastic optimization of power line design* in Proc. IEEE PES Eindhoven PowerTech2015, pp. 892–897.
 43. Sauhats, A., Inde, J., Neimane, V., Vempers, G. *Co-Generation Strategies and Development Possibilities in Cities of North-Eastern Europe*. Oil Shale. – Vol. 24. (2007) pp. 337–346.
 44. Sauhats, A. S., Neimane, V., Vempers, G., Tereskina, I., Bočkarjova, G. *Optimization of Power Supply Using Cooperative Game Theory*. Thesis of the 3rd International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2008, Lithuania, Kaunas, 8.–9. May, 2008. – pp. 162–167.
 45. Holdermann, C., Kissel, J., Beigel, J. *Distributed photovoltaic generation in Brazil: an economic viability analysis of small-scale photovoltaic systems in the residential and commercial sectors*. Energy Policy 2014.

46. EK “*Solar energy policy in the EU and the Member States, from the perspective of the petitions received.*
[http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/556968/IPOL_STU\(2016\)556968_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/556968/IPOL_STU(2016)556968_EN.pdf), (accessed on 05.10.2018).
47. La Monaca, Sarah & Ryan, Lisa. (2017). *Solar PV where the sun doesn't shine: Estimating the economic impacts of support schemes for residential PV with detailed net demand profiling.* Energy Policy. 108. 731–741. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.05.052.
48. Jäger-Waldau, A. *PV Status Report 2017, EUR 28817 EN, Publications Office of the European Union.* Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-74071-8, DOI:10.2760/452611, JRC108105.
49. Huld, T., Jäger-Waldau, A., Ossenbrink, H., Szábo, S., Dunlop, E. and Taylor, N. *Cost Maps for Unsubsidised Photovoltaic Electricity.* JRC Report JRC 91937 2014.
50. *photovoltaic systems: A comparison of feed-in tariffs, net metering, and net purchase and sale Solar Energy*, Volume 86, Issue 9, September 2012, Pages 2678–2685. DOI:10.1016/j.solener.2012.06.001.