

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Inga Iljina

Doktora studiju programmas „Enerģētika un elektrotehnika” doktorante

**IEROBEŽOJUMU UN ATBALSTA IETEKME UZ
ELEKTROENERĢIJAS TIRGU, CENU UN REŽĪMIEM**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji
profesors *Dr. sc. ing.*
ANATOLIJS MAHŅITKO

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

Zinātniskā konsultante
vadošā pētniece *Dr. sc. ing.*
RENĀTA VARFOLOMEJEVA

RTU Izdevniecība
Rīga 2017

Iljina, I. Ierobežojumu un atbalsta ietekme uz elektroenerģijas tirgu, cenu un režīmiem. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2017. – 36 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes „P-05” (Enerģētika) 2017. gada 4. jūlija lēmumu Nr. 36/17.

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



ISBN 978-9934-10-992-8

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2017. gadā 11. oktobrī Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 306. auditorijā, plkst. 14.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Vladimirs Čuvičins

Rīga Tehniskā universitāte

Vadošais pētnieks *Dr. sc. ing.* Arturas Klementavicius

Lietuvas Enerģētikas institūts, Lietuva

Elektrisko sistēmu departamenta vadītājs, profesors *Dr. sc. ing.* Saulius Gudžius

Kauņas Tehnoloģiju universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

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

Inga Iljina (paraksts)

Datums

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tas satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu. Darbā kopējais apjoms 162 lappuses, tajās ietverti 82 attēli un 18 tabulas. Darbam ir 5 pielikumi. Literatūras sarakstā ir 151 nosaukums.

SATURS

PROMOCIJAS DARBA AKTUĀLITĀTE	5
PROMOCIJAS DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI.....	5
DARBA SAITE AR CITIEM LATVIJĀ VEIKTIEM PĒTĪJUMIEM	
ENERĢĒTIKAS JOMĀ	6
PĒTĪJUMA METODES UN LĪDZEKĻI.....	6
DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE UN GALVENIE REZULTĀTI	7
PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME	7
AUTORA PERSONĪGAIS IEGULDĪJUMS.....	8
PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA	8
PUBLIKĀCIJAS	9
PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS.....	12
1. ELEKTROENERĢIJAS TIRGU ATTĪSTĪBA UN DARBĪBAS PRINCIPI.....	12
2. ENERGOSISTĒMAS VADĪBAS UN OPTIMIZĀCIJAS UZDEVUMA	
NOSTĀDNE UN ALGORITMIZĀCIJA	13
3. BIOGĀZES ELEKTROSTACIJU REŽĪMU OPTIMIZĀCIJA, IEVĒROJOT TIRGUS	
CENAS UN IEROBEŽOJUMUS	19
4. HIDROELEKTROSTACIJU DARBA REŽĪMA OPTIMIZĀCIJA, IEVĒROJOT	
TIRGUS CENAS UN IEROBEŽOJUMUS.....	23
4.1. Hidroelektrostaciju attīstības stadijas un problēmas	23
4.2. Hidroelektrostaciju kaskādes darbības optimizācijas algoritms.....	24
4.3. HES kaskādes darba režīma optimizācijas piemēri.....	26
5. OPTIMIZĀCIJAS PROCEDŪRU PĀRBAUDES REZULTĀTI, ŅEMOT VĒRĀ	
TĪKLA IEROBEŽOJUMUS	28
SECINĀJUMI	33
REKOMENDĀCIJAS TURPMĀKAJAM DARBAM.....	34
IZMANTOTO INFORMĀCIJAS AVOTU SARAKSTS.....	35

Promocijas darba aktualitāte

Pasaulē notiekošā enerģētikas nozares restrukturizācija sekmē enerģijas tirgu veidošanos. Elektroenerģētikas nozares reformas noteica pāreju uz konkurences cenu veidošanas mehānismiem elektroenerģijas tirgū. Tradicionālās centralizētās nozares vadības vietā nāk vadība, kas balstās uz tirgus subjektu cenu signālu adekvātu atspoguļošanu. Lai varētu spriest par šo procesu, jāapskata nozares attīstības gaita. Pilnīga priekšstata veidošanai jāizpēta dažādu tirgus modeļu priekšrocības un trūkumi. Latvijas iestāšanās enerģijas tirgū nosaka energosistēmas vadības principu maiņas nepieciešamību. Centieni sasniegt iespējami augstāku efektivitātes līmeni rada pieprasījumu pēc atbilstoša programmatūru kompleksa izveides. Šī mērķa sasniegšana prasa daudzu darbietilpīgu problēmu un uzdevumu atrisināšanu.

Ideālā elektroenerģijas tirgū visi tā dalībnieki pērk un pārdod elektroenerģiju par vienotu līdzsvara cenu. Cenu veidošanu ietekmē daudzi faktori un ierobežojumi (gan tehniskie, gan juridiskie, gan ekoloģiskie). Ierobežojumus vismaz daļēji iespējams mainīt. Sabiedrība izmanto ierobežojumus energoapgādes sistēmas attīstības ietekmēšanai un virzīšanai uz vēlamo mērķi (piemēram, izmešu mazināšanu vai reģionālo attīstību) vai arī importējamo energoresursu apjoma samazināšanai. Ievērojot dažāda veida ierobežojumus, tostarp vēlmi atbalstīt atjaunojamo energoresursu izmantošanu, vienotu līdzsvara cenu visiem tirgus dalībniekiem daudzos gadījumos nevar noteikt. Ierobežojumu izpilde var prasīt ievērojamus līdzekļus. Atbalsts fiksētu un paaugstinātu elektroenerģijas iepirkuma cenu veidā rada atjaunojamo ģenerācijas avotu režīmu vadības novirzes no optimāliem darbības režīmiem tirgū, kas ir brīvs no atbalstiem un ierobežojumiem. Rodas jautājumi: cik pamatotas ir atbalsta cenas? Cik pamatoti ir ierobežojumi? Tāpēc, lai izprastu elektroenerģijas tirgus darbību, jāpievērš pastiprināta uzmanība tirgus ierobežojumiem un cenu noteikšanas mehānismam. Lai varētu spriest par ierobežojumu ietekmi, ir jārisina sarežģīts energosistēmas režīmu optimizācijas uzdevums.

Šajā darbā ir izskatīti optimizācijas uzdevumu formulēšanas un atrisināšanas jautājumi, kas tiek plaši apspriesti pasaules literatūrā. Ievērojams ieguldījums energosistēmu optimizācijas teorijas attīstībā ir tādiem ārzemju zinātniekiem kā F. C. Švepe, S. M. Harvejs, V. V. Hogans, S. Stofts, G. B. Šeble, L. A. Krumms, P. I. Bartolomejs, N. I. Voropajs, A. Z. Gamms, M. Bjorndals, B. Burstede, T. J. Paņikovska, R. Greens, V. Neimane un citiem. No Latvijas zinātniekiem ieguldījumu energosistēmas darbības un elektroenerģijas cenu izpētē liberalizēta tirgus apstākļos sniedza J. Barkāns, Z. Krišāns, J. Gerhards, A. Sauhats, A. Mahņitko, G. Junghāns, O. Linkevičs, I. Oļeņikova, A. Mutule.

Pieņemtie tirgus noteikumi un konkurences esamība pamatīgi mainīja optimizācijas uzdevumu nostādni un nozīmīgumu. Šis uzdevums praksē tiek risināts katru stundu, pielāgojot konkrēta ražotāja režīmu mainīgiem tirgus apstākļiem. Ir nepieciešams veikt darbības apstākļu un konkurentu uzvedības prognozi, kā arī jāņem vērā gadījuma un nenoteiktie faktori un procesi, jāmodelē ražošanas apstākļi un procesi. Aprēķinu neprecizitāte rada tiešos ekonomiskos zaudējumus.

Visu iepriekšminēto aspektu aktualitāte noteica šā darba tēmas, mērķu un satura izvēli.

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir veicināt energosistēmas ekonomiski efektīvu darbību un attīstību. Izvirzītā mērķa sasniegšanai promocijas darbā tika risināti šādi pamatuzdevumi:

- 1) apskatīta elektroenerģijas tirgu attīstības gaita un lielāko deregulēto elektroenerģijas tirgu darbības principi;

- 2) izpētīti elektroenerģijas cenu noteikšanas principi konkurences tirgus apstākļos;
- 3) sintezēts stohastiskais elektrostaciju režīmu un piedāvājuma cenu optimizācijas algoritms; veikta uzdevuma mērķa funkcijas transformācija un optimizācijas uzdevuma dekompozīcija, kas ļāva izmantot lineāras un nelineāras programmēšanas metožu kombinācijas, nodrošinot pieņemamu aprēķinu izpildes laiku;
- 4) izstrādāts elektroenerģijas mezglu cenu aprēķina algoritms nostabilizējušā režīmā, ņemot vērā tīkla nehomogenitāti, reaktīvās jaudas plūsmas un veikta algoritma aprobācija eksperimentālu aprēķinu ceļā;
- 5) pamatota energosistēmas pārvades ierobežojumu un elektrostaciju tehnisko un juridisko ierobežojumu ietekmes uz režīmiem un elektroenerģijas cenām analīzes metode un algoritms;
- 6) definētas pieņemto atjaunojamo energoresursu atbalsta shēmu nepilnības un piedāvāti to likvidēšanas ceļi;
- 7) piedāvāta un pārbaudīta metode un algoritms nelineāru mezglu cenu aprēķina uzdevumu risināšanas vienkāršošanai.

Darba saite ar citiem Latvijā veiktiem pētījumiem enerģētikas jomā

Brīvprātīga Latvijas iestāšanās enerģijas tirgū nosaka energosistēmas vadības principu maiņas nepieciešamību. Iespējami augstāka efektivitātes līmeņa nodrošināšanai nepieciešama atbilstoša režīma vadības programmatūras kompleksa izveide. Šī mērķa sasniegšana prasa daudzu darbietilpīgu problēmu un uzdevumu atrisināšanu. Lai to paveiktu un pēc iespējas ātrāk izveidotu nepieciešamo programmatūru, problēma tiek sadalīta vairākās daļās, kas tiek risinātas pētījumu virknē:

- a) ātro procesu vadība (īsslēgumi, asinhronā gaita, frekvences avārijas);
- b) īstermiņa režīmu optimāla plānošana un vadība;
- c) energosistēmu attīstības stratēģiskā plānošana (ilgtermiņa plānošana);
- d) elektrostaciju un tīklu režīmu modelēšana.

Nosauktajos virzienos pēdējo gadu laikā Latvijā aizstāvēti vai sagatavoti aizstāvēšanai daudzi promocijas darbi (A. Kutjuns, G. Junghāns, O. Linkevičs, M. Kalniņš, D. Žalostība, G. Vempers, V. Strelkovs, S. Kieņe, A. Gavrilovs, E. Kucajevs, M. Silarājs, N. Skobeļeva, A. Ļvovs, R. Petričenko, S. Berjozkina, R. Varfolomejeva, A. Obuševs, L. Petričenko, H. Coban). Pētījumi bija iekļauti valsts pētījumu programmā „Enerģētika” (zinātniskais vadītājs akadēmiķis J. Ekmanis). Izmantojot iegūto pieredzi un sintezētos algoritmus, tika izvirzīts jauns mērķis – sintezēt energosistēmas režīmu vadības komplekso programmatūru. Šis darbs pakļaujas definētajam mērķim un risina daļu no šim mērķim pakļautajām problēmām.

Pētījuma metodes un līdzekļi

1. Lineārās programmēšanas optimizācijas uzdevumu risināšanai tika izmantota simpleksa metode.
2. Nelineārās programmēšanas optimizācijas uzdevumu risināšanai tika izmantota vispārinātā reducētā gradienta metode, kvaziņūtona metode un nelineārā uzdevuma lineārā aproksimācija, kas ļāva vienkāršot uzdevuma risināšanu un lietot simpleksa metodi.
3. Mezglu cenu aprēķinam tika izmantota Lagranža nenoteikto reizinātāju metode.

4. Mezglu cenu aprēķinam lineārās programmēšanas uzdevumam homogēnā tīklā tika izmantots arī lineārās programmēšanas uzdevumu dualitātes princips.
5. Promocijas darba optimizācijas pamata uzdevumu risināšana tika veikta *Microsoft Office Excel*® un *MatLAB*® vidē, izmantojot tajos iebūvētos risinātājos.
6. Aprēķinu veikšanai tika izmantota interaktīvā vide *MatLAB*®, kas paredzēta intensīvai skaitļošanai, datu analīzei un to vizuālai attēlošanai, kā arī programma *MathCAD*®, kas paredzēta inženieru problēmu risināšanai un rezultātu vizualizēšanai un analīzei.

Darba zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

1. Izpētīti elektroenerģijas cenu noteikšanas principi konkurences tirgus apstākļos.
2. Piedāvāts energosistēmas optimizācijas uzdevuma risināšanas un elektroenerģijas zonu (mezglu) cenu aprēķina algoritms un matemātiskais modelis, ņemot vērā tīkla nehomogenitāti un reaktīvās jaudas plūsmas. Algoritms aprobēts Baltijas energosistēmas shēmas piemēram.
3. Pamatota lineārās aproksimācijas izmantošanas iespēja sarežģītu nelineāru energosistēmu optimizācijas uzdevumu risināšanai. Metodes aprobācija veikta jaudas plūsmu sadalījuma starp elektrostacijām uzdevumam, kas tiek izmantots mezglu cenu noteikšanai.
4. Analizēta elektroenerģijas zonu (mezglu) cenu jutība pret energosistēmas pārvades tīkla ierobežojumiem un pamatota to ietekme uz elektroenerģijas cenu.
5. Pierādīta iespēja definēt un risināt optimizācijas uzdevumu stohastiska nostādņē, veicot uzdevuma dekompozīciju un izmantojot lineāras un nelineāras programmēšanas algoritmu kombināciju.
6. Pierādīta biogāzes elektrostaciju un mazo hidroelektrostaciju atbalsta shēmu izmaiņu nepieciešamība.

Promocijas darba praktiskā nozīme

Darbā piedāvātos algoritmus var izmantot:

1. dispečeri – energosistēmas režīmu operatīvai vadībai;
2. elektroenerģijas ražotāji – cenu pieteikumu veidošanai un ikdienas elektrostaciju režīmu plānošanai (izstrādāto algoritmu un matemātisko modeļu izmantošana ļaus palielināt ģenerācijas avotu ražošanas efektivitāti);
3. elektroenerģijas tirgotāji, plānojot elektroenerģijas pirkšanas izmaksas;
4. enerģētikas speciālisti, kas nodarbojas ar energosistēmu attīstības plānošanu un projektēšanu (gan elektroapgādes tīklu attīstības plānošanai, gan energosistēmas ģenerējošo jaudu attīstības variantu analīzei);
5. enerģētikas sektora politikas plānotāji, veidojot vai mainot energoresursu atbalsta shēmas.

Darba rezultāti tiek izmantoti pabeigtos vai realizējamajos projektos un programmās.

1. Valsts nozīmes enerģētikas programmā (zinātniskais vadītājs akadēmiķis J. Ekmanis) projektā Nr. 7 „Klimata izmaiņu samazināšanas un atjaunojamo enerģijas resursu tehnoloģiju integrēšana Latvijas energosistēmā” (zinātniskais vadītājs profesors A. Sauhats).

2. Valsts nozīmes enerģētikas programmā „Energоеfektīvi un oglekļa mazieltipīgi risinājumi drošai, ilgtspējīgai un klimata mainību mazinošai energoapgādei (LATENERGI)” (zinātniskais vadītājs akadēmiķis L. Ribickis), projektā Nr. 2 „Energosistēmas attīstības plānošanas un enerģijas ražošanas, tirgošanas un sadales optimizācija” (zinātniskais vadītājs profesors A. Sauhats).
3. Pētījumā “AS „Latvenergo” elektrostaciju režīmu plānošanas programmatūras izstrāde” (Rīgas Tehniskās universitātes un AS „Latvenergo” 2013. gada līgums, pētījums pabeigts 2016. gadā). Programmatūras izstrādē piedalījās RTU un „Latvenergo” autoru kolektīvs, arī šī promocijas darba autore.

Darba rezultāti tiek izmantoti arī maģistrantūras studentu mācību procesā priekšmetā „Elektroapgādes sistēmu optimizācija”.

Autores personīgais ieguldījums

Energosistēmas režīmu optimizācija un mezglu cenu noteikšana tirgus ekonomikas apstākļos un aproksimējošās programmēšanas lietošanas energosistēmas režīmu optimizācijas uzdevumā pārbaude un pamatošana par darba virzienu tika izvēlēta, ņemot vērā profesora Anatolija Mahņitko ieteikumu.

Stohastiskā uzdevuma nostādne un tā atrisināšanas algoritms, Šepli vektora lietojums formulēts ar profesora Antana Sauhata palīdzību.

Atjaunojamo energoresursu atbalsta shēmu analīze ir veikta kopā ar vadošo pētnieci Renātu Varfolomejevu. Kopējie publikāciju rezultāti, kas pieder Renātai Varfolomejevai (sk. publikāciju sarakstu), šajā darbā nav iekļauti, izņemot mazo koģenerācijas staciju un hidroelektrostaciju optimizācijas rezultātus, kas atzīmēti tekstā. Daugavas HES režīmu analīze veikta, izmantojot programmatūru *OPTIBIDUS*, kas izstrādāta un tiek pilnveidota RTU Enerģētikas institūtā (zinātniskais vadītājs Antans Sauhats, atbildīgie izpildītāji: Kārlis Baltputnis un Romāns Petričenko). Programmatūra izstrādāta, balstoties uz hidroelektrostaciju optimizācijas algoritmu.

Pārējie darbā dotie aprēķini, rezultātu analīze, optimizēšanas procedūru programmēšana un pārbaude, rezultātu prezentēšana, secinājumi un apkopojumi pieder autorei.

Promocijas darba aprobācija

Par darba rezultātiem ziņots, un tie apspriesti 17 starptautiskajās konferencēs.

1. *The 10th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems*, Rumānija, Oradja, 27.–29. maijs, 2009.
2. *The 5th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2010*, Lietuva, Kauņa, 6.–7. maijs, 2010.
3. *The 9th International Scientific Conference Energy – Ecology – Economy 2010*, Slovākija, Tatranske Matliare, 18.–20. maijs, 2010.
4. *The 8th International Conference on Advances in Electro-Technologies ICAdET'2010*, Rumānija, Oradja, 27.–28. maijs, 2010.
5. *The 11th International Scientific-Technical Conference Problems of Present-day Electrotechnics-2010*, Ukraina, Kijeva, 1.–3. jūnijs, 2010.
6. *The 51st International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering*, Latvija, Rīga, 14. oktobris, 2010.

7. *The 6th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2011*, Lietuva, Kauņa, 5.–6. maijs, 2011.
8. *The 10th International Scientific Conference Energy-Ecology-Economy 2011*, Slovākija, Tatranske Matliare, 7.–9. jūnijs, 2011.
9. *The 3rd International Student Conference on Energetics 2011*, Portugāle, Leirija, 7.–9. jūlijs, 2011.
10. *The 7th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2012*, Lietuva, Kauņa, 3.–4. maijs, 2012.
11. *The 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2012*, Itālija, Venēcija, 18.–25. maijs, 2012.
12. *The 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*, Čehija, Brno, 23.–25. maijs, 2012.
13. *IEEE Grenoble PowerTech 2013*, Francija, Grenoble, 16.–20. jūnijs, 2013.
14. *The 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2013*, Polija, Vroclava, 5.–8. maijs, 2013.
15. *IEEE The 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Latvija, Rīga, 11.–13. maijs, 2015.
16. *The 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2015*, Itālija, Roma, 10.–13. jūnijs, 2015.
17. *The 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2016*, Itālija, Florence, 7.–10. jūnijs, 2016.

Publikācijas

Darba rezultāti publicēti 32 starptautiskos izdevumos.

1. Mahņitko, A., **Umbraško, I.** Determination of Electricity Nodal Prices Using Lagrange Method. *Journal of Computer Science and Control Systems*. 2009, vol. 2, Nr. 2, 161.–166. lpp.
2. Mahņitko, A., Gerhards, J., Ribakovs, S., **Umbraško, I.** Cenu veidošanās jautājumi elektroenerģijas tirgos. *Enerģētika un elektrotehnika*. 2009, Nr. 24, 16.–23. lpp.
3. Mahņitko, A., **Umbraško, I.** Influence of System Limitations on the Electricity Prices at Consumption Nodes. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2010, vol. 47, Nr. 4, 3.–16. lpp.
4. Mahņitko, A., **Umbraško, I.**, Varfolomejeva, R. The System's Limitations Costs Determination Using the Duality Concept of Linear Programming. *Journal of Computer Science and Control Systems*. 2010, vol. 3, Nr. 1, 115.–118. lpp.
5. Mahņitko, A., **Umbraško, I.** Nelineāras programmēšanas metožu izmantošana elektroenerģijas mezglu cenu noteikšanā. *Enerģētika un elektrotehnika*. 2010, Nr. 26, 14.–20. lpp.
6. **Umbraško, I.**, Varfolomejeva, R. Рынок электроэнергии Латвии после либерализации. No: *I конференция Электроэнергетика глазами молодежи: пленарные доклады*, Krievija, Jekaterenburga, 17.–19. novembris, 2010. Jekaterenburga: УПИ, 2010, 408.–411. lpp.
7. Mahņitko, A., **Umbraško, I.**, Varfolomejeva, R. О формировании ценовых заявок потребителей электроэнергии. No: *XI Международная научно-техническая конференция "Проблемы современной электротехники – 2010" (ПСЭ-2010)*, Ukraina, Kijeva, 1.–3. jūnijs, 2010. Kijeva: КПИ, 2010, 1.–4. lpp.

8. Mahņitko, A., **Umbraško, I.**, Varfolomejeva, R. The Bids Formation for Consumers of Electricity. No: *Proceedings of the 5th International Conference on Electrical and Control Technologies, Lietuva, Kauņa, 6.–7. maijs, 2010.* Kauņa: Technologija, 2010, 192.–195. lpp.
9. Mahņitko, A., Varfolomejeva, R., **Umbraško, I.** The Economic Strategy of Generating Companies in a Competitive Electricity Market. No: *Proceedings of the 9th International Scientific Conference Energy-Ecology-Economy 2010, Slovākija, Tatranske Matliare, 18.–20. maijs, 2010.* Tatranske Matliare: Slovak University of Technology, 2010, 1.–9. lpp.
10. Mahņitko, A., **Umbraško, I.** Technological Limitations Influence on Value of Objective Function of Electric Power System Optimisation Task. No: *The 51st International Scientific Conference Power and Electrical Engineering. Section of Power and Electrical Engineering: Abstract Book and Electronic Proceedings, Latvija, Rīga, 14. oktobris, 2010.* Rīga: RTU, 2010, 111.–114. lpp.
11. **Umbraško, I.**, Varfolomejeva, R., Mahņitko, A. The Electricity Producers Bid Prices Formation based on Profitability. No: *The 10th International Scientific Conference Energy-Ecology-Economy 2011, Slovākija, Tatranske Matliare, 7.–9. jūnijs, 2011.* Bratislava: Slovak University of Technology, 2011, 1.–6. lpp.
12. Mahņitko, A., Varfolomejeva, R., **Umbraško, I.** The Market Participants Profit Maximization Considering the Spinning Reserve and System's Limitations. No: *The 15th International Scientific Conference on Present-Day Problems of Power Engineering. Vol. 3: Forecasting and Energy Economics: Forecasting, Planning and Development Issues, Energy Markets and Technical-Economic Analysis, Polija, Jurata, 8.–10. jūnijs, 2011.* Gdaņska: Department of Electrical Power Engineering, 2011, 43.–50. lpp.
13. Mahņitko, A., **Umbraško, I.**, Varfolomejeva, R. Nodal Prices Determination Using the Duality Concept of Linear Programming. No: *Electrical and Control Technologies 2011: Proceedings of the 6th International Conference on Electrical and Control Technologies, Lietuva, Kauņa, 5.–6. maijs, 2011.* Kauņa: Technologija, 2011, 149.–154. lpp.
14. **Umbraško, I.**, Varfolomejeva, R., Mahņitko, A. Algorithm of Nodal Prices Determination for Inhomogeneous Networks. No: *Proceedings of the 3rd International Student Conference on Energetics 2011, Portugāle, Leirija, 7.–9. jūlijs, 2011.* Piscataway: IEEE, 2011, 1.–6. lpp.
15. Mahņitko, A., Gerhards, J., Varfolomejeva, R., **Umbraško, I.** Algorithm of Operating Equipment Selection Considering Demand Elasticity. No: *Elektroenergetika 2011: Proceedings of the 6th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, Slovākija, Stara Lesna, 21.–23. septembris, 2011.* Košice: Technical University of Košice, 2011, 376.–379. lpp.
16. Mahņitko, A., **Umbraško, I.** Assessment of the Reactive Power Flows Impact on the Nodal Prices of Active Power. No: *Proceedings of the 7th International Conference on Electrical and Control Technologies, Lietuva, Kauņa, 3.–4. maijs, 2012.* Kauņa: Technologija, 2012, 170.–174. lpp.
17. **Umbraško, I.**, Varfolomejeva, R., Mahņitko, A. Modeling of the Generating Company Behavior in Energy and Reserve Market. No: *Proceedings of the 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Itālija, Venēcija, 18.–25. maijs, 2012.* Piscataway: IEEE, 2012, 1070.–1074. lpp.

18. Varfolomejeva, R., **Umbraško, I.**, Mahņitko, A. Algorithm of Producers' Profit Maximization by Optimal Operating Equipment Selection, Generating Power and Spinning Reserve Distribution. No: *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012, Čehija, Brno, 23.–25. maijs, 2012*. Brno: Brno University of Technology, 2012, 193.–196. lpp.
19. **Umbraško, I.**, Mahņitko, A. Reaktīvās jaudas kompensācijas ietekme uz aktīvās jaudas mezglu cenām. *Enerģētika un elektrotehnika*. 2012, Nr. 30, 19.–24. lpp.
20. Varfolomejeva, R., **Umbraško, I.**, Mahņitko, A. The Small Hydropower Plant Operating Regime Optimization by the Income Maximization. No: *IEEE Grenoble PowerTech 2013, Francija, Grenoble, 16.–20. jūnijs, 2013*. Piscataway, NJ: IEEE, 2013, 2431.–2436. lpp.
21. Varfolomejeva, R., **Umbraško, I.**, Mahņitko, A. Algorithm of Smart Control System Operation of Small Hydropower Plant. No: *12th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Polija, Vroclava, 5.–8. maijs, 2013*. Piscataway, NJ: IEEE, 2013, 330.–334. lpp.
22. Mahņitko, A., Gerhards, J., Varfolomejeva, R., **Umbraško, I.**, Linkevičs, O. Development Opportunities of the Small Hydroenergetics in Latvia and Smart Operating System for Small-Scale Hydropower Plants. *Enerģētika un elektrotehnika*. 2013, Nr. 31, 10.–17. lpp.
23. Sauhats, A., Varfolomejeva, R., **Umbraško, I.**, Coban, H. The Small Hydropower Plant Income Maximization Using Games Theory. No: *Proceedings of the 2013 International Conference on Environment, Energy, Ecosystems and Development*. Venēcija: Wseas LLC Staff, 2013, 152.–158. lpp.
24. Sauhats, A., Varfolomejeva, R., **Umbraško, I.** Additional Income Distribution between Small Hydropower Plant and Public Trader Using Shapley Value. *Renewable Energies and Power Quality Journal*. 8.–10. aprīlis, 2014, Nr. 12, 1.–5. lpp.
25. Varfolomejeva, R., Zima-Bočkarjova, M., Sauhats, A., Petričenko, R., **Umbraško, I.**, Coban, H. Reconsideration of Supporting Scheme for Renewable Energy Producers. No: *Environmental Biotechnology and Engineering – 2014: The Fourth International Symposium on Environmental Biotechnology and Engineering. Vol. 1, Meksika, 9.–12. septembris, 2014*. Meksika: Cinvestav, 2014, 294.–306. lpp.
26. Sauhats, A., Varfolomejeva, R., **Umbraško, I.**, Coban, H. An Additional Income of Small Hydropower Plants and a Public Trader. *International Journal of Energy*. 2014, vol. 8, 29.–35. lpp.
27. Coban, H., Varfolomejeva, R., Sauhats, A., **Umbraško, I.** Hydropower Plant Regime Management According to the Market Conditions. No: *2nd International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials: Book of Abstracts, Turcija, Fethiye/Mugla, 16.–19. oktobris, 2014*. Fethiye: ENEFM2014, 2014, 506.–507. lpp.
28. Mahņitko, A., Gerhards, J., Linkevičs, O., Varfolomejeva, R., **Umbraško, I.** Small Hydropower in Latvia and Intellectualization of Its Operating Systems. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2014, vol. 50, Nr. 6, 3.–15. lpp.
29. Varfolomejeva, R., **Umbraško, I.**, Sauhats, A., Broka, Z. Impact of the Limitations of Transmission Line Capacity on Pricing. No: *IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives: Proceedings, Latvija, Rīga, 11.–13. maijs, 2015*. Rīga: RTU, 2015, 318.–323. lpp.
30. Varfolomejeva, R., Sauhats, A., **Umbraško, I.**, Broka, Z. Biogas Power Plant Operation Considering Limited Biofuel Resources. No: *2015 IEEE 15th International Conference*

on Environment and Electrical Engineering: Conference Proceedings, Itālija, Roma, 10.–13. jūnijs, 2015. Roma: 2015, 570.–575. lpp.

31. Coban, H., Varfolomejeva, R., Sauhats, A., **Umbraško, I.** Hydropower Plant Regime Management according to the Market Conditions. No: *2nd International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials: Proceedings, Turcija, Oludeniz, Fethiye/Mugla, 16.–19. oktobris, 2014.* Šveice: Springer International Publishing, 2015, 141.–152. lpp.
32. Varfolomejeva, R., **Iljina, I.**, Coban, H., Sokolovs, N., Sauhats, A. The Limiting Factors and Supporting Schemes Influence on Small-Scale Power Plant Work. No: *2016 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering: Conference Proceedings, Itālija, Florence, 7.–10. jūnijs, 2016.* Florence: IEEE, 2016, 1893.–1898. lpp.

Promocijas darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā. Tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, rekomendācijas un literatūras saraksts. Darbā ir 82 attēli, 18 tabulu, kopā 162 lappuses. Darbam ir pieci pielikumi. Literatūras sarakstā norādīts 151 izmantotās literatūras avots.

Pirmajā nodaļā tiek apskatīta elektroenerģijas tirgu attīstības gaita, analizētas dažādu elektroenerģijas tirdzniecības modeļu priekšrocības un trūkumi. Šī nodaļa veltīta dažādiem elektroenerģijas cenu noteikšanas principiem tirgus konkurences un ierobežojumu apstākļos. Tiek salīdzināts zonālo cenu un mezglu cenu noteikšanas mehānisms. Atsevišķa uzmanība veltīta lielākajiem deregulētajiem elektroenerģijas tirgiem. Apskatīta situācija elektroenerģijas tirgū Baltijas valstīs, pievēršot uzmanību starpzonu elektrolīniju caurlaides spējai, kā arī iespējām likvidēt šos ierobežojumus.

Otrajā nodaļā apskatīti energosistēmas režīma plānošanas uzdevuma algoritmizācijas matemātiskie pamati, noteikti daudzdimensionālā uzdevuma risināšanas etapi, apskatīts plašs matemātiskās programmēšanas metožu klāsts. Piedāvāta un pamatota metodoloģija sarežģītu elektroenerģijas plānošanas procesu aprēķināšanai.

Trešajā nodaļā risināts biogāzes elektrostaciju režīmu optimizācijas uzdevums, ievērojot tirgus cenas un ierobežojumus.

Ceturtajā nodaļā apskatītas hidroelektrostaciju kaskādes optimizācijas iespējas, ievērojot ierobežojošos faktorus.

Piektajā nodaļā doti energosistēmas režīma plānošanas un elektroenerģijas cenu noteikšanas uzdevumu piemēri, kas ietver gan lineārās, gan nelineārās programmēšanas uzdevumus. Piedāvāts algoritms energosistēmas optimizācijas uzdevuma risināšanai un mezglu cenu noteikšanai nehomogēnā tīklā, izmantojot Lagranža nenoteikto reizinātāju metodi, kā arī veikta starpzonu tīklu caurlaides spējas ierobežojumu ietekmes vērtēšana uz elektroenerģijas cenu atsevišķā zonā.

1. ELEKTROENERĢIJAS TIRGU ATTĪSTĪBA UN DARBĪBAS PRINCIPI

Pirmajā nodaļā pamatota promocijas darba aktualitāte, aprakstot elektroenerģijas tirgu attīstības gaitu, analizējot dažādu elektroenerģijas tirdzniecības modeļu priekšrocības un trūkumus. Šī nodaļa veltīta dažādiem elektroenerģijas cenu noteikšanas principiem tirgus konkurences un ierobežojumu apstākļos. Tiek salīdzināts zonālo un mezglu cenu noteikšanas mehānisms. Atsevišķa uzmanība veltīta lielākajiem deregulētajiem elektroenerģijas tirgiem.

Nodaļā analizēta ierobežojumu un elektroenerģijas ražošanas atbalsta ietekme uz elektroenerģijas cenām un režīmiem. Visi ierobežojumi pēc būtības ir tirgu kropļojoši faktori. Ierobežojumi var tikt iedalīti tehniskajos un juridiskajos ierobežojumos. Pie tehniskajiem ierobežojumiem pieder gan energosistēmas ierobežojumi (piemēram, tīkla ierobežojumi, ģeneratoru jaudas ierobežojumi, energobloku apturēšanas ierobežojumi, rezervuāru ierobežojumi u. c.), gan pieejamo energoresursu ierobežojumi, kas var būt atkarīgi no laikapstākļiem (saule, vējš, gaisa temperatūra, nokrišņi) vai energoresursu piegādes (piemēram, piegādātais kurināmā apjoms, saražotā biogāze u. c.). Savukārt pie juridiskajiem ierobežojumiem pieder visi tirgu ietekmējošie faktori, kas izriet no tiesiskā regulējuma. Tie ietver gan vides aizsardzības ierobežojumus (piemēram, izmešu ierobežojumus, minimālā un maksimālā ūdens līmeņa ierobežojumus u. c.), gan energoefektivitātes prasības (piemēram, primāro energoresursu ietaupījums augstas efektivitātes koģenerācijas stacijām), gan arī noteiktu enerģijas ražošanas veidu vai energoresursu izmantošanas atbalsta shēmas, kas rada stimulus attīstīt šāda veida enerģijas ražošanu. Nepietiekama elektropārvades līniju caurlaides spēja izraisa stingrākus elektrotīkla tehniskos ierobežojumus. Tā ir aktuāla elektropārvades tīkla problēma gan Latvijas, gan pasaules mērogā.

Tirgus ierobežojošo faktoru problēmu aktualizācija radīja nepieciešamību meklēt risinājumus, kas ļautu daļēji vai pilnīgi likvidēt pastāvošos elektriskā tīkla tehniskos ierobežojumus vairumā darba režīmu. Darbā izskatīta starpzonu elektropārvades līniju caurlaides spējas ietekme uz elektroenerģijas cenu zonā (Baltijas valstīs), ievērojot importa iespējas un atbalstu elektroenerģijas ražošanai no atjaunojamajiem energoresursiem vai koģenerācijā. Uzdevuma nostādne un algoritmizācija apskatīta otrajā nodaļā [1]–[3].

2. ENERGOSISTĒMAS VADĪBAS UN OPTIMIZĀCIJAS UZDEVUMA NOSTĀDNE UN ALGORITMIZĀCIJA

Energosistēmu attīstības un vadības mērķi un uzdevuma specifika

Energosistēmu vadība un attīstība notiek, ievērojot šādus četrus vispasaules mērogā atzītus [6] mērķus:

- efektivitātes paaugstināšana;
- drošuma līmeņa paaugstināšana;
- kaitīgās ietekmes uz vidi un klimata pārmaiņu samazināšana;
- ilgtspējas nodrošināšana.

Pieņemot lēmumu, ir jāņem vērā visi četri nosauktie mērķi. No teiktā izriet pirmais svarīgais apgalvojums: energosistēmu vadības uzdevumi pieder daudzkritēriju uzdevumu klasei.

Daudzkritēriju uzdevumi var tikt atrisināti dažādi [4]. Nosauksim tikai trīs visplašāk izmantotās risināšanas pieejas.

1. viena kritērija izvēle optimizācijas uzdevuma mērķa funkcijas formulējumam; pārējie tiek pārnesti ierobežojumu klasē;
2. integrālas mērķa funkcijas formulējums; šajā gadījumā optimizācijas mērķa funkcijā visi kritēriji tiek apvienoti, izmantojot svara koeficientus [5]; tieši šo koeficientu izvēle rada vislielākās grūtības;
3. Pareto kompromisa kopas [2], [6], [7] noteikšana un pasniegšana lēmuma pieņēmējiem. Šajā darbā tālāk tiek izmantota pirmā pieeja. Turklāt īpaša uzmanība tiks veltīta ierobežojumu vērtību izvēles pamatojumam.

Optimizācijas parametri

Risinot energosistēmu optimizācijas uzdevumus, ir jāizvēlas daudzi noteicošie režīmu parametri katrai plānošanas perioda stundai, piemēram, ģeneratoru aktīvās un reaktīvās jaudas, sprieguma līmeņi. Nosauktie parametri ir jāmaina laikā, pielāgojoties enerģijas pieprasījumam un citiem ietekmējošiem apstākļiem. Bez nosauktajiem parametriem, kam piemīt nepārtrauktu lielumu raksturs, energosistēmas vadības procesā var mainīt tās struktūru, ieslēdzot vai atslēdzot iekārtas: ģeneratorus, transformatorus, reaktorus. Ieslēgšana-atslēgšana var tikt aprakstīta ar loģiskajiem (Būla) [7] mainīgajiem, kas var pieņemt tikai divas vērtības, proti, 0 vai 1. Rezultātā mainās arī uzdevuma matemātiskais apraksts.

Pat nelielas energosistēmas gadījumā, ņemot vērā, ka mainīgie var būt atšķirīgi dažādos laika momentos, var apgalvot, ka ir jāveic milzīgs skaits struktūru darbības iespēju novērtējumu. Piemēram, 30 ģeneratoru gadījumā, plānojot režīmu 168 stundām (nedēļai), struktūru skaits ir $N = 5040!$

Ņemot vērā minēto, varam formulēt otro apgalvojumu: energosistēmu vadības uzdevumi pieder daudzparametru uzdevumu klasei ar lielu nepārtraukto un loģisko mainīgo skaitu. Loģisko mainīgo lielumu kombināciju skaits ir milzīgs.

Nenoteiktie un varbūtiskie mainīgie

Energosistēmu darbību būtiski ietekmē daudzi faktori, kam piemīt varbūtisks (var aprakstīt ar mainīgo, kas var tikt aprakstīts ar varbūtību sadalījuma funkciju) vai nenoteikts (nav informācijas sadalījuma funkcijas pamatotai izvēlei) raksturs. Šādu faktoru esamību lielā mērogā izraisa tas, ka režīmu plānošana, vadība un optimizācija daudzos gadījumos notiek, ņemot vērā nākotnes stāvokli. Nākotnes enerģijas pieprasījumu, ūdens pieplūdi, āra gaisa temperatūru, energoresursu cenas var prognozēt, tikai ar ierobežotu precizitāti. Trešais apgalvojums: energosistēmu vadības uzdevumi pieder stohastiskās optimizācijas uzdevumu klasei.

Energosistēmu vadība kā spēle

Mūsdienu energosistēmas strādā apstākļos, kas ietver daudzus lēmuma pieņēmējus – spēlētājus. Elektrostacijas pieder dažādām kompānijām. Tirgu ietekmē enerģijas tirgotāju lēmumi. Patērētāji apzināti var izvēlēties sev izdevīgu režīmu.

Konkurentu lēmumi var būt nelabvēlīgi citiem spēlētājiem. Informācija par pieņemtajiem lēmumiem kļūst zināma tikai *post factum*. Atsevišķos gadījumos spēlētājiem var rasties iespēja apvienoties – veidot koalīciju (kooperatīvu), apmainīties ar informāciju, saskaņot lēmumus un gūt papildu peļņu.

Būtiski atzīmēt, ka apskatāmās situācijas aprakstam, ņemot vērā cilvēka darbības un ietekmi, nevar lietot varbūtisko pieeju tiešā veidā. Minētais ļauj formulēt ceturto apgalvojumu: energosistēmu vadība notiek apstākļos, ko būtiski ietekmē konkurentu un partneru rīcība.

Ietekmējošo procesu dimensionalitāte, šķērskorelācija un paškorelācija

Kā jau tika atzīmēts, apskatāmo uzdevumu ietekmē daudzi nenoteikti vai varbūtiski (stohastiski), laikā mainīgi parametri. Šīs izmaiņas var aprakstīt, izmantojot gadījuma procesu metodoloģiju [8]–[10]. Būtiski atzīmēt, ka jāņem vērā ciešās saites starp procesiem. Piemēram: āra gaisa temperatūras sasaiste ar slodzēm dažādos mezglos, ūdens pieplūdi upēs vai siltuma pieprasījumu. Aprakstot procesus, ir jāņem vērā arī viena procesa lielumu, kas pieder dažādiem laika momentiem, savstarpējā atkarība.

No teiktā izriet piektais apgalvojums: energosistēmas režīmus ietekmē daudzdimensionāls, laikā un mainīgo telpā sarežģīti saistīts gadījuma process.

Lēmumu pieņemšana laika intervālos

Plānojot režīmus, nepieciešams sastādīt nākotnes plānu, bet, skatoties no vadības elastīguma viedokļa, sastādītajos plānos realizācijas laika gaitā var veikt izmaiņas. Šīs iespējas realizēšana būtiski ietekmē optimizācijas uzdevumu, padarot to sarežģītāku. Tādējādi varam noformulēt sesto apgalvojumu: energosistēmu vadības uzdevumi pieder daudzsoļu uzdevumu klasei.

Ierobežojumi

Optimizācijas uzdevumos ir sastopami divu veidu ierobežojumi:

- 1) ierobežojumi, kas aprakstāmi ar vienādībām (piemēram, aktīvās un reaktīvās jaudas bilances ierobežojumi mezglos);
- 2) ierobežojumi, kas aprakstāmi ar nevienādībām (piemēram, jaudas plūsmas ierobežojumi kontrolējamos šķēlumos, agregātu jaudu diapazons vai sprieguma ierobežojumi mezglos) [27]–[29].

„Dimensionalitātes lāsts” („*The curse of dimensionality*”)

Energosistēmu vadības optimizācijas uzdevumu teorētiski var atrisināt ar daudzu zināmu algoritmu palīdzību. Diemžēl praktiski tas prasītu neiespējamus resursus gan laika, gan datortehnikas resursu ziņā. Līdz ar to var iedalīt šādus skaitļošanas resursu pieprasījuma pieauguma avotus:

- milzīgs iespējamo energosistēmas struktūru skaits;
- gadījuma procesu dimensionalitāte un nepieciešamība ņemt vērā starpkorelāciju un paškorelāciju;
- uzdevuma nelinearitāte pie liela optimizācijas mainīgo skaita;
- liels ierobežojumu skaits un to pārbaudes sarežģītība.

Ir iespējami gadījumi, kad ierobežojumu izpildes pārbaude veido atsevišķu sarežģītu problēmu. Par piemēriem var kalpot augstsprieguma līniju pieļaujamās jaudas plūsmu ierobežojumi, kuru pārbaude prasa visas sistēmas darbības modelēšanu. Vēl sarežģītāka ir stabilitātes ierobežojumu pārbaude, jo ir nepieciešams modelēt ne tikai pamatiekārtu darbību, bet arī automātiskās vadības sistēmas (regulatori, relejaizsardzības, pretavāriju automātika). Minētie jautājumi šajā darbā netiek apskatīti. Tiek pieņemts, ka sistēmas ierobežojumu pārbaudei var izmantot rūpnieciskās energosistēmu modelēšanas programmas, piemēram, *ETAP* vai *EUROSTAG* [6].

Energosistēmu vadības optimizācijas uzdevuma matemātiskais formulējums

Pieņemsim, ka enerģijas ražotāji un patērētāji (turpmāk īsuma labad visus sauksim par ražotājiem) ir sarunājuši un nodibinājuši enerģijas tirgu. Pieļausim, ka katrs i -tais no K elektroenerģijas ražotājiem plāno savu darbību laika periodam T_p un viņi var izvēlēties savu darbības režīmu, ko katrā laika momentā t var uzdot ar izmantojamo iekārtu struktūru S un parametriem:

$$X_{it} \left[X_{it1}, X_{it2}, \dots, X_{itN_i} \right], \quad (2.1)$$

kur $N_i - i$ -tā ražotāja izvēlamo parametru skaits.

Pieņemsim, ka ražošanas peļņu R_i ietekmē gadījuma lielumi Π_i . Šīs ietekmes dēļ peļņa R_i arī ir gadījuma lielums. Pieņemot, ka gadījuma lielumiem Π_i ir zināma kumulatīvā varbūtības sadalījuma funkcija, gadījuma lielumam R_i var izteikt peļņas matemātisko cerību $M[R_i]$:

$$M[R_i] = \int_0^{T_p} \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int \phi(X, S, \Pi) dF_{\Pi}. \quad (2.2)$$

Vienādojums (2.2) satur $X_{(-i)}$ un $S_{(-i)}$, kas ir daļa no X un S un ir atkarīgi no citiem lēmumu pieņēmējiem un vispārīgā gadījumā nav zināmi i -tajam tirgus dalībniekam. Tādējādi vienādojumā (2.2) pastāv divi dažādi nenoteiktības un nejaušības avoti: dabas faktori (temperatūra, nokrišņi, saules radiācija u. tml.) un konkurentu darbība.

Formulēsim optimizācijas uzdevumu šādā veidā:

$$\begin{cases} M[R_1] \Rightarrow \max, \\ \vdots \\ M[R_N] \Rightarrow \max \end{cases} \quad (2.3)$$

pie nosacījuma, ka:

$$X, S, \Pi \in \Omega, \quad (2.4)$$

kur Ω – atļauto parametru un struktūru telpa.

Formulēto uzdevumu bez papildu nosacījumiem nav iespējams atrisināt, jo ražotāju/patērētāju intereses ir pretrunīgas. Šie papildu nosacījumi tiek ieviesti, pieņemot tirgus darbības noteikumus. Vislielākā nozīme ir pieteikumu izvēles reglamentējošajam noteikumam, kas nosaka, ka enerģijas pieprasījuma nodrošināšanai tiek izvēlēti vislētākie piedāvājumi. Enerģijas tirgus apstākļos, kur ražošanas jaudas (piedāvājums) pārsniedz pieprasītās, uzdevumu (2.3) var sadalīt N neatkarīgos maksimizēšanas uzdevumos šādā veidā:

$$M[R_i] = \max \text{ visiem } i, \quad (2.5)$$

jo izmantotā (2.2) funkcija ϕ pieņem formu:

$$\phi(X, S, \Pi_i^*), \quad (2.6)$$

kur Π_i^* – gadījuma lielumu kopa, kas atšķirībā no Π_i satur arī tirgus cenas, kuras ir jāprognozē tirgus dalībniekiem.

Līdz ar to optimizācijas uzdevums ievērojami vienkāršojas, taču joprojām paliek pārāk sarežģīts praktiskai izmantošanai, jo vienādība (2.2) satur lielas dimensionalitātes gadījuma skaitļu kopu Π un atbilstošas dimensionalitātes varbūtības sadalījuma funkciju F_{Π} , lielu iespējamo struktūru S skaitu un milzīgas dimensionalitātes integrāli.

Optimizācijas uzdevuma vienkāršošanas paņēmieni

Sarežģīta optimizācijas uzdevuma risināšanai ir lietderīgi to vienkāršot. Šim nolūkam var izmantot vairākus paņēmienus.

1. Plānošanas laika dalīšana intervālos.

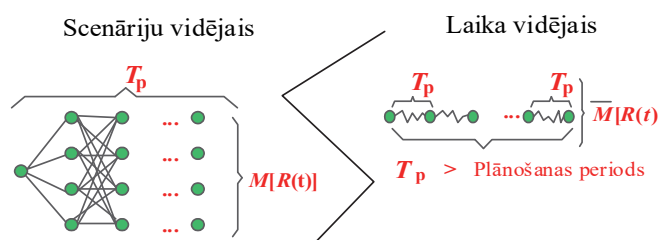
Sadalot laiku intervālos, vienādojumā (2.2) laika integrālis tiek aizvietots ar summu, un tiek meklēti optimizācijas mainīgie katrai plānošanas perioda stundai. Arī *Nord Pool* elektroenerģijas biržā lietotais algoritms izmanto šo aizstāšanu.

2. Uzdevuma stohastiskās nostādnes aizvietošana ar deterministisko.

Procesi Π_t^* tiek aizvietoti ar to vidējām vērtībām, un vienādojumā (2.2) pazūd daudzkārtējais integrālis. Līdz ar to nav nepieciešama varbūtības sadales funkcija F_{Π} , un uzdevums ievērojami vienkāršojas.

3. Scenāriju metode.

Var apgalvot, ka tieši šī metode ir attīstīta, analizēta un lietota visplašāk [4], [11]–[13]. Izmantojot scenāriju metodi, gadījuma procesi Π_t tiek aizvietoti ar to prognozējamajām realizācijām, un tiek novērtēta katras realizācijas varbūtība. Scenāriju metodes izmantošanu var vienkāršot, veicot optimizācijas uzdevuma transformāciju no scenāriju vidējā uz laika vidējo [14]. Šāds uzdevuma formulēšanas veids (2.1. att.) ļauj ievērojami vienkāršot elektrostaciju darbības plānošanas uzdevumu. Tomēr šajā gadījumā nepieciešams īstenot prognozēšanas procesu, kuru ilgums pārsniedz plānošanas periodu T_p . Darbā apskatīta arī plānošanas perioda ilguma izvēles problēma.

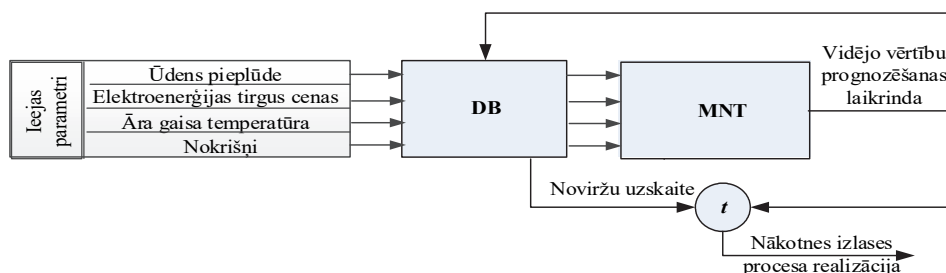


2.1. att. Optimizācijas uzdevuma transformācija no scenāriju vidējā uz laika vidējo.

Procesu prognozēšanas metodes

Pēdējos gados energosistēmu vadības uzdevuma procesu prognozēšanai tiek plaši izmantoti mākslīgie neironu tīkli (*Artificial Neural Network*) (MNT) [15]–[20]. Problēmas, kas saistītas ar MNT struktūras izvēli un apmācību, apskatītas daudzās publikācijās, un to izpēti un risināšana šajā darbā netiek attīstīta. Tiek izmantots modelis, ko sintezējuši un pārbaudījuši RTU zinātnieki (R. Petričenko, K. Baltputnis) un kas ir spējīgs prognozēt procesu realizāciju izmaiņas laikā [29]. Prognozes sastādīšanai tiek izmantoti iepriekšējo dienu procesu reģistrācijas rezultāti (45–60 diennaktis).

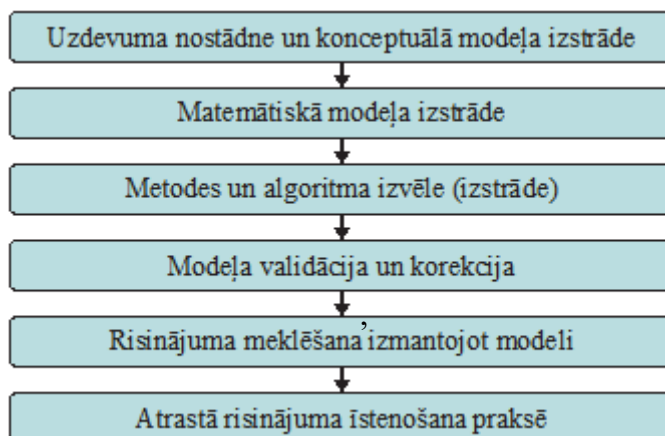
Prognozēšanas modeļa struktūra parādīta 2.2. attēlā. Tas sastāv no realizāciju datubāzes (DB) un mākslīgo neironu tīkla (MNT). Atzīmēsim, ka izmantojamās datubāzes ir pieejamas elektroniskā veidā, izmantojot internetu [16], [17].



2.2. att. Elektroenerģijas cenas un ūdens pieplūdes prognozēšanas modelis.

Energosistēmas režīma plānošanas uzdevuma risināšanas etapi un procedūras

Energosistēmas režīma plānošana tiek secīgi veikta vairākos etapos (2.3. att.).



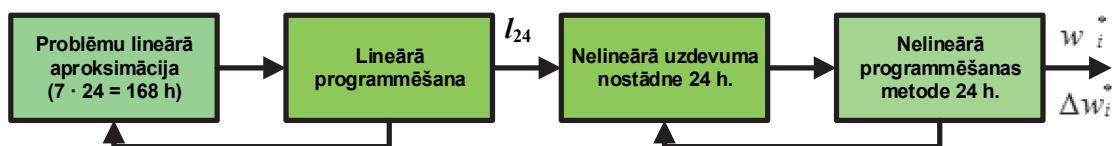
2.3. att. Optimizācijas uzdevuma risināšanas etapi.

Lai atrastu uzdevuma risinājumu, atkarībā no mērķa funkcijas, ierobežojumu veida un struktūras jāpiemēro noteiktas matemātiskās programmēšanas metodes [21].

No izmantojamo metožu analīzes var secināt, ka pašlaik nepastāv vienota metode visu optimizācijas problēmu efektīvai risināšanai, tāpēc tiek izmantotas konkrētam gadījumam piemērotākās optimizācijas metodes. Izņēmums ir lineārā programmēšana, kurai ir izstrādāta uzdevuma risināšanas simplekismetode. Metode garantē globāla uzdevuma risinājuma atrašanu, ja tāds eksistē. Tas rada vēlmi izmantot simplekismetodi arī nelineārās programmēšanas uzdevumu risināšanā. Šo vēlmi iespējams īstenot praksē, izmantojot **linearizācijas paņēmienus** un aizstājot nelineārās programmēšanas uzdevuma risināšanu ar alternatīva lineārās programmēšanas uzdevuma risināšanu. Protams, nelineārā optimizācijas uzdevuma vienkārtēja linearizācija neļauj atrast galīgo risinājumu. Taču, ievērojot noteiktus nosacījumus, jebkuru izejas nelineārais optimizācijas uzdevums var aizstāt ar secīgiem lineārās programmēšanas starpu uzdevumiem, kas tiek risināti ar simplekismetodi.

Aprakstīto vienkāršošanu rezultātā kļūst iespējama optimizācijas uzdevumu atrisināšana stohastiskā un nelineārā nostādne vienai stacijai. Mēģinājumi izdarīt to pašu staciju kaskādei bija neveiksmīgi – vairs nebija iespējams atrast globālo maksimumu.

Problēmas atrisināšana ir iespējama, ja tiek izmantota uzdevuma dekompozīcija (2.4. att.). Darbā piedāvāts sadalīt elektrostaciju darbības vidējā termiņa plānošanas uzdevumu apakšuzdevumos. Apskatītās dekompozīcijas pamatā likta heuristiskā pieeja – pieņemtā linearizācijas iespēja ir pierādīta ar skaitliskiem eksperimentiem.



2.4. att. Uzdevuma dekompozīcija.

3. BIOGĀZES ELEKTROSTACIJU REŽĪMU OPTIMIZĀCIJA, IEVĒROJOT TIRGUS CENAS UN IEROBEŽOJUMUS

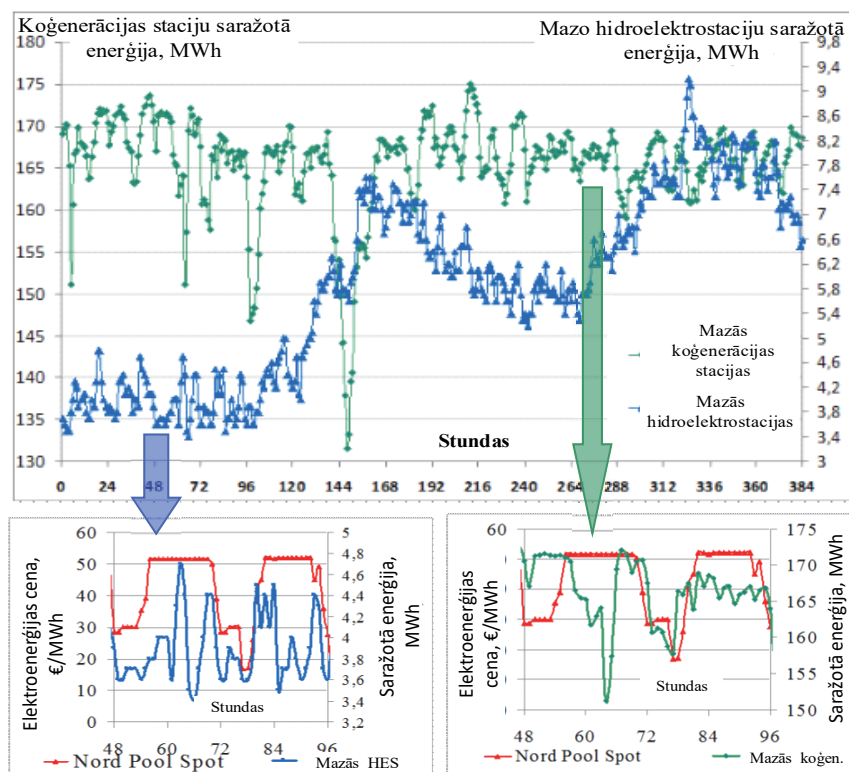
Latvijā vērojama izteikta augšupejoša tendence jauno biogāzes un biomasas staciju būvniecībā. Saskaņā ar Latvijas Centrālās statistikas pārvaldes datiem biogāzes izmantojošu elektrostaciju jauda un saražotā elektroenerģija ar katru gadu pieaug [22]. Pēc jaunu biogāzes elektrostaciju darbības sākšanas 2016. gadā Latvijā ir 60 biogāzes elektrostaciju ar kopējo uzstādīto elektrisko jaudu 61,16 MW [23].

Mazās biomasas un biogāzes elektrostacijas tiek būvētas reģionos, kur pieejama lielākā daļa vietējo atjaunojamo energoresursu, veicinot decentralizētu elektroenerģijas ražošanu. Šie elektroenerģijas avoti atrodas tuvu elektroenerģijas patēriņam un paaugstina patērētāju elektroapgādes drošumu, samazina elektroenerģijas pārvades un sadales zudumus, pazemina enerģijas izmaksas un veicina enerģētisko neatkarību. Šādu elektrostaciju būvniecība ir īpaši ieteicama reģionos, kur ir ierobežota pārvades līniju kapacitāte vai ir kādi citi elektroenerģijas caurlaides spējas ierobežojumi.

Enerģijas ražošana no biogāzes Latvijā tiek veicināta elektroenerģijas obligātā iepirkuma ietvaros, kas paredz saražotās elektroenerģijas iepirkšanu par garantētu iepirkuma cenu, kas ir ievērojami augstāka par elektroenerģijas tirgus cenu („*feed-in*” tarifs). Obligātais iepirkums ierobežotu primāro resursu gadījumā ir pretrunā ar ģenerācijas stimulēšanu enerģijas pieprasījuma pīķa (maksimālo cenu) stundās (3.1. att.).

Nodaļas mērķis ir izstrādāt biogāzes koģenerācijas elektrostaciju režīmu vadības algoritmu, izmantojot stohastisko pieeju un ņemot vērā ierobežotos pieejamos resursus biogāzes ražošanai un nepieciešamību nodrošināt pieprasīto siltumenerģijas daudzumu, kā arī pamatot šāda algoritma izmantošanas nepieciešamību, elektrostacijai darbojoties tirgus apstākļos.

Izmantojot elektroenerģijas cenas un siltumenerģijas pieprasījuma prognozi un lietojot piedāvāto komplekso algoritmu optimizācijas problēmas risināšanai, iespējams atrast biogāzes resursa optimālo sadalījumu.



3.1. att. Elektrostacijas ģenerācijas piemērs.

Iespējamo risinājumu var izmantot arī esošās atbalsta shēmas pārskatīšanai, paredzot ģenerācijas iekārtu vadības un elektrostaciju un publiskā tirgotāja sadarbības pielāgošanās iespējas tirgus apstākļos [24].

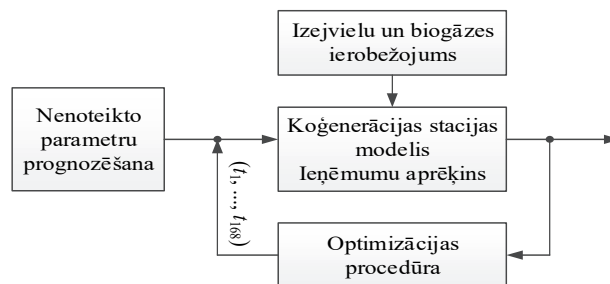
Ražotājam un tirgotājam sadarbojoties, var veidoties papildu ieņēmumi no elektrostaciju darbības grafika pielāgošanas elektroenerģijas tirgus cenas grafikam. Tā rezultātā rodas šo ieņēmumu sadales uzdevums starp sadarbības (koalīcijas) dalībniekiem. Darbā tiek piedāvāts šīs problēmas risinājums, izmantojot kooperatīvo spēļu teoriju (Šepļa vērtību). Publiskā tirgotāja papildu ieguvums var tikt izmantots maksājuma sloga mazināšanai enerģijas patērētājiem. Līdz ar to varam secināt, ka publiskā tirgotāja un elektrostācijas, kurai ir ierobežoti primārie resursi, operatora sadarbība ļauj sniegt papildu ienākumu abām pusēm un mazināt atjaunojamo resursu izmantošanas atbalsta radīto slogu elektroenerģijas lietotājiem. Šepļa vērtības izmantošana papildu ienākuma sadalījumam iepriekš aplūkota, izmantojot mazo hidroelektrostaciju piemēru [7].

Optimizācijas uzdevuma nostādne

Mūsu gadījumā sākumā izmantojam gadījuma procesu prognozēšanu 168 stundu laika posmam, kas atspoguļo laika vidējā pieeju, pēc tam nosakām maksimālos ienākumus, izmantojot elektroenerģijas cenu un siltumenerģijas pieprasījuma prognozi. Optimizācijas procedūras struktūra atspoguļota 3.2. attēlā.

Lai prognozētu siltumenerģijas pieprasījumu un elektroenerģijas tirgus cenas, tiek izmantoti MNT [24] (izmantotas 10 elektroenerģijas cenu prognozes un 10 siltumslodžu grafiki).

Pēc tirgus dalībnieku iesniegto piedāvājuma un pieprasījuma pieteikumu saskaņošanas stundas elektroenerģijas cenas c_i un siltumenerģijas pieprasījums ir zināms. Tātad mēs varam veikt optimizācijas procesu, izmantojot lineāro programmēšanu, ar nosacījumu, ka izmaksu raksturlielumi aplūkojamajā laika periodā ir nemainīgi.



3.2. att. Optimizācijas procedūra.

Izmantojot iegūtās prognozes, varam formulēt biogāzes koģenerācijas elektrostācijas darbības plānošanas optimizācijas uzdevumu ierobežotu biogāzes resursu apstākļos:

$$R_t(W_{el}^*; W_{th}^*) = \left\{ \begin{array}{l} \arg \max \sum_{i=1}^{T_p} (W_{el\,i}(l_i) \cdot c_i + W_{th\,i}(l_i) \cdot c_{th} - C(l_i)) \\ i \in \tau; \tau = \{1, \dots, T_p\} \\ W_{el\,min} \leq W_{el\,i} \leq W_{el\,max} \\ W_{th\,min} \leq W_{th\,i} \leq W_{th\,max} \\ \sum_{i \in T} l_i \leq L_T \end{array} \right\}, \quad (3.1)$$

kur c_i – ikstundas elektroenerģijas cena, EUR/MWh;

c_{th} – fiksēta siltumenerģijas cena, EUR/MWh;

$W_{el\ i}, W_{th\ i}$ – saražotās elektroenerģijas un siltumenerģijas apjoms ($\{W_{el\ i}; W_{th\ i}\} \in R_i; i \in \tau$), MWh;

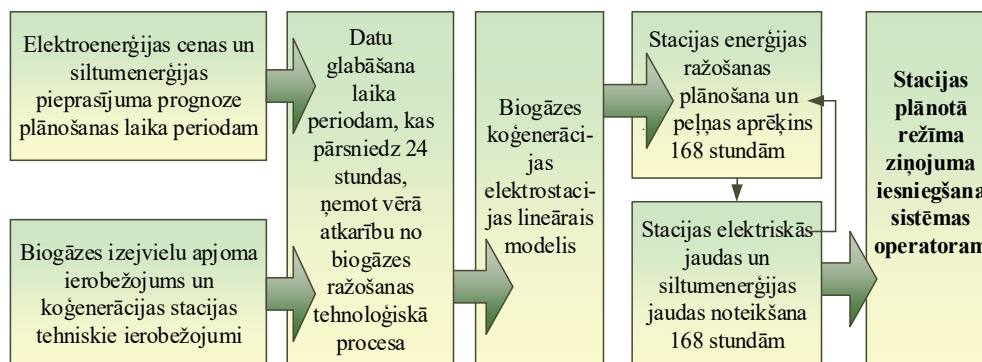
$W_{el\ i}^*, W_{th\ i}^*$ – saražotās elektroenerģijas un siltumenerģijas apjoms, MWh;

$W_{el\ min}, W_{el\ max}, W_{th\ min}, W_{th\ max}$ – elektroenerģijas un siltumenerģijas minimālā un maksimālā iespējamā vērtība, ņemot vērā tehniskos ierobežojumus, MWh;

$c(l_i)$ – izejvielu izmaksas, EUR/t.

No matemātiskā viedokļa ikstundas saražotā elektroenerģija ir svarīgākais mainīgais lēmuma pieņemšanai investīciju aprēķina problēmas risināšanā un darbības plānošanā.

Biogāzes elektrostacijas optimizācijas algoritma struktūra dota 3.3. attēlā. Izmantojot elektroenerģijas cenas un siltumenerģijas pieprasījuma prognozi un lietojot šo komplekso algoritmu optimizācijas problēmas risināšanai, varam atrast biogāzes resursa optimālo sadalījumu.



3.3. att. Biogāzes koģenerācijas elektrostacijas darbības optimizācijas procesa algoritms.

Koalīcija neprasa atcelt spēkā esošos tiesību aktus atjaunojamo enerģijas avotu atbalstam, tāpēc uzdevuma nostādne tiek veikta divējādi: optimizācija procesā ievērojot gan fiksētās iepirkuma cenas, gan elektroenerģijas tirgus cenas.

Pieejas ideja ir šāda.

1. Ja elektrostacija strādā bez tirgotāja un izmanto piešķirto atbalstu, tad var optimizēt tās darbību, cenšoties saražot maksimālo enerģijas apjomu, neņemot vērā maksimālā pieprasījuma stundas (stundas, kad elektroenerģijas cena tirgū ir visaugstākā). Pieņemsim, ka ieņēmumi šajā gadījumā ir I_1 . Daļa no šiem ieņēmumiem I_{t1} tiek saņemta no publiskā tirgotāja, kas pārdod elektrostacijas saražoto elektroenerģiju tirgū, bet atlikusī daļa I_{s1} tiek saņemta no sabiedrības atbilstoši atbalsta shēmai:

$$I_1 = I_{t1} + I_{s1}. \quad (3.2)$$

2. Ja elektrostacija strādā pēc sabiedrībai izdevīgiem tirgus nosacījumiem kā patstāvīgs tirgus dalībnieks, tad iespējams saņemt kopīgus ieņēmumus I_2 ar tirgus daļu I_{t2} un atbalstu I_{s2} . Atbalsts I_{s2} būs mazāks par atbalstu I_{s1} , jo optimizācija tiek veikta, maksimizējot I_{t2} , kas ir lielāks par I_{t1} , taču samazina saražotās enerģijas daudzumu. Rezultātā šāda darbība var izrādīties mazāk izdevīga par iepriekšējo (no stacijas īpašnieka viedokļa), jo I_1 ir lielāks par I_2 un šāds darbības veids netiks izvēlēts.

3. Taču, ja stacija strādā koalīcijā ar tirgotāju, tad, elektrostacijai strādājot pēc 2. punktā minētā algoritma, viņu kopējā papildu peļņa I_p , kura ir jāsadala, ir:

$$I_p = (I_{t2} - I_{t1}) - (I_1 - I_2), \quad (3.3)$$

jo tirgotājs gūst lielākus ieņēmumus no elektroenerģijas pārdošanas tirgū par augstākām cenām, taču ražotāja kopējie ieņēmumi samazinās.

Biogāzes elektrostacijas optimizācijas piemērs

Apskatītais optimizācijas uzdevums balstās vienas Latvijas biogāzes elektrostacijas piemērā. Kā primārais enerģijas resurss tiek izmantoti vistu kūtsmēsli. Optimizācijas modeļa izveidei ir svarīgi zināt iespējamās biogāzes ražošanas apjomus. Siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanas vienādojums ir atkarīgs no izmantotā gāzes apjoma, stacijas lietderības koeficienta un biogāzes siltumspējas.

Šajā darbā ņemam vērā, ka saražotās siltumenerģijas un elektroenerģijas kopējā summa ir atkarīga no fermentatoros iepildītā izejmateriālu apjoma plānošanas laika periodam. Zinot vistu kūtsmēslu daudzumu, biogāzes potenciālu un siltumspēju, saskaņā ar (3.1) varam aprēķināt optimālo saražojamo siltumenerģijas un elektroenerģijas daudzumu, ņemot vērā elektroenerģijas tirgus cenu un fiksētu siltumenerģijas cenu. Uzdevuma risināšanai izmantosim lineārās programmēšanas simplekismetodi.

Plānojot režīmu, ir jāņem vērā, ka koģenerācijas stacijai var būt noteikts minimālais saražojamais siltumenerģijas daudzums, kas nepieciešams ražošanas procesa nodrošināšanai. Lai uzskatāmi atspoguļotu izejvielu apjoma ierobežojuma ietekmi uz rezultātu, tika izskatīti divi gadījumi, kad pieejams 1050 t un 882 t vistu kūtsmēslu.

Iegūtie rezultāti atspoguļoti 3.1. tabulā. Laika periodos, kad elektroenerģijas cena ir visaugstākā, koģenerācijas stacija saražo maksimālo elektroenerģijas un siltumenerģijas apjomu. Savukārt laikā, kad elektroenerģijas cena ir zema, netiek izmantots liels biogāzes apjoms, un saražotais elektroenerģijas apjoms ir proporcionāls minimāli nepieciešamajam siltumenerģijas ražošanas apjomam. Optimizācijas rezultāti liecina, ka enerģijas ražošanas grafika pielāgošana elektroenerģijas tirgus cenai nodrošina augstāku peļņu nekā vienmērīga biogāzes sadalījuma gadījumā.

Turklāt – jo stingrāks ir izejvielu ierobežojums, jo lielāku papildu ieguvumu iespējams gūt, izvēloties enerģijas ražošanas grafika optimizēšanu pēc tirgus cenas. Līdz ar to secināms, ka biogāzi ieteicams izmantot atbilstoši piedāvātajam stohastiskās optimizācijas algoritmam.

3.1. tabula

Biogāzes koģenerācijas stacijas optimizācijas uzdevuma rezultāti [25]

Pieejamais vistu kūtsmēslu daudzums, t	Biogāzes izmantošanas sadalījuma pieeja	Peļņa, EUR	Peļņas starpība atkarībā no izmantotās pieejas, EUR (%)
1050	Vienmērīgs biogāzes sadalījums visam plānošanas periodam	17 905,20	998,54 (5,6 %)
	Sadalījums atbilstoši elektroenerģijas tirgus cenai	18 903,74	
882	Vienmērīgs biogāzes sadalījums visam plānošanas periodam	15 040,37	965,53 (6,4 %)
	Sadalījums atbilstoši elektroenerģijas tirgus cenai	16 005,89	

Iegūtie rezultāti pierāda, ka publiskā tirgotāja un elektrostacijas operatora sadarbība ļauj mazināt atbalsta radīto slogu elektroenerģijas lietotājiem un/vai sniegt papildu ienākumu abām pusēm. Atzīmēsim, ka atbalsta shēmas maiņa ietekmētu biogāzes stacijas iekārtu izvēli jau projektēšanas stadijā, veicinātu jaudas palielinājumu un tās izmantošanu enerģijas pieprasījuma pīķa stundās.

4. HIDROELEKTROSTACIJU DARBA REŽĪMA OPTIMIZĀCIJA, IEVĒROJOT TIRGUS CENAS UN IEROBEŽOJUMUS

4.1. Hidroelektrostaciju attīstības stadijas un problēmas

Hidroelektrostacijas (HES) attīstībā var iedalīt trīs galvenos etapus.

1. Projekta formulēšana, plānošana un izdevīguma analīze. Tā notiek pirms īstenošanas stadijas, un ir nepieciešams izstrādāt pārskatu (projekta skici), kurā ietilpst visa izpēte, datu ievākšana, tehniski ekonomiskais pamatojums, risku analīze un izmaksu un ieguvumu analīze. Šī stadija ir svarīga gan pašiem projekta iniciatoriem, gan arī potenciālajiem kreditoriem.
2. Projekta izpilde. Balstoties uz tehniski ekonomisko pamatojumu, tiek pieņemts lēmums virzīties tālāk uz projekta īstenošanu, izvēloties labāko variantu. Darbs jāsāk ar plānošanu un datu savākšanu. Hidroenerģētisko resursu izvērtēšana prasa vairāku veidu datus, to skaitā detalizētas ziņas par ūdenstilpnēm, upju ģeometriju, topogrāfiju un pieejamo ūdens daudzumu. Šie dati ļauj novērtēt hidroenerģijas ražošanai izšķiroši svarīgus mainīgos: neto spiedienaugstumu, aprēķina caurplūdi un turbīnu skaitu un jaudu [14].
3. Elektrostacijas ekspluatācija. Ņemot vērā, ka stacijas īpašnieki cenšas maksimizēt savu peļņu, ir nepieciešams izveidot režīmu vadības sistēmu.

Eksistē visu nosaukto etapu izpildes metodikas, ir pieejams programmnodrošinājums, kuru pamatā ir deterministiskā pieeja, kas ir nepiemērota jauniem enerģijas tirgus apstākļiem. Mazo upju enerģētisko resursu izmantošana tiek stimulēta, ieviešot atbalsta shēmas [24], [26], [29], [30]. Šo shēmu dizaina nepilnība veicina nepareizu (no sabiedrības viedokļa) hidroresursu izmantošanu, jo, atbalstot atjaunojamās energoresursus, tiek noteikta pastāvīga enerģijas cena un ražotājs cenšas maksimizēt ģenerētās enerģijas daudzumu, ignorējot tās paaugstināto pieprasījumu pīķa stundās.

Uz vienas upes var būt uzbūvētas vairākas stacijas, kas pieder dažādiem saimniekiem. Parādās papildu jautājumi – kā saskaņot šo staciju darbību, lai iegūtu maksimālo summāro peļņu, kā šo peļņu taisnīgi sadalīt. Pastāvošās metodikas ignorē šo problēmu. Šajā nodaļā tiek aprakstīta metodika, kas novērš atzīmēto trūkumu.

Var iedalīt divu veidu objektus: mazās un lielās hidroelektrostacijas. Pirmā veida objektu optimizācijas uzdevums ir vienkāršāks, jo tādām elektrostacijām vairumā gadījumu ir tikai viena vai divas turbīnas. Pat staciju kaskādes gadījumā strādājošo turbīnu kombināciju skaits ir neliels. Lielo staciju, piemēram, Daugavas HES, gadījumā turbīnu skaits var sasniegt desmitus, un, ņemot vērā plānošanas perioda garumu, tas rada nepieciešamību analizēt milzīgu skaitu strādājošo agregātu kombināciju.

Pasaules mērogā notiek intensīva mazo HES būvniecība, kas nosaka šo objektu tehniski ekonomiskā pamatojuma metožu uzlabošanas svarīgumu. Pretēji tam – lielo HES būvniecība ir gandrīz apstājusies, taču paliek aktuāla lielo HES režīmu plānošana un vadība.

Nodaļā galvenā uzmanība veltīta optimizācijas algoritmam un programmatūrai, kas ir trīs gadu ilga pētījuma „AS „Latvenergo” elektrostaciju režīmu plānošanas programmatūras

izstrāde” ar vairāk nekā 10 pētnieku piedalīšanos rezultāts. Promocijas darba autorei pieder ideja izmantot lineāro un nelineāro uzdevuma nostādni kopā. Šī ideja deva iespēju vairākas reizes samazināt aprēķinu laiku. Romāns Petričenko un Kārlis Baltputnis, izmantojot autores un R. Varfolomejevas izstrādāto algoritmu, sintezēja lietotājiem draudzīgu programmatūru. Izstrādātā algoritma atsevišķu bloku aprobācija tika veikta, balstoties uz vienkāršotiem piemēriem, kas publicēti [14], [27] un atkārtoti promocijas darba pielikumā.

Mazo HES projektēšanas un vadības problēmas ir plaši atspoguļotas autores publikācijās, kas ietvertas promocijas darba pielikumā.

4.2. Hidroelektrostaciju kaskādes darbības optimizācijas algoritms

Tiek aplūkota trīs hidroelektrostaciju kaskādes darbība. Elektrostaciju kaskādes sagaidāmo peļņu P_R var aprakstīt ar nelineāru funkciju, kas ir jāmaksimizē:

$$P_R(t) = \sum_{k=1}^K c_k \sum_{l=1}^L P_{lk} = F(c_k, W_{rk}, V_{lk}), \quad (4.1)$$

$$\forall k \in K, \forall l \in L$$

ar nosacījumu, ka:

$$\underline{P}_l \leq P_{lk} \leq \overline{P}_l, \quad (4.2)$$

$$\underline{h}_r \leq h_{rk}(P_{lk}) \leq \overline{h}_r, \quad \forall r \in R, \quad (4.3)$$

$$\underline{dh}_{rk} \leq dh_{rk}(P_{lk}) \leq \overline{dh}_{rk}, \quad (4.4)$$

$$h_{rk} = H_r, \quad (4.5)$$

kur $K, L, R; h, l, r$ – hidroagregātu un rezervuāru ikstundas datu reģistrācijas periodu kopas;

P_{lk} – hidroagregāta l saražotais elektroenerģijas daudzums stundā k (lēmuma mainīgais);

c_k – elektroenerģijas cena stundā k ;

$\underline{P}_l, \overline{P}_l$ – agregātu jaudas ierobežojumi (minimums un maksimums);

$h_{rk}(P_{lk})$ – ūdens līmenis rezervuārā r stundā k ;

$\underline{h}_r, \overline{h}_r$ – ūdens līmeņa ierobežojumi rezervuārā r (minimums un maksimums);

$dh_{rk}(P_{lk})$ – ūdens līmeņa pazemināšanās/paaugstināšanās rezervuārā r stundā k ;

$\underline{dh}_{rk}, \overline{dh}_{rk}$ – ūdens līmeņa paaugstināšanās/pazemināšanās ierobežojumi stundā k (minimums un maksimums);

W_{rk} – ūdens pieplūde rezervuārā stundā k ;

h_{rk} – ūdens līmenis plānošanas perioda beigās;

V_{lk} – ūdens caurplūde caur agregātu l stundā k .

Uzdevuma (4.1) atrisinājums ir saistīts ar vairākām īpatnībām.

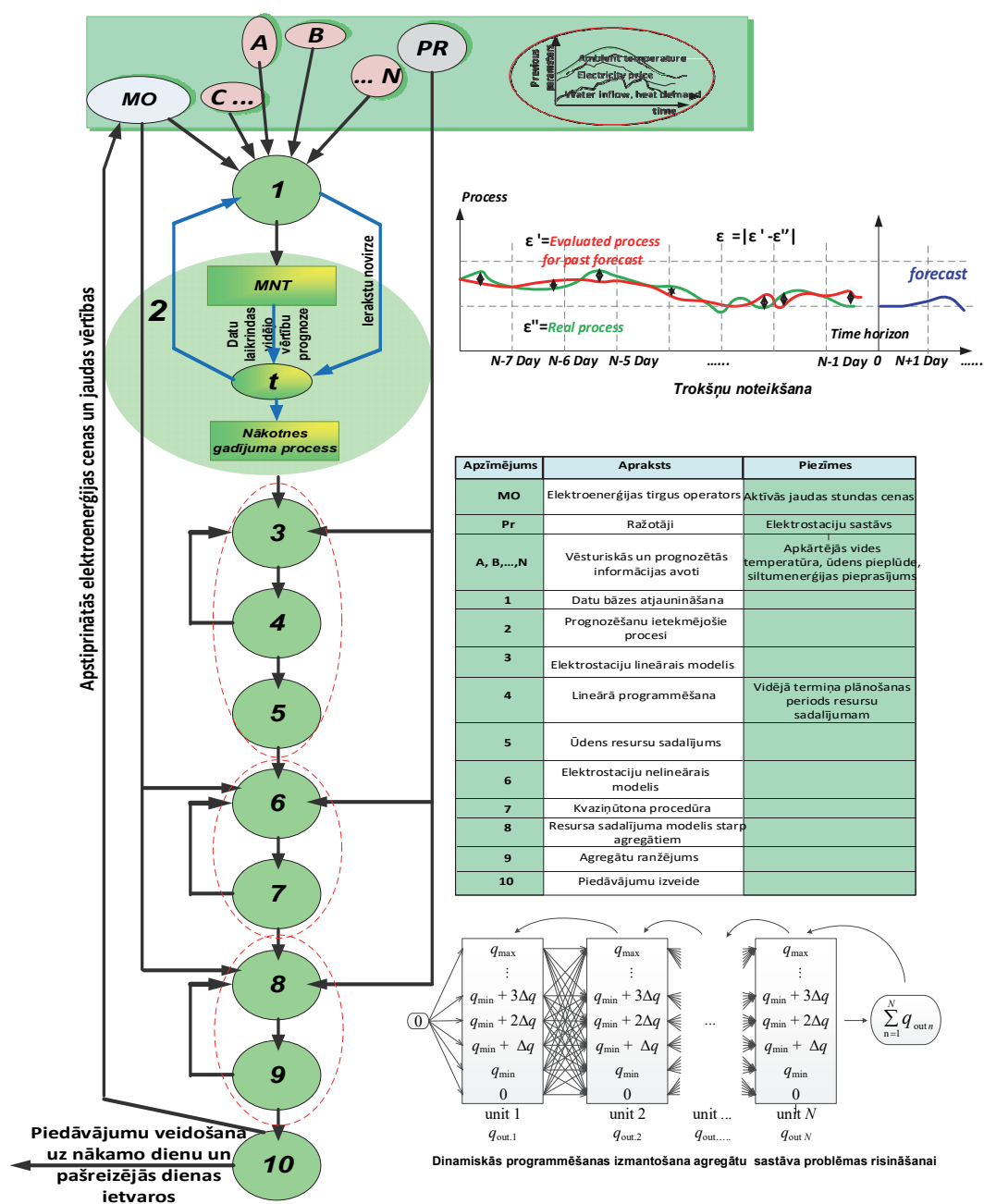
1. Funkcijas $h(P)$ un $dh(P)$ ir acīmredzami nelineāras, īpaši relatīvi nelielu rezervuāru gadījumā. Elektrostaciju saražotais enerģijas daudzums ir nelineāri atkarīgs no turbīnu caurplūdes, ūdens ieplūdes un rezervuāru tīrā hidrauliskā spiedienaugstuma. Sarežģītās ģeometrijas dēļ rezervuāru ūdens līmenis ir atkarīgs no pieplūdes nelinearitātes.

Papildus jāņem vērā, ka vienu un to pašu elektroenerģijas daudzumu elektrostacijā var saražot, izmantojot dažādas agregātu darbības kombinācijas.

2. Stāvokļa mainīgos c_k un W_{rk} iespējams prognozēt ar ierobežotu precizitāti, un tie ir uzskatāmi par stohastiskiem lielumiem. Šo vērtību izmaiņu laikā var aprakstīt ar stohastiskām funkcijām.

Lai pārvarētu grūtības, ko rada minētās īpatnības, nepieciešams mainīt optimizācijas uzdevuma matemātisko formulējumu. Tirgus cena un ūdens pieplūde ir galvenie nenoteiktie parametri, kas ietekmē aplūkoto hidroelektrostaciju darbību. Šos parametrus iespējams prognozēt tikai ar ievērojamu novirzes līmeni.

Uzdevuma atrisināšanai nepieciešamo darbību secība atspoguļota izstrādātā algoritma struktūrā (4.1. att.). Tiek izmantoti šādi paņēmieni: linearizācija, mainīgo skaita samazināšana, plānošanas perioda ilguma samazināšana un atgriešanās pie deterministiskā uzdevuma formulējuma.



4.1. att. HES darbības plānošanas optimizācijas algoritms.

Pirmajā HES kaskādes optimizācijas algoritma blokā tiek noteikti HES ierobežojošie ekoloģiskie un tehnoloģiskie parametri (darbības ierobežojumi) un tiek atjaunota datubāze.

Otrajā blokā tiek prognozēti nenoteiktie parametri – elektroenerģijas cena tirgū un ūdens pieplūde plānošanas periodam. Cenas un ūdens pieplūdes prognozē ņemti vērā vēsturiskie dati par iepriekšējām divām nedēļām, ieskaitot faktiskās vērtības novirzi no prognozes iepriekšējā dienā.

Pēc prognozēšanas tiek uzsākts optimizācijas process. Optimizācija tiek veikta divos etapos. Pirmajā optimizācijas procesa etapā (4.3. att., 3.–5. bloks) tiek veidots lineārais modelis, kura ietvaros tiek veikta HES kaskādes ražošanas un gūtās peļņas plānošana garākam plānošanas periodam (septiņas diennaktis). Lineārā modeļa izmantošana ļauj ietaupīt aprēķinam nepieciešamo laiku, un iegūtie rezultāti tiek precizēti optimizācijas procesa otrajā etapā (4.3. att., 6.–7. bloks), kad tiek izmantots nelineārs modelis un veikta HES kaskādes darbības (ražošanas grafika un prognozētās gūtās peļņas) optimizācijas procedūra īsākam periodam (24 stundām). Tā rezultātā tiek noteikta katras HES aktīvā jauda katrai diennakts stundai.

Pēdējā etapā (4.3. att., 8.–9. bloks), izmantojot dinamisko programmēšanu (DP), tiek izvēlēta katras stacijas katra agregāta jauda. 10. bloks paredz cenu pieteikuma izveidi nākamajai diennaktij.

Uz šī algoritma pamata izstrādāta specializēta programmatūra *OPTIBIDUS* HES kaskādes darbības plānošanai.

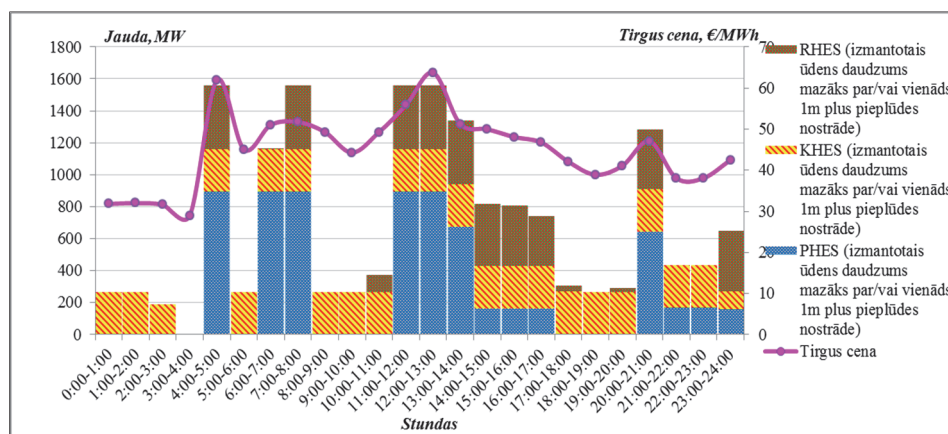
4.3. HES kaskādes darba režīma optimizācijas piemēri

Tālāk atspoguļoti veikto eksperimentālo aprēķinu interesantākie rezultāti.

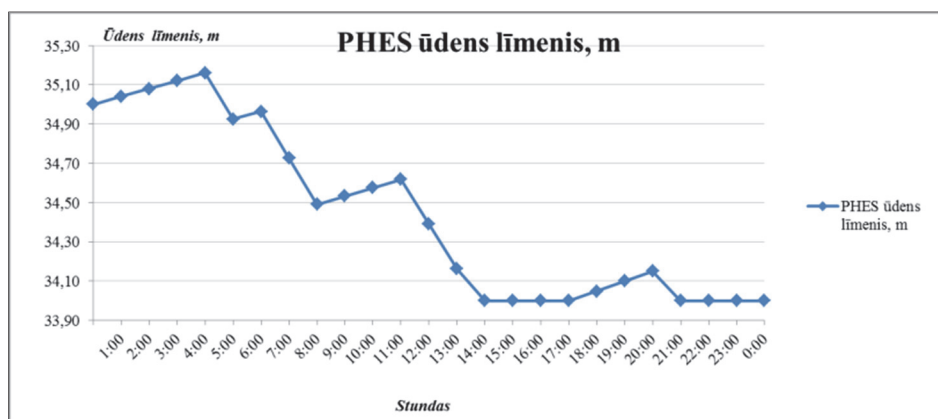
Ierobežojumu izpildāmības pārbaude

Viens no ierobežojumiem, kura izpilde tiek kontrolēta, ir pieļaujamā rezervuāru līmeņa aprakstošās nevienādības. Pieņemot, ka stacija īstermiņa optimizācijas periodā (24 stundas) var samazināt savu ūdens līmeni rezervuārā par vienu metru kopā ar ūdens pieplūdi, stacija var iegūt lielāku peļņas vērtību nekā, nostrādājot tikai ūdens pieplūdi. Piemēram, Pļaviņu HES optimizācijas perioda sākuma ūdens līmenis ir 35 m, bet optimizācijas perioda beigās to var samazināt līdz 34 m; Ķeguma HES – 23 m un 22 m; Rīgas HES – 11,8 m un 10,8 m.

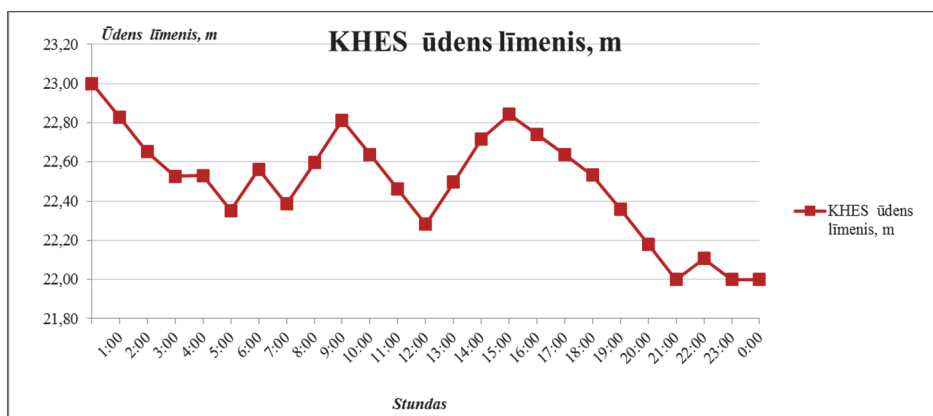
Iegūtie rezultāti – Daugavas HES izstrāde un ūdens līmeņa izmaiņas – atspoguļoti 4.2.–4.5. attēlā. Kā redzams no ūdens līmeņa grafika izmaiņām, noteiktie ierobežojumi izpildās.



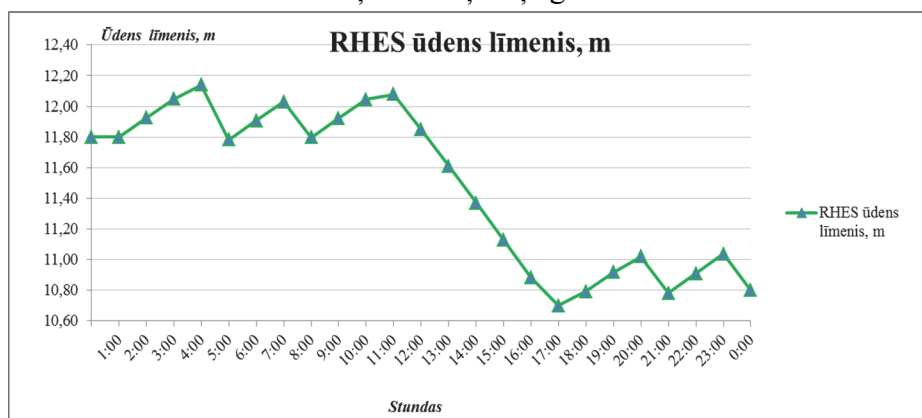
4.2. att. Daugavas HES aktīvās jaudas aprēķins nelineārā uzdevuma nostādņē.



4.3. att. Ūdens līmeņa izmaiņas Pļaviņu HES rezervuārā.



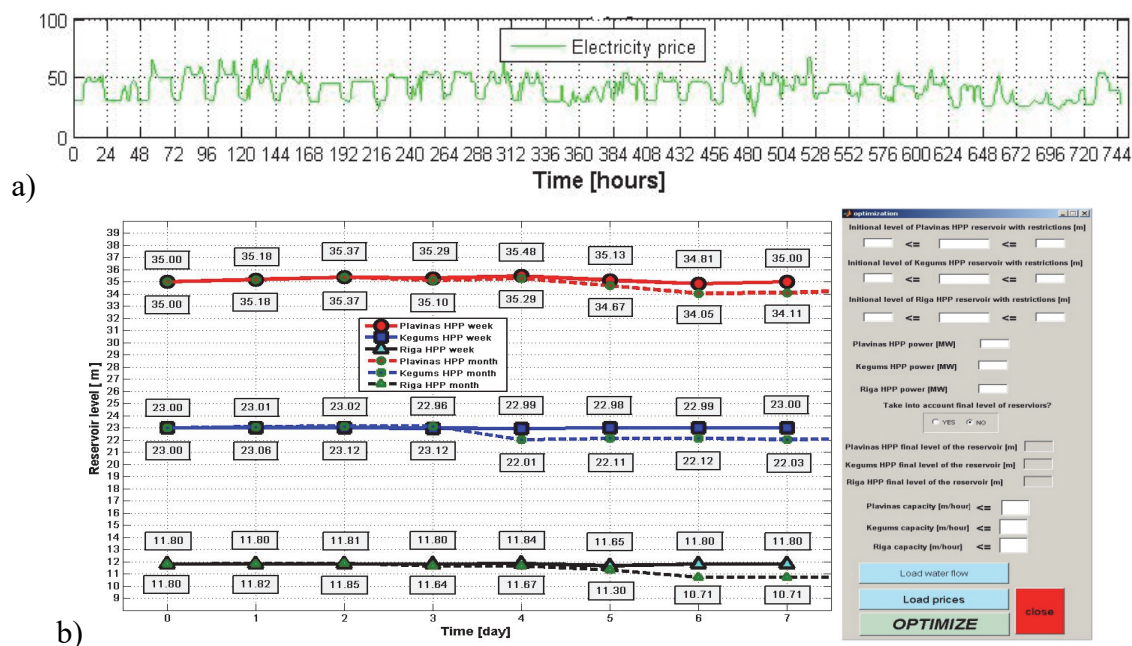
4.4. att. Ūdens līmeņa izmaiņas Ķeguma HES rezervuārā.



4.5. att. Ūdens līmeņa izmaiņas Rīgas HES rezervuārā.

Plānošanas perioda ierobežošanas līdz 168 stundām pamatotība

4.6. attēlā parādīti ūdenstilpņu ūdens resursa sadalījuma uzdevuma risinājuma rezultāti, ierobežojot plānošanas periodu līdz 2, 3, ... 7 dienām. Rezultātu analīze ļauj secināt, ka tālāka plānošanas perioda palielināšana var dot tikai nebūtisku efektu, jo mums tik un tā ir jāizmanto pirmās dienas beigu ūdens līmeņa vērtība.



4.6. att. Ūdens līmeņi Daugavas HES ūdenskrātuvēs, mainoties prognozēšanas perioda ilgumam: a) elektroenerģijas tirgus cenu prognoze mēnesim (744 stundām); b) optimizācijas procesā iegūtie ūdens līmeņi ūdenskrātuvēs, veicot optimizāciju nedēļu un mēnesi iepriekš.

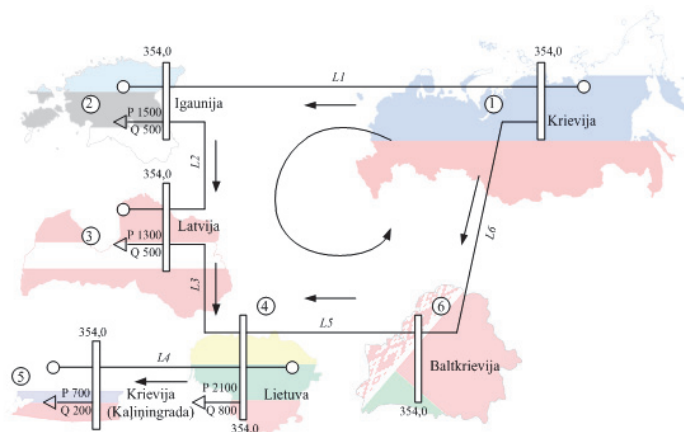
Iegūtie rezultāti ļauj secināt, ka piedāvātais modelis ir izmantojams par pamatu, veidojot Daugavas HES kaskādes optimizācijas programmnodrošinājumu. Optimizācijas procedūru verifikācijas nolūkos ir veikts liels skaits eksperimentu. Rezultāti ļauj secināt par eksperimentu ticamību un par ierobežojumu ievērošanu, kā arī par procedūras spēju atrast globālo peļņas maksimumu.

5. OPTIMIZĀCIJAS PROCEDŪRU PĀRBAUDES REZULTĀTI, ŅEMOT VĒRĀ TĪKLA IEROBEŽOJUMUS

Nodaļā aprakstīti algoritmi un procedūras, kas atšķirībā no iepriekš apskatītajām vēl nav realizētas rūpnieciski izmantojamas programmatūras veidā.

Tiek piedāvāti algoritmi sistēmas optimizācijas uzdevuma risināšanai un mezglu cenu noteikšanai, ņemot vērā elektriskā tīkla ietekmi, lokāli (zonā vai mezglā) izvietotu ražotāju enerģijas cenas, gan lineārā, gan nelineārā uzdevuma nostādņē. Nelineārajā nostādņē piedāvāts izmantot reducētā gradienta metodi, Lagranža nenoteikto reizinātāju metodi un lineāras aproksimācijas algoritmu.

Piedāvātā sistēmas optimizācijas uzdevuma risināšanas un mezglu cenu noteikšanas algoritma, kurā izmantota Lagranža nenoteikto reizinātāju metode, aprobācija veikta Baltijas energosistēmas piemēram (5.1. att.). Eksperimentālo aprēķinu rezultāti pierāda piedāvātā algoritma izmantošanas iespējamību. Apskatītajā piemērā tika izmantoti pieņēmumi par ģenerācijas cenu pieteikumiem, kas neatbilst realitātei, jo nav iespējams iegūt šos datus oficiālā veidā. Reālu datu izmantošana ļautu iegūt faktiskās elektroenerģijas cenas konkrētos mezglos (valstīs).



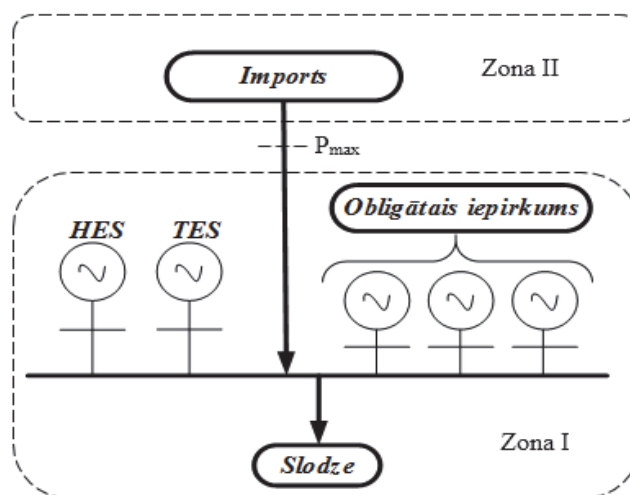
5.1. att. Vienkāršota Baltijas apvienotās energosistēmas principiālā shēma.

Iegūtie rezultāti liecina, ka nehomogenitātes ievērošana aprēķinos nepagarina aprēķinam patērēto laiku, arī rezultāts netiek būtiski ietekmēts. Ierobežojumu esamība vienlīdz nozīmīgi ietekmē energosistēmas režīmu gan homogēna, gan nehomogēna tīkla gadījumā. Taču, aizvietojot nehomogēnu tīklu ar homogēnu modeli, nepieciešama šī modeļa validācija, kas ir atsevišķi izskatāms jautājums un netiek risināts šajā promocijas darbā.

Starpzonu elektropārvades līniju ietekme uz elektroenerģijas cenu zonā

Darbā tiek vērtēta arī starpzonu elektropārvades līniju caurlaides spējas ietekme uz elektroenerģijas cenu atsevišķā zonā (vispārinātajā mezglā) tirgus apstākļos. Lai atspoguļotu Latvijas energosistēmas darbības īpatnības, tiek ievērotas importa iespējas no kaimiņzonas ar zemāku cenu pieteikumu, kā arī elektroenerģijas, kas ražota no atjaunojamajiem energoresursiem, obligātais iepirkums.

Tiek izmantota vienkāršota energosistēma, kas tiek aizvietota ar vispārināto mezglu (5.1. att.).



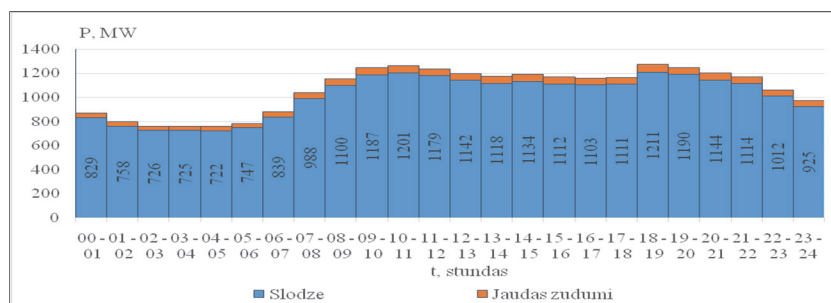
5.1. att. Energosistēma.

Staciju minimālās un maksimālās jaudas tehnoloģiskie ierobežojumi un cenu pieteikumi (pieņemti konstanti laikā) ir apkopoti 5.1. tabulā.

Staciju jaudas tehnoloģiskie ierobežojumi un cenu pieteikumi

	TES	HES
$P_{\min}, \text{MW}$	170	65
$P_{\max}, \text{MW}$	662	402
$c, \text{EUR/MW}$	46	35

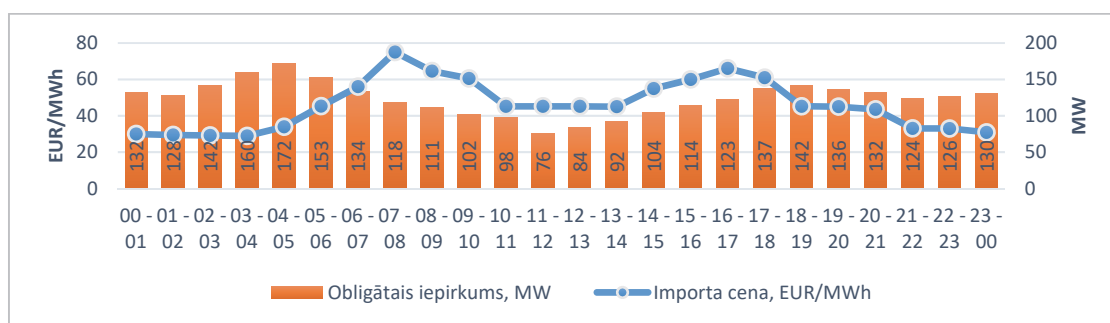
Summārās slodzes izmaiņu prognoze dota 5.2. attēlā, pieņemot, ka jaudas zudumi veido 5 % slodzes. Optimizāciju tiek veikta, sadalot diennakti 24 laika periodos ik pa stundai.



5.2. att. Slodzes prognoze zonā I.

Pieņemam, ka esošais ūdens apjoms var nodrošināt HES darbu ar maksimālo jaudu visā apskatāmajā laika periodā. Papildus ņemts vērā termoelektrostacijas (TES) jaudas regulēšanas ierobežojums laikā (MW/min), kas paredz, ka tās jauda nevar mainīties vairāk nekā par 180 MW/h.

Piedāvātā importa cena no zonas II un elektroenerģijas obligātajā iepirkumā iepirktā apjoma prognoze par fiksētu cenu $c_{OI} = 96 \text{ EUR/MW}$ dota 5.3. attēlā.



5.3. att. Importa cenu un obligātā iepirkuma apjoma dinamika.

Lai novērtētu starpzonu elektropārvades līniju caurlaides spējas ietekmi, tika apskatīti septiņi dažādi tās maksimāla ierobežojumu scenāriji – no 0 MW līdz 700 MW un neierobežots plūsmas apjoms.

Papildus jāņem vērā jaudas balance sistēmā:

$$s_{\text{TES}}^t P_{\text{TES}}^t + s_{\text{HES}}^t P_{\text{HES}}^t + P_{\text{OI}}^t + s_{\text{imp}}^t P_{\text{imp}}^t = P_{\text{SI}}^t + \Delta P_{\text{SI}}^t, \quad (5.1)$$

kur $s_{\text{TES}}^t P_{\text{TES}}^t$ – TES saražotā jauda stundā t , MW;

$s_{\text{HES}}^t P_{\text{HES}}^t$ – HES saražotā jauda stundā t , MW;

P_{OI}^t – obligātā iepirkuma ietvaros saražotā jauda stundā t , MW;

$s_{\text{imp}}^t P_{\text{imp}}^t$ – izmantotā importa jauda stundā t , MW;

P_{Sl}^t – summārā sistēmas slodze stundā t , MW;

ΔP_{Sl}^t – summārie jaudas zudumi sistēmā stundā t , MW.

Uzdevuma mērķa funkcija ir:

$$F = \min \left[\sum_{t=1}^n \left(s_{\text{TES}}^t P_{\text{TES}}^t c_{\text{TES}} + s_{\text{HES}}^t P_{\text{HES}}^t c_{\text{HES}} + P_{\text{OI}}^t c_{\text{OI}} + s_{\text{imp}}^t P_{\text{imp}}^t c_{\text{imp}} \right) \right], \quad (5.2)$$

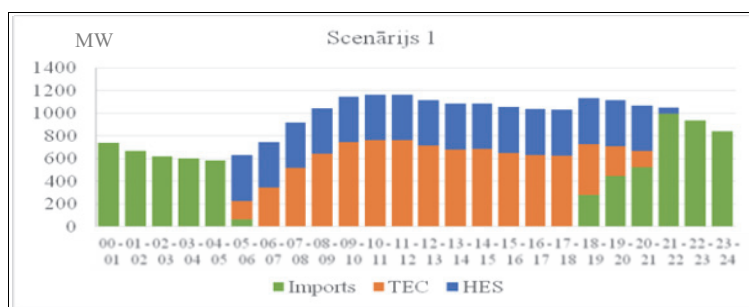
kur $s_{\text{TES}}^t P_{\text{TES}}^t$ – TES saražotā jauda stundā t , MW;

$s_{\text{HES}}^t P_{\text{HES}}^t$ – HES saražotā jauda stundā t , MW;

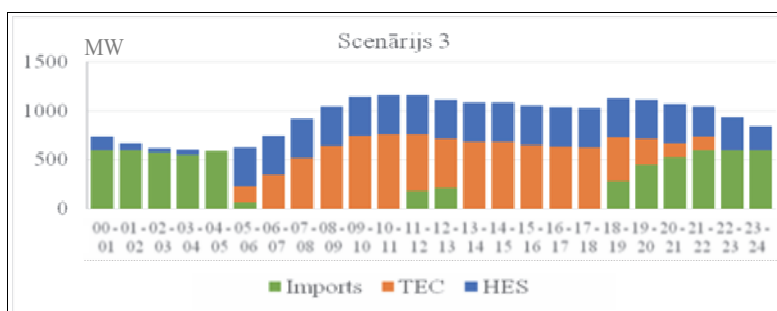
P_{OI}^t – obligātā iepirkuma ietvaros saražotā jauda stundā t , MW;

$s_{\text{imp}}^t P_{\text{imp}}^t$ – izmantotā importa jauda stundā t , MW.

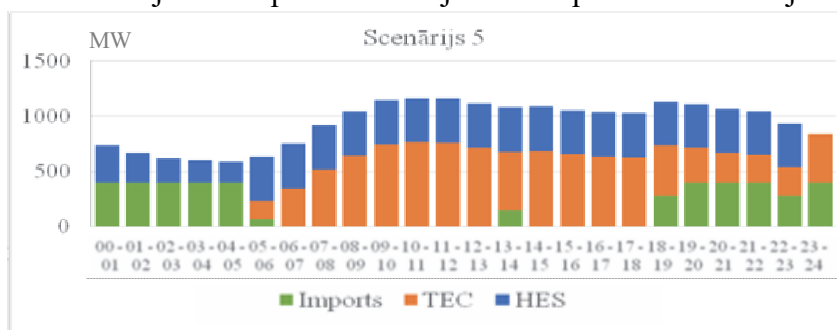
Optimizācijas uzdevuma risināšanai tiek izmantota vispārinātā reducētā gradienta metode. Optimizācija veikta, izmantojot datoru ar procesoru *Intel® Core™ i5-2430M* (2,4 GHz), operatīvo atmiņu 4 GB. Dažu scenāriju jaudas sadalījuma rezultāti atspoguļoti 5.4.–5.7. attēlā. Atkarībā no ierobežojumu scenārija aprēķina laiks dažādiem scenārijiem bija no 13,884 sekundēm līdz 109,091 sekundēm [28].



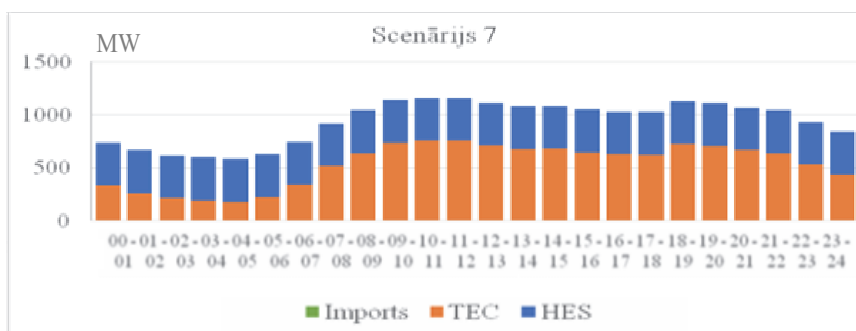
5.4. att. Slodzes sadalījums starp elektrostacijām un imports bez ierobežojuma.



5.5. att. Slodzes sadalījums starp elektrostacijām un imports ar ierobežojumu 600 MW.



5.6. att. Slodzes sadalījums starp elektrostacijām un imports ar ierobežojumu 400 MW.



5.7. att. Slodzes sadalījums starp elektrostacijām un imports ar ierobežojumu 0 MW.

Elektroenerģijas tirgus cenas rezultāti I zonā atspoguļoti 5.4. tabulā. Iegūtie rezultāti ļauj secināt, ka ierobežojumu neesamība ļauj optimāli sadalīt slodzi starp elektrostacijām un importu. Tāpēc 1. scenārijā tiek sasniegts labākais rezultāts, kas dod iespēju elektrostacijām nepiedalīties tirgū gadījumā, ja tirgus elektroenerģijas cena ir zemāka par pašizmaksu.

5.4. tabula

Tirgus cenas dinamika zonā I

Laiks	Scenārijs						
	1	2	3	4	5	6	7
0.00–1.00	30,01	35,00	35,00	35,00	35,00	46,00	46,00
1.00–2.00	29,46	29,46	35,00	35,00	35,00	35,00	46,00
2.00–3.00	29,21	29,21	35,00	35,00	35,00	35,00	46,00
3.00–4.00	28,95	28,95	35,00	35,00	35,00	35,00	46,00
4.00–5.00	33,94	33,94	33,94	35,00	35,00	46,00	46,00
5.00–6.00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
6.00–7.00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	56,03	46,00
7.00–8.00	75,05	75,05	75,05	75,05	75,05	75,05	46,00
8.00–9.00	64,59	64,59	64,59	64,59	64,59	64,59	46,00
9.00–10.00	60,57	60,57	46,00	60,57	60,57	60,57	46,00
10.00–11.00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
11.00–12.00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
12.00–13.00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
13.00–14.00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
14.00–15.00	55,01	55,01	55,01	55,01	55,01	55,01	46,00
15.00–16.00	60,01	60,01	60,01	60,01	60,01	60,01	46,00
16.00–17.00	66,08	66,08	66,08	66,08	66,08	66,08	46,00

Laiks	Scenārijs						
	1	2	3	4	5	6	7
17.00–18.00	61,03	61,03	61,03	61,03	61,03	61,03	46,00
18.00–19.00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
19.00–20.00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
20.00–21.00	46,00	43,57	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
21.00–22.00	35,00	35,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
22.00–23.00	33,02	35,00	35,00	46,00	46,00	46,00	46,00
23.00–24.00	30,91	35,00	35,00	35,00	46,00	46,00	46,00

Dažādu scenāriju mērķfunkcijas rezultāti atspoguļoti 5.5. tabulā. Palielinoties ierobežojumu stingrībai (samazinoties līniju caurlaides spējai), pieaug mērķa funkcijas vērtība un elektroenerģijas tirgus cena I zonā.

5.5. tabula

Energosistēmas režīma optimizācijas uzdevuma mērķa funkcijas vērtība

Scenārija Nr.	F , EUR
1	1 262 435,3
2	1 265 123,5
3	1 267 738,9
4	1 272 349,4
5	1 281 582,4
6	1 294 551,9
7	1 317 863,1

Dotā uzdevuma risinājums pierāda izstrādātā algoritma izmantošanas iespējamību, arī risinot energosistēmas optimizācijas uzdevuma dinamisko nostādni laikā.

Praksē reālās energosistēmās ar nehomogēniem tīkliem optimizācijas uzdevums kļūst ievērojami sarežģītāks, jo strāvas sadalījuma koeficientu matricas ir kompleksā formā.

SECINĀJUMI

1. Hidroenerģija un bioenerģija Latvijai ir īpaši svarīgs atjaunojamās enerģijas avots, kas ļauj samazināt globālās sasilšanas efektu un mazina valsts enerģētisko atkarību no ārvalstīm.
2. Elektroenerģijas tirgus cenu ietekmē ne tikai pārvades tīkla, bet arī ekoloģiskie un juridiskie ierobežojošie faktori.
3. Elektrotīkla tehniskos ierobežojumus, ko izraisa nepietiekama elektropārvades līniju caurlaides spēja, var samazināt, izbūvējot jaunas elektropārvades līnijas vai izmantojot jaunas pārvades tehnoloģijas, kas mazinās esošo līniju noslodzi, vai arī izbūvējot jaunas elektrostacijas tuvāk patērētāju slodzei (izklaidētā ģenerācija).
4. Spēcīgas enerģijas cenu svārstības tirgū rada nepieciešamību mainīt ģenerējošo kompāniju ekspluatācijas un vadības principus, kā arī rada elektrostaciju plānošanas optimizācijas uzdevuma stohastisko formulējumu.

5. Nenoteiktībai un gadījuma parādībām ir svarīga loma tehniski ekonomiskajā analīzē, kā arī optimizācijas uzdevumā. Līdz ar to modeļiem un uzdevumu risināšanas rīkiem ir jābūt stohastiskiem. Optimizācijas uzdevuma formulējums ar pieeju, kas balstās uz laika vidējās peļņas aprēķināšanu, vienkāršo stohastisko procesu modelēšanu.
6. Elektrostaciju režīma plānošanas optimizācija atbilstoši elektroenerģijas cenu izmaiņām un optimāla energoresursu sadale ļauj ražotājam gūt lielāku peļņu.
7. Darbā izklāstītā praktiskā stohastiskā pieeja optimālai uz peļņu balstītai ikdienas un ikstundas energoresursa plānošanai atvieglo stacijas operatora ikdienas darbu un paaugstina energouzņēmuma efektivitātes līmeni.
8. Uz spēļu teoriju balstītas metodes var palīdzēt pieņemt pareizo lēmumu par koalīciju dibināšanu starp tirgus spēlētājiem, publisko tirgotāju un vietējiem patērētājiem. Taisnīgai papildu ienākumu sadalīšanai var izmantot Šeplija vērtību.
9. Aktīvās jaudas mezglu cenas ir atkarīgas arī no reaktīvās jaudas plūsmām tīklā. Tāpēc labklājības funkcijas maksimizēšanai ir lietderīgi izskatīt ne tikai pieejamās tīkla caurlaides spējas palielināšanu, būvējot jaunas līnijas, bet arī reaktīvās jaudas kompensācijas iespējas tīklā.
10. Promocijas darbā piedāvāts optimizācijas uzdevuma risināšanas un elektroenerģijas mezglu cenu aprēķināšanas algoritms, ņemot vērā tīkla nehomogenitāti un reaktīvās jaudas plūsmas; algoritma aprobācija veikta Baltijas energosistēmas piemēram. Eksperimentālo aprēķinu rezultāti pierāda piedāvātā algoritma izmantošanas iespēju.
11. Lai vienkāršotu sarežģītu nelineārās programmēšanas uzdevumu risināšanu, to atvieglotu un paātrinātu skaitļošanas procesu, promocijas darbā piedāvāts izmantot aproksimējošās programmēšanas metodi, kas ļauj ņemt vērā ierobežojumus gan vienādību, gan nevienādību formā. Iegūtie rezultāti liecina par aproksimējošās programmēšanas metodes lietošanas pamatotību energosistēmas darbības režīma plānošanas uzdevumam.
12. Promocijas darba izstrādē iegūtos rezultātus var izmantot kā bāzi rūpnieciski izmantojamo programmatūru tālākai attīstīšanai un ražošanas uzņēmuma konkurētspējas paaugstināšanai.
13. Rezultātu apkopojums rāda, ka, izmantojot optimizācijā piedāvāto algoritmu un grozot esošo atbalsta shēmu, biogāzes elektrostacijām un HES Latvijā var gūt papildu ienākumus, bet sabiedrība – papildu labumu.

REKOMENDĀCIJAS TURPMĀKAJAM DARBAM

Promocijas darba rezultātus var izmantot:

- 1) attīstot Latvijas elektrostaciju režīmu vadības programmatūru kompleksu;
- 2) biogāzes elektrostaciju un mazo HES režīmu optimizācijas programmatūra var kļūt par plaši komerciāli realizējamu produktu; lai to panāktu, nepieciešami lietotājam draudzīgi un ērti interfeisi un lietotāja instrukcijas;
- 3) saskaņojot Latvijas elektrostaciju darbības režīmus ar kaimiņvalstīm;
- 4) dibinot mazo elektrostaciju koalīciju un to vadības kompāniju ar mērķi samazināt vadības izdevumus un pilnīgāk un efektīvāk izmantot summāro jaudu.

IZMANTOTO INFORMĀCIJAS AVOTU SARAKSTS

- [1] Strautmanis, J. *Ekoloģisko tiesību pamati*. Rīga: Apgāds Zvaigzne ABC, 1997, 222. lpp.
- [2] Gavrilovs, Aleksandrs. *Energosistēmas funkcionēšanas efektivitātes vērtējumu daudzkritēriju optimizācijas modelis (uz Latvijas energosistēmas piemēra)*. Promocijas darbs. Rīga: RTU, 2011. 150 lpp.
- [3] Umbraško, I., Varfolomejeva, R., Mahņitko, A. The Electricity Producers Bid Prices Formation Based on Profitability. No: *Power Engineering 2011: Volume of Abstracts of the 10th International Scientific Conference Energy-Ecology-Economy 2011, Slovākija, Tatranske Matliare, 7.–9. jūnijs, 2011*. Bratislava: Slovak University of Technology, 2011, 99.–100. lpp.
- [4] Seifert, W. W., Steeg, C. W. *Control Systems Engineering*. Ņujorka, Toronto, Londona: Jr. McGraw-Hill Book Company, INC, 1960.
- [5] LiBao, S., Ding, H. L., Zhao, X. Determination of Weight Coefficient for Power System Restoration. No: *Proc. IEEE Transaction on Power Systems*. 2012, vol. 27, Nr. 2, 1140.–1141. lpp.
- [6] Berjozkina, Svetlana. *Augstsprieguma elektrolīniju optimizācijas paņēmieni*. Promocijas darbs. Rīga: RTU, 2014. 170 lpp.
- [7] Varfolomejeva, R., *Elektrisko staciju režīmu plānošanas un optimizācijas aspekti tirgus ekonomikas apstākļos*. Promocijas darbs. Rīga: [RTU], 2014. 147 lpp.
- [8] Fleten, S.-E., Haugstvedt, D., Steinsbo, J. A., Belsnes, M. M., Fleischmann, F. Bidding Hydropower Generation: Integrating Short- and Longterm Scheduling. No: *Proc. of the 17th Power Systems Computation Conference, Stokholma, Zviedrija, 22.–26. augusts, 2011*. Ņujorka: Curran Associates, Inc., 2011, 352.–358. lpp.
- [9] Baslis, C., Bakirtzis, A. Mid-Term Stochastic Scheduling of a Pricemaker Hydro Producer With Pumped Storage. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2011, vol. 26, Nr. 4, pp. 1856–1865.
- [10] Flach, B., Barroso, L., Pereira, M. Long-Term Optimal Allocation of Hydro Generation for a Price-Maker Company in a Competitive Market: Latest Developments and a Stochastic Dual Dynamic Programming Approach. *IET Generation, Transmission Distribution*. 2010, vol. 4, no. 2, pp. 299–314.
- [11] Kristoffersen, T. K. *Stochastic Programming With Applications to Power Systems*. Promocijas darbs. Ārhusa, Dānija: Ārhusas Universitāte, 2007. 185 lpp.
- [12] Gray, R. M. *Probability, Random Processes, and Ergodic Properties*. Information Systems Laboratory, Electrical Engineering Department: Stanford University, 2010, 205 p.
- [13] Wallace, S. W., Fleten, S. E. Stochastic Programming Models in Energy. *Handbooks in operations research and management science*. 2003, vol. 10, pp. 637–677.
- [14] Sauhats, A., Varfolomejeva, R., Petričenko, R., Kucajevs, J. A Stochastic Approach to Hydroelectric Power Generation Planning in an Electricity Market. No: *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering: Conference Proceedings, Itālija, Roma, 10.–13. jūnijs, 2015*. Piscataway: IEEE, 2015, 883.–888. lpp.
- [15] Labadie, J. W. Optimal Operation of Multireservoir System: State of the Art Review. *Journal of Water Resources Planning and management*. 2004, vol. 130, no. 2, pp. 93.–111.
- [16] Vardanyan, Y., Amelin, M., Hesamzadeh, M. Short-Term Hydropower Planning With Uncertain Wind Power Production. No: *Proc. 2013 Power and Energy Society General Meeting*. IEEE, 2013, 1.–5. lpp.
- [17] Ramos, M., Exposito, A., Santos, J. Influence of ANN-Based Market Price Forecasting Uncertainty on Optimal Bidding. No: *Proc. of the 14th PSCC Conference. Sevilja, Spānija, 24.–28. jūnijs, 2002*. Session 7, paper 1, 1.–6. lpp.
- [18] Karagiannopoulos, S., Vrettos, E., Andersson, G., Zima, M. Scheduling and Real-Time Control of Flexible Loads and Storage in Electricity Markets Under Uncertainty. *Proc. EEM14*, 2014, pp. 1–5.
- [19] Leon, S., Lasdon, et. al. Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Optimization. *Case Western Reserve university Office of Naval Research*. 1975, No. 353.

- [20] Pareiro, M., Pinto, L. M. V. G. Multi-Stage Stochastic Optimization Applied to Energy-Planning. *Proc. 1991 Mathematical Programming*. 1991, vol. 52, pp. 359–375.
- [21] Gerhards, J., Mahņitko, A. *Elektroapgādes sistēmu optimizācija*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2007. 149 lpp.
- [22] Latvijas Centrālā statistikas pārvalde. Tiešsaiste. <http://www.csb.gov.lv>.
- [23] Subsidētās elektroenerģijas ražotāju reģistrs (14.06.2016.). Tiešsaiste. https://www.em.gov.lv/files/energetika/SEN_reg_14062016.xls
- [24] Varfolomejeva, R., Zima-Bočkarjova, M., Sauhats, A., Petričenko, R., Umbraško, I., Coban, H. Reconsideration of Supporting Scheme for Renewable Energy Producers. No: *4th International Symposium on Environmental Biotechnology and Engineering: Book of Abstracts, Meksika, 9.–12. septembris, 2014*. Meksika: 4ISEBE Cinvestav, 2014, 62.–63. lpp.
- [25] Varfolomejeva, R., Sauhats, A., Umbraško, I., Broka, Z. Biogas Power Plant Operation Considering Limited Biofuel Resources. No: *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering: Conference Proceedings, Itālija, Roma, 10.–13. jūnijs, 2015*. Roma: 2015, 570.–575. lpp.
- [26] Sauhats, A., Varfolomejeva, R., Umbraško, I. Additional Income Distribution Between Small Hydropower Plant and Public Trader Using Shapley Value. *Renewable Energies and Power Quality Journal*. 8.–10. aprīlis, 2014, No. 12, pp. 1–5.
- [27] Varfolomejeva, R., Petričenko, R., Sauhats, A., Kucajevs, J. An Optimization Algorithm Selection to Regulate the Power Plant Work. No: *Proc. 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*. Rīga: RTU, 2015, 63.–68. lpp.
- [28] Varfolomejeva, R., Umbraško, I., Sauhats, A., Broka, Z. Impact of the Limitations of Transmission Line Capacity on Pricing. No: *IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives: Proceedings, Latvija, Rīga, 11.–13. maijs, 2015*. Rīga: RTU, 2015, 1.–6. lpp.
- [29] Sauhats, A., Petričenko, R., Balputnis, K., Broka, Z., Varfolomejeva, R. A Multi-Objective Stochastic Approach to Hydroelectric Power Generation Scheduling. No: *Proceedings of the 19th Power Systems Computation Conference (PSCC 2016), Itālija, Dženova, 20–24 jūnijs, 2016*. Dženova, 2016, 1–7. lpp.
- [30] Sauhats, A., Coban, H., Balputnis, K., Broka, Z., Petričenko, R., Varfolomejeva, R. Optimal Investment and Operational Planning of a Storage Power Plant. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016, vol. 41, pp. 12443–12453.