

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Aleksandrs GAVRILOVS

**ENERGOSISTĒMAS FUNKCIONĒŠANAS EFEKTIVITĀTES
VĒRTĒJUMU DAUDZKRITĒRIJU OPTIMIZĀCIJAS MODELIS
(UZ LATVIJAS ENERGO SISTĒMAS PIEMĒRA)**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2011

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Aleksandrs GAVRILOVS
Enerģētikas doktora programmas doktorants

**ENERGOSISTĒMAS FUNKCIONĒŠANAS EFEKTIVITĀTES
VĒRTĒJUMU DAUDZKRITĒRIJU OPTIMIZĀCIJAS MODELIS
(UZ LATVIJAS ENERGOSISTĒMAS PIEMĒRA)**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. sc. ing., profesors
A. MAHŅITKO

Rīga 2011

UDK 621.311(474.3)(043.2)

Ga 932 e

Gavrilovs A. Energosistēmas funkcionēšanas efektivitātes vērtējumu daudzkritēriju optimizācijas modelis (uz Latvijas energosistēmas piemēra). Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU, 2011. – 33 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Promocijas padomes P-05 (Enerģētika) 2011.gada 14.jūnija lēmumu, protokols Nr.1.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu Nacionālās programmas „Atbalsts doktorantūras programmu īstenošanai un pēcdoktorantūras pētījumiem” projekta „Atbalsts RTU doktorantūras attīstībai” ietvaros.

ISBN 978-9934-10-208-0

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS RĪGAS TEHNISKĀS UNIVERSITĀTĒ
INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011.g. 21. novembrī Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, aktu zālē.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Valdes priekšsēdētājs, Dr.sc.ing. Vilnis Krēsliņš
Latvijas Elektroenerģētiku un Energobūvnieku asociācija

Asoc. profesors, Dr.sc.ing. Aleksandrs Dolgicers
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, Dr.sc.ing. Michal Kolcun
Košice Tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

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

Aleksandrs Gavrilovs(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus un rekomendācijas, literatūras sarakstu, 3 pielikumus, 50 zīmējumus un ilustrācijas, 26 tabulas, kopā 150 lappuses. Literatūras sarakstā ir 99 nosaukumi.

SATURS

PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE	5
DARBA MĒRĶI UN UZDEVUMI.....	6
PĒTĪŠANAS METODES UN LĪDZEKĻI	6
DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE UN GALVENIE REZULTĀTI	6
DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME	6
DARBA APROBĀCIJA	7
PUBLIKĀCIJAS	7
PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA	8
1. DAUDZMĒRĶU OPTIMIZĀCIJAS PROBLĒMAS AKTUALITĀTE.....	9
2. ENERGOSISTĒMAS OPTIMĀLAS ATTĪSTĪBAS STRATĒGIJU IZVĒLE.....	14
3. ENERGOSISTĒMAS REŽĪMA OPTIMIZĀCIJAS KLASISKAIS MODELIS	17
4. EES OPTIMIZĀCIJAS UZDEVUMS TIRGUS APSTĀKĻOS	22
5. PARETO PRINCIPA PIELIETOJUMS EES OPTIMĀLA ATTĪSTĪBAS VARIANTA IZVĒLEI.....	27
6. SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS TURPMĀKAM DARBAM.....	30
LITERATŪRA.....	31

PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE

Elektroenerģētika ir vadošā infrastruktūras nozare, kas praktiski bez alternatīvām nosaka ekonomikas attīstības iespēju robežas, tāpēc tai nepieciešams nodrošināt apsteidzošu ģenerējošo jaudu pieaugumu, kā arī realizēt drošu un kvalitatīvu elektroapgādi.

Parādoties pirmajām elektrostacijām un apvienotām elektroenerģētiskām sistēmām (EES), izveidojās arī to darba režīmu optimizācijas uzdevumi. Pie tiem pieskaitāmi saražotās elektroenerģijas minimālās izmaksas sasniegšanas uzdevumi, primāro energoresursu izdevumu samazināšana tās ražošanai, negatīvās ietekmes uz apkārtējo vidi mazināšana, elektroenerģijas transporta uzdevumu risināšana u.c.

Līdzās šim ekspluatācijas uzdevumam ne mazāka nozīme ir arī projektēšanas uzdevumam: enerģētisko sistēmu optimālās attīstības stratēģijas izstrādāšana un, tieši, elektrotīklu un to konfigurāciju, ieskaitot jaunu elektrostaciju un apakšstaciju tipu, jaudu un izvietojuma, sprieguma, vadu šķērsriezuma utt. izvēle. Tas ir ārkārtīgi sarežģīts tehniskais uzdevums, kura risināšanā nepieciešams ņemt vērā energoresursu esamību, to transportēšanas nosacījumus, elektroenerģijas un siltumenerģijas piegādes ērtību patērētājiem, apkārtējās vides aizsardzības pieprasījumu izpildīšanu, būvējamo elektrostaciju vietas izvēli un virkni citu prasību.

Ievērojams ieguldījums energosistēmu režīmu optimizācijas teorijas attīstībā ir tādiem zinātniekiem, kā: M.J. Steiberg, T.H. Smith, V.M. Gornštein, L.A. Krumm, A.V. Bogoslovski, B.P. Mirošničenko, A.V. Ponomarjev, V.A. Venikov, V.G. Žuravļev, D.A. Arzamascev, P.I. Bartolomej, L.S. Beljaev, N.I. Voropaj, A.Z. Gamm, A.L. Mizin, L.A. Melentjev, V.G. Derzskij, M.E. El-Hawary, G.S. Christensen, A.J. Wood, B.F. Wollenberg, Y.H. Song, J.A. Momoh un citiem.

Dabiska vēlēšanās paaugstināt EES un to elementu režīmu ekonomisko efektivitāti tirgus ekonomikas apstākļos, elektroenerģijas ražošanas, sadales un patēriņa procesu paplašināšanās un diversifikācija, diktē paaugstinātas prasības plānošanas algoritmu efektivitātei un pielāgojamībai, operatīvai optimizācijai un to režīmu korekcijai.

Lai paaugstinātu ekspluatācijas un projektēšanas uzdevumu risināšanas efektivitāti EES ar dažāda tipa elektrostacijām, apakšstacijām, elektropārvades līnijām, kuras pieder dažādām īpašuma formām, obligāta ir to daudzkritēriju modeļu uzskaitē.

Struktūras un organizācijas izmaiņas elektroenerģētikas nozarē, notiekošās pēdējo gadu laikā, pieprasa pārlūkot pieeju EES režīmu vadības optimizācijai. Daudzmērķu pieeja dod iespēju kompleksāk risināt energosistēmu funkcionēšanas režīmu optimizācijas uzdevumus, precīzāk ievērot to tehnoloģiskos un komerciālos ierobežojumus un, tāpat, iegūt risinājumus, maksimāli tuvus esošai realitātei.

Pāreja uz tirgus elektroenerģiju tarifu formēšanu noveda līdz tam, ka atsevišķiem EES subjektiem funkcionēšanas optimalitātes kritēriji ir dažādi, pie tam bieži vien pretrunīgi. Ja agrāk, elektroenerģētikas centralizētās vadības periodā, galvenais optimalitātes kritērijs bija kurināmā, izlietotā elektroenerģijas ražošanai, un ģenerētās enerģijas pašizmaksas minimizācija, tad tirgus apstākļos tradicionālais optimizācijas uzdevums tiek sadalīts virknē apakšuzdevumu. Noteicošākie tiem ir maksimuma kritēriji peļņai no enerģijas pārdošanas vai elektriskās un siltuma enerģijas energoresursu ražošanas, iegādes, pārvades, pārveidošanas un sadales izdevumu minimums. Par svarīgu uzskatāms arī cenas minimizācijas kritērijs.

Konkurētspējīgam elektroenerģijas vairumtirgum jāizveido caurskatāma un efektīva režīmu vadīšanas un cenu veidošanas sistēma par piegādāto (pirkto) elektroenerģijas apjomu. Tādejādi, ar enerģētikas nozares liberalizāciju, EES režīmu operatīvās vadības uzdevumu pētīšanas metodoloģijas pilnveidošana iegūst īpašu aktualitāti.

Visi augstākminētie aspekti un to apskatīšanas aktualitāte noteica dotā darba tēmas, mērķu un satura izvēli.

DARBA MĒRĶI UN UZDEVUMI

Darba mērķis ir EES darba režīmu un attīstības variantu izpēte, ieskaitot analīzes, daudzmērķu optimizācijas, modelēšanas un lēmumu pieņemšanas pilnveidošanas jautājumus tās funkcionēšanas efektivitātes paaugstināšanai. Lai to veiktu, tika apskatīti sekojoši pamatuzdevumi:

1. Izpētīt EES režīmu daudzmērķu optimizācijas pamatmetodes.
2. Izpētīt optimālās EES slodzes sadalījuma problēmas starp elektrostacijām daudzkritēriju mērķa uzdevuma apstākļos.
3. Apskatīt EES funkcionēšanas principus un īpatnības konkurenta elektroenerģijas tirgus apstākļos.
4. Piedāvāt EES attīstības projektuzdevumu risināšanas metodiku un algoritmus, pamatojoties uz konkrētu Latvijas energosistēmas attīstības projektu risināšanas piemēriem no daudzkritēriju analīzes pozīcijas.

PĒTĪŠANAS METODES UN LĪDZEKĻI

Darbā izmantotas sekojošas pētīšanas metodes un līdzekļi:

- Ņūtona metode, lai risinātu nelineāro algebrisko vienādojumu sistēmas, kas apraksta EES stacionāro režīmu;
- Lagranža metode nelineāro uzdevumu optimizācijai;
- lēmumu pieņemšanas kritēriji nenoteiktības apstākļos;
- Pareto optimalitātes princips;
- interaktīva vide MATLAB, kas paredzēta intensīvai skaitļošanai, datu analīzei un to vizuālai attēlošanai;
- sistēma GAMS – augsta līmeņa programmēšanas valoda, lai veidotu matemātiskus modeļus un risinātu optimizācijas problēmas;
- sistēma MathCAD inženieru problēmu risināšanai un rezultātu vizualizēšanai un analīzei;
- programmu komplekss MUSTANG energosistēmas režīmu modelēšanai;
- Microsoft Excel programmu nodrošinājums.

DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE UN GALVENIE REZULTĀTI

1. Izpētītas EES režīmu optimizācijas uzdevumu daudzkritēriju modelēšanas metodes, kas dod iespēju paaugstināt tās operatīvās vadības efektivitāti.
2. Izstrādāts EES slodzes optimālā sadalījuma matemātiskais modelis, ņemot vērā kurināmā patēriņa, jaudas zudumu tīklos un izmešu atmosfērā minimuma kritērijus. Izpētīts kurināmā pārtēriņa raksturs elektrostacijās atkarībā no vietējo apstākļu koeficienta un kurināmā īpašību variēšanas, samazinot izmešus atmosfērā izvēlētajā elektrostacijā.
3. Piedāvāta izpētes metodika un matemātiskais modelis optimālajam jaudas sadalījumam starp EES mezgliem tirgus attiecību apstākļos starp elektroenerģētikas subjektiem uz Latvijas, Igaunijas, Lietuvas, Krievijas un Baltkrievijas apvienotās EES testu shēmas piemēra.
4. Veikta galveno Latvijas un Baltijas energosistēmas attīstības projektu analīze.
5. Izstrādāts EES attīstības optimālās stratēģijas izvēles algoritms pie vairākām alternatīvām, izmantojot spēļu teorijas elementus.
6. Piedāvāta grafiska pieeja projektēšanas uzdevuma risināšanai, aplūkojot vairākus kritērijus un alternatīvas, kas atvieglo izvēles veikšanu personai, kura pieņem lēmumu. Metodika aprobēta uz Latvijas EES attīstības stratēģiju izvēles piemēra.

DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

Algoritmus un metodikas, piedāvātās darbā, var izmantot:

- dispečeri EES režīmu operatīvai dispečeru vadībai;
- elektroenerģijas ražotāji ikdienas elektrostaciju režīmu plānošanai;
- enerģētikas speciālisti, kuri nodarbojas ar elektroapgādes shēmu attīstības, to projektēšanas un EES ģenerējošo jaudu attīstības variantu analīzes jautājumiem;
- elektroenerģijas tirgotāji optimālas tirdzniecības stratēģijas izstrādāšanai.

DARBA APROBĀCIJA

Par darba rezultātiem ir tika ziņots, un tie bija apspriesti 11 starptautiskajās konferencēs:

1. The 3rd International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2008, Lithuania, Kaunas, 8 – 9 May, 2008.
2. The 6th International Scientific Symposium Electric Power Engineering, Russia, St. Petersburg, 15 – 19 September, 2008.
3. The 49th International Scientific Conference. Power and Electrical Engineering and Environmental Sciences, Latvia, Riga, 14 – 15 October, 2008.
4. III Международная научно-практическая конференция "Энергосистема: управление, конкуренция, образование", Россия, Екатеринбург, 13 – 16 октября, 2008.
5. The 4th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2009, Lithuania, Kaunas, 7 – 8 May, 2009.
6. Первый научно-практический семинар "Экономическая безопасность государства и научно-технические аспекты её обеспечения" ("Економічна безпека держави і науково-технологічні аспекти її забезпечення"), Украина, Киев, 21 – 22 октября 2009 года.
7. The 5th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2010, Lithuania, Kaunas, 6 – 7 May, 2010.
8. International Scientific Event "Energetika 2010. Power engineering 2010". The 9th International Scientific Conference "Energy – Ecology – Economy 2010", Slovakia, Tatranske Matliare, 18 – 20 May, 2010.
9. XI International Scientific-Technical Conference "Problems of Present-day Electrotechnics-2010", Ukraine, Kiev, 1 – 3 June, 2010.
10. The 51st International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, 14 October, 2010.
11. II научно-практический семинар с международным участием "Экономическая безопасность государства и научно-технические аспекты её обеспечения", Украина, Киев, 21 – 22 октября 2010.

PUBLIKĀCIJAS

Darba rezultāti ir tikuši publicēti 16 starptautiskajos izdevumos:

1. Mahnitko A., Gavrilov A. Estimating Influence on the Environment during Power System Mode Optimization // Electrical and Control Technologies. Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2008. – Kaunas: KTU, 2008. – pp. 373 - 376
2. Mahnitko A., Gavrilovs A. Energosistēmas režīma optimizācija, ievērojot ietekmi uz gaisa baseinu // RTU zinātniskie raksti. 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika. – 2008. – 22. sēj. – 7. - 15. lpp.
3. Mahnitko A., Gavrilov A. Thermal Power Plant Emissions Minimization taking into account Losses in Network // Journal of Computer Science and Control Systems. – Oradea: University of Oradea, 2008. – Vol.1, No.1. – pp. 161 - 166
4. Махнитко А., Гаврилов А. Анализ воздействия режимов работы тепловых электростанций на окружающую среду // A Publication of Technical University of

- Košice. Elektroenergetika. Scientific and Professional Journal on Electrical Power Engineering. – Košice: Technical University of Košice, 2008. – Vol.1, No.2 – pp. 27 - 32
5. Mahnitko A., Gavrilov A. Evaluation of Thermal Power Plant Mode Influence on the Environment // Scientific proceedings of Riga Technical University. Power and Electrical Engineering. – Riga: RTU, 2008. – Vol.23. – pp. 18 - 30
 6. Махнитко А., Герхард Я., Гаврилов А. Проблемы развития электроэнергетики Латвии // Энергосистема: управление, конкуренция, образование. Сборник докладов III международной научно-практической конференции 13 – 16 октября 2008. Том 2. – Екатеринбург, 2008. – С. 274 - 277
 7. Mahnitko A., Gavrilov A. Analysis of Latvian power system development in the Kurzeme region using multicriterion optimization // Electrical and Control Technologies. Proceedings of the 4th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2009. – Kaunas: Technologija, 2009. – pp. 170 - 175
 8. Махнитко А., Герхард Я., Гаврилов А. Проблемы развития электроэнергетики Латвии // Энергохозяйство за рубежом. – 2009. – Nr.2. – С. 24 - 32
 9. Mahnitko A., Gavrilovs A. Par barojošo tīklu un ģenerējošo jaudu attīstību Kurzemes reģionā Latvijā // RTU zinātniskie raksti. 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika. – Rīga: RTU, 2009. – 24. sēj. – 7. - 15. lpp.
 10. Махнитко А.Е., Герхард Я.Х., Гаврилов А.Л., Ломан Т.В. Направления и перспективы развития стран Балтии в области энергетики // Экономическая безопасность государства и научно-технические аспекты её обеспечения. Труды первого научно-практического семинара с международным участием 21-22 октября 2009 г. – Киев, 2009. – С. 356 - 364
 11. Mahnitko A., Gavrilov A. The use of the Pareto principle in analysis of Baltic power system development strategy // Electrical and Control Technologies. Proceedings of the 5th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2010. – Kaunas: Technologija, 2010. – pp. 156 - 161
 12. Mahnitko A., Gavrilov A. About plans of atomic power development in countries of the Baltic region // International Scientific Event "Power engineering 2010". Volume of Abstracts of the 9th International Scientific Conference "Energy - Ecology - Economy 2010". – Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2010. – pp. 24 - 25
 13. Гаврилов А.Л. Анализ оптимальности функционирования энергосистемы с использованием принципа Парето // Proceedings CD of the XI International Scientific-Technical Conference "Problems of Present-day Electrotechnics-2010", Ukraine, Kiev, 1 - 3 June, 2010.
 14. Gavrilovs A., Mahnitko A. Pareto principa realizācija Latvijas elektrotīkla attīstības variantu salīdzinājumam // RTU zinātniskie raksti. 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika. – Rīga: RTU, 2010. – 26. sēj. – 7. - 13. lpp.
 15. Mahnitko A., Gavrilov A. Use of Pareto Principle in Power System Mode Analysis // Scientific Journal of Riga Technical University. Power and Electrical Engineering. – Riga: RTU, 2010. – Vol.4, No.27. – pp. 53-56
 16. Махнитко А.Е., Гаврилов А.Л., Герхард Я.Х. Новые проекты и рыночная стратегия в энергетике – основа экономической безопасности Латвии // Экономическая безопасность государства и научно-технические аспекты её обеспечения: Труды II-го научно-практического семинара с международным участием, 21-22 октября 2010 г. – С. 226 - 235

PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā. Tas satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus un rekomendācijas, 3 pielikumus un literatūras sarakstu. Darbā ir 50 attēli, 26 tabulas, kopā 150 lappuses. Literatūras sarakstā norādīti 99 izmantotās literatūras avoti.

1. DAUDZMĒRĶU OPTIMIZĀCIJAS PROBLĒMAS AKTUALITĀTE

Šajā nodaļā tiek veiktas energosistēmas režīmu daudzmērķu optimizācijas ideju un principu analīze. Uz analīzes pamata formulētas mērķfunkcijas un uzdoti optimizācijas uzdevumu ierobežojumi.

Elektroenerģētikā, kā arī citās cilvēku darbības nozarēs, bieži nākas satikties ar tā saucamajiem optimizācijas uzdevumiem. Raksturīgie optimizācijas uzdevumi EES ir:

- *ekspluatācijas uzdevums* – EES stacionāro režīmu vadība;
- *projektēšanas uzdevums* – EES attīstības plānošana dažādiem laika periodiem.

Viens no galvenajiem EES optimālās vadības uzdevumiem normālajos ekspluatācijas apstākļos ir izdevīgākais patērētāju elektriskās slodzes sadalījums starp sistēmas ģeneratoriem. Pie tam ir nepieciešams nodrošināt sistēmas enerģētisku, darba un naudas resursu izmantošanas augstu efektivitāti, drošu un bez pārtraukumu energoapgādi, neenerģētisku prasību, kuras izvirza daudzas tautsaimniecības nozares, izpildi.

Norādītais uzdevums ir ļoti sarežģīts, ko nosaka lieli elektroenerģētikas mērogi un tās intensīvas attīstības nosacījumi, energosistēmu atsevišķu elementu tehnisku, ekonomisku un režīma raksturojumu (dažādu tipu elektrostacijas, elektropārvades līnijas) atšķirība. Šī uzdevuma efektīvā risinājuma praktiska iespēja parādījās tikai uz mūsdienīgu datoru bāzes. Tomēr arī šajos apstākļos uzdevuma veiksmīgs risinājums iespējams tikai pie tā dekompozīcijas, t.i. sadalot kopējo uzdevumu uz vienkāršāku savstarpēji saistītu uzdevumu rindu.

Optimizācijas uzdevumus visvienkāršāk izpildīt, pētot vienu kritēriju. Vairumā gadījumu pētnieka rīcībā nav pietiekami labu daudzmērķu optimizācijas metožu, un analogiskus uzdevumus viņš vienkāršo, pārvēršot tos par vienkārša uzdevumiem. Tas tiek darīts šādā veidā. Starp visiem mērķiem tiek izdalīts viens, kurš tiek uzskatīts par galveno, dominējošo. Visus pārējos mērķus nomaina ar kādām minimālām nepieciešamām prasībām (ierobežojumiem), kuru izpilde visos gadījumos tiek uzskatīta par obligātu.

Neatkarīgi no optimizācijas uzdevuma kritēriju skaita, informatīvā nodrošinājuma mainīgos var iedalīt trīs grupās:

- *determinēti mainīgie* – fiksēti parametri, kuru vērtības ir precīzi zināmas (vai arī tiek uzskatītas par precīzi zināmām) formulējot matemātisko modeli;
- *stohastiskie mainīgie* – gadījuma rakstura parametri, kuriem zināmi sadalījuma likumi un to raksturs;
- *nenoteiktie mainīgie*, kam zināmi tikai iespējamo vērtību apgabali. Nenoteiktos parametrus var uzdot tikai ar intervāliem vai diapazoniem. Pēdēja laikā nenoteiktas sākuma informācijas gadījumā izdala tā saucamo neprecīzo informāciju.

Skarā ar to, ka var būt dažādu veidu informācija un daži, pie tam pretrunīgi, mērķi, dabiski, ka rodas dažādas *risinājuma alternatīvas* [14]. Terminam „alternatīva” ir virkne sinonīmu; atkarībā no uzdevuma konkrētām īpatnībām, tiek lietoti sekojoši termini: variants, plāns, sistēmas kustības trajektorija u.c. Viens un tas pats variants (alternatīva) dažādos apstākļos tiek vērtēts dažādi. Saka, ka vienai un tai pašai alternatīvai ir dažāds iznākums atkarībā no sistēmas pastāvēšanas ārējiem apstākļiem. Dabiski, ka starp iespējamām alternatīvām ir vēlams izvēlēties vislabāko noteiktā izpratnē, vai, kā ir pieņemts teikt, atrast optimālo uzdevuma risinājumu. Šīs alternatīvas dažādām situācijām tiek sauktas dažādi – *racionālas, efektīvas, iespējami - optimālas, optimālas pēc Pareto*. To kopēja pazīme ir tā, ka tās ir labākas par citām kādā nozīmē, bet izdalīt no tām vēl labākas tajā pašā nozīmē ar regulārām matemātiskām metodēm jau neizdodas.

Daudzmērķu optimizācijas pamati

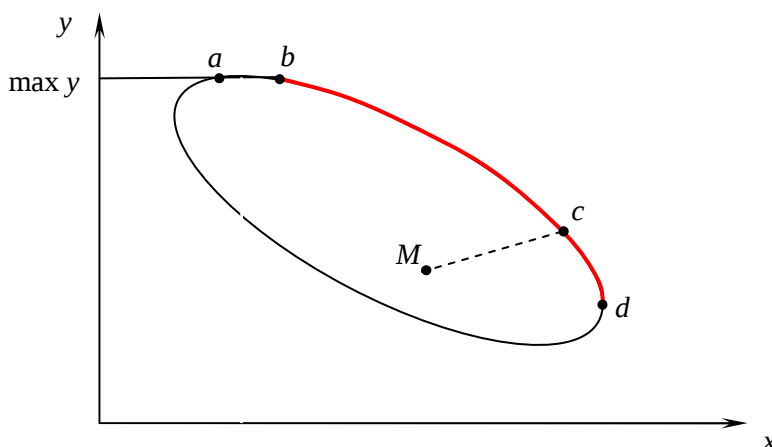
Parasti pilnīgi nodrošināt dažādu mērķu izpildi nav iespējams. Vienmēr nākas upurēt vienu pilnīgu izpildīšanu priekš citu mērķu izpildīšanas, t.i. būt mierā ar kādu kompromisa

risinājumu. Tā iemesls ir mērķu pretrunīgums. Raksturīgs piemērs ir divi mērķi – ekonomiskums un drošums. Kā likums, drošuma palielināšana notiek uz ekonomiskuma pasliktināšanas rēķina un otrādi.

Tādējādi, kompromisa risinājuma meklēšana ir daudzmērķu optimizācijas centrālais uzdevums [11, 16]. Pie tam, dažādiem mērķiem dažādās situācijās ir dažāda vērtība. No tā izriet, ka kompromisa risinājumam jābalstās uz viena mērķa priekšrocību pār citām. Tiek izmantotas sekojošās metodes, kas paredzētas priekšrocību analīzei:

- **Pareto-optimālo alternatīvu kopa.** Zem Pareto optimālo risinājumu kopas saprot tādu, kad neviens no šīs kopas risinājumiem nevar tikt aizvietots ar citu, labāku pēc kāda kritērija bez tā, lai nepasliktinātu risinājumu kaut vai pēc kāda viena cita kritērija. Šādi, katrs risinājums no Pareto kopas ir labāks par citiem no tās pašas kopas pēc kādiem vieniem un sliktāks – pēc citiem kritērijiem. Tā kā kritēriji nav salīdzināmi, tad starp šiem risinājumiem nav neviena tāda, kas būtu labāks par citiem jebkurā gadījumā. Kas attiecas uz risinājumiem, kas neietilpst Pareto kopā, tad tie ir sliktāki kaut pēc viena kritērija. Tieši tāpēc Pareto kopu sauc par efektīvu un tālāku meklēšanu ar kādu papildus nosacījumu vai procedūru piesaistīšanu izpilda tikai uz Pareto kopas [13].

Pareto principa būtību var paskaidrot ar vienkārša uzdevuma palīdzību, kad ir divi nesalīdzamie kritēriji x un y , un optimizācija nozīmē abu kritēriju maksimizāciju (jautājuma principiālā būtība saglabājas arī pie minimizācijas). 1.1. att. visu pieļaujamo risinājumu kopu veido laukums, kuru ierobežo x un y asis pozitīvā kvadrantā un līklīnija $abcd$, ieskaitot arī šīs līnijas punktus. Acīmredzami, ka pāreja no punkta M uz kādu no līklīnijas punktiem, kuri ierobežoti ar punktiem b un d , nozīmē risinājuma uzlabošanu kaut vai pēc viena kritērija bez pasliktināšanas pēc cita kritērija. Visi starppunkti uz līklīnijas $b-d$ ir labāki par laukuma iekšā esošiem punktiem pa abiem kritērijiem vienlaicīgi. Bet pāreja no punkta b punktā d un otrādi nav iespējama bez viena no kritēriju pasliktināšanas. Visi risinājumi, kas atbilst punktiem uz līklīnijas $b-d$, pieder pie Pareto-optimālo risinājumu kopas. Pie tam, katram risinājumam, kas atbilst jebkurai citam pieļaujama laukuma punktam, vienmēr var atrast ne mazāk par vienu risinājumu no Pareto kopas, kurš ir labāks kaut pēc viena kritērija un nav sliktāks pēc cita kritērija. Vairāku kritēriju gadījumiem principiālā aina saglabājas (daudzdimensiju kritēriju telpai).



1.1. att. Optimālo plānu izvēle

- **Skalārizācijas metode.** Ja pastāv kāda daudzdimensiju mērķu (vai kritēriju) vektoru telpa, kurā dažādiem mērķiem (vai kritērijiem) uzstāda atbilstībā dažādus un nesakrītošus savā starpā vektorus (vektoru moduļu vērtības nosaka vienā un tajā pašā mērījumu mērogā), tad moduļus var salīdzināt pēc vērtības. Šādi rodas iespēja algebriski izmērīt lietderīgumu un noteikt vienu mērķu skaitlisko priekšroku pār citiem. Šajā gadījumā ir iespējama skalārizācija

– vektoru aizvietošana ar skalārām funkcijām. Ja visus mērķus i var raksturot ar kritēriju funkcijām φ_i , tad skalārizācija nozīmē visu φ_i aizvietošanu ar vienu kopīgu funkciju φ :

$$\varphi = \sum_{i=1}^n b_i \varphi_i^0 \rightarrow \text{extr}; \quad \sum_{i=1}^n b_i = 1; \quad \varphi_i^0 = \frac{\varphi_i}{\varphi_{i \max(\min)}},$$

kur b_i – kritēriju svara koeficienti, ar kuru palīdzību tiek salīdzinātas visu kritēriju lietderība;
 φ_i^0 – kritēriji, kas ir pierakstīti bezizmēra veidā.

Skalārizācijas rezultātā optimizācija kļūst par vienkritērija pie kāda sintētiskā mērķa. Zināms skalārizācijas piemērs ir patērētāju elektroapgādes drošuma (precīzāk, bezatteiksmes) kritērija aizvietošana ar ekonomisku zaudējumu no elektroapgādes traucējumiem kritērija palīdzību.

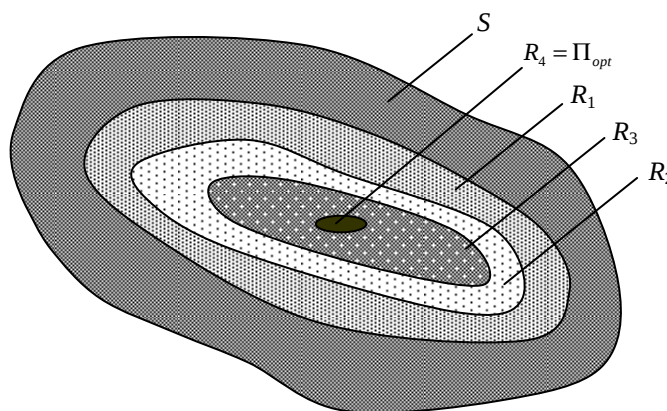
Tomēr bieži aprēķinu vienkāršībai skalārizāciju piemēro apstākļos, kad to darīt nedrīkst, kad svara koeficientu skaitliskas vērtības izvēlas tādā eksperta ceļā, kurā ir daudz vairāk ne visai pamatota voluntārisma, nekā loģiski pamatotu ekspertu vērtējumu.

• **Priekšrokas metode.** Šo metodi pielieto nenoteiktības apstākļos un tā balstās uz atzīmētas iespējami-optimālo plānu kopas pēc katra kritērija pastāvēšanas. Aprēķina shēma izskatās sekojoši. Pieņem minimāli pieļaujamās visu kritēriju $y_1 = y_2, y_3, \dots, y_n$ vērtības, izņemot vienu y_1 – pašu svarīgāko. Ar izvēlēta paša svarīgākā kritērija y_1 palīdzību veic parastu vienkritērija optimizāciju ($y_1 = \min y_1$) un veidojas iespējami-optimālo plānu kopa R_1 pēc dotā kritērija.

Visus kritērijus, kuri bija aizvietoti ar ierobežojumiem, saliek rindā pēc apmierināšanas priekšrokas $y_1 = y_2, y_3, \dots, y_n$ vērtības, kur y_2 – pirmais pēc svarīguma kritērijs (pēc y_1). Uz R_1 kopas veic optimizāciju pēc y_2 kritērija. Rezultātā dabū apakškopu $R_2 \subseteq R_1$, kura ir iespējami-optimāla ne tikai pēc kritērija y_1 , bet arī pēc kritērija y_2 .

Šo procedūru atkārto visiem pārējiem kritērijiem, kas noved pie pakāpeniskas iespējami-optimālu plānu kopas samazināšanas pēc shēmas $\Pi_{opt} = R_n \subseteq R_{n-1} \subseteq \dots \subseteq R_2 \subseteq R_1$.

Kā piemērs, 1.2. att. ir parādīta pieļaujamo plānu kopa S un atbilstošas iespējami-optimālu plānu apakškopas: R_1 – pēc kritērija y_1 ; R_2 – pēc kritērija y_1 un y_2 ; R_3 – pēc kritērijiem y_1, y_2, y_3 ; $\Pi_{opt} = R_4$ – pēc kritērijiem y_1, y_2, y_3, y_4 .



1.2. att. Optimāli-varbūtisku plānu kopas pēc priekšrokas metodes

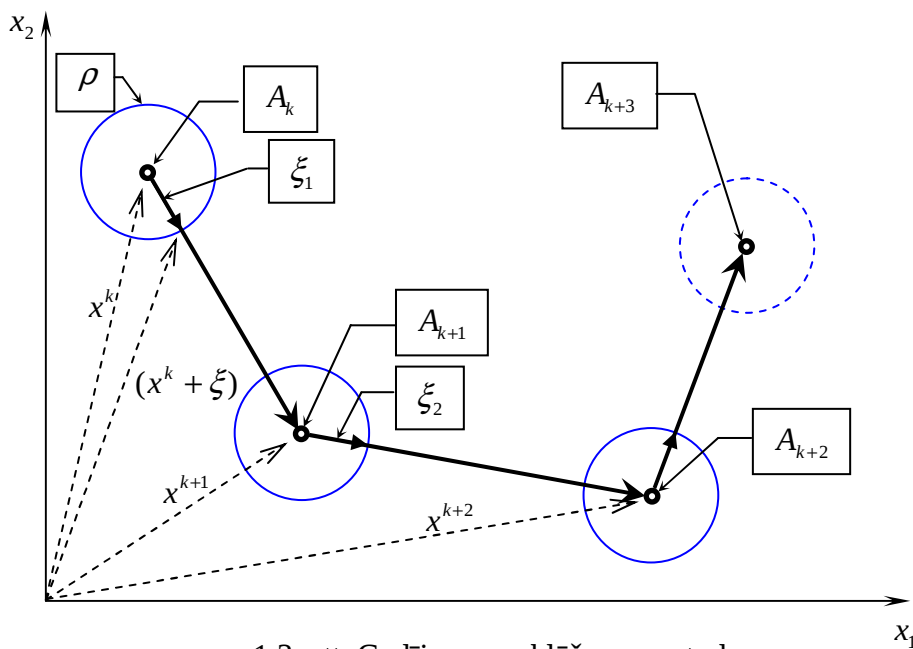
• **Gadījuma meklēšanas metodes.** Monte–Karlo metode ir gadījuma meklēšanas vienkāršākā metode, kas tiek pielietota nosacītās optimizācijas uzdevumos. Metodes būtība ir iegūst uzdoto gadījuma punktu daudzumu pieļaujama apgabalā, noskaidrot un izskaitļot funkcijas vērtības tajos, bet pēc tam atrast punktu ar mērķa funkcijas ekstrēmu vērtību.

Vispārējā gadījumā ar Monte–Karlo metodi saprot vairāku paņēmieni apvienojumu, kas ļauj novest uzdevuma risinājumu līdz vairākkārtējiem izmēģinājumiem. Parasti priekš praktiskiem uzdevumiem šādi izmēģinājumi noved pie aprēķiniem, kas veicami ar gadījuma

skaitļiem. Statistisko izmēģinājumu metode ir efektīva tikai tad, ja izmanto datorus, jo statistisko raksturlīkņu aprēķināšanai nepieciešams vairāku atsevišķu gadījumu izvērtējums un liela apjoma skaitliskās informācijas statistiskā apstrāde.

Monte–Karlo metodi izmanto uzdevumos stohastisko parādību pētīšanai un determinēto uzdevumu risināšanai. Elektroenerģētikā pirmā tipa uzdevumos metodi izmanto energosistēmu režīmu, shēmu un parametru optimizācijai, sistēmu un elementu darbības drošuma izpētei, sistēmu attīstības prognozēšanai, vadības optimālo algoritmu veidošanai utt. Šādu uzdevumu risināšanai tiek izstrādāti attiecīgie stohastiskie modeļi, kas tiek pakļauti statistiskiem izmēģinājumiem pēc noteiktām loģiskām shēmām, kas balstās uz gadījuma skaitļu izvēli. Lai risinātu determinētos uzdevumus ar statistisko izmēģinājumu metodi, nepieciešams, pirmkārt, sastādīt stohastisko risinājuma modeli. Šāds modelis visbiežāk veidojas balstoties uz Bernulli teorēmu un ģeometriskās iespējamības noteikšanu.

Pastāv arī vairākas citas gadījuma meklēšanas metodes. Viena no tādām metodēm nejauši izvēlas kustības virzienu katrā solī (1.3. att.).



1.3. att. Gadījuma meklēšanas metode

Praksē pielieto sekojošo algoritmu [19]:

Solis 1. Noteic (vai uzdod) sākuma punktu $x^0 = x^1$ mainīgo faktoru telpā.

Solis 2. Gadījuma vektoram ξ tiek uzdots izmēģinājuma ρ un darba a soļa vērtība ($a > \rho$).

Solis 3. Tiek izskaitļoti vektora ξ koordinātes $\xi_1, \dots, \xi_n$, kas ir gadījuma vektora ρ garums, ar vienmērīguma sadalījuma līkumu uz n -dimensijas sfēras.

Solis 4. Izpilda divus izmēģinājuma eksperimentus punktos x^k un $(x^k + \xi)$, kur k – soļa numurs, t.i. sākumā tas ir $x^k = x$, bet pēc tam $x^k + \xi = x^1 + \xi$.

Tiek salīdzinātas atsaukšanās šajos punktos un formējas funkcija:

$$\psi = \text{sign}\{f(x^k + \xi) - f(x^k)\}; \quad (\psi = \text{sign}\{f(x^1 + \xi) - f(x^1)\}).$$

Ja $\psi > 0$, tad notiek pāreja uz soli (3÷6) (vēl jāuzdod meklēšanas mēģinājumu skaits). Ja $\psi < 0$, tad notiek pāreja uz soli 5.

Solis 5. Tiek īstenots darba solis (ar garumu a) mērķa funkcijas vērtības samazināšanas virzienā, t.i.

$$x^{k+1} = x^k - \psi \frac{a}{\rho}, \quad \left(x^{k+1} = x^k - \psi \frac{a}{\rho} \right).$$

Solis 6. Punktu $x^{k+1}(x^2)$ pieņem par jaunu sākumpunktu un pāriet pie soliēm $(3 \div 6)$, ja nav izpildīts kritērijs solī 7. Ja izrādās, ka $f(x^k) = f(x^k + \xi)$, tad kustības virziena noteikšana atkal notiek pēc gadījuma skaitļa, piemēram:

- $x^k + \xi$ pusē pāra skaitļa izkrišanas gadījumā;
- $x^k - \xi$ pusē nepāra skaitļa izkrišanas gadījumā.

Solis 7. Pār ienākšanas minimuma apgabalā kritēriju uzskata vairākkārtīgu situācijas atkārtošana $f(x^k + \xi) > f(x^k)$ (piemēram, 100-kārtīga atkārtošana).

Risinājuma izvēli nenoteiktības un daudzkritēriju apstākļos parasti veic lēmumu pieņemošā persona (LPP) ar ekspertu komisijas viedokļa ievērošanu. Tas veidojas ar noteiktas atsevišķu ekspertu vērtējumu un galīgas komisijas ekspertu vērtējuma iegūšanas metodes palīdzību.

Energosistēmas režīmu daudzmērķu struktūras optimizācija

EES optimizācijas uzdevumos nācās saskarties ar daudzu pretrunīgu problēmu risināšanu. Izejas informācijas neprecizitāte gandrīz katra uzdevuma lēmuma pieņemšanā noteic tās optimālo risinājumu nenoteiktības zonu. Papildus kritēriju piesaistīšana dod iespēju neņemt vērā optimālā risinājuma nenoteiktības izvēles problēmu. Dažu kritēriju vienlaicīgā uzskaitē ir optimālo risinājumu nenoteiktības zonas sašaurināšanas līdzeklis.

Energosistēmu režīmu vadība sastāv no sekojošām funkcijām: stāvokļa prognozēšana, mērķu un kritēriju noteikšana, izstrāde, lēmuma pieņemšana un realizācija, rezultātu novērtēšana. Energosistēmas stāvoklis raksturojas ar noteiktu strādājošu ģeneratoru sastāvu, tīklu topoloģiju, komutācijas ierīču stāvokli, relejaizsardzības nostādni un pretavārijas automātiku, režīmu un ekspluatācijas noteikumiem, patērēto jaudu un spriegumiem tīkla mezglos, strāvām zaros. Ja izejas stāvoklis energosistēmā apzīmēts ar vektoru

$$S_0 = (S_0^s, S_0^k, S_0^e, S_0^{ek}),$$

kur $S_0^s, S_0^k, S_0^e, S_0^{ek}$ – izejas stāvokļa vektori, kuri atbilstoši nosaka izstrādes stabilitāti, kvalitāti, ekonomiskumu un ekoloģiju, tad j tehniskā risinājuma realizācija ($j \in m$) pie režīma struktūras optimizācijas izsauks energosistēmas pāreju uz jaunu j stāvokli $S_j = (S_j^s, S_j^k, S_j^e, S_j^{ek})$. Pie tam, jāizpildās sekojošiem noteikumiem: $S_j^s \in \psi^s, S_j^k \in \psi^k, S_j^e \in \psi^e, S_j^{ek} \in \psi^{ek}$, kur $\psi^s, \psi^k, \psi^e, \psi^{ek}$ – vektoru stāvokļu pieļaujamo vērtību kopas, kuras nosaka atbilstoši energosistēmas režīma stabilitātes, kvalitātes, ekonomiskuma un ekoloģijas noteikumus [18].

Mērķu strukturizācija dod iespēju izveidot parciālo kritēriju vektoru, kuru skaitliskās vērtības raksturo uzdoto mērķu sasniegšanas pakāpi. Pie tam daļu kritēriju, $k_1 \subset k$, pēc iespējas maksimizē, bet otru daļu, $k_2 \subset k$, minimizē. No tā izriet energosistēmu režīmu daudzkritēriju struktūras optimizācijas uzdevums: no uzdotā realizējamo tehnisko risinājumu gala variantu kopas $A = (a, b, \dots, j, \dots, m)$ izvēlēties variantu, kurš būtu optimāls pēc dažiem kritērijiem. Tehniskā risinājuma optimālā varianta daudzkritērija izvēles matemātiskais modelis izskatās šādi:

$$\begin{aligned} \text{opt } k(A) &= \{\max_A k_1(A), \min_A k_2(A)\}, \\ W(Y, D) &= 0, \\ X^{\min} &\leq X \leq X^{\max}, \\ Y^{\min} &\leq Y \leq Y^{\max}, \\ D &= (S, B, X), \quad X = (P, Q, U, k_T), \quad k_1 \cup k_2 = k, \end{aligned} \tag{1.1}$$

kur $W(Y, D)$ – tīkla mezglos jaudu nebilances vektors-funkcija; Y – atkarīgo mainīgo vektors; D – izejas datu vektors; S – kompleksās slodzes vektors tīkla mezglos; B – tīkla pašvadītspēju un savstarpējo vadītspēju matrica; X – neatkarīgo režīmu parametru matrica; P, Q – ģeneratoru aktīvās un reaktīvās jaudas; U – spriegums tīkla mezglos; k_T – transformatoru transformācijas koeficienti.

Energosistēmu režīmu daudzkritēriju struktūras optimizācijas uzdevums var būt atrisināts:

- noteiktības gadījumā, ja modelī (1.1) izejas datu vektors D uzrādīts ar determinētās informācijas vektoru D_d ;
- nenoteiktības gadījumā, ja izejas datu vektors D uzrādīts ar nenoteiktās informācijas vektoru D_H , kur $D_H^{\min} \leq D_H \leq D_H^{\max}$;
- gadījuma noteikumos, ja izejas datu vektors D uzrādīts ar gadījuma informācijas vektoru D_B .

2. ENERGOSISTĒMAS OPTIMĀLAS ATTĪSTĪBAS STRATĒGIJU IZVĒLE

Šajā nodaļā, pamatojoties uz oficiālajiem avotiem un dokumentiem, ir aprakstītas Latvijas elektroenerģētikas problēmas un attīstības virzieni. Apskatīta projektēšanas uzdevuma atrisinājuma metodika uz energosistēmas attīstības stratēģijas izvēles piemēra, pielietojot spēļu teorijas kritērijus.

Elektroapgādes problēmas un attīstības scenāriji Latvijā

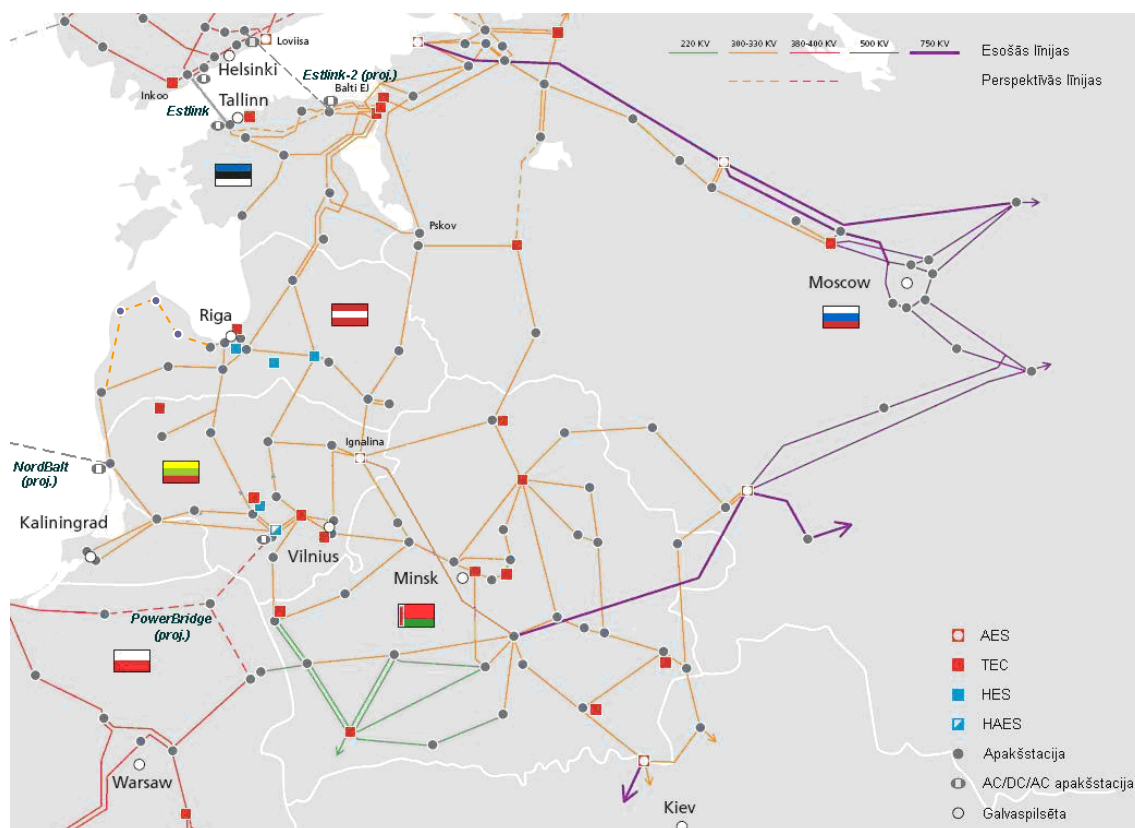
Latvijas energosistēma darbojas vienotā 750/330 kV enerģētiskā riņķī ar Lietuvas, Igaunijas, Krievijas un Baltkrievijas energosistēmām (2.1. att.). Šobrīd Latvijas elektrostaciju elektroenerģijas izstrādes iespējas nav pietiekamas, lai segtu patēriņu. Trūkstošos elektroenerģijas apjomus pērk no kaimiņvalstu energosistēmām. Analizējot pieejamo informāciju no dažādiem avotiem par kaimiņvalstu energosistēmas attīstības plāniem un pieejamām jaudām, var secināt, ja netiks rekonstruētas esošās un uzceltas jaunas elektrostacijas, Baltijas valstu reģions pēc 2015. gada varētu sākt izjust elektrisko jaudu trūkumu [25, 26]. Latvijai tas varētu ierobežot importa iespējas, kas izsauktu cenu palielināšanos, bet sliktākajā gadījumā nepieciešamību ierobežot patēriņu.

Lai nosegtu iztrūkstošo bāzes jaudas deficītu Latvijā, praktiski īstenojamie risinājumi ir šādi:

- dabasgāzi izmantojoša elektrostacija, modernizējot Rīgas TEC-2 veco bloku (izmantojamā tehnoloģija – gāzes turbīnas kombinētais cikls – GTCC);
- cieto kurināmo (akmeņogles, kūdras, biomasu vai iepriekšminēto kurināmo maisījumu) izmantojoša elektrostacija (izmantojamās tehnoloģijas: pulverizētā sadedzināšana (PC), sadedzināšana verdošajā slānī (FBC) vai kombinētā cikla tehnoloģija ar cietā kurināmā gazifikāciju);
- ilgtermiņā varētu būt apskatāmas kodoldegvielu izmantojošas tehnoloģijas Latvijas teritorijā [5].

Saskaņā ar Baltijas valstu lielāko energokompāniju speciālistu veiktajām pētnieciskajām aplēsēm, Baltijas valstu energosistēmu pilnvērtīgai tehniskai integrācijai Eiropas Savienības energosistēmu tīklā būtu nepieciešams realizēt vismaz trīs energosistēmu starpsaslēgumu izbūves projektus (2.1. att.):

- jūras kabeļa Igaunija – Somija otro kārtu „*Estlink 2*” (ap 650 MW);
- Lietuvas – Zviedrijas jūras kabeļa „*NordBalt*” izbūvi (līdz 1000 MW);
- Lietuvas – Polijas energosistēmu sauszemes starpsavienojuma „*PowerBridge*” izbūvi (ar energotilta pārvades jaudu līdz 1000 MW).



2.1. att. Austrumeiropas augstspriegumu (220 – 750 kV) tīklu shēma

No ES integrētās enerģētikas politikas viedokļa raugoties, tikai tālredzīga un plānveidīga bāzes jaudu attīstīšanas (aizvietošanas un būvniecības) politika, totāla tirgus tehniskā, ekonomiskā un regulatīvā integrācija, kā arī resursu piegādes faktoru uzlabošana var palīdzēt mazināt Latvijas atkarību no strauji pieaugošā energoresursu un elektroenerģijas importa. Bez bāzes jaudām un jauniem starpsavienojumiem nevar pastāvēt iekšējais un ārējais tirgus; nevar tikt nodrošināta Baltijas reģiona energoapgādes un arī ārējā stratēģiskā drošība.

Energosistēmas attīstības stratēģijas izvēles problēma

Agrāk gandrīz visi energosistēmas optimizācijas uzdevumi tika atrisināti, pielietojot vienu kritēriju – reducētās izmaksas. Kā labāko uzskatīja variantu ar zemākām izmaksām. Savukārt, apskatot investēšanas projektu efektivitāti un veicot to atlasi finansēšanai, ir jānovērtē līdzefekts no šo pasākumu īstenošanas. Faktiski, izvēle jāveic pēc dažiem kritērijiem.

Bez optimizācijas uzdevuma daudzkritēriju rakstura, tam ir raksturīga arī izejas informācijas nenoteiktība, piemēram, elektriskās slodzes izmaiņa perspektīvā, zaudējuma lielums elektroapgādes pārtraukumu un elektroenerģijas kvalitātes pasliktināšanās dēļ, kurināmā izmaksas perspektīvā, kaitējums no uzturēšanas pārkārtojuma u.c.

Pie elektroapgādes optimizācijas uzdevumiem, ko atrisina projektēšanas un ekspluatācijas laikā, pieskaitāma elektroapgādes attīstības variantu izvēle, elektroenerģijas zudumu samazināšanas pasākumi, drošuma paaugstināšanas pasākumi, apakšstaciju izvietojuma izvēle u.c. Optimizācijas daudzkritēriju uzdevumi tiek atrisināti, attēlojot elektroapgādes sistēmu sarežģītas sistēmas veidā, kurai ir raksturīgi daudzi funkcionēšanas mērķi un izejas informācijas daļas nenoteiktība [23].

Optimizācijas uzdevumu atrisināšana pēc daudzkritēriju modeļiem izejas informācijas nenoteiktības apstākļos ir iespējama, izmantojot spēļu teorijas elementus.

EES attīstības variantu salīdzinājums Kurzemes reģionā Latvijā

EES projektēšanas uzdevums ir apskatīts uz Latvijas energosistēmas attīstības Kurzemes reģionā piemēra [2]. Tiek izskatītas šādas energosistēmas attīstības alternatīvas (2.2. att.):

- φ_1 – 330 kV gaisvadu līnijas (GL) Ventspils – Grobiņa izbūve un ostas uzlabošana Ventspilī (ogļu elektrostacijas izbūve Ventspilī);
- φ_2 – 330 kV GL Liepāja – Grobiņa izbūve un ostas uzlabošana Liepājā (ogļu elektrostacijas izbūve Liepājā);
- φ_3 – augstsprieguma līdzstrāvas kabelļlīnijas (KL) Nibro (Zviedrija) – Ventspils izbūve.



2.2. att. Latvijas energosistēmas attīstības varianti Kurzemē

Energosistēmas attīstības pamatmērķi ir nodrošināt kvalitatīvu un drošu elektroapgādi pie zemākām izmaksām, kā arī minimāli ietekmēt apkārtējo vidi. Tāpēc, izvēloties optimālāko attīstības variantu, bija izvirzīti šādi kritēriji:

C_{Σ} – diskontētās ikgadējās izmaksas;

A_R – gadā patērētajiem nepiegādātā elektroenerģija avārijas atslēgumu dēļ;

C_{ek} – diskontētās ikgadējās izmaksas par atsavināto zemi un dabas resursu atjaunošanu.

Lēmumu pieņemšana paredz izvēlēties situāciju visizdevīgākam uzvedības variantam no vairākiem esošiem variantiem nenoteiktības apstākļos. Šādi uzdevumi var būt aprakstīti ar matricu spēlēm, kurās spēlētājs mijiedarbojas ar apkārtējo vidi.

Dotajā gadījumā aplūkota spēle ar dabu, t.i. matricas spēle, kurā spēlētājs (elektroapgādes kompānija) mijiedarbojas ar apkārtējo vidi, kura nav ieinteresēta viņa zaudējumā, un risina uzdevumu uzvedības visizdevīgākā varianta noteikšanai, ņemot vērā apkārtējās vides stāvokļa nenoteiktību.

Eksistē kritēriju virkne, kurus izmanto optimālās stratēģijas izvēlei nenoteiktības apstākļos [19, 22]. Šajos aprēķinos tika pielietoti sekojoši kritēriji:

- **Valda kritērijs** orientēts uz vissliktākajam attīstības plāna realizācijas perspektīvām un nodrošina garantēto ieguvumu ar minimālu risku:

$$a_{ij}^* = \max_i \min_j a_{ij}, \quad (2.1)$$

kur a_{ij} – situācijas rezultāts, kad spēlētājs pieņem stratēģiju i pie dabas stāvokļa j ;

- **Hurvica kritērijs**, saskaņā ar kuru tiek izvēlēta tāda stratēģija, kas ieņem zināmu starpstāvokli starp pesimismu un optimismu:

$$a_{ij}^* = \max_i [\lambda \min_j a_{ij} + (1 - \lambda) \max_j a_{ij}], \quad (2.2)$$

kur λ – uzticības koeficients, kas izvēlēts intervālā $[0, 1]$;

- **Sevidža kritērijs.** Kritērija būtība ir tādas stratēģijas izvēle, lai nepieļautu pārāk lielus zaudējumus, līdz kuriem tā var novest:

$$r_{ij}^* = \min_i \max_j r_{ij}, \quad (2.3)$$

kur $r_{ij} = \max_i a_{ij} - a_{ij}$ - risku („nožēlošanas”) matricas elementi;

- **Laplasi kritērijs.** Šis kritērijs balstās uz nepietiekama pamatojuma principa. Par cik dabas stāvokļa varbūtības nav zināmas, var pieņemt, ka tās ir vienlīdz ticamas:

$$a_{ij}^* = \max_i \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij}, \quad (2.4)$$

kur n – apskatāmo faktoru skaits attīstības stratēģiju salīdzināšanai.

Saskaņā ar aprēķinu rezultātiem nepieciešams veikt izvēli starp dažādiem risinājumiem:

- pēc Valda kritērija realizēt alternatīvu φ_1 ;
- pēc Hurvica kritērija realizēt alternatīvu φ_3 , jo uzticības koeficients λ tuvāk nullei („veselīga optimisma” stratēģija) un φ_1 , jo λ tuvāk vienam (pesimista stratēģija);
- pēc Sevidža kritērija realizēt alternatīvu φ_1 ;
- pēc Laplasi kritērija realizēt alternatīvu φ_1 .

Lēmuma pieņemšanas kritērija izvēle ir viens no sarežģītākajiem un atbildīgākajiem etapiem operāciju izpētē. Pie tam, neeksistē kaut kādu vispārēju rekomendāciju vai padomu. Taču, ja nav pieņemams pat visminimālākais risks, tad pielieto Valda kritērijs. Un otrādi, ja zināms risks tomēr pieļaujams, izvēlas Sevidža kritēriju [29].

Attīstības stratēģijas izvēles stabilitāti var novērtēt, pamatojoties uz dažu kritēriju analīzi. Izvēlas to variantu, pēc kura novēro lielāku sakritību skaitu. Tādā veidā, risinājuma rezultāts pēc dažādiem kritērijiem biežāk par citiem rekomendē φ_1 , tādējādi, uz esošo datu pamata, energokompānijai, lai uzlabotu elektroapgādi Kurzemē ar minimālu risku, jāuzbūvē 330 kV GL Ventspils – Grobiņa un jāuzlabo osta Ventspilī, kas nepieciešams cietā kurināmā elektrostacijas uzbūvei Ventspilī.

3. ENERGOSISTĒMAS REŽĪMA OPTIMIZĀCIJAS KLASISKAIS MODELIS

Šajā nodaļā ir izskatīta EES režīma optimizācijas uzdevuma nostādne un atrisinājuma piemēri, ievērojot kurināmā patēriņu elektrostacijās, jaudas zudumus tīklā un kaitējumu ekoloģijai. Piedāvāta metodika kurināmā pārtēriņa novērtēšanai, samazinot kaitējumu izvēlētas elektrostacijas darbības rajonā.

Energosistēmu režīmu vadības uzdevumu klasiskajā nostādnē veido tāds risinājums, kas nodrošinās minimālus izdevumus elektroenerģijas ražošanai, pārvadei un sadalei. No teiktā izriet, ka uzdevumu sastāda energoresursu izdevumu $C(P)$ minimizācija. Savukārt, kurināmā minimālo patēriņu var nodrošināt, piemēram, optimāli izmantojot ierobežotos hidroresursus.

Pie normālās EES režīma optimālas vadības pastāv nepieciešamība ekonomiski sadalīt slodzi starp avotiem, t.i., jānosaka tāda aktīvā jauda P_i^t , kas nodrošinās energoresursu minimālus izdevumus.

Izlietot vairāk hidroenerģijas, nekā to pieļauj hidroresurss W , nedrīkst, mazāk – nav izdevīgi. Nelietderīgi izmantotais ūdens nozīmē, ka sistēmā nepieciešamo elektroenerģiju ražos, sadedzinot papildus kurināmo termoelektrostacijās. Kurināmā patēriņš B_i termoelektrostacijā i atkarīgs no tā aktīvās jaudas, darbināmās iekārtas. Gan viens, gan otrs ir atkarīgs no laika. Tad, kopējie izdevumi kurināmajam ir funkcija no laika [1, 3]:

$$C(P) = \sum_{i=1}^{N_T} c_i \int_0^T B_i(t) dt, \quad (3.1)$$

kur c_i – stacijas i kurināmā cena; N_T – termoelektrostaciju skaits.

Pilnīga hidroresursa izmantošana laika sprīdī T atbilst noteikumam:

$$\sum_{j=1}^{N_H} \left(\int_0^T W_{qj}(t) dt - W_j \right) = 0, \quad (3.2)$$

kur N_H – HES skaits; W_j – noteiktais ūdens uzkrājums hidrostacijā j laika periodā T ; $W_{qj}(t)$ – ūdens patēriņš, kas atkarīgs no hidroģeneratoru aktīvās jaudas un rika.

Tādējādi energosistēmas režīma optimizāciju veido izmaksu $C(P)$ minimuma noteikšana atbilstoši (3.1) pie noteikuma (3.2). Šie noteikumi saista mainīgos lielumus un nozīmē to, ka režīma parametru optimālās vērtības dotajā laika momentā nevar noteikt tikai no sistēmas kārtējās informācijas.

Gadījumā, ja energosistēmā nav hidrostaciju, t.i., nav noteikuma (3.2), optimizācijas uzdevuma atrisināšana vienkāršojas, tā kā režīms laika intervālā T būs optimāls, ja izdevumi būs minimāli:

$$\Delta C^t(P)_{\min} = \min \left(\sum_{i=1}^{N_T} B_i^t \cdot c_i \right), \quad (3.3)$$

kur B_i – nosacītā kurināmā patēriņš stundā pie jaudas laika momentā P_i^t .

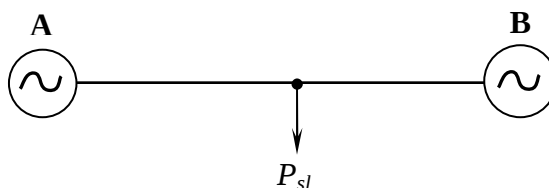
Pie tam, optimālo režīmu meklē tādā pieļaujamā apvidū, ko veido režīma ierobežojumi. Visbiežāk sastopami režīmu ierobežojumi:

$$P_{i\min} \leq P_{qi} \leq P_{i\max}; \quad Q_{i\min} \leq Q_{qi} \leq Q_{i\max}; \quad U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max}; \quad P_{L\min} \leq P_L \leq P_{L\max}.$$

Kurināmā pārtēriņa novērtēšana, samazinot atmosfēras piesārņošanu

Pie nelabvēlīgiem meteoroloģiskiem apstākļiem, apkārtējai videi var tikt nodarīts liels kaitējums. Ja jaudīga siltumelektrostacija atrodas blīvi apdzīvotā rajonā, tad sanitārie dienesti var pieprasīt ierobežot elektrostacijas jaudu, ar mērķi samazināt piesārņojuma līmeni. Tāpēc nepieciešams novērtēt papildus kurināmā patēriņu siltumelektrostacijās, lai samazinātu kaitīgās ekoloģiskās parādības elektrostacijas darbības rajonā [18].

3.1. att. ir parādīta koncentrēta energosistēma, sastāvoša no divām daļām **A** un **B**. Apakšsistēma **B** atrodas blīvi apdzīvotā rajonā, kur nepieciešams samazināt kaitīgus izmešus atmosfērā. To var sasniegt ar slodzes pārdalījumu starp energosistēmas agregātiem, ievērojot kaitējumu no atmosfēras piesārņojuma. Novērtēsim radušos kurināmā pārtēriņu.



3.1. att. Energosistēmas modelis ar divām apakšsistēmām A un B

Visizdevīgākais jaudas sadalījums tiek panākts, izmantojot režīma daudzizmēru optimizācijas noteikumu [15]

$$\sum_i^n B_i \cdot c_i + \sum_i^n Y_i \rightarrow \min, \quad (3.4)$$

kur B_i – nosacītā kurināmā patēriņš apakšsistēmā i , t.n.k./st; c_i – nosacītā kurināmā cena, n.n.v./t; Y_i – kaitējums no izmešu nonākšanas atmosfērā, n.n.v./t kaitīgās vielas.

Pieņemot, ka kurināmā cenas elektrostacijās ir vienādas, noteikumam (3.4) atbilst

$$\sum_i^n B_i \cdot \tilde{c}_i = \min, \quad (3.5)$$

kur $\tilde{c}_i = (c_i + \Delta c_i)$ – kurināmā cena elektrostacijā i , kas koriģēta, ievērojot kaitējumu Δc_i .

Pie iekārtu izliektajām enerģētiskajām raksturlīknēm un pie darba esošo iekārtu sastāva nemainīguma, noteikumu (3.5) var pārrakstīt elektrostaciju kurināmā izdevumu relatīvo pieaugumu vienādības formā:

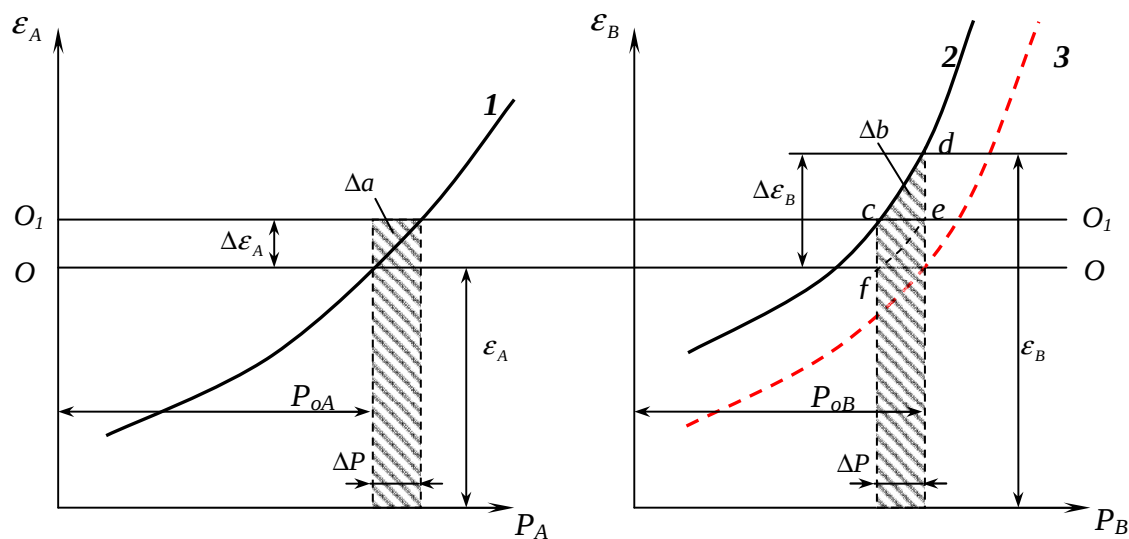
$$\varepsilon_i \cdot \tilde{c}_i = idem; \quad i \in n, \quad (3.6)$$

kur ε_i – kurināmā patēriņa relatīvais pieaugums (elektrostacijas kurināmā patēriņa izmaiņas ātrums, mainoties jaudai), *t.n.k./MWh*.

Nosacījums (3.6), gadījumam, kad $c_A > c_B$, ir parādīts 3.2. att. Horizontālā līnija $O - O$ atbilst šim nosacījumam un nosaka apakšsistēmu optimālās slodzes P_{oA} un P_{oB} .

Lai samazinātu kurināmā patēriņu, nepieciešams izlīdzināt relatīvos pieaugumus, tas ir, atslogot apakšsistēmu **B** par ΔP lielumu un par tādu pašu lielumu noslogot apakšsistēmu **A** (pieņemts, ka elektrostaciju jaudas ierobežojumi to atļauj). Šādu režīmu nosauksim par etalonu (3.2. att. attēlots ar līniju $O_1 - O_1$).

Apakšsistēmas **B** atslogošana dod kurināmā ekonomiju, kas 3.2. att. atbilst aizkrāsotās figūras laukumam, kas sastāv no taisnstūra un trīsstūra Δb . Analogiski, apakšsistēmas **A** noslogošana izsauc kurināmā pārtēriņu, kas 3.2. att. parādīts ar aizkrāsoto figūru, kas sastāv no tāda paša taisnstūra un trīsstūra Δa . Tas viss norāda, ka būs nepieciešams papildus kurināmā patēriņš ΔB , lai samazinātu degšanas produktu kaitīgo izmešu ietekmi uz atmosfēru. Kurināmā pārtēriņa ΔB lielumu nosaka divu līklīniju trīsstūru summa: $\Delta B = \Delta a + \Delta b$, jeb figūras *cdef* laukums.



3.2. att. Kurināmā pārtēriņa noteikšana, ievērojot ekoloģiskās sekas.

Ar cipariem parādītas relatīvo pieaugumu raksturlīknes:

1 – apakšsistēmai **A**; 2 – apakšsistēmai **B** (reālā); 3 – apakšsistēmai **B**, koriģētai ievērojot cenu un kaitējumu

Nav grūti parādīt, ka:

$$\Delta B = 0.5 \cdot \varepsilon_{no}^2 \cdot (1 - c^*)^2 \cdot ctg E, \quad (3.7)$$

kur ε_{no} – relatīvais kurināmā pieaugums pie neoptimālas apakšsistēmas **B** noslogošanas pēc

kurināmā; $c^* = \frac{\tilde{c}}{\tilde{c}_{\max}}$; $ctg E = \frac{ctg \alpha \cdot ctg \beta}{ctg \alpha + ctg \beta}$ – raksturo ekvivalentās raksturlīknes

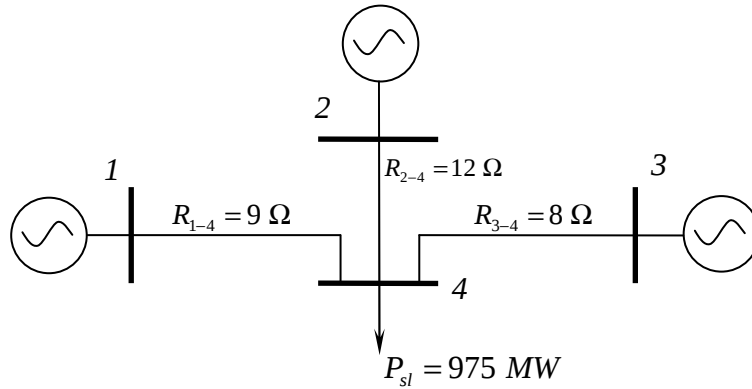
liekumu; $ctg \alpha$ un $ctg \beta$ – staciju **A** un **B** diferenciālo raksturlīkņu slīpums.

No iegūtās vienādības (3.7) var izdarīt sekojošus secinājumus:

- pie jebkuras c^* , kas atšķiras no 1, rodas kurināmā pārtēriņš (tas atbilst gadījumam, kad ierobežojumi neietekmē jaudas sadalījumu starp elektrostacijām);
- kurināmā pārtēriņš ir proporcionāls apakšsistēmas **B** relatīvā pieauguma kvadrātam un pieaug, pieaugot vidējai sistēmas slodzei, jo, palielinoties slodzei, aug relatīvā kurināmā pārtēriņš un ekvivalentās raksturlīknes vidējais stāvums.

EES režīma optimizācijas uzdevuma nostādnes un atrisinājuma piemēri

EES režīma klasiskās optimizācijas un kurināmā pārtēriņa novērtēšanas metodika ir apskatīta koncentrētas testa energosistēmas shēmā, kas sastāv no trim ekvivalentām termoelektrostacijām (3.3. att.) [7, 8, 24]. Nominālais tīkla spriegums ir 330 kV.



3.3. att. Testa energosistēmas shēma

Aprēķinu gaitā bija veikta EES režīma optimizācija pēc trim mērķa funkcijām:

$$\sum_i c_i \cdot B_i \rightarrow \min, \quad i \in N; \quad (3.8)$$

$$\sum_i c_i \cdot B_i + \Delta P \cdot (\tau \cdot \beta' + \beta'') \rightarrow \min, \quad i \in N; \quad (3.9)$$

$$\sum_i c_i \cdot B_i + \sum_i c_k \cdot M_{\Sigma i} + \Delta P \cdot (\tau \cdot \beta' + \beta'') \rightarrow \min, \quad i \in N, \quad (3.10)$$

pie ierobežojumiem ģenerētajai jaudai:

$$P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max}, \quad (3.11)$$

un ievērojot aktīvās jaudas bilanci EES:

$$\sum_i P_i + \Delta P - \sum_i P_{sl_i} = 0, \quad i \in N, \quad (3.12)$$

kur ΔP – kopējie aktīvās jaudas zudumi tīklā, MW; τ – maksimālo zudumu stundu skaits, h/gadā; β' – elektroenerģijas zudumu izmaksas, €/MW·h; β'' – maksa par jaudas vienību sistēmas maksimuma laikā, €/MW; $M_{\Sigma i}$ – kaitīgo vielu izmeši atmosfērā, t kaitīgās vielas/gadā; c_k – īpatnējais kaitējums no pelnu, sēra oksīdu un slāpekļa oksīdu izmešu nonākšanas atmosfērā, €/t kaitīgās vielas; P_{g_i} – aktīvā jauda, ģenerētā mezglā i , MW; P_{sl_i} – aktīvā slodzes jauda mezglā i , MW; N – mezglu skaits tīklā.

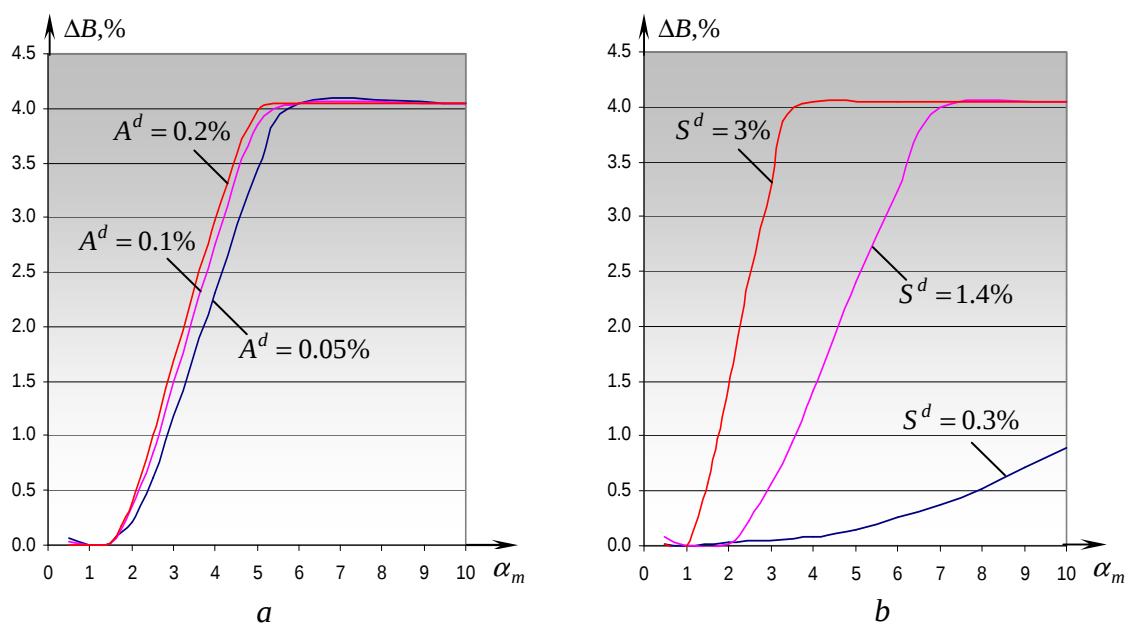
No veiktajiem aprēķiniem var secināt, ka kopējie izdevumi palielinājās par 24.5%, ievērojot gaisa baseina piesārņojumu, sadedzinot kurināmo elektrostacijās, un jaudas zudumus tīklā (izteiksme (3.10)), salīdzinājumā ar rezultātiem saskaņā ar mērķa funkciju (3.8). Šis rezultāts ir papildus apliecinājums tam, ka jo pilnīgāks un precīzāks ir risināmā uzdevuma matemātiskais modelis, jo reālāki būs iegūtie rezultāti.

Kurināmā pārtēriņš sistēmā, samazinot izmešus atmosfērā izvēlētā elektrostacijā

Pieņemot, ka elektrostacija Nr.1 (3.3. att.) atrodas blīvi apdzīvotā rajonā, kur nepieciešams samazināt negatīvo ietekmi uz atmosfēru, novērtēts kurināmā pārtēriņš, ko izraisa slodzes pārdalījums starp elektrostacijām, ievērojot kaitējumu no atmosfēras piesārņojuma.

Par cik kaitējuma lielums ir atkarīgs no daudziem konkrētiem faktoriem, tāpēc kaut kāda pamatotu lielumu izmantošana ir apgrūtināta. Daudz svarīgāk ir noskaidrot parametru izmaiņas tendenci un kurināmā papildizmaksu izmaiņu robežas. Lai novērtētu kaitējuma izmaiņas raksturu aprēķinos izmantots vietējo faktoru koeficients α_m . Koeficienta α_m jēga ir tāda: atsevišķos nelabvēlīgos laika apstākļos (bezvējš, zemi mākoņi, paaugstināts fona piesārņojums, smogs utt.) kaitējuma lielums kontrolējamā sistēmā palielinās α_m reizēs. α_m lielumu ietekmē apdzīvotības blīvums, rūpniecības esamība, lauksaimniecība un klimatiskie apstākļi elektrostācijas zonā [7, 8, 24].

Aprēķinu rezultāti attēloti relatīvās vienībās grafikos 3.4. att. Šo līkņu minimumi, kad nav degvielas pārtēriņa, realizējas dažādos punktos un sadala pārtēriņa līkņu augošās un dilstošās līnijas. Šie punkti sakrīt ar EES etalonu režīmu ($\Delta B = 0$). Pēc tam, pieaugot vietējo apstākļu koeficienta α_m vērtībai, kas līdzvērtīgs kaitējuma īpatnējo izmaksu pieaugumam, notiek elektrostācijas Nr.1 ievērojama atslogošana pret optimālo. Tas noved pie elektrostaciju Nr.2 un Nr.3 pārslogošanas un papildus kurināmā patēriņa, kas pārsniedz kurināmā ekonomiju elektrostacijā Nr.1. Tādējādi, parādās pārtēriņa ΔB pieaugums ar vienlaicīgu kaitējuma samazinājumu kontrolējamās elektrostācijas Nr.1 darbības rajonā. Kurināmā pārtēriņš EES pieaug ar koeficientu α_m , kamēr netiek sasniegti elektrostaciju Nr.2 un Nr.3 ierobežojumu (3.11) maksimālās vērtības uz ģenerāciju. Grafikos 3.4. att. to atspoguļo līkņu horizontālais raksturs.

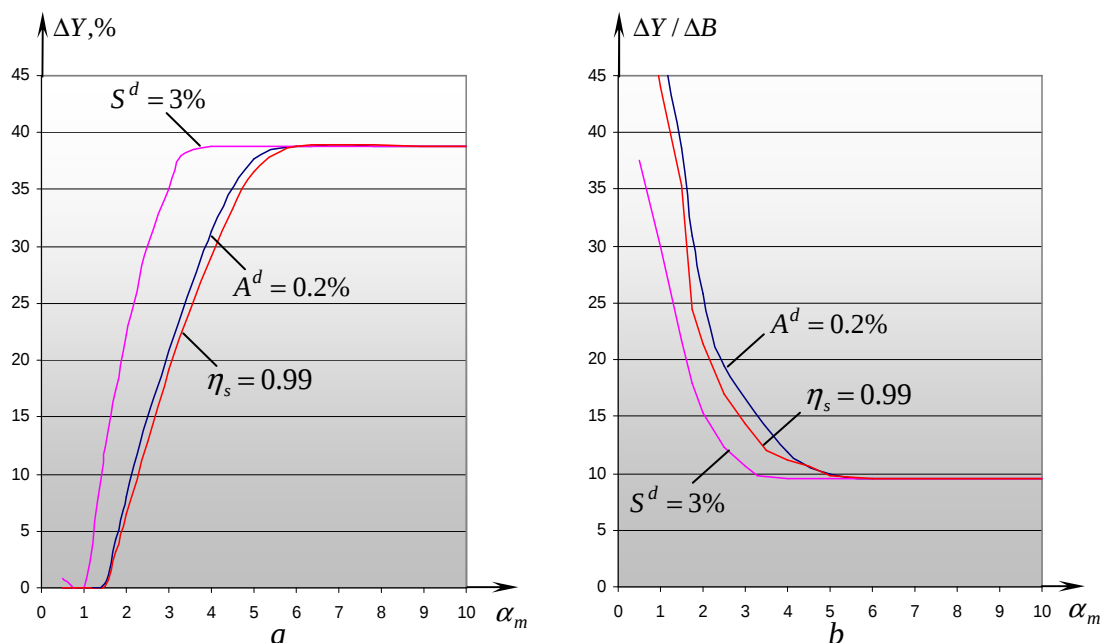


3.4. att. Papildus kurināmā patēriņa izmaiņa EES, samazinot negatīvo ekoloģisko efektu elektrostācijas Nr.1 darbības rajonā, atkarībā no vietējo apstākļu koeficienta α_m , variējot:

a – kurināmā pelnainumu A^d ; b – kurināmā sērainumu S^d

3.5. att. *a* ir parādīts kaitējuma samazinājums no kaitīgajiem izmešiem elektrostacijas Nr.1 darbības rajonā, atkarībā no vietējo apstākļu koeficienta α_m pie dažādiem kurināmā parametriem.

3.5. att. *b* salīdzināta kaitējuma izmaiņa no izmešiem elektrostacijas Nr.1 darbības rajonā ar papildus kurināmā patēriņu sistēmā: izmešu procentuālais samazinājums uz 1% kurināmā patēriņa palielinājumu; tas ir attēlota sakarība $\Delta Y / \Delta B$ no vietējiem faktoriem (variējamā parametra).



3.5. att. Kaitējuma no kaitīgiem izmešiem samazinājums elektrostacijas Nr.1 darbības rajonā (*a*) un tā salīdzinājums ar papildus kurināmā patēriņu sistēmā (*b*), atkarībā no vietējo apstākļu koeficienta α_m pie dažādiem kurināmā parametriem

4. EES OPTIMIZĀCIJAS UZDEVUMS TIRGUS APSTĀKĻOS

Šajā nodaļā tiek piedāvāta EES režīma optimizācijas metodika tirgus attiecību apstākļos starp elektroenerģētikas subjektiem un veikta tās aprobācija uz ekvivalentas Baltijas valstu, Krievijas un Baltkrievijas apvienotās enerģosistēmas shēmas.

Tirgus attiecības pasaules ekonomikā eksistē sen. Tomēr, pat ekonomiski attīstītās valstīs tirgus elektroenerģētikā parādījās ievērojami vēlāk, nekā citās cilvēku darbības sfērās.

Centralizētās vadības gadījumā galvenais akcents tiek likts uz energoapgādes drošumu, kura nodrošinājums tiek sasniegts, pakārtojot visus EES elementus vienam pārvaldes centram. Pie tam, itin bieži drošums, kā EES funkcionēšanas svarīgāks faktors, tiek nodrošināts uz ekonomiskuma rēķina [21]. Vertikāli integrētai vadības sistēmai ir noteikti trūkumi:

- darba režīmu optimizācijā tiek izmantots efektīvs enerģijas izstrādes minimālo izmaksu kritērijs;
- monopola stāvoklis nozarē nesekmē tehnisko (tehnoloģisko) nozares attīstību un nemotivē subjektus ieviest mūsdienu ekonomiskas, kaut arī dažreiz diezgan dārgas, tehnoloģijas.

Šie faktori nosaka pārejas nepieciešamību uz jaunu elektroenerģētikas nozares vadības sistēmu ar konkurenci [12]. Kopā ar jauniem enerģētikas darbības ekonomiskajiem apstākļiem, parādotes elektroenerģijas vairumtirdzniecībai, mainījās arī uzdevuma nostādne, kritēriji, optimizācijas metodes un paņēmieni. Pāreja uz elektroenerģijas tarifu tirgus formēšanu noveda pie tā, ka atsevišķu apvienotā elektroenerģijas tirgus subjektu optimālas

funkcionēšanas kritēriji ir dažādi, pie tam dažreiz arī pretrunīgi. Ja agrāk, elektroenerģētikas centralizētās vadības laikā, optimuma pamatkritērijs bija kurināmā patēriņa elektroenerģijas ražošanai un saražotās elektroenerģijas pašizmaksu minimizēšana, tad tirgus apstākļos tradicionālais optimizācijas uzdevums tiek sadalīts apakšuzdevumu rindā. Tiem noteicošie ir peļņas no elektroenerģijas pārdošanas maksimuma vai elektroenerģijas ražošanas, pārveidošanas, pārvades un sadales izmaksu minimuma kritēriji. Svarīgs arī ir cenas minimuma kritērijs.

Energosistēmas funkcionēšanas optimalitātes analīze elektroenerģijas tirgus apstākļos, izmantojot Pareto principu un Neša līdzsvaru

EES funkcionēšanas īpatnības tirgus un konkurences apstākļos ir apskatītas EES modelī brīvajās cenās uz elektroenerģiju.

Kopējie izdevumi EES mezglam izskatās šādi [9]:

$$C_{\Sigma_i}(x_i, y_{ij}, y_{ji}, c_{ij}, c_{ji}) = C_i(x_i) - \sum_{j=1}^n a_{ij} c_{ij} y_{ij} + \sum_{j=1}^n a_{ji} c_{ji} y_{ji} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n a_{ij} \pi_{ij} c_{ij} y_{ij} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n a_{ji} \pi_{ji} c_{ji} y_{ji}, \quad (4.1)$$

kur C_i – izdevumu funkcijas uz ģenerāciju EES mezglā i ; x_i – jaudas ģenerācija mezglā i ; y_{ij} – jaudas plūsma no mezgla i uz j ; c_{ij} – elektroenerģijas cena, kas atbilst jaudas plūsmai y_{ij} ; a_{ij} – savienojumu matricas elementi; π_{ji} – jaudas zudumu koeficienti līnijā starp mezglēm j un i .

Izteiksmes (4.1) pirmais loceklis atbilst x_i elektroenerģijas vienību ražošanas izdevumiem. Otrais loceklis rāda peļņu no pārdotas elektroenerģijas, bet trešais loceklis saistīts ar elektroenerģijas pirkšanas izdevumiem. Pieņemts, ka izdevumi, kas saistīti ar elektroenerģijas zudumiem ir vienmērīgi sadalīti starp pircējiem un pārdevējiem. Sakarā ar šo, izteiksmē (4.1) ir ceturtais un piektais loceklis.

Šādi, apskatītais daudzvērtu optimizācijas uzdevums formulējas sekojoši:

$$C_{\Sigma_1}(x_1, y_{1j}, y_{j1}, c_{1j}, c_{j1}) \rightarrow \min, \quad (4.2)$$

$$C_{\Sigma_n}(x_n, y_{nj}, y_{jn}, c_{nj}, c_{jn}) \rightarrow \min, \quad (4.3)$$

$$x_i = P_i + \sum_{j=1}^n a_{ij} y_{ij} - \sum_{j=1}^n a_{ji} (1 - \pi_{ji}) y_{ji}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4.3)$$

$$y_{ij} y_{ji} = 0, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad (4.4)$$

$$C'_i(x_i) y_{ij} \leq c_{ij} y_{ij} \leq C'_j(x_j) y_{ij}, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad (4.5)$$

$$0 \leq x_i \leq \bar{x}_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4.6)$$

$$0 \leq y_{ij} \leq \bar{y}_{ij}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4.7)$$

kur P_i – slodze mezglā i ; $\bar{x}_i$ – elektrostacijas i maksimālā jauda; $\bar{y}_{ij}$ – maksimālā pārvadāma jauda līnijā starp mezglēm i uz mezglu j .

Visas sistēmas mērķis ir nodrošināt uzdoto elektroenerģijas patēriņu, bet katra mezgla mērķis – minimizēt elektroenerģijas ražošanas izmaksas, kas ļaus iegūt maksimālo peļņu katrā mezglā no elektroenerģijas pārdošanas. Abi šie mērķi var novest pie dažādiem elektroenerģijas ražošanas līmeņiem katrā mezglā. Tiek izmantotas divas pieejas visas sistēmas un katra mezgla optimālā stāvokļa ievērošanai. Pirmā no tiem atbilst Pareto optimālajam atrisinājumam, bet otrā – Neša līdzsvara punktam [28].

Izejot no (4.1), Pareto uzdevumu var formulēt sekojoši:

$$\sum_{i=1}^n C_i(x_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \pi_{ij} c_{ij} y_{ij} \rightarrow \min, \quad (4.8)$$

ievērojot ierobežojumus (4.3) – (4.7). Funkcijas (4.8) minimizāciju var interpretēt sekojoši: Pareto optimālais atrisinājums minimizē kopējās izmaksas uz ražošanu (pirmais loceklis izteiksmē (4.8)) un izdevumus jaudas zudumu dēļ (otrai loceklis (4.8)).

Savukārt Neša uzdevuma veids ir minimizēt funkciju

$$\sum_{i=1}^n C_i(x_i) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} c_{ij} y_{ij} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \pi_{ij} c_{ij} y_{ij} \rightarrow \min, \quad (4.9)$$

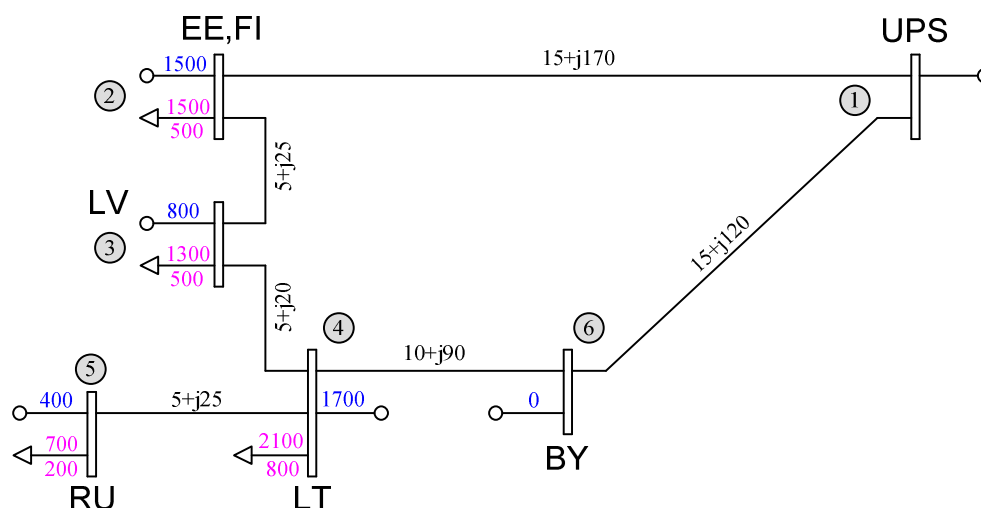
ievērojot ierobežojumus (4.3) – (4.7). Funkcijas (4.9) īpatnība ir tā, ka pirmais loceklis (ražošanas izdevumi) un trešais loceklis (kopējie zudumu izdevumi) tiek minimizēti, bet otrais loceklis (peļņa no pārdotās elektroenerģijas), sakarā ar negatīvo zīmi, tiek maksimizēts.

Apskatāmie matemātiskās programmēšanas uzdevumi (4.8) un (4.9) ir neizliekti, tāpēc var eksistēt vairāki lokālie optimumi. Lai noteiktu globālo optimumu globālās optimizācijas metode tiek pielietota [4, 30].

Augstāk apskatītās EES režīmu modelēšanas un novērtēšanas metodikas aprobācija tika veikta uz reālas apvienotās EES aprēķinu shēmas (4.1. att.), kas atbilst Latvijas (mezgls 3), Krievijas (mezgls 1), Igaunijas un Somijas pateicoties jūras KL „Estlink” (mezgls 2), Lietuvas (mezgls 4), Baltkrievijas (mezgls 6) un Kaļiņingradas apgabala (Krievija; mezgls 5) apvienotās EES reālajam modelim [20]. Darba ietvaros katras valsts elektropārvades sistēma tiek apskatīta kā atsevišķs mezgls. Jaudas, ko patērē un ģenerē valstis, elektropārvades pretestības rādītāji ir balstīti uz patiesiem datiem, kas ņemti no AS „Latvenergo” datubāzes.

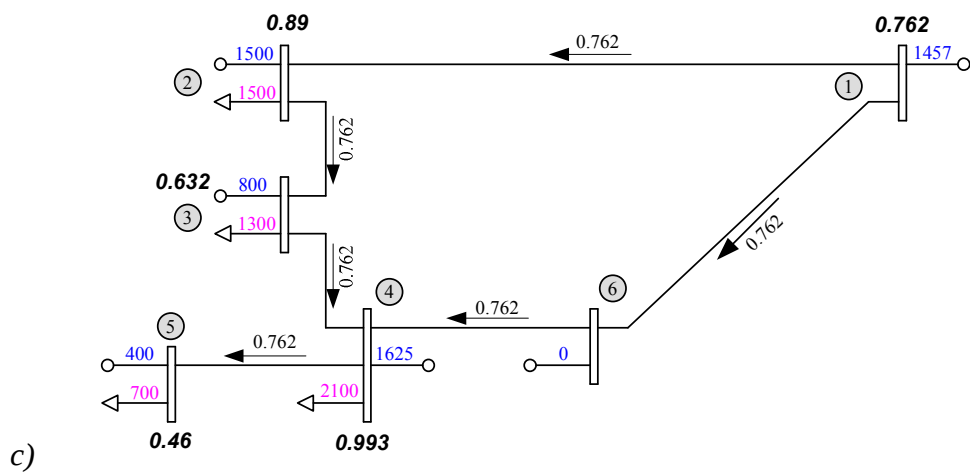
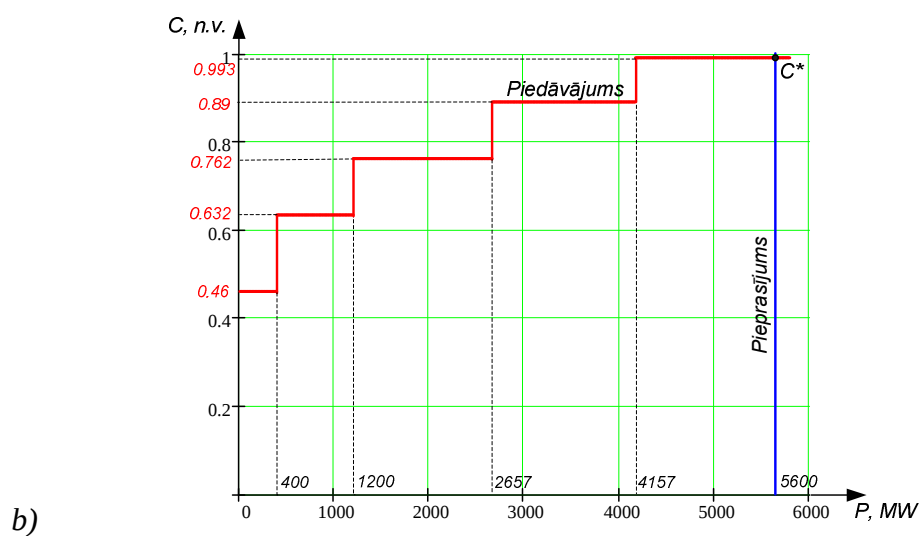
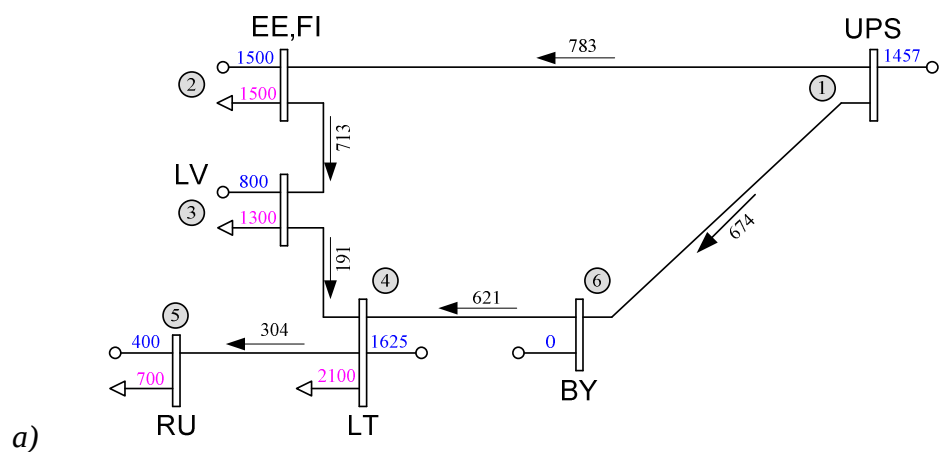
Tā kā izdevumu funkcijas reālajā EES ir konfidencialā informācija un oficiāli nav pieejama, apskatāmajā Baltijas apvienotas energosistēmas aprēķinu modelī (4.1. att.) ir pieņemtas patvaļīgas izdevumu funkcijas $C_i(x_i)$ elektroenerģijas ražošanai mezglos otrās kārtas polinomu veidā.

Abas pieejas Pareto uzdevuma (4.8) un Neša uzdevuma (4.9) atrisināšanai ar pieņemtajam izdevumu funkcijām elektroenerģijas ražošanai realizētas „GAMS” (the General Algebraic Modeling System) vidē. „GAMS” ir augsta līmeņa programmēšanas valoda, lai veidotu matemātiskus modeļus un risinātu optimizācijas problēmas [10, 17, 31].



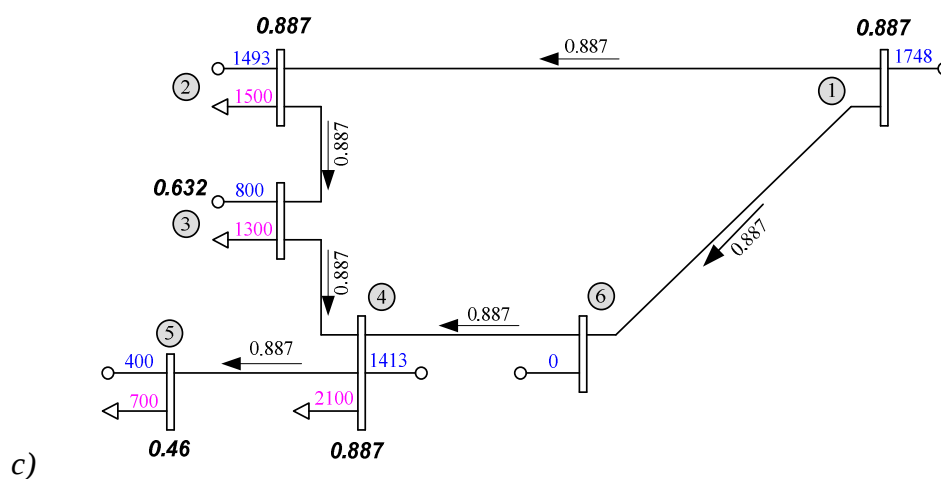
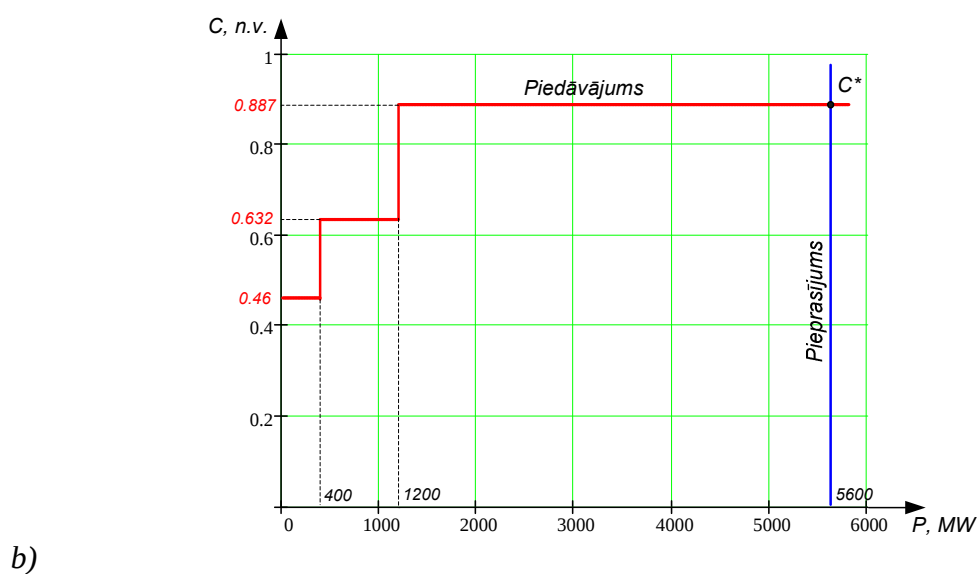
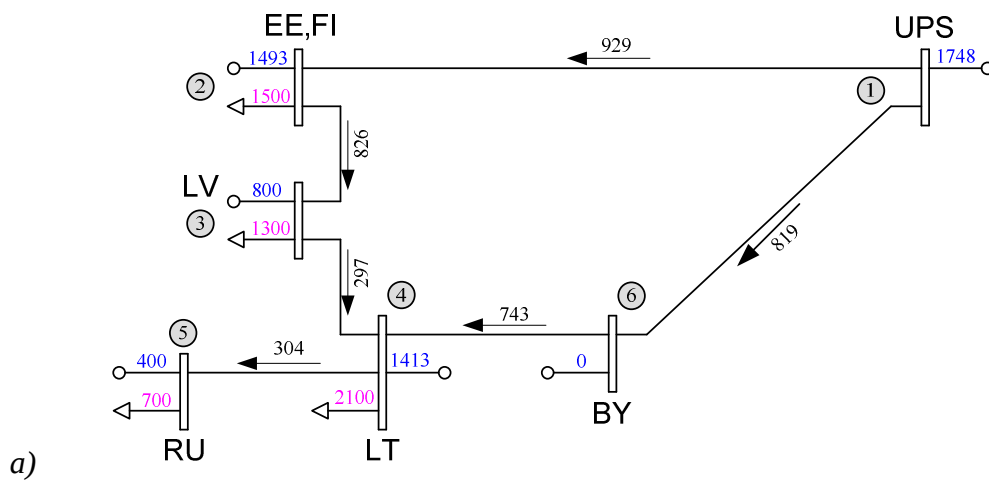
4.1. att. Apvienotās Baltijas, Krievijas un Baltkrievijas energosistēmas aprēķinu modelis

1. Uzdots patēriņa optimālais nodrošinājums EES saskaņā ar Pareto uzdevumu (4.8), ievērojot ierobežojumus (4.3) – (4.7), parādīts 4.2. a) att. Līdzsvara cenas iegūšanas princips atspoguļots 4.2. b) att., bet jaudas plūsmu cenas līnijās un marginālās cenas mezglos ir parādītas 4.2. c) att.



4.2. att. Pareto uzdevuma atrisinājums: a) – uzdota patēriņa optimālais nodrošinājums sistēmā; b) – līdzsvara cenas iegūšana; c) – marginālās cenas mezglos un jaudas plūsmu cenas

2. Neša uzdevuma (4.9) modelēšanas rezultāti „GAMS” vidē, ievērojot ierobežojumus (4.3) – (4.7), atspoguļoti 4.3. att.



4.3. att. Neša uzdevuma atrisinājums: a) – aktīvās jaudas optimālais sadalījums sistēmā; b) – līdzsvara cenas iegūšana; c) – marginālās cenas mezglos un jaudas plūsmu cenas

No iegūtajiem rezultātiem var izdarīt secinājumu, ka risinājums, optimālais pēc Pareto (mērķa funkcija (4.8)), noved pie neizdevīga tirgus stāvokļa elektroenerģijas pārdevējiem energosistēmā (4.2. c) att.). Uz to norāda plūsmu cena, kas ir zemāka par tirgus cenu:

$c_{ij} = 0.762 < C^* = 0.993$ (4.2. b) att.). Sakarā ar to, ka mezgls 1 pārdod elektroenerģiju par cenu, kas līdzināms savai mezgla cenai, dotais pārdevējs negūs peļņu no darījuma. Šāds rezultāts ir izskaidrojams ar to, ka uzdevuma mērķa funkcijā (4.8) nav peļņas maksimizācijas locekļa no pārdotās elektroenerģijas. Iegūtais tirgus stāvoklis nav izdevīgs arī deficīta mezgliem 3 un 5, kuri ir spiesti pirkt iztrūkstošos elektroenerģijas apjomus par augstāku cenu, salīdzinājumā ar viņu pieteiktajām cenām. Tas ir saistīts ar ģenerētās jaudas deficītu sistēmā un citu jaudas piegādes avotu iztrūkumu sistēmā dotajiem mezgliem. Taču, dotā situācija ir izdevīga deficīta mezglam 4, kuram ir iespēja nopirkt lētāku elektroenerģiju attiecībā pret saražoto šajā mezglā. Pareto-optimālais tirgus stāvoklis noved pie situācijas, kad nevar uzlabot jebkura tirgus dalībnieka stāvokli, vienlaicīgi nepazeminot labklājību vismaz vienam no pārējiem.

Savukārt, elektroenerģijas tirgus dalībnieku peļņas maksimizācijas uzskaitē modelī (4.9) noveda pie tirgus stāvokļa, kas atbilst tirgus rezultātiem: $c_{ij} = C^* = 0.887$ (4.3. b) att.). Iegūtajā energosistēmas režīmā mezgls 1 piegādā elektroenerģiju par cenu, atbilstošu mezglu 2 un 4 pieteiktajai cenai (4.3. c) att.). Šī cena ir maksimāli iespējamā cena, par kuru mezgli 2 un 4 ir gatavi pirkt iztrūkstošos elektroenerģijas apjomus. Tai pašā laikā, kad nav citu ģenerācijas avotu, mezgli 3 un 5 ir spiesti pirkt iztrūkstošos jaudu apjomus par augstāku cenu, salīdzinot ar savām pieteiktajām cenām. Neša līdzsvars noved pie tirgus stāvokļa, kad savas stratēģijas izmaiņa nav izdevīga nevienam tirgus dalībniekam.

Kā izriet no aprēķinu rezultātiem, peļņas uzskaitē matemātiskajā modelī (4.9) noveda pie kopējo izdevumu samazināšanās mezgliem 3, 4 un 5, bet palielināja izdevumus spēlētājiem 1, 2 un 6, salīdzinājumā ar modeli (4.8). Bez tam palielinājās arī kopējie izdevumi sistēmā.

5. PARETO PRINCIPA PIELIETOJUMS EES OPTIMĀLA ATTĪSTĪBAS VARIANTA IZVĒLEI

Šajā nodaļā ir aplūkota metodika, kas ļauj grafiski iegūt Pareto-optimālo risinājumu kopu, atrisinot EES attīstības projektēšanas uzdevumu noteiktam kritēriju un alternatīvu sastāvam.

Kā jau bija minēts, kad kritēriji ir skaitliski un kvalitatīvi nesalīdzināmi, izmanto Pareto principu. Kaut arī teorētiski alternatīvas, kas apmierina Pareto principu, jāapskata kā vienādi optimālas, tomēr eksistē praktiskās alternatīvu salīdzināšanas un tālākas atsijāšanas iespējas. Šāda pieeja ir lietderīga, jo dažreiz alternatīvu skaits kompromisu kopā ir diezgan liels un vēlams to saīsināt. Bet galvenais ir tas, ka beigu beigās personai, kas pieņem lēmumu, ir jāpieņem vienīgā izvēle. Tāda veida alternatīvu analīzi kompromisu kopā sauc par iejaukšanās kompromisu kopā [27].

Piemērā ir salīdzinātas divas Baltijas reģiona energosistēmu iespējamās attīstības alternatīvas (5.1. att.) [6]:

φ_1 – augstsprieguma līdzstrāvas jūras KL Klaipēda (Lietuva) – Nybro (Zviedrija) “NordBalt” izbūve (400 km) ar pārvadāmo jaudu 750 MW;

φ_2 – līdzstrāvas jūras KL Sindī (Igaunija) – Dundaga (Latvija) (180 km) un 330 kV GL Grobiņa – Ventspils – Dundaga – Tume – Rīga izbūve (310 km).

Lai nodrošinātu kvalitatīvu un drošu elektroapgādi pie zemākām izmaksām, kā arī minimāli ietekmēt apkārtējo vidi, izvēlētām alternatīvām jāapmierina Pareto princips pēc četriem kritērijiem:

C_K – ikgadējās kapitālizmaksas;

C_E – ikgadējās ekspluatācijas izmaksas;

C_{ek} – izmaksas par kaitējumu apkārtējai videi;

C_R – tautsaimniecības zaudējumi, atslēdzoties līnijai avārijas dēļ.



5.1. att. Baltijas reģiona energosistēmu attīstības alternatīvas, kas apskatītas piemērā

Skalārā kritērija veids ir

$$F = p_1 C_K + p_2 C_E + p_3 C_{ek} + p_4 C_R, \quad (5.1)$$

kur svāra koeficientiem p_j ir spēkā

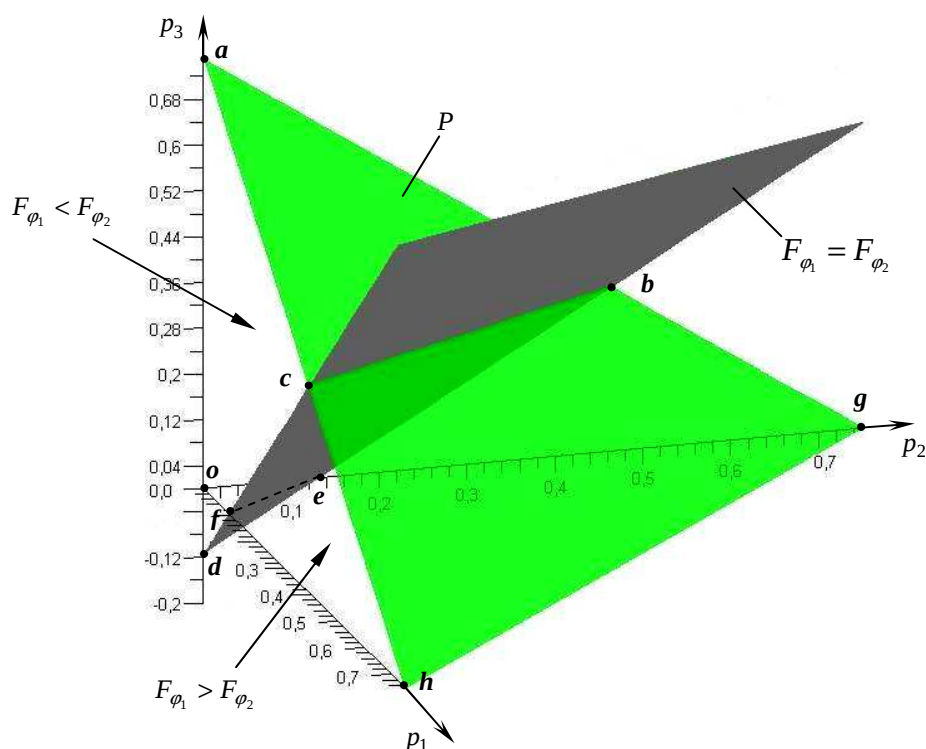
$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1. \quad (5.2)$$

Problēma ir saistīta ar to, ka nav zināmi svāra koeficienti p_j . Pie tam, saskaņā ar Pareto principu, pie vienām svāra koeficientu vērtībām vislabākais var būt viens variants, bet pie citām – cits.

Ar Pareto-optimālo risinājumu grafiskās interpretācijas palīdzību, LPP uzskatāmi var redzēt kompromisa iespējamību starp dotajiem kritērijiem. Priekš tam, kā kritērijus viņš izvēlas trīs rādītājus, vissvarīgākos, vai kuru vērtības visvairāk variējas, vai ir tuvas kritiskajām, bet uz pārējiem uzliek ierobežojumus; tiek atrisināts Pareto kopas konstruēšanas uzdevums un LPP izvēlas vislabāko variantu. Pēc tam LPP izvēlas citus kritērijus ar pietiekami augstām vērtībām, pārved pārējos ierobežojumu kategorijā un ar šiem ierobežojumiem atkal konstruē Pareto kopu pēc citiem trim kritērijiem. Pēc šādas procedūras vairākiem cikliem LPP ir pietiekama informācija par kompromisa iespējamību starp kritērijiem, un var izvēlēties piemērotāku variantu. Šādi piedāvātā metode reprezentē vispārināšanu trīsdimensiju telpā.

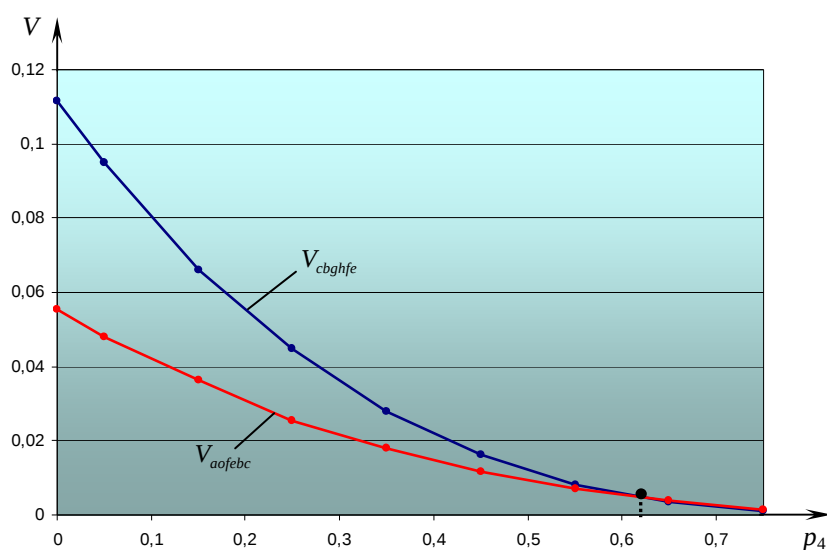
Dota aprēķinu piemēra risinājumus ar diviem salīdzināmiem variantiem, atkarībā no svāra koeficienta vērtībām, interpretēts grafiski. 5.2. att. ir parādīts rajonēšanas rezultāts, kad svāra koeficienta p_4 (kas raksturo tautsaimniecības zaudējumu, atslēdzoties līnijai avārijas dēļ, kritērija svarīgumu) vērtība ir $p_4 = 0.25$. Dažādas p_4 vērtībās ir plaknes, kas ir paralēlas plaknei P . Figūras $aofebc$ tilpums, kuru ierobežo plakne $F_{\varphi_1} = F_{\varphi_2}$ un koordināšu asis, atbilst φ_1 alternatīvas efektivitātes nosacījumam $F_{\varphi_1} < F_{\varphi_2}$, bet figūras $cbghfe$ tilpumam atbilst φ_2 alternatīvas nosacījums $F_{\varphi_2} < F_{\varphi_1}$.

Salīdzinot figūru $aofebc$ un $cbghfe$ tilpumus, var secināt, kura no alternatīvām ir labākā. Tā kā $V_{cbghfe} > V_{aofebc}$, tad gadījumā, kad $p_4 = 0.25$ (5.2. att.) par labāko atzīstama alternatīva φ_2 – KL Sindi – Dundaga un GL Grobiņa – Ventspils – Dundaga – Tume – Rīga izbūve.



5.2. att. Risinājumu rajonēšana kritēriju telpā ($p_4 = 0.25$)

Grafikā 5.3. att. ir parādīti figūru V_{aofebc} (kur izpildās nosacījums $F_{\varphi_1} < F_{\varphi_2}$) un V_{cbghfe} ($F_{\varphi_2} < F_{\varphi_1}$) tilpumi pie dažādām svara koeficienta p_4 vērtībām: no $p_4 = 0$ līdz $p_4 = 0.75$. Kā var redzēt no 5.3. att., abas alternatīvas sasniedz vienādu nozīmi ($F_{\varphi_1} = F_{\varphi_2}$) gadījumā, kad tautsaimniecības zaudējumu kritērija svara koeficienta vērtība ir $p_4 = 0.63$. Šajā punktā abu figūru tilpumi ir vienādi $V_{aofebc} = V_{cbghfe}$. Palielinoties tautsaimniecības zaudējumu kritērija svarīgumam ($p_4 > 0.63$) par labāko atzīstama alternatīva φ_1 – KL Klaipēda – Nybro izbūve, jo figūras $aofebc$ tilpums ir lielāks par figūras $cbghfe$ tilpumu ($V_{aofebc} > V_{cbghfe}$).



5.3. att. Figūru $aofebc$ ($F_{\varphi_1} < F_{\varphi_2}$) un $cbghfe$ ($F_{\varphi_2} < F_{\varphi_1}$) tilpumi pie dažādām svara koeficienta p_4 variācijām

Piedāvātai procedūrai, kas iegūta ar divu daudzkritēriju uzdevumu atrisinājuma metožu sintēzi – Pareto un priekšroku metodēm – ir sekojošas pozitīvas īpatnības: atšķirībā no Pareto kopas konstruēšanas un vizualizēšanas metodes, tā pieļauj operēt ar kritēriju skaitu, vairāku par trim, tajā pašā laikā četru un vairākdimensiju Pareto kopas vizualizēšana praktiski nav iespējama. Atšķirībā no priekšroku metodes, piedāvātā procedūra ievērojami saīsina soļu skaitu, atļauj novērtēt kompromisa iespējamību starp vairākiem kritērijiem katrā solī, pie tam gala atrisinājums būs Pareto-optimāls pēc trim kritērijiem, kurus LPP uzskata par visvairāk svarīgiem. Šādas piedāvātas metodes īpatnības atļauj to izmantot jebkuros daudzizmērķu optimizācijas uzdevumos ar kritēriju skaitu, lielāku par trim, tajos gadījumos, kad grūti vai nav iespējams kvantitatīvi novērtēt kritēriju relatīvo svarīgumu.

6. SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS TURPMĀKAM DARBAM

1. Energosistēmas attīstības un ekspluatācijas uzdevumiem raksturīgs to daudzkritēriju raksturs. Energosistēmai jābūt ekonomiskai, patērētājus jānodrošina ar drošu un kvalitatīvu elektroapgādi. Pie tam negatīvai ietekmei uz apkārtējo vidi jābūt minimālai. Papildus jāņem vērā arī daudzi citi lokāla rakstura noteikumi un apstākļi.
2. Viens no pamatzdevumiem enerģētikas vadības jomā ir EES režīma optimizācija. Bez šī ekspluatācijas uzdevuma, liela nozīme ir arī projektēšanas uzdevumam. Daudzkritēriju pieeja to risināšanai dod iespēju parādīt to matemātiskos modeļus ar daudzām mērķa funkcijām un ierobežojumiem (atkarībā no risināmo uzdevumu veida), kas ietver sevī sistēmas, režīma, finansu, resursu un citus ierobežojumus, atstājošus ietekmi uz dotā uzdevuma risinājumu.
3. Daudzmērķu pieeja dod iespēju kompleksi pieiet energosistēmu režīmu optimizācijas uzdevumam, iegūstot risinājumus, vairāk atbilstošus realitātei.
4. Elektroenerģētikas centralizētās vadības periodā optimālais kritērijs bija kurināmā, patērētā elektroenerģijas ražošanai, un saražotās elektroenerģijas pašizmaksas minimizācija.
5. Enerģētikas vadības decentralizācija izraisīja izmaiņas optimizācijas uzdevumu nostādņē un nepieciešamību izskatīt jaunus optimizācijas kritērijus. Enerģētiskās nozares liberalizācija padarīja aktuālu peļņas no elektroenerģijas pārdošanas maksimizācijas problēmu vai izmaksu minimumu tās ražošanai, pārveidošanai, pārvadei un sadalei. Tirgus attiecību attīstības galamērķis enerģētikā ir elektroenerģijas cenu pazemināšana patērētājiem.
6. Darbā tiek analizēti kritēriji, kas ir būtiski lēmumu pieņemšanai personai attiecībā uz EES režīmu optimālās plānošanas un to attīstības uzdevumiem. Pamatojoties uz kritēriju analīzi, piedāvāts formalizēts mērķfunkciju apraksts, kuras varētu būt izmantotas daudzizmērķu optimizācijas uzdevumu risināšanā.
7. Veikta Latvijas energoapgādes problēmu, stratēģiju un EES attīstības projektu analīze, balstoties uz oficiāliem avotiem un dokumentiem. Atzīmēts, ka esošo problēmu elektroapgādes jomā risināšana paātrinās Latvijas energosistēmas integrācijas procesu ar citām Eiropas Savienības energosistēmām, nodrošinās pieeju tā elektroenerģijas tirgum. Plānoto pasākumu realizācija pašu ģenerējošo jaudu palielināšanā (ogļu stacija, AES, vēja elektrostaciju parks), kā arī Latvijas piedalīšanās jaunu starpsavienojumu veidošanā ar kaimiņvalstu energosistēmām, dos iespēju paaugstināt tās enerģētisko drošību.
8. Piedāvāta projektuzdevuma risināšanas metodika nenoteiktības apstākļos, izmantojot spēļu teoriju. Parādīts, ka lēmuma pieņemšanas kritērija izvēle ir vissarežģītākais un atbildīgākais no etapiem operāciju izpētē un bieži vien atkarīgs no LPP interesēm.
9. Piedāvāts slodzes optimālā sadalījuma starp EES elektrostacijām matemātiskais modelis, ņemot vērā kurināmā patēriņa elektrostacijās, jaudas zudumu elektrotīklos un izmešu atmosfērā minimuma kritērijus. Novērtēts kurināmā pārtēriņš izvēlētajā elektrostacijā,

samazinot izmešus atmosfērā, atkarībā no vietējo apstākļu koeficienta un kurināmā īpašību izmaiņām.

10. Parādīta EES optimālā jaudas sadalījuma metodika tirgus attiecību apstākļos starp elektroenerģijas tirgus subjektiem, izmantojot Pareto optimalitātes principu un Neša līdzsvaru. Izstrādātās metodikas praktiskai aprobācijai un iegūto rezultātu analīzei veikts aprēķins uz testa shēmas piemēra (Latvijas, Lietuvas, Igaunijas, Krievijas un Baltkrievijas apvienotās EES ekvivalents).
11. Atrisināts metodikas izstrādāšanas uzdevums, kas dod iespēju grafiski iegūt Pareto-optimālo risinājumu kopu optimālā energosistēmas attīstības varianta izvēlei noteiktam kritēriju un stratēģiju sastāvam. Uzdevuma atrisināšanas grafiskā pieeja parādīta uz Baltijas EES attīstības stratēģiju izvēles piemēra.
12. Ar Pareto-optimālā risinājuma grafiskās interpretācijas palīdzību LPP var uzskatāmi redzēt kompromisa starp apskatāmajiem kritērijiem iespēju. Piedāvāta metodika dod iespēju novērtēt to kompromisu iespēju un iegūt risinājumu uzdevumiem ar kritēriju skaitu lielāku par trim, pie tam ierobežojoties ar trīsdimensiju kopas aplūkošanu, un dodot vizuālu risinājuma uztveri. Šīs īpatnības atļauj izmantot piedāvāto metodiku daudzkritēriju optimizācijas uzdevumos ar kritēriju skaitu lielāku par trim.
13. Darbā parādīti ekspluatācijas un projektēšanas uzdevumu aprēķinu piemēri uz vienkāršotiem EES matemātiskajiem modeļiem. Turpmāk plānots pētījumus papildināt ar precīzāku to tehnisko un ekonomisko raksturojumu matemātisko aprakstu.
14. Darbā apskatītās EES režīmu optimizācijas metodikas neņem vērā reaktīvo jaudu sadalījumu tīklā. Homogēnajiem tīkliem šis sadalījums tiek izpildīts neatkarīgi. Nepieciešams papildus izpētīt reaktīvo jaudu plūsmu iespējamo ietekmi uz optimizācijas rezultātiem nehomogēno tīklu gadījumā (piemēram, Baltijas, Krievijas un Baltkrievijas EES ekvivalentajā modelī).
15. Nosakot optimālo aktīvās slodzes sadalījumu starp EES mezgļiem elektroenerģijas tirgus apstākļos uz Baltijas, Krievijas un Baltkrievijas enerģētiskā gredzena aprēķinu testa shēmas piemēra, pieņemtas patēriņa funkcijas otrās pakāpes polinomu veidā, kuras neatbilst realitātei, jo nav iespējams tās iegūt oficiālā veidā. Ja būtu iegūtas reālas izdevumu funkcijas, iespējams modelēt faktiskās cenas uz elektroenerģiju konkrētos mezgļos (valstīs).
16. EES režīmu optimizācija tirgus apstākļos uz Baltijas, Krievijas un Baltkrievijas apvienotā EES ekvivalenta modeļa tika veikta pie nezināmiem patērētāju cenu pieteikumiem mezgļos. Ar reāliem patērētāju cenu pieteikumiem un izdevuma funkcijām mezgļos būtu iespējams veidot precīzas pieprasījuma un piedāvājuma līknes un noteikt reālu līdzsvara cenu. Modelēšanas rezultāts dotu iespēju iegūt reālu jaudas sadalījumu apvienotā EES, kas garantētu visiem tirgus dalībniekiem maksimālas peļņas iegūšanu.

LITERATŪRA

1. Gerhards J., Mahņitko A. Energosistēmu režīmu optimizācija. – Rīga: RTU, 2005. – 249 lpp.
2. Mahņitko A., Gavrilovs A. Par barojošo tīklu un ģenerējošo jaudu attīstību Kurzemes reģionā Latvijā // RTU zinātniskie raksti. 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika. – Rīga: RTU, 2009. – 24. sēj. – 7. - 15. lpp.
3. Mahņitko A., Vorps H. Energosistēmu režīmu optimizācija. Lekciju konspekts. – Rīga, RTU, 1992. – 115 lpp.
4. Horst R., Tuy H. Global optimization. Deterministic Approaches. Third reviewed and enlarged edition. – Berlin: Springer, 1996. – 737 p.
5. Mahņitko A., Gavrilov A. About plans of atomic power development in countries of the Baltic region // International Scientific Event "Energetika 2010. Power engineering 2010".

- The 9th International Scientific Conference "Energy - Ecology - Economy 2010", Slovakia, Tatranske Matliare, 18 – 20 May, 2010. – pp. 24-25
6. Mahnitko A., Gavrilov A. Analysis of Latvian power system development in the Kurzeme region using multicriterion optimization // The 4th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2009, Lithuania, Kaunas, 7 – 8 May, 2009. – Kaunas: Technologija, 2009. – pp. 170-176
 7. Mahnitko A., Gavrilov A. Estimating influence on the environment during power system mode optimization // Electrical and Control Technologies: Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2008, 8 – 9 May, 2008, Lithuania, Kaunas. – Kaunas: KTU, 2008. – pp. 373-376
 8. Mahnitko A., Gavrilov A. Thermal Power Plant Emissions Minimization taking into account Losses in Network // The 7th International Conference on Renewable Sources and Environmental Electro-Technologies RSEE, 29 – 30 May, 2008, Romania, Oradea. Journal of Computer Science and Control Systems. – 2008 – Vol.1, No.1. – Oradea: University of Oradea, 2008. – pp. 161-166
 9. Mahnitko A., Gavrilov A. Use of Pareto Principle in Power System Mode Analysis // The 51th International Scientific Conference, Power and Electrical Engineering, October, 2010. Scientific Journal of Riga Technical University. Power and Electrical Engineering. – 2010. – Vol.4, No.27. – Riga: RTU, 2010. – pp. 53-56
 10. McKinney D.C., Savitsky A.G. Basic optimization models for water and energy management, 2003. – 183 p.
 11. Saadat H. Power System Analysis. – New York: WCB/McGraw-Hill Book Company, 1999. – 700 p.
 12. Stoft S. Power System Economics. Designing Markets for Electricity. – IEEE Press & Wiley-interscience, 2002. – 467 p.
 13. Ананичева С.С., Мызин А.Л. Модели развития электроэнергетических систем. – Екатеринбург, 2005. – 75 с.
 14. Арзамасцев Д.А. Введение в многоцелевую оптимизации энергосистем. – Свердловск: УПИ, 1984. – 82 с.
 15. Барамысова Г.А., Бурлаку М.И., Журавлёв В.Г. Оценка экономического эффекта при распределении нагрузки с учётом экологических факторов // Электричество. – 1982. – №.9. – С. 62-65.
 16. Бартоломей П.И., Паниковская Т.Ю. Оптимизация режимов энергосистем. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – 164 с.
 17. Брук А., Кендрик Д., Меераус А., Раман Р. Руководство по GAMS (русская версия). – Центральноазиатская миссия агентства США по международному развитию, 1999. – 172 с.
 18. Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
 19. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – Москва: Дрофа, 2004. – 208 с.
 20. Гаврилов А.Л. Анализ оптимальности функционирования энергосистемы с использованием принципа Парето // Proceedings CD of the XI International Conference "Problems of Present-day Electrotechnics-2010", Ukraine, Kiev, 31 May - 4 June, 2010.
 21. Ерохин П.М. Задачи и технологии оперативно-диспетчерского управления режимами ЕЭС в конкурентно-рыночной энергетике России // Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2005. – 48 с.
 22. Зайченко Ю.П. Исследование операций. – Киев: Вища школа, 1975. – 320 с.
 23. Лещинская Т.Б. Применение методов многокритериального выбора при оптимизации систем электроснабжения сельских районов // Электричество. – 2003. – №.3. – С. 14-22.

24. Махнитко А., Гаврилов А. Анализ воздействия режимов работы тепловых электростанций на окружающую среду // The 6th International Scientific Symposium Electric Power Engineering, 15 – 19 September, 2008, Russia, St. Petersburg. – Košice: Technical University of Košice (ISSN 1337-6756), 2008. – С. 27-32.
25. Махнитко А.Е., Гаврилов А.Л., Герхард Я.Х. Новые проекты и рыночная стратегия в энергетике – основа экономической безопасности Латвии // Экономическая безопасность государства и научно-технические аспекты её обеспечения: Труды II-го научно-практического семинара с международным участием, 21-22 октября 2010 г. Украина, Киев, 21 – 22 октября 2010. – С. 226-235.
26. Махнитко А., Герхард Я., Гаврилов А. Проблемы развития электроэнергетики Латвии // Энергохозяйство за рубежом. – 2009. – №. 2. – С. 24-32.
27. Мжельский Б.И., Мжельская Е.Б. Введение в теорию оптимизации. – Москва: Издательство МЭИ, 2001. – 88 с.
28. Ногин В.Д. Принятие решений при многих критериях. – Санкт-Петербург, 2007. – 103 с.
29. Синьков В.М., Богословский А.В., Григоренко В.Г. и др. Оптимизация режимов энергетических систем. – Киев: Вища школа, 1976. – 307 с.
30. Таха Хемди А. Введение в исследование операций: пер. с англ. /А. Таха Хемд. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2005. – 912 с.
31. GAMS Home Page / Internets. – <http://www.gams.com/>