

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mārtiņš KALNIŅŠ

**ENERGOSISTĒMU REŽĪMU OPTIMIZĀCIJAS MATEMĀTISKO
MODEĻU IZSTRĀDE TIRGUS EKONOMIKAS APSTĀKĻOS**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2008

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Mārtiņš KALNIŅŠ
Doktora studiju programmas „Enerģētika” doktorants

**ENERGOSISTĒMU REŽĪMU OPTIMIZĀCIJAS MATEMĀTISKO
MODEĻU IZSTRĀDE TIRGUS EKONOMIKAS APSTĀKĻOS**

Promocijas darba kopsavilkums

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

Rīga 2008

UDK 621.311.1(043.2)
Ka 281 e

Kalniņš M. Energosistēmu režīmu optimizācijas matemātisko modeļu izstrāde tirgus ekonomikas apstākļos.

Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU,
2008.-32 lpp.

Iespiests saskaņā ar Enerģētikas institūta 2008.
gada 27. 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

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2008. g. 29. augustā, plkst. 17:00, Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, 3. stāva zālē.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Prof. Ing. Michal Kolcun, PhD
Technical University of Kosice

Dr.habil.sc.ing., prof. Zigurds Krišāns
Latvijas Zinātņu Akadēmija, Fizikālās Enerģētikas institūts

Asoc. prof. Inga Zicmane
Rīgas 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.

Mārtiņš Kalniņš(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumi un pielikumu, literatūras sarakstu, 39 attēlus, 31 tabulu, kopā 144 lappuses. Literatūras sarakstā ir 57 nosaukumi.

Saturs

Darba aktualitāte	5
Darba mērķi un uzdevumi	6
Pētījumu metodika un līdzekļi	6
Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti	7
Darba praktiskais pielietojums	7
Darba aprobācija	8
Darba struktūra	10
1. Elektroenerģijas brīvā tirgus modelēšanas īpatnības	10
1.1 Konkurences tirgus veidi	10
1.2 Elektroenerģijas brīvais tirgus	11
1.3 Energosistēmas režīma optimizācijas uzdevuma klasiskais risinājums plānveida ekonomikas apstākļos	13
1.4 Reaktīvās jaudas kompensācijas optimālā risinājuma meklējuma metožu analīze	14
1.5 Cenu piedāvājuma formēšanas problēma	15
2. Ilgtermiņa režīmu plānošana elektroenerģētiskajās HES sistēmās	15
2.1 Kopējas ziņas par ilgtermiņa režīmu plānošanu	15
2.2 Ilglaicīgā režīmu plānošanas metodika elektroenerģētiskajās sistēmās	15
2.3 Ūdens un HES saražotās elektroenerģijas cenu noteikšana	16
2.4 Ilgtermiņa optimālo režīmu plānošanas metodikas secinājumi	17
2.5 Rīgas Hidroelektrostacijas enerģētisko raksturlīkņu modelēšana	18
3. Elektroenerģijas piegādes adresācija	20
3.1 Problēmas nostādnes	20
3.2 Elektroenerģijas piegādes adresācijas problēma	21
3.3 Aktīvās un reaktīvās jaudas pārvades adresācija	22
3.4 Grafu teorijas pielietojums adresācijas problēmas risināšanā	23
3.5 Reaktīvās jaudas adresācija	23
4. Elektroenerģijas mezglu tirgus modelēšana	24
4.1 Problēmas nostādnes	24
4.2 Mezglu cenu noteikšana elektroenerģijas tirgus dalībniekiem	25
4.3 Jaudas piegāžu adresācijas principa realizācija mezglu cenu noteikšanai	28
4.4 Energosistēmas režīmu ietekme uz elektroenerģijas mezglu cenām	28
Secinājumi un rekomendācijas turpmākajiem pētījumiem	29
Literatūra	30

Darba aktualitāte

Tirgus ekonomikas mehānismu ieviešana enerģētisko sistēmu vadībā un enerģētisko uzņēmumu un organizāciju saimniecisko darbību izmaiņa dažādu lēmumu pieņemšanā, kad ir izmainījušās savstarpējo attiecību ekonomiskie principi starp elektroenerģijas piegādātājiem un patērētājiem, ir radījusi nepieciešamību koriģēt lielāko daļu enerģētisko uzdevumu nostādnes, izmantojamos matemātiskos modeļus un risinājuma metodes. Daudzos gadījumos ir arī nepieciešams ņemt vērā jaunus faktorus elektroenerģētisko sistēmu režīmu optimizācijas izmantotajos kritērijos.

Ja iepriekš, piemēram, galvenais režīma optimizācijas uzdevums bija jaudas deficīta minimizācija, tad tagad, reizē ar deficīta minimizāciju ir jāizmanto arī elektroenerģijas ražošanas un pārvades izmaksu minimizēšanas kritērijs.

Sociāli-ekonomisko apstākļu straujā izmaiņa enerģētikā (elektroenerģijas industrijas objektu privatizācija, akcionāru sabiedrību parādīšanās, nepieciešamība strādāt likumdošanas aktu, saistītu ar elektroenerģētiku, ietvaros, līgumattiecības starp elektroenerģijas ražotājiem un patērētājiem) ir noteikusi sekojošās likumsakarības:

Pirmkārt, tirgus ekonomikas apstākļos pieaug elektroenerģētiskās sistēmas darbības un attīstības nenoteiktība.

Otrkārt, izmainās elektroenerģētiskās nozares vadības princips: vadības principu „no augšas uz leju”, nomaina princips „no lejas uz augšu”.

Treškārt, parādās dažāda līmeņa elektroenerģijas tirgi (vietējie, reģionālie).

Ceturtkārt, var tikt novēroti smagi režīma traucējumi un lieli jaudas un enerģijas deficīti, kas saistīti ar krīzes stāvokli sabiedrībā un ekonomikā (dēļ kavētiem maksājumiem, investīciju trūkuma, inflācijas, streiki utt.).

Visi iepriekšminētie apstākļi ir vēl viens apliecinājums tam, ka nepieciešams būtiski attīstīt elektroenerģētisko sistēmu metodes un modeļus, kas izstrādāti iepriekš. Konkrēti režīmu optimizācijas jomā nepieciešams:

1. Elektroenerģētisko sistēmu modeļos jāņem vērā pilnīgāku un metodoloģiski pamatotu elektrostaciju primāro energoresursu apgādes drošumu. Ja plānveida saimniecības vadībā kurināmā piegāde elektrostacijām bija primārais uzdevums, tad tirgus ekonomikas apstākļos ir jāņem vērā kurināmā piegādes izdevumu

palielināšanās, kurināmā piegāžu pārtraukums dēļ sociāli ekonomiskiem apstākļiem utt.).

2. Elektroenerģētisko sistēmu modeļos jāņem vērā dažādu līmeņu elektroenerģijas tirgu rašanos un darbību, kā arī to iespējas, ja rodas jaudas deficīts.

3. Elektroenerģētisko sistēmu režīmu optimizācijas aprēķinos jāņem vērā elektroapgādes kompāniju iespējas sadarboties savā starpā, atkarībā no to starpā pastāvošajām līgumattiecībām.

Darba mērķi un uzdevumi

Šī darba mērķis ir izstrādāt energosistēmu režīmu matemātiskos modeļus tirgus ekonomikas apstākļos, kā arī piedāvāt algoritmus, ko iespējams izmantot, lai noteiktu energosistēmu darbības efektivitātes rādītājus.

Lai to izdarītu, darbā tiek apskatīti sekojoši uzdevumi:

- elektroenerģijas piegāžu adresācija starp piegādātājiem un patērētājiem;
- elektroenerģijas mezglu cenas noteikšana.

Pētījumu metodika un līdzekļi

Darbā izmantotas sekojošas pētīšanas metodes un līdzekļi:

- Ņūtona metode, lai risinātu nelineāro algebrisko vienādojumu sistēmas, kas apraksta elektroenerģētisko sistēmu stacionāro režīmu;
- orientēto grafu teorija;
- Lagranža metode nelineāro uzdevumu optimizācijai;
- programmu komplekss „MUSTANG”;
- apgrieztās matricas metodes lineāru algebrisku vienādojumu sistēmu risināšanai;
- Microsoft Excel programmu nodrošinājums.

Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

Ir izstrādāts un aprobēts elektroenerģijas adresēto piegāžu noteikšanas algoritms, kas ļauj noteikt katra jaudas avota piedalīšanās daļu konkrēta patērētāja slodzes noseģšanā.

Izpētīts elementārā tirgus matemātiskais modelis, kas piemērojams katram elektroenerģētiskās sistēmas mezglam.

Konkretizēta finansiālās bilances forma katram elektroenerģētiskās sistēmas mezglam.

Balstoties uz grafisko pieeju, izstrādāts un aprobēts elektroenerģijas mezglu cenu noteikšanas algoritms.

Pētīta elektroenerģijas mezglu cenu atkarība no elektroenerģētiskās sistēmas režīmu izmaiņām.

Darba praktiskais pielietojums

Elektroenerģijas adresēto piegāžu noteikšanas algoritma pielietojums ļauj noteikt katra jaudas avota piedalīšanās daļu konkrētas patērētāja slodzes noseģšanā, kas var vienkāršot apmaksas jautājumu par saņemto elektroenerģiju.

Vienots elementārā elektroenerģijas tirgus modelis visiem elektroenerģētiskās sistēmas mezgliem ļauj modelēt savstarpējās tirgus attiecības starp elektroenerģijas piegādātājiem un patērētājiem.

Piedāvātais elektroenerģijas mezglu cenu noteikšanas algoritms pirmkārt orientēts uz to, lai patērētājiem būtu iespējams nodrošināt taisnīgu un argumentētu samaksas kārtību par izmantoto elektroenerģiju.

Piedāvātie algoritmi ļauj ņemt vērā jebkura veida elektroenerģijas ražošanas izmaksu funkcijas.

Piedāvātie algoritmi var tikt izmantoti praksē jebkuras elektroenerģētiskās sistēmas ekspluatācijā.

Iegūtās elektroenerģijas mezglu cenas elektroenerģijas tirgus dalībnieki var izmantotas kā pamatu cenu piedāvājuma veidošanai.

Darba aprobācija

Izstrādātie matemātiskie modeļi un algoritmi tika testēti, kā piemēru izmantojot Latvijas energosistēmas 330 kV elektriskā tīkla shēmu.

Par promocijas darba rezultātiem ziņots šādās konferencēs:

1. RTU 43. studentu zinātniskā un tehniskā konference, 2002.
2. RTU 44. studentu zinātniskā un tehniskā konference, 2003.
3. RTU 45. studentu zinātniskā un tehniskā konference, 2004.
4. XII International Scientific Conference. “Present-Day Problems of Power Engineering” APE’05, Gdansk, Poland, 8 – 10.05.2005.
5. Power Engineering and Technologies, Kaunas University of Technology, Kauņa, Lietuva, 21 – 22.04.2005.
6. Elektroenergetika, Stara Lesna, Slovākija, 21 – 23.09.2005.
7. RTU 46. starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, 13 – 15.10.2005.
8. 7th International Conference Control of Power & Heating Systems 2006 – CP&HS’06, Zlin, Czech Republic, 16 – 18.05.2006.
9. 6th International Conference on Renewable sources and environmental electro-technologies - RSEE’2006, Oradea , Romania 8 – 10.06.2006.
10. RTU 47. Starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, 12. – 14.10.2006.
11. The 6th WSEAS/IASME International Conference on ELECTRIC POWER SYSTEMS, HIGH VOLTAGES, ELECTRIC MACHINES (POWER’06), Tenerife, Spain, 16-18 12.2006.
12. Power Tech 07, Lausanne, Switzerland, 02. – 05.07.2007.
13. Elektroenergetika 07, Stara Lesna, Slovakia 19. – 21.09.2007.

Promocijas darba saturs atspoguļots 15 autora publikācijās.

Referējamos izdevumos:

1. Kalniņš M., Mahņitko A. Settlement of transmitted Active and Reactive power// APE’ 05, Gdansk University of Technology, The XII International Scientific Conference on Present – Day Problems of Power Engineering, vol. 1, 225. – 233. lpp., Gdansk, Polija, 2005.

2. Kalniņš M., Mahņitko A. Determination of Reactive Power Contribution Factors// “Power Engineering and Technologies” proceedings, 38. – 43. lpp., Kauņa, Lietuva, 2005.
3. Mahņitko A., Gerhards J., Guseva S., Kalnins M. Forming of prices for electric power under conditions of free market// Elektroenergetika 2006, proceedings of the III International Scientific Conference, Stara Lesna, Slovākija, 2005.
4. Kalniņš M., Mahņitko A. Mezglu cenu noteikšana elektroenerģijas tirgus dalībniekiem// RTU 46. starptautiskā zinātniskā konferences materiāli, 4.sērija, 14. sējums, 13. – 21. lpp., Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 2005.
5. Kalniņš M., Mahņitko A. Application of Principle of Power Deliveries settlement for 330 kV Electric Power Network of Latvia// Proceedings of 7th International Conference Control of Power & Heating Systems 2006 – CP&HS’06, Zlin, Czech Republic, 2006.
6. Kalniņš M., Mahņitko A. Application of Principle of Power Deliveries settlement for 330 kV Electric Power Network of Latvia// Proceedings of 6th International Conference on Renewable sources and environmemntal electro-technologies RSEE’2006, 60 – 65 lpp., Oradea , Romania, 2006.
7. Kalniņš M., Mahņitko A. Realisation of Principle of Power Deliveries Settlement for Consumers of High Voltage Electric Power Network of Latvia// RTU 47. starptautiskā zinātniskā konferences materiāli, 4. sērija, 17. sējums, 59 – 70 lpp., Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 2006.
8. Kalniņš M., Mahņitko A. Realization of Principle of Power Deliveries Settlement for Large Scale High Voltage Electric Power Network// Proceedings of the 6th WSEAS/IASME International Conference on Electric Power Systems, High Voltage, Electric Machines (POWER’06), Spain, 2006.
9. Kalniņš M., Mahņitko A. Method of Power Deliveries Settlement for Large Scale Electric Power Network// WSEAS Transactions on Power Systems Journal, Issue 11, Volume 1, Tenerife, Spain, 2006.

10. Kutjuns A., Kalniņš M. Method of transmission power networks reliability estimation, Proceedings of Power Tech 07, Lausanne, Switzerland, 2007.
11. Kalniņš M., Mahņitko A., Kutjuns A. Influence of Intersystem Power Flows on Node Prices of Electric Power for Latvia Power System// Proceedings of Elektroenergetika 07, Stara Lesna, Slovakia, 2007.

Vietējos izdevumos:

1. Kalniņš M., Mahņitko A. Optimālā slodžu sadalījuma noteikšana starp termoelektrostacijas agregātiem ar dinamiskās programmēšanas metodi// RTU 43. studentu zinātniskās un tehniskās konferences materiāli, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 2002.
2. Kalniņš M., Mahņitko A. Reaktīvās jaudas kompensācijas optimālā risinājuma meklējuma metožu analīze// RTU 44. studentu zinātniskās un tehniskās konferences materiāli, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 2003.
3. Kalniņš M., Mahņitko A. Sadaļņu konstruktīvo īpatnību ievērošana, risinot elektroenerģijas piegādes adresācijas uzdevumos// RTU 45. studentu zinātniskās un tehniskās konferences materiāli, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 2004.
4. Kalniņš M., Mahņitko A. Elektrostaciju piedalīšanās daļas noteikšana konkrētas slodzes nodrošināšanai// RTU zinātniskie raksti, Enerģētika un elektrotehnika, Sērija 4, Sējums 11, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 2004.

Darba struktūra

Promocijas darbs satur ievadu, 4 nodaļas un secinājumus, kā arī literatūras sarakstu. Promocijas darba kopējais apjoms ir 144 datorsalikuma lappuses. Darbā ir ietverta 31 tabula un 39 attēli. Literatūras sarakstā iekļauti 57 izmantotās literatūras avoti.

1. Elektroenerģijas brīvā tirgus modelēšanas īpatnības

1.1 Konkurences tirgus veidi

Elektroenerģētikas ekonomikas reformas galvenā sastāvdaļa ir civilizēta un efektīva elektroenerģijas tirgus izveidošana. Agrāk centralizēti sadalītā elektriskā enerģija tagad ir pārtapusi par preci, par kuras realizēšanas formu kalpo pirkšana-pārdošana [1 – 4].

Tirgū esošo piegādātāju un patērētāju skaists un saites starp tiem nosaka pieprasījuma un piedāvājuma attiecību tipu. Atkarībā no piegādātāju un patērētāju skaita attiecības parasti izdala sekojošus tirgus tipus [5]:

1. Pilnīga jeb tīra konkurence;
2. Oligopols;
3. Pilnīgs jeb tīrs monopols;
4. Monopolistiskā konkurence.

Sakarā ar nozares specifiku, elektroenerģētika ir dabīgs monopols. Tāpēc objektīvi ir tas, ka tai raksturīgs pilnīga monopola tirgus vai oligopola tirgus. Šie divi tirgus tipi ir pieskaitāmie pie nepilnīgas (daļējas) konkurences tirgiem.

Runāt par konkurences tirgu elektroenerģētikā var tikai ar noteiktu daļu nosacītības un attiecībā tikai uz tām tā struktūrdaļām, kas nav dabiskie monopoli. Uz tirgus konkurences mehānismu pamata jānotiek elektroenerģijas ražošanai un realizācijai. Elektropārvades līnijām jāpaliek valsts īpašumā, bet cenām par elektroenerģijas pārvadi jābūt stingri kontrolētām.

1.2 Elektroenerģijas brīvais tirgus

Ja nodala pakalpojumus par preces transportēšanu (piegādāšanu) no pašas preces, tad elektroenerģija kļūst par preci, ko var pirkt, pārdot un transportēt (pārvadīt, piegādāt) no vienas vietas uz citu, tāpat kā jebkuru citu preci. Un pat tādā gadījumā, ja elektroenerģijas piegāde (pārvade) paliek kā dabisks monopols, bet katram patērētājam ir iespēja brīvi izvēlēties piegādātāju, kas apgādās to ar elektroenerģiju, tad var runāt par elektroenerģijas tirgus eksistenci [6].

Elektroenerģijai kā precei piemīt savas īpatnības: ražošanas un patēriņa procesu vienlaicība, glabāšanas neiespējamība lielos daudzumos, jebkura ražotāja vai patērētāja ietekme uz visa preču kopuma kvalitāti, stingru kvalitātes standartu ievērošanas nepieciešamība utt. Tāpēc tirgus subjektu mijiedarbībā iesaistās arī institūcija, kas koordinē dalībnieku darbību, lai nodrošinātu drošu visas EES darbību – *pārvades sistēmu operators (PSO)*.

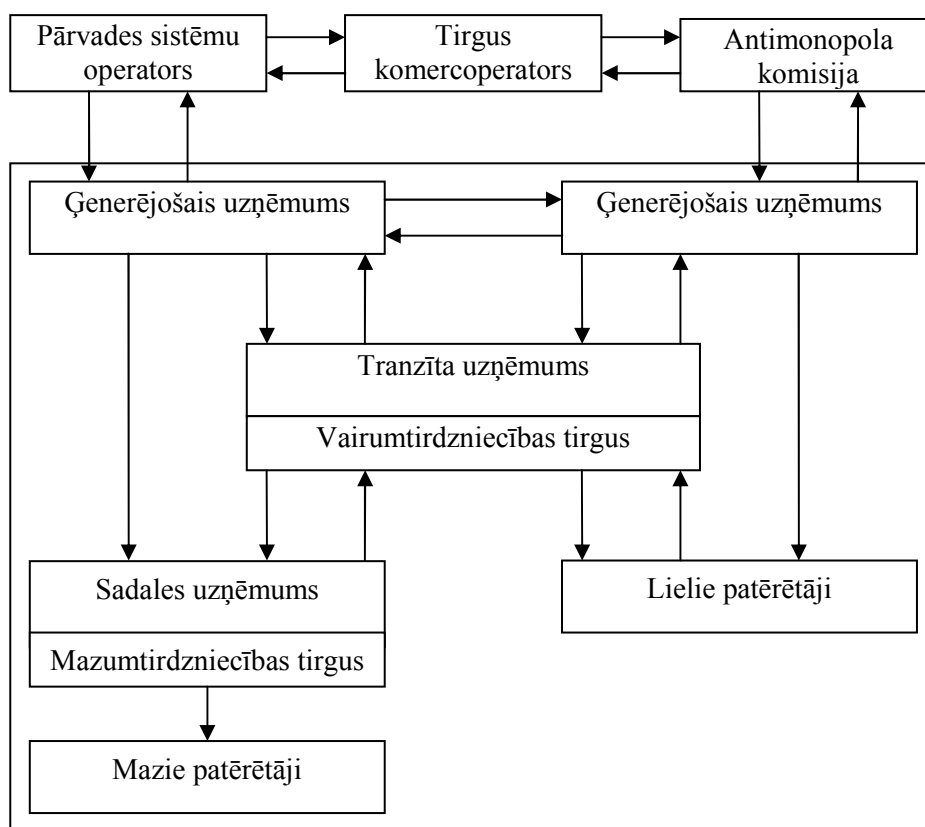
Ja apskata enerģētikā kā biznesu, tad ir jābūt mehānismam, kas precīzāk ievēro dalībnieku komercintereses un aizsargā tās. Jānodrošina līdztiesīgas darba iespējas, jāorganizē tirgus process, jāseko līdzī dalībnieku savu saistību izpildei un jārisina

strīdus jautājumi. Šādas sistēmas izveidei un uzturēšanai ir nepieciešams *tirgus komercoperators* (TKO), kuram ir pilna informācija ne tikai par tehniskajām, bet arī par ekonomiskajām tirgus subjektu īpašībām.

Sakarā ar dažu reģionu elektroenerģētiskā tirgus īpatnībām, ko raksturo lieli tīkla garumi un maza caurlaides spēja tajos, ir nepieciešama valsts institūcijas klātbūtne, kas neļauj veikt cenu izmaiņas kāda subjekta monopola stāvokļa dēļ, vājas tīklu caurlaides spēju dēļ vai pēc tirgus dalībnieku vienošanās. Šo funkciju var veikt arī TKO ar *antimonopolistiskās komisijas* palīdzību.

Informatīvos pakalpojumus, kas nepieciešami PSO dispečera darbībai, TKO un antimonopolistiskajai komisijai var piegādāt ārējās *ekspertu organizācijas*.

Īpaši jāatzīmē elektrisko pārvades tīklu loma elektroenerģētiskā tirgus veidošanā un funkcionēšanā. Tas ir saistīts ar to, ka elektriskie pārvades tīkli ir un tuvākajā laikā arī paliks vienīgais veids elektroenerģijas pārvadīšanā lielos apjomos, tādēļ tie bieži tiek asociēti ar tirgus telpu. Ir skaidrs, ka, lai saglabātu taisnīgu konkurenci starp ražotājiem un patērētājiem, elektriskajiem tīkliem jānodrošina vienlīdzīgas piekļuves tiesības visiem tirgus dalībniekiem.



1.1 att. Elektroenerģijas tirgus struktūra

1.3 Energosistēmas režīma optimizācijas uzdevuma klasiskais risinājums plānveida ekonomikas apstākļos

Vienkāršākajā gadījumā aktīvās jaudas sadalījums starp elektrostacijas ģeneratoriem tiek noteikts katrai diennakts stundai atsevišķi un šī risinājuma mērķis ir noteikt tādas ģeneratoru aktīvās jaudas vērtības, pie kurām uzdotā summārā elektrostacijas aktīvā jauda apskatāmajā stundā tiek izstrādāta ar minimālu kurināmā patēriņu. Ja netiek ņemta vērā aktīvā jauda, ko izmanto elektrostacijas pašpatēriņam, tad doto uzdevumu, kad elektrostacija tiek apskatīta kā blokshēma (katrs bloks vai agregāts ietver sevī katlu, tvaika turbīnu un ģeneratoru) var formulēt sekojošā veidā [7 – 9]:

$$B = \sum_{i=1}^n B_i(P_i) \Rightarrow \min; \quad (1.1)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_{\Sigma}; \quad (1.2)$$

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1.3)$$

kur: P , B - attiecīgi uzdotā elektrostacijas aktīvā jauda (MW) un summārais kurināmā patēriņš šīs jaudas iegūšanai (tonnas nosacītā kurināmā- t.n.k.);

P_i – agregāta i meklējamā jauda; $P_{i, \min}$, $P_{i, \max}$ - attiecīgi jaudas tehniskais minimums un agregāta i lielākā pieejamā jauda;

$B_i(P_i)$ – patēriņa raksturlīkne, t.i. agregāta kurināmā patēriņa atkarība no jaudas, kas tiek uzskatīta par nemainīgu stundas laikā;

n – elektrostacijas agregātu skaits.

Izteiksme (1.1) tiek saukta par mērķa funkciju pie optimāluma kritērijiem, bet vienādojumi (1.2) un (1.3) – optimizācijas uzdevuma ierobežojumi.

Līdz šim laikam visbiežāk lietojamā uzdevuma (1.1) – (1.3) risināšanas metode bija relatīvo pieaugumu metode, bet tās trūkumi ir tas, ka to var izmantot tikai tad, ja nosacīto pieaugumu raksturlīknes (NPR) ir augošas, kas ne vienmēr tā ir praksē.

Šāda trūkuma nav dinamiskās programmēšanas metodei (DPM), kura ļauj atrast globālo mērķa funkcijas (1.1) minimumu neatkarīgi no agregātu NPR veida.

Uzdevuma (1.1)- (1.3) risinājums process izmantojot DPM ir sastāv no diviem etapiem- tiešā un apgrieztā risinājuma.

Tiešā risinājuma būtība ir elektrostacijas ekvivalentās patēriņa raksturlīknes izveidošana neatkarīgi no elektrostacijas uzdotās summārās slodzes.

Optimālais agregātu izmantojums pie noteiktas elektrostacijas slodzes tiek atrasts pēc ekvivalentās elektrostacijas raksturlīknes izmantojot apgriezto risināšanas procedūru. Vispirms tiek atrasta n - tā agregāta jauda un tā kurināmā patēriņš. Pēc tam atrod to pašu $n-1$ agregātam utt. Rezultātā var iegūt tādu elektrostacijas agregātu darba režīmu, kas prasa minimālus izdevumus par kurināmo.

1.4 Reaktīvās jaudas kompensācijas optimālā risinājuma meklējuma metožu analīze

Reaktīvās jaudas, kuras avoti ir elektrostaciju ģeneratori un elektropārvades līniju (EPL) elementi, pārvadīšana pa elektriskajiem tīkla līnijām, noved pie nozīmīga elektropārvades sistēmu tehniski-ekonomisko darba rādītāju pasliktinājuma. Tas notiek aktīvās jaudas un elektroenerģijas zudumu pieauguma rezultātā, EPL caurlaides spēja samazinās sakarā ar ilgstoši pieļaujamo strāvas noslodzi.

Ir vairākas metožu grupas, kas paredzētas reaktīvās jaudas kompensācijas (RJK) optimizācijas uzdevuma risināšanai [11, 12]. Pirmā RJK optimizācijas metožu grupa ir saistīta ar lineāro vienādojumu sistēmu risināšanu. Šīs sistēmas kārtību nosaka mezglu skaits, kuros tiek uzstādīti reaktīvās jaudas avoti (RJA). Galvenais pirmās grupas metožu trūkums ir, ka tās nevar strādāt ar diskrētām funkcijām un ar tabulu veidā uzdotām RJA raksturlīknēm. Otrā RJK optimizācijas grupa raksturīga ar gradientu metožu izmantošanu pakāpeniski tuvojoties optimumam. Pie trešās RJK optimizācijas metožu grupas pieder dinamiskās programmēšanas metodes. Tad risinājums noved pie daudzsoļu funkcionāla optimizācijas ar ierobežotu mainīgo skaitu. Risinājums tiek veikts ar diviem vienam otram sekojošiem etapiem (tiešais un apgrieztais risinājums). Tiešā risinājuma realizācija ļauj noteikt nosacīti-optimālo atrisinājumu daudzumu. Apgrieztais risinājums ļauj no nosacīti-optimālo risinājumu daudzuma izvēlēties vislabāko risinājumu pēc efektivitātes integrālā kritērija.

Metodes, kas ir balstītas uz lineāro vienādojumu sistēmu risināšanu var tikt izmantotas vaļējo un slēgto tīklu aprēķinam. Gradientu metodes tiek lietotas RJK sistēmas aprēķinam. Dinamiskā programēšana visbiežāk tiek pielietota patērētāju elektroapgādes sistēmās RJK aprēķinos.

1.5 Cenu piedāvājuma formēšanas problēma

Energosistēmas darba režīma plānošana nākamajai diennaktij jaunajos ekonomikas apstākļos ir saistīts ar subjekta rīcības stratēģijas izvēli elektroenerģijas tirgū, ko nosaka veiksmīga cenu piedāvājumu formēšana, lai iegūtu maksimālu ekonomisko efektu. Veiksmīga, jo pašlaik nepastāv tiešs, zinātniski pamatots un saprotams šo piedāvājumu veidošanas mehānisms.

Tāpēc šīs problēmas risināšana ir pietiekami aktuāla un šajā nodaļā ir dots viens no iespējamajiem tās realizācijas variantiem [1, 6, 13]. Jāpiezīmē, ka šī pieeja ir paredzēta tirgus modelim ar divlīmeņu tirgus sistēmu: reģionālo un starp reģionālo.

2. Ilgtermiņa režīmu plānošana elektroenerģētiskajās HES sistēmās

2.1 Kopējas ziņas par ilgtermiņa režīmu plānošanu

Ilgtermiņa režīmu plānošana – tradicionālais uzdevums, risinājums ar dispečera vadību, vienotām un apvienotām elektroenerģētiskajām sistēmām (EES). Uzdevums īpaši svarīgs elektroenerģētiskajās sistēmās ar lielu elektroenerģijas ražošanas apjomu, ko saražo HES, kam ir iespējama ūdenstilpņu ilgtermiņa regulēšana. [14 – 17].

Uzdevumu risināšanai tiek ņemti vērā dažādi ierobežojumi, tiek ievērotas tehniskās, ūdenssaimnieciskās, ekoloģiskās un citas prasības.

Uzdevuma risināšanas mērķis – regulēšanas periodā maksimālā ekonomiskā efekta sasniegšana no visu elektroenerģētisko sistēmu darbības. Šādas vienotās elektroenerģētiskās sistēmas galvenie kritēriji ir šādi:

- minimālie ražošanas izdevumi elektroenerģijas ražošanā;
- minimālais vidējais cenu līmenis tirgū piegādājamajai elektroenerģijai;
- maksimālā peļņa piegādātājiem un pircējiem.

2.2 Ilglaicīgā režīmu plānošanas metodika elektroenerģētiskajās sistēmās

Metodika sevī ietver matemātiskā uzdevumu noformulēšanu, skaitliskās risinājuma metodes izvēli, algoritmu izstrādi, padarot skaitļošanas procesu iespējamu pēc darbietilpības, un algoritma īstenošanu datorprogrammas veidā.

Kā plānošanas kritērijs pieņemts summārais mainīgais izdevumu minimums (kurināmais), ražojot elektroenerģiju $TES Z(t)$ apskatāmajā regulēšanas periodā. Sekojot optimuma principam, laika daudzintervālu procesos uzdevuma funkcija var būt attēlota kā [14]:

$$\min Z(t) = \sum_{i=1}^I c_{TES}^i(t) \cdot W_{TES}^i(t) + \alpha_{t+1} \cdot (v_{t+1}), \quad (2.1)$$

kur i - TES numurs;

I - TES kopējais skaits;

$c_{TES}^i(t)$ - i -tajā TES saražotās elektroenerģijas cena intervālā t ;

$W_{TES}^i(t)$ - i -tajā TES saražotās elektroenerģijas apjoms intervālā t ;

$\alpha_{t+1} \cdot (v_{t+1})$ - patēriņa funkcijas mainīgā daļa elektroenerģijas izstrādei TES laikā no intervāla $(t+1)$ līdz regulēšanas perioda beigām;

v_{t+1} - ūdens rezervju vektors HES ūdenskrātuvēs intervāla $(t+1)$ sākumā (intervāla t beigās);

T - regulēšanas periodā apskatāmo intervālu skaits t .

Izvēlētā dinamiskā programmēšanas metode [8 – 10] ļauj:

- vienkāršot kopējo plānošanas uzdevumu, sadalot to vairākos vienkāršākos optimizācijas uzdevumos;
- izskatīt ūdens un elektroenerģētiskos ierobežojumus katra intervāla t beigās regulēšanas gada intervāla laikā;
- rezultātā iegūt ne tikai optimālos meklētos lielumus, bet arī ātru un vienkāršu optimālā ilglaicīgā režīma pārrēķinu gadījumā, ja izmainās iekšējie apstākļi regulēšanas aprēķina laikā, sākot no jebkura uzdotā intervāla t ;
- aprēķināt rezerves un izstrādātā ūdens cenu ieregulēšanas perioda laika intervālos.

Uzdevumu risināšanas izstrādātais algoritms satur vairākus vienkāršojumus, un pieņēmumus, kas ļauj samazināt kopējo uzdevumu darbietilpību un ļauj atrisināt uzdevumus pieņemamā laikā ar datora palīdzību.

2.3 Ūdens un HES saražotās elektroenerģijas cenu noteikšana

Risinājuma gaitā tiek aprēķinātas ne tikai saražotās elektroenerģijas HES optimālās vērtības $W_{HES}^j(t)$ un TES optimālās vērtības $W_{TES}^j(t)$, brīvģaitas ūdens novade $S^j(t)$, ūdens patēriņš caur turbīnām $Q^j(t)$ un ūdens rezerves ūdenskrātuvēs $V^j(t)$, bet arī ūdens un HES saražotās elektroenerģijas cenas [14 – 17].

Aprēķinu gaitā, plānojot ilglaicīgus elektroenerģētisko sistēmu darbības režīmus hidroelektrostacijās, nosaka divus ūdens cenu veidus: ūdens cena uzkrātajam ūdenim katra HES ūdenskrātuvē un patērētā ūdens daudzuma, kas izplūst caur HES turbīnu, cena.

Patērētā ūdens cenas izmantošana dod iespēju atrast HES saražotās elektroenerģijas cenu, ņemot vērā:

- katra HES ūdens ierobežojuma īpatnības;
- ūdens pieplūdes nenoteiktību HES ūdenskrātuvēs;
- HES kaskādes izvietojumu;
- citās elektroenerģētisko sistēmu elektrostacijās saražotās elektroenerģijas apjomu;
- elektroenerģētisko sistēmu tīklu ierobežojumus.

Svarīgi atzīmēt, ka elektroenerģijas cena atspoguļo nevis elektroenerģijas ražošanas pašizmaksu, bet tā ir vienāda ar ietaupītajām apkures izmaksām termoelektrostacijās apskatāmā regulēšanas perioda laikā.

2.4 Ilgtermiņa optimālo režīmu plānošanas metodikas secinājumi

Piedāvātā HES ilglaicīgo optimālo režīmu plānošanas metodika balstīta uz daudzintervālu (dinamisko) elektroenerģijas ražošanas apskatīšanu regulēšanas laika periodā. Metodika ietver uzdevuma matemātisko formulēšanu, dinamiskās programmēšanas metodes kā skaitļošanas procedūras izvēli, algoritma izstrādi un uzdevuma atrisinājumu pieņemamā laika periodā. Metodika dod iespēju aprēķināt rezerves un izstrādātā ūdens cenu, kā arī elektroenerģiju, kas saražota HES optimālā darba režīmā.

HES saražotās elektroenerģijas cena ir atkarīga kā no uzkrātajiem ūdens resursiem, tā arī no papildus ūdens pieplūdes ūdenskrātuvēs. HES darbības novirzes no izstrādes optimālā apjoma noved pie elektroenerģijas cenu līmeņa celšanās kā šajā HES, tā arī citās elektrostacijās.

Ilglaicīgo optimālo režīmu realizācija HES iespējama vairumtirdzniecības tirgus dalībniekiem uzdod saražotās elektroenerģijas cenu. Neprecīza cenas uzdošana HES saražotajai elektroenerģijai noved pie optimizācijas efektivitātes pazemināšanās un pie izdevumu palielināšanās elektroenerģijas ražošanai TEC. Jo lielāka uzstādītā HES jauda, jo precīzāk jābūt uzdotai tās saražotās elektroenerģijas cenai.

2.5 Rīgas Hidroelektrostacijas enerģētisko raksturlīkņu modelēšana

Ergosistēmu darba režīmu regulēšanai, īslaicīgo režīmu optimizācijai un operatīvajai optimizācijai, nepieciešams noteikt analītiskas caurplūdes raksturlīknes (CR) un energonesēja caurplūdes relatīvo pieaugumu raksturlīknes (RPR). HES agregātiem tās konstruē uz eksistējošo caurplūdes grafiku pamata - krituma raksturlīkņēm, ko piegādā izgatavotājrūpnīca vai ko iegūst speciālu eksperimentu rezultātā. Šajā nodaļā ir izskatīta analītiskās caurplūdes raksturlīkņu $Q = f(H, P)$ un relatīvo pieaugumu raksturlīknes $q = f(H, P)$ konstruēšanas metodikas Rīgas HES.

Grafiku analīze parāda, ka caurplūdes - krituma grafiki rāda atkarību $Q = f(H)$ pie dažādu agregātu slodzēm P , kas uzturētas kā konstantes. Analītiskās izteiksmes iegūšanai ir nepieciešams katrai P vērtībai modulēt sakarību $Q = f(H)$, bet šajā gadījumā būtu aptuveni 30 dažādu vienādojumu tikai vienam agregātam, un tos būtu ļoti grūti izmantot režīma optimizācijas procesā. Vienādojumu modeļu sakarību $Q = f(H, P)$ un $q = f(H, P)$ skaita samazināšanai var izmatot mazāko kvadrātu metodi ar modulētu lineāro vai kvadrātisko datu atkarību saskaņā ar noteikto precizitāti.

Lineāram modelim caurplūdes raksturlīkne var modelēt bilineārai raksturlīknei veidā [18]:

$$Q_{ij} = a_0 + a_1 P_i + a_2 H_j + a_{12} P_i H_j, \quad (2.2)$$

kur $i = 1 \div 28$ - hidroagregātu izejas datu tabulas rindas numurs;

$j = 1 \div 41$ - hidroagregātu izejas datu tabulas stabiņa numurs.

Regresijas vienādojumu koeficientu a_0, a_1, a_2, a_{12} atrašanai pēc lineārā modeļa, izmanto mazāko kvadrātu metodi. Aprēķinos slodze P un kritums H parādās normēto vērtību veidā, t.i. pieņemam vērtības robežas no -1 līdz +1.

Nepieciešams, lai kvadrātu novirzes summa (2.2) būtu vismazākā, tādējādi iegūstam F funkciju [18]:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Q_{ij} - (a_0 + a_1 P_i + a_2 H_j + a_{12} P_i H_j))^2 = \min, \quad (2.3)$$

kur $m = 28$ - rindas hidroagregātu izejas datu tabulā;

$n = 41$ - stabiņš hidroagregātu izejas datu tabulā.

Iegūtie rezultāti pēc ūdens caurplūdes raksturlīknes modeļa (2.2) apkopoti tabulā.

Nelineāram modelim caurplūdes raksturlīkni var modelēt bilineāras raksturlīknes veidā [18]:

$$Q_{ij} = a_0 + a_1 P_i + a_2 H_j + a_{12} P_i H_j + a_{11} P_i^2 + a_{22} H_j^2 . \quad (2.4)$$

Tāpat kā lineāram modelim vienādojuma (24) koeficientu $a_0, a_1, a_2, a_{12}, a_{11}, a_{22}$ atrašanai izmantosim mazāko kvadrātu metodi.

Nepieciešams, lai kvadrātu novirzes summa (24) būtu vismazākā, tādējādi iegūstam F funkciju [18]:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Q_{ij} - (a_0 + a_1 P_i + a_2 H_j + a_{12} P_i H_j + a_{11} P_i^2 + a_{22} H_j^2))^2 = \min . \quad (2.5)$$

Iegūtie rezultāti pēc ūdens caurplūdes raksturlīknes modeļa (2.4) apkopoti tabulā.

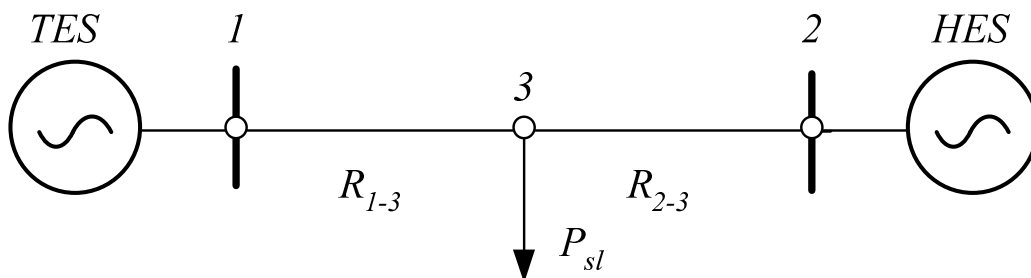
Optimizējot režīmu energosistēmās ar hidroelektrostacijām, izmanto Lagranža nenoteikto reizinātāju metodi. Termoelektrostacijas (TES) un hidroelektrostaciju (HES) paralēlas darbības shēma parādīta 2.2 att. Uzskatīsim TES kā nosacīti ekvivalentu staciju, kas aizstās sistēmas TES kopu. Aktīvās jaudas bilances vienādojums modelēs energosistēmas stacionāro režīmu:

$$N_i = P_{TESi} + P_{HESi} - P_{sl} - \Delta P^i = 0, \quad i = \overline{1, n} . \quad (2.6)$$

Noteikumam jābūt spēkā katrā i -tajā laika intervālā un arī ūdens bilancei visos n intervālos:

$$M = \sum_{i=1}^n W_i \Delta t_i - W = 0 \quad (2.7)$$

kur $\sum \Delta t_i = T$. Šeit W_i - HES ūdens patēriņš laika vienībā; T - regulēšanas cikla ilgums; W - kopējais ūdens daudzums, ko HES patērēs regulēšanas cikla laikā (diennaktī, nedēļā, gadā utt.).



2.1 att. Energosistēmas shēma

Mērķfunkcija ir TES izdevumi elektroenerģijas ražošanai regulēšanas ciklā T .

$$C = \sum_{i=1}^n C_i (P_{TESi}) \cdot \Delta t_i. \quad (2.8)$$

Sastādīsim Lagranža funkciju:

$$L = \sum_{i=1}^n C_i (P_{TESi}) \cdot \Delta t_i + \sum_{i=1}^n \lambda_i N_i + \lambda_0 M. \quad (2.9)$$

Optimālie jaudu sadales noteikumi starp TES un HES:

$$\frac{\partial L}{\partial P_{TESi}} = \frac{\partial C_i}{\partial P_{TESi}} \cdot \Delta t_i + \lambda_i \cdot \left(1 - \frac{\partial \Delta P^i}{\partial P_{TESi}} \right) = 0. \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{HESi}} = \lambda_i \cdot \left(1 - \frac{\partial \Delta P^i}{\partial P_{HESi}} \right) + \lambda_0 \cdot \frac{\partial W_i}{\partial P_{HESi}} \cdot \Delta t_i = 0. \quad (2.11)$$

Apzīmēsim:

$$\frac{\partial C_i}{\partial P_{TESi}} = c_i \varepsilon_i; \quad \frac{\partial W_i}{\partial P_{HESi}} = \omega_i.$$

No izteiksmes (2.10) noteiksim:

$$\lambda_i = - \frac{c_i \varepsilon_i \Delta t_i}{1 - \sigma_{TESi}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2.12)$$

kur $\sigma_{TESi} = \frac{\partial (\Delta P^i)}{\partial P_{TESi}}$ - zudumu relatīvais pieaugums. Ievietosim λ_i i -tajā sistēmas

(2.11) vienādojumā:

$$- \frac{c_i \varepsilon_i \Delta t_i}{1 - \sigma_{TESi}} \cdot \left(1 - \frac{\partial (\Delta P^i)}{\partial P_{HESi}} \right) + \lambda_0 \omega_i \Delta t_i = 0$$

un iegūsim

$$\frac{c_i \varepsilon_i}{1 - \sigma_{TESi}} = \lambda_0 \cdot \frac{\omega_i}{1 - \sigma_{HESi}} = \mu, \quad (2.13)$$

kur: λ_0 - ūdens cena; $\lambda_0 \omega_i$ - relatīvās elektroenerģiju izmaksu izmaiņas HES-ā; μ - sistēmas relatīvais pieaugums. Var teikt, ka ar nenoteikto Lagranža reizinātāju λ_0 HES ir reducēta (nosacīti pārveidota) par ekvivalentu termoelektrostaciju TES.

3. Elektroenerģijas piegādes adresācija

3.1 Problēmas nostādnes

Pārdevēju un pircēju mijiedarbība EES notiek caur elektrisko tīklu, kuram ir spēkā Oma un Kirhofa likumi. Uz to pamata tiek veidoti matemātiskie modeļi, kas tiek

izmantoti lai meklētu pieļaujamus un optimālos risinājumus. Tirgus apstākļu modelēšana prasa ievest šādos modeļos ekonomiskos mainīgos un ņemt vērā to savstarpējās saistības - gan savā starpā, gan ar fizikālajiem mainīgajiem, kā arī ierobežojumus abu tipu mainīgajiem. Šādus modeļus sauc par ekonomiski-tehniskajiem modeļiem [19 – 21]. Ar to palīdzību tiek analizēts kā tehniskais, tā arī ekonomiskais EES stāvoklis plānojot elektroenerģētiskās sistēmas režīmus, tiek veikta esošā režīma operatīvā novērtēšana, bijušo režīmu analīze.

3.2 Elektroenerģijas piegādes adresācijas problēma

Tirgus apstākļos, nosakot ģenerētās aktīvās jaudas sadalījumu starp patērētājiem, rodas jautājums par katras stacijas piedalīšanās daļu nodrošinot katru konkrēto slodzi. Šī uzdevuma atrisinājums ļauj sadalīt konkrētas stacijas elektroenerģijas ražošanas izmaksas starp visiem šīs enerģijas patērētājiem godīgā veidā. Dotajā nodaļā tiek risināts vienkārša grafa algoritma izveidošanas uzdevums, lai noteiktu stacijas piedalīšanās daļu slodzes nodrošināšanā. Tiek ievests jēdziens *adresācijas matrica* A_d kurā rindiņu skaits ir vienāds ar slodžu skaitu, bet stabiņu skaitu nosaka staciju vai ģenerāciju skaits:

$$P_l = A_d P_g, \quad (3.1)$$

kur: P_l , P_g – slodzes un ģenerācijas jaudas vektori, kuru komponentu skaits ir vienāds attiecīgi ar slodžu un ģenerāciju skaitu.

Adresācijas matricas izveides pamatā ir ceļa meklēšana orientētā grafā, kur zaru orientācija sakrīt ar jaudas plūsmu virzienu zaros. Svarīgi adresācijas matricas izveides procesā ir visu ceļu noteikšana no katra ģeneratora uz katru slodzi. Tam var izvēlēties vienu no grafu teorijas izstrādātajiem algoritmiem ceļa meklēšanai starp uzdotajiem mezgliem orientētā grafā [20 – 23].

Orientētam grafam ceļa meklējuma algoritms no ģenerējošā mezgla i uz slodzes mezglu j , sastāv no sekojošiem soļiem:

1. Pieņemam, ka mezgls i pieder kārtai $k = 0$.
2. Izdalīt zarus, kas iziet no i -tā mezgla un atzīmēt to gala mezglus kā piederošus kārtai $k + 1$.
3. Atkārtot katram $k + 1$ kārtai piederošajam mezglam 2. punktā aprakstīto operāciju kamēr izpildās viens no nosacījumiem:

- mezgls, kas ierakstīts kārtā $k + 1$ nesakrīt ar mezglu j ;
- no $k + 1$ kārtas mezgla neiziet neviens zars (gala mezgls).

4. Visi zari, kas saista i -to nulltās kārtas mezglu ar j -tajiem sekojošo kārtu mezgliem veido meklējamās ceļus starp mezgliem i un j .

Tirgus ekonomikas apstākļos, kad ir svarīgi noteikt pārvadāmās elektroenerģijas daudzumu no konkrētas ģenerācijas stacijas uz konkrētu slodzi, šo metodi var izmantot ekonomiskajiem aprēķiniem, lai noteiktu maksu par adresātam piegādāto elektroenerģiju. Tāpat šo metodiku var izmantot lai noteiktu maksājumus par elektroenerģijas tranzītu pa elektropārvades līnijām.

3.3 Aktīvās un reaktīvās jaudas pārvades adresācija

Aktīvās un reaktīvās jaudas sadalījuma gadījumā starp patērētājiem rodas jautājums par katras stacijas piedalīšanās daļas konkrētas slodzes nodrošināšanai un jaudas plūsmu noteikšanu no katra ģenerators pa elektriskā tīkla aizvietošanas shēmas zariem. Tiek piedāvāts algoritms, kas ļauj atrisināt adresācijas problēmu liela izmēra shēmām [24].

Stacijas piedalīšanās daļas konkrētas slodzes nodrošināšanā un jaudas plūsmu, kas plūst no katra ģenerators pa elektriskā tīkla aizvietošanas shēmas zariem, noteikšana ir ļoti svarīgi lai novērtētu:

- atbildību par zudumu vērtību elektrisko tīklu elementu;
- samaksu par tranzītu;
- elektroenerģijas ražotāju un patērētāju atbildību par pieļaujamā režīma saglabāšanu (režīma mainīgo lielumu noteikšana uzdotajās tehnoloģiskajās robežās);
- reaktīvās jaudas lokālo bilanci;
- elektroenerģijas cenas korekciju ņemot vērā zudumus un vairākiem citiem uzdevumiem.

Interesi par šo problēmu lielākoties nosaka tirgus attiecību attīstība darbojoties elektroenerģētiskajām sistēmām.

Adresācijas uzdevums, kā jau tika atzīmēts ir plūsmu sadalījuma dekompozīcijas uzdevums pa n apakšsistēmām, katra no kurām ir saistīta ar vienu no n ģeneratoriem. Piedāvātā algoritma pamatā ir ceļā meklēšana orientētā grafā, kura zaru orientācija sakrīt ar zaru jaudu plūsmu virzienu. Tāda meklējuma rezultātā tiek izveidots koks,

kura pamatā ir ģeneratora mezglu. Šis mezgls tiek pieskaitīts pie koka mezglu pirmā līmeņa. Tālākie koka izveides algoritma soļi:

pie otrā līmeņa tiek pieskaitīti mezgli, kurus var sasniegt no pamata mezgla, virzoties zara orientācijas virzienā; šie zari savieno pirmo un otro līmeni;

pie trešā līmeņa pieskaitīti mezgli, uz kuriem var nokļūt zaru orientācijas virzienā no katra no otrā līmeņa mezgliem;

analogiski tiek noteikti ceturtnā, piektā un sekojošo līmeņa mezgli un tos savienojošie zari.

Mezgls tiek uzskatīts par koka beigu mezglu, ja no tā nevar nokļūt uz citiem mezgliem, kas var notikt, ja mezgls ir radiāls vai arī tas ir plūsmu sadalījuma mezgls, no kura var iziet tikai slodze.

Ir parādīts arī adresācijas algoritma realizācijas piemērs.

3.4 Grafu teorijas pielietojums adresācijas problēmas risināšanā

Grafu teorija ir pietiekami nobriedusi un īpaši piemērota lai risinātu jaudas adresācijas problēmu un citus tīkla topoloģijas jautājumus [25]. Šajā gadījumā tiek lietots virzītais grafs. Grafa virsotnes ir sistēmas ģenerācijas un slodzes mezgli un grafa šķautnes ir līnijas un transformatori. Katras šķautnes virziens sakrīt ar jaudas plūsmas virzienu. Aktīvās jaudas virzītais grafs var atšķirties no reaktīvās jaudas grafa pēc šķautņu virziena.

Pirmām kārtām ir apskatītas un pierādītas atbilstošās lemmas, kas parāda nepieciešamos nosacījumus, lai garantētu metodes iespējas noteikt jaudas plūsmas. Tad, balstoties uz plaši pielietoto mezglu-līniju saistīto matricu, tiešās un apgrieztās secības ir viegli nosakāmas. Piedāvātā metode ir ļoti efektīva un piemērota lietošanai reālās enerģētiskajās sistēmās.

3.5 Reaktīvās jaudas adresācija

Ģenerētās reaktīvās jaudas sadalījuma adresācijas noteikšanas algoritms nedaudz atšķiras no ģeneratoru aktīvās jaudas sadalījuma adresācijas uzdevuma [26]. Galvenokārt atšķirība ir tajā, ka nepieciešams veikt zaru kapacitatīvo vadītspēju uz zemi aprēķinu, kas iekļauti Π -veida elektropārvades līniju aizvietošanas shēmā, kā arī transformatoru induktīvās vadītspējas, kas iekļautas to Γ -veida aizvietošanas shēmās.

Tāpat kā aktīvās plūsmas sadalījuma gadījumā, sagatavošanās etapā darbam ar reaktīvās plūsmas sadalījuma adresācijas algoritmu, tiek aprēķinātas reaktīvās injekcijas vērtības. Tā kā reaktīvo jaudu ģenerē ne tikai ģeneratori, bet arī reaktīvās jaudas avoti, kas ir arī zaru vadītspējas, tad mezglu skaits, kuros rezultējošā reaktīvās jaudas injekcija ir ģenerācija, vispārīgā gadījumā var būt lielāks par ģeneratoru skaitu shēmā. Reaktīvās jaudas ģenerācijas adresācijas uzdevums ir jārisina kā visiem ģeneratoriem, tā arī visām injekcijām – reaktīvās jaudas avotiem. Vēl viena reaktīvās jaudas sadalījuma īpatnība ir saistīta ar līniju kapacitatīvo vadītspēju uz zemi esamību. Reaktīvās jaudas var plūst no sākuma un beigu līniju mezgliem uz tās vidu, to summa ir vienāda ar jaudas zudumiem līnijā. Lai atrisinātu adresācijas uzdevumu priekš tādas līnijas vidus, nepieciešams ievest papildus mezglu un ievietot tajā slodzi, kas vienāda ar jaudas zudumu līnijā.

4. Elektroenerģijas mezglu tirgus modelēšana

4.1 Problēmas nostādnes

Ir zināms, ka optimālā tirgus stratēģija elektroenerģijas cenu veidošanā ir vienlīdzība starp cenu un elektroenerģijas ražošanas relatīvo izmaksu pieaugumu (ievērojot zudumus tīklā). Šāda cena tiek dēvēta par marginālo cenu. Protams, tirgus cena atšķirsies no marginālās, jo tā papildus sevī ietver arī peļņas komponenti, ir atkarīga no piedāvājuma un pieprasījuma un ir ierobežota ar sociāli-politiskajiem faktoriem. Tomēr, marginālās cenas ir jāzina, lai novērtētu tirgus cenas. Vienota marginālā cena nepietiekoši pilnīgi ievēro režīma, teritoriālās, strukturālās un citas specifiskās pievienojuma īpatnības. Ir acīmredzams, ka elektroenerģijas patērētājiem, kas atrodas attālināti no ģenerācijas centriem, marginālajai cenai jābūt atšķirīgai no patērētājiem, kas atrodas blakus ģenerācijas centriem. Cenu starpību, pirmām kārtām, var skaidrot ar jaudas un enerģijas zudumiem elektriskajos tīklos. Tāpēc par marginālo cenu var runāt kā vienotu lielumu visai elektroenerģētiskajai sistēmai (EES) kopumā, tā arī par atsevišķiem lielumiem atsevišķos EES rajonos – mezglos [27 – 30].

Pēc definīcijas mezglu marginālā cena (MMC – turpmāk tekstā mezglu cena MC) tiek apskatīta kā visa elektroenerģētiskā tirgus elektroenerģijas ražošanas un sadales izmaksu atvasinājums pēc slodzes izmaiņas noteiktos EES mezglos. Slodzes

izmaiņa vienā EES mezglā ir saistīta ar viena vai vairāku ģeneratoru izstrādes izmaiņu, plūsmu sadalījuma izmaiņu, un, protams, kopējo sistēmas jaudas zudumu izmaiņu.

Mezglu marginālo cenu veidošana ir viena no svarīgākajām elektroenerģētiskā tirgus modeļa raksturiezīmēm.

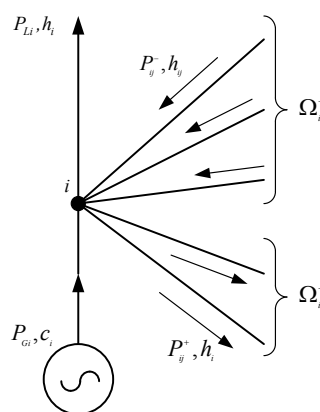
Konkurences elektroenerģētiskā tirgus mezglu cenas var tikt uzskatītas par cenu signāliem, kas tiek izmantoti, lai noteiktu atsevišķu elektroenerģijas ražotāju svarīgumu un to iespēju manipulēt ar cenām. Atsevišķos gadījumos, zinot elektroenerģijas mezglu cenas, var noteikt kuri tirgus dalībnieku cenu pieteikumi ietekmē konkurences tirgus rezultātus.

4.2 Mezglu cenu noteikšana elektroenerģijas tirgus dalībniekiem

Elektroenerģētikas reformu ar pietiekamu precizitāti var iztēloties divu savstarpēji saistītu procesu veidā – restrukturizācija un nozares pāriešanu no regulētu cenu veidošanas uz tehniski ekonomisko modeli. Šāda veida modeļi ļauj precīzāk ievērot izmaksas, kas saistītas ar elektroenerģijas ražošanu un pārvadi.

Par mezglu cenu noteikšanas matemātiskā modeļa pamatu tiek pieņemti sekojoši atzinumi [31]:

1. Katrs elektriskā tīkla mezgls tiek apskatīts kā elementārais tirgus (ET). Plūsmas (jaudas), kas ieplūst mezglā (ET) un ģenerācijas tajā tiek apskatīti kā pārdevēji, kas piegādā savu produkciju – elektroenerģiju par savām cenām, vai noteiktām ārpus dotā tirgus (plūsmām), vai ģeneratoru paziņotām. Plūsmas un slodzes, kas izplūst no mezgla (ET) tiek uzskatītas par pircējiem. Visiem dotā mezgla pircējiem elektroenerģijas cena ir vienota. ET shēma ir dota 4.1. att.



4.1. att. Elementārais tirgus elektriskā tīkla mezglā

2. Katram ET saglabājas ieplūstošo un izplūstošo jaudu fizikālā bilance, t.i. pirmais Kirhofa likums. Ar jaudu, kā agrāk tika minēts, saprot stundas vidējā jauda (skaitliski vienāda ar enerģiju par stundu). Jaudas bilances modelis elektroenerģētiskās sistēmas mezglos tiek pieņemts:

$$-P_{Gi} + P_{Li} + \sum P_{ij}^+ - \sum P_{ij}^- = 0, \quad i = \overline{1, n} \quad (4.5)$$

kur P_{Gi} - aktīvā jauda, kas ģenerēta mezglā i ;

P_{Li} - aktīvā jauda slodzei mezglā i ;

P_{ij}^+ - plūsma, kas plūst no mezgla i uz j pa līniju $i-j$;

Q^+ - mezglu kopa, kas saistīta ar i -to, uz kuriem plūst plūsmas no mezgla i ;

P_{ij}^- - plūsma, kas plūst no mezgla j uz mezglu i pa līniju $i-j$;

Q^- - mezglu kopa, kas saistīta ar i -to, no kuriem plūst plūsma P_{ij}^- ;

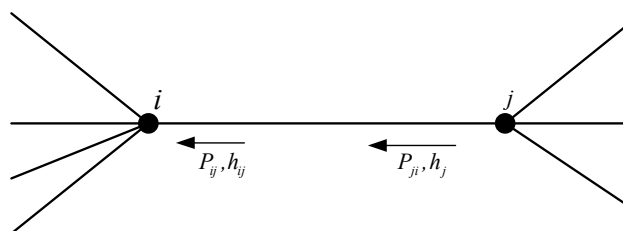
n - mezglu skaits (ET).

3. Katrai mezglā i ieplūstošā jaudai P_{ij} ir pašai sava cena h_{ij} .

4. Katrs i -tā mezgla ģenerators piesaka ET savu jaudu P_{Gi} un tās ražošanas izmaksas $C(P_{Gi})$ vai, atsevišķā gadījumā, jaudu P_{Gi} un cenu c_i .

5. No i -tā mezgla izplūstošās plūsmas un slodzes, tiek apskatītas kā pirkumi pēc dotajam mezglam vienotas cenas h_i , kas iegūta balstoties uz mezglā ieplūstošo plūsmu un ģenerāciju cenu un pārdošanas apjomu sajaukšanu. Katram i -tajam mezglam saglabājas finansiālā bilance:

$$\left. \begin{aligned} -C_i(P_{Gi}) - \sum_{j \in \Omega_i^-} P_{ij}^- \cdot h_{ij} + P_{Li} \cdot h_i + \sum_{j \in \Omega_i^+} P_{ij}^+ \cdot h_{ij} = -P_{Gi} \cdot c_i - \sum_{j \in \Omega_i^-} P_{ij}^- \cdot h_{ij} + h_i \cdot (P_{Li} + \sum_{j \in \Omega_i^+} P_{ij}^+) = 0, \\ i = \overline{1, n}. \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$



4.2. att. Elektriskā tīkla saites bilance

6. Balance saitē i - j (4.2. att.) liecina par to, ka plūsmas cenai līnijas i - j sākumā ir jābūt vienādei ar plūsmas cenu i - j līnijas beigās, t.i.:

$$h_{ij} \cdot P_{ij} = h_j \cdot P_{ji}, \quad (4.7)$$

kur P_{ij} - plūsma i - j līnijas beigās;

h_j - mezglā cena mezglā j .

Vienādojums (4.7) ir svarīgākais apskatāmajā modelī. Lielumu $C_{ij} = h_j \cdot P_{ij} = h_{ij} \cdot P_{ji}$ var nosaukt par naudas plūsmu pa līniju i - j . Šī naudas plūsma ir invarianta līnijas parametriem.

Sistēmu (4.9) var attēlot matricas formā kā:

$$\begin{pmatrix} P_{L1} + \sum_{j \in \Omega_1^+} P_{1j} & -P_{21} & \dots & -P_{n-1,1} & -P_{n1} \\ -P_{12} & P_{L2} + \sum_{j \in \Omega_2^+} P_{2j} & \dots & -P_{n-1,2} & -P_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -P_{1n} & \dots & \dots & -P_{n-1,n} & P_{Ln} + \sum_{j \in \Omega_n^+} P_{nj} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1(P_{G1}) \\ C_2(P_{G2}) \\ \vdots \\ C_n(P_{Gn}) \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

vai reducētā veidā:

$$A \cdot h = C \quad (4.9)$$

Matricas vienādojumā (4.8) koeficientu matrica A ir nesimetriska, jo, ja $P_{ij}^+ \neq 0$ tad $P_{ij}^- = 0$, t.i. matricas A elementus saista sakarība:

$$a_{ij} \cdot a_{ji} = 0. \quad (4.10)$$

Visi matricas A nediagonālie elementi ir negatīvi, t.i. $a_{ij} \leq 0$.

Mezglu cenu noteikšanas secība ietver sevī sekojošus posmus:

1. Tiek uzdots (tiek aprēķināts pēc jebkuras pieejamās nostabilizējošā režīma aprēķina programmas vai tiek pieņemts pēc stāvokļa novērtējuma uzdevuma rezultātiem) elektriskā tīkla bilances (plūsmu sadalījuma) režīms. Tādā veidā plūsmas P_{ij} un P_{ji} ir režīma ($i = \overline{1, n}; i \neq j$) zināmie parametri.

2. Tiek apskatīta katra ģenerators cenas pieteikums $C_i(G_i)$ vai tā izdevumu raksturlīkne $C_i(P_{Gi})$ un tā tirgū izdotā jauda.

3. Tiek veidota matrica A un vienādojuma (4.8) labajās puses brīvo (zināmo) elementu vektors.

4. Katram slodzes grafika intervālam tiek risināta vienādojuma sistēma (4.8) attiecībā pret cenu vektoru h . Mezglu cenas h_i tiek noteiktas tekošajā režīmā laika intervālā t ($t = 1, 2, \dots, 24$).

Apskatītais mezglu cenu noteikšanas algoritms var tikt izmantots pie dažāda veida izdevumu funkcijām (kvadrātiskām, pakāpjveida, tabulārām utt.) priekš elektroenerģijas izstrādes ar ģeneratoriem.

Pāreja no plūsmu bilances pa mezgliem un līnijām uz attiecīgajām finansiālajām bilancēm, ļauj iegūt objektīvu cenu novērtēšanu patērētāju un ģenerācijas mezglos.

Parādīts arī mezglu cenu noteikšanas algoritma realizācijas piemērs.

4.3 Jaudas piegāžu adresācijas principa realizācija mezglu cenu noteikšanai.

Tiek apskatīsim piemērs, lai parādītu adresācijas algoritma darbību, izmantojot aktīvo plūsmu sadalījuma rezultātus, kas iegūti izmantojot datorprogrammu “MUSTANG” stacionārā režīma aprēķiniem četriem dažādiem elektroenerģētiskās sistēmas režīmiem [32].

Aprēķini tiek veikti izmantojot reāli eksistējošu liela izmēra elektroenerģētisko sistēmu – Latvijas 330 kV elektrotīklu.

Veiktie aprēķini esošai elektrosistēmai apliecina adresācijas koeficientu izmantošanas lietderību attīstoties finansiāli-ekonomiskajām attiecībām starp elektroenerģijas tirgus dalībniekiem.

4.4 Energosistēmas režīmu ietekme uz elektroenerģijas mezglu cenām

Šajā sadaļā tiek veikta elektroenerģētiskās sistēmas režīma izmaiņu ietekmes novērtējums uz elektroenerģijas mezglu cenām. Šis novērtējums ir pārbaudīts uz reāli eksistējošas Latvijas 330 kV elektrosistēmas piemēra.

Iespējams noteikt arī pārmaksu patērētājiem, ja kāds no piegādātājiem paaugstina elektroenerģijas cenu piedāvājumu, lai iegūtu papildus peļņu

Elektroenerģētiskās sistēmas režīma izmaiņas ietekmē mezglu cenu izmaiņu sistēmas mezglos.

Mezglu cenu izmaiņu lielumu lielā mērā ietekmē elektroenerģijas piegādātāju cenu piedāvājumu vērtības un ražošanas izmaksas.

Latvijas elektroenerģētiskajai sistēmai būtu lietderīgi analizēt elektroenerģijas mezglu cenas saistībā ar starpsistēmu jaudas plūsmas ar kaimiņvalstu energosistēmām.

Secinājumi un rekomendācijas turpmākajiem pētījumiem

Promocijas darba rezultāti

- Ņemot vērā tirgus ekonomikas ietekmi uz enerģētikas vadību ir jāizdara nopietnas izmaiņas elektroenerģētisko sistēmu modeļu veidošanā, jāņem vērā papildus faktori, kas iepriekš tika uzskatīti par maznozīmīgiem.
- Ievērojot tirgus ekonomikas attiecības enerģētikā, ir izpētīta savstarpējo attiecību problēma starp jaudas piegādātājiem un patērētājiem, lai būtu iespējams noteikt katra piegādātāja piedalīšanās daļu konkrēta patērētāja slodzes noseģšanā. Šī uzdevuma atrisinājuma rezultāti ļauj taisnīgi sadalīt elektroenerģijas ražošanas izdevumus konkrētā elektrostacijā starp visiem šajā elektrostacijā saražotās elektroenerģijas patērētājiem. Turklāt, elektroenerģijas adresāciju var izmantot elektroenerģijas mezglu cenu noteikšanai. Šīs cenas ir viens no svarīgākajiem elektroenerģētiskās sistēmas tehniskās un finansiālās analīzes rādītājiem risinot režīmu plānošanas uzdevumus, esošā režīma novērtējumā un iepriekšējo režīmu analīzē. Elektroenerģijas mezglu cenu sastāvdaļas ir ģenerācijas ražošanas izdevumi, ekspluatācijas izdevumi, jaudas zudumu izmaksas, izmaksas, kas saistītas ar tīklu ierobežojumu pārkāpumiem un elektroapgādes drošuma nodrošināšanu.
- Ir izpētīta analītiskā ūdens caurplūdes raksturlīkņu un ūdens caurplūdes relatīvo pieaugumu raksturlīkņu veidošanas iespēja hidroelektrostacijām izmantojot regresīvās analīzes metodi. Tā rezultātā ir noteiktas izmaksu un relatīvo pieaugumu raksturlīkņu modeļi Rīgas HES.
- Ir veikta lineārā un kvadrātiskā Rīgas HES izmaksu raksturlīkņu modeļa analīze. Ir noteikts, ka lineārais Rīgas HES izmaksu raksturlīkņu modelis aproksimējas ar bilineāru funkciju pēc ūdens spiediena un izstrādātās jaudas. Vidējā kvadrātiskā kļūda šim modelim eksperimenta punktos nepārsniedz 5,1%. Kvadrātiskajam modelim šī kļūda sasniedz 27,5%.
- Ir izstrādāts algoritms elektroenerģijas piegāžu adresācijas matricas izveidošanai, kas balstās uz ceļu noteikšanu orientētā grafā, kur zaru orientācija sakrīt ar jaudas plūsmu virzienu šajos zaros (attiecīgajās līnijās).
- Ir veikta adresācijas matricas aprēķina aprobācija kā piemēru izmantojot Latvijas energosistēmas 330 kV elektriskā tīkla shēmu.

- Ir parādīts, ka elektroenerģijas mezglu cenas, salīdzinot ar marginālajām cenām, kas aprēķinātas pēc pieauguma principa ļauj samazināt elektroenerģijas cenas patērētājiem.
- Ir veikta elektroenerģiju mezglu cenu atkarības analīze no elektroenerģētiskās sistēmas režīma izmaiņām regulēšanas perioda laikā.
- Izstrādāts un aprobēts elektroenerģijas mezglu cenu aprēķina algoritms kā piemēru izmantojot Latvijas energosistēmas 330 kV elektriskā tīkla shēmu.

Rekomendācijas turpmākiem pētījumiem

- Ir iespējams izstrādāt ūdens caurplūdes raksturlīknes un ūdens caurplūdes relatīvo pieaugumu raksturlīknes Pļaviņu HES un Ķeguma HES.
- Nepieciešams noteikt ūdens caurplūdes raksturlīknes un ūdens caurplūdes relatīvo pieaugumu raksturlīknes Daugavas HES kaskādei. Zinot šīs raksturlīknes un zinot raksturlīknes termoelektrostacijām ir iespējams paaugstināt Latvijas elektroenerģētiskās sistēmas īslaicīgās optimizācijas operativitāti, izmantojot klasiskās optimizācijas uzdevumu risināšanas metodes.
- Nepieciešams noteikt termoelektrostaciju elektroenerģijas ražošanas reālo izmaksu vērtības vai konkrētas sakarības un pamatotas to peļņas robežas. Tas ļaus novērtēt iespējamās elektroenerģijas mezglu cenu vērtības un tādējādi koriģēt elektroenerģijas cenu patērētājiem.
- Ir nepieciešams izveidot ekvivalento apvienoto Baltijas valstu, Krievijas un Baltkrievijas energosistēmu modeli ar mērķi spēt modelēt elektroenerģijas vidējās svērtās mezglu cenas slodzes mezglos (atsevišķās energosistēmās) diennakts periodā, kas ir pamats „nākamās dienas” tirgus funkcionēšanai.

Literatūra

1. Бартоломей П.М., Летун В.М. Проблема формирования ценовых заявок //- Екатеринбург: Вестник УГТУ-УПИ. Сер. Энергосистема: управление, качество, конкуренция. - 2004, № 12 (42), с. 31 – 35.
2. Гамм А.З., Васильев М.Ю. Эскизы моделей рыночных механизмов в электроэнергетике. - Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 1999, № 1. - 50 с.
3. Ерохин П.М., Обоскалов В.П. Ценовые заявки на конкурентном рынке электрической энергии //- Екатеринбург: Вестник УГТУ-УПИ. Сер. Энергосистема: управление, качество, конкуренция. - 2004, № 12, с. 52 - 56.

4. Папков Б.В., Куликов А.Л. Вопросы рыночной электроэнергетики. Н.Новгород, изд. Волго Вятской академии государственной службы, 2005 г. 282 с.
5. Абызов М.А., Хлебников В.В. Экономические аспекты реформирования российской электроэнергетики // Энергия: экономика, техника, экология, 2004, № 1, с. 18 - 25.
6. Гамм А.З., Васильев М.Ю. Эскизы рыночных механизмов в электроэнергетике. - Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 1999, № 1. -50 с.
7. Ерохин П.М. (Yerohin P.M.). Задачи и технологии оперативно-диспетчерского управления режимами ЕЭС в конкурентно-рыночной энергетике России. Автореферат диссертации на соискание уч.степени докт.техн. наук. - Екатеринбург: УГТУ - УПИ, 2005. - 48 с.
8. Синьков В.М. и другие, Оптимизация режимов энергетических систем. Киев, Вища школа, 1976 г. 308 с.
9. Венников В.А. Журавлёв В.Г. Филлипова Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. М.: Энергоиздат, 1981 г. 464 с.
10. V Dāle, Z Krišāns, O Paegle. Elektrisko tīklu attīstības dinamiskā optimizācija (kr. val.) Rīga, Zinātne, 1990 g. 248 lpp.
11. Мельников Н. А. Реактивная мощность в электрических сетях. – М: Энергия, 1975 – 128 с.
12. Карпов Ф. Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях. – М.: Энергия, 1975 – 182 с.
13. Аюев Б.И., Ерохин П.М., Паниковская Т.Ю. Виды аукционов и стратегии их участников //- Екатеринбург: Вестник УГТУ-УПИ. Сер. Энергосистема: управление, качество, конкуренция. - 2004, № 12 (42), с. 19 – 23.
14. Легалов Д. И. Поломарчук С. И. Долгосрочное планирование режимов электроэнергетике систем с ГЭС.
15. Pereira M., Compodinico N., Kelman R. Long-term Hydro Scheduling Based on Stochastic Models – Internatioan Conference o Electric Power System Operations and Management (EPSOM 98) September, 1998 – Zurich, Switzerland.
16. Fosso O., Al Abbas, abdullah M. Long-term Operation Planning of Hydro-Thermal Power Systems – Electra, October 2000, No 292.
17. Леголов Д.И. Определение цены электроэнергии выработаемой на ГЭС, с использованием метода динамического программирования - Иркутск, изд. ИЦЭМ СО РАН, 2004.
18. О. Н. Касандрова, В. В. Лебедев. Обработка результатов наблюдений. – Москва: Наука, 1970. – 103. с.
19. G.Exposito, J.M. Riquelme Santos, T.G. Garsia, E.A. Ruiz Valasco. Fear allocation of transmission power losses. IEEE Trans. Power Syst., 2000. Vol.15, No 1, pp. 184 – 188.
20. Wu Felix F. Ping Wei. Power transfer allocation for open access using graph theory – fundamentals and applications in system without loopflow. IEEE Trans. Power Syst., 2000, Vol 15, No3, pp. 923-929.
21. Brovyakov Yu.A., Gamm A. Z., Golub I.I. Construction of contribution factors matrix. Energy system: control, quality, security: Collected papers of the Conference: USTU-UPI, 2001 pp. 16 – 20.
22. Janusz W. Bialek. Matrix based versus graph based approach to electricity trasing. IEEE Power Engineering Society 2001 Winter Meeting.

23. Tang G. A Quick and practicable power flow tracing method on electric energy market. Part I: Theoretic fundament. IEEE Power Engineering Society 2001 Winter Meeting, advance Program, Jan. 28 – Feb.1, 2001, Columbus, Ohio, USA.
24. Gamm A.Z., Golub I.I. Grishin Y.A., Voitov O.N. a Graph Approach to Determining the Contribution Factors of Electric Power Supplies and Losses. MEPS '02, 2002, Wroclaw, Poland, pp. 215 – 220.
25. Gamm A.Z. New approaches to the solution of the problem of the control room control of electric power systems// Russian academy of science . Power engineering, 1991, Nr. 4, pp. 12 -22.
26. Gamm. A.Z., Golub I.I. Contribution of active and reactive power transmission in electrical power system. “Electrichestvo” No 3, 2003 pp. 9 – 16.
27. Schweppe F.C., Caramanis M.C., Tabors R.D. Evaluation of sport price based electricity rates // IEEE Trans. on PAS, vol. PAS - 104, No. 7 , July 1985.
28. Stamtsis G.C., Christiansen J., Erlich I. Evaluation of Power Systems Congestions Using Nodal Price Analysis. Proceedings of the International Symposium MEPS' 02. Poland, Wroclaw, 2002, pp. 25 – 30.
29. Васьковская Т.А. Показатели разницы узловых цен на оптовом рынке электроэнергии // Электричество. - 2007, № 2, с. 23 - 27.
30. Gamm A. Z., Golub I. I., Batunin A. V., Gamm A. A. Nodal weighted average prices for electrical power. – Electricity, 2005, No 10, p. 17 – 24.
31. Gamm A.Z., Golub I.I., Gamm A.A. Two algorithms of determination of node prices on electric power // AmSU News. Russia, Irkutsk, 2003, vol.21, pp.43 – 48.
32. Ivanovs V., Rimarev V., Gerhards J., Mahnitko A. Calculations of Steady and transient states in the complex power systems according to the program “ MUSTANG” // 5 – th International Conference – Control of Power & Heating Systems 02, Zlin, Czech Republic, May 21 – 22, 2002.