

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte  
Enerģētikas institūts

**Svetlana BERJOZKINA**

Doktora studiju programmas „Enerģētika un elektrotehnika” doktorante

**AUGSTSPRIEGUMA ELEKTROLĪNIJU  
OPTIMIZĀCIJAS PAŅĒMIENI**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
Dr. habil. sc. ing., profesors  
**A.S.SAUHATS**

Zinātniskais vadītājs Dr. sc. ing., profesors <b>E.VANZOVIČS</b>
--

**Rīga 2014**

UDK 621.315(043.2)  
Be 565 a

Berjozkina S. Augstsprieguma elektrolīniju  
optimizācijas paņēmieni. Promocijas darba  
kopsavilkums.-R.:RTU, 2014.-36 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Promocijas padomes  
P-05 (Enerģētika) 2014. gada 17. marta lēmumu  
Nr. 6/14.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda  
atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju  
īstenošanai».

**ISBN 978-9934-10-533-3**

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2014. gadā 17. aprīlī Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, 117. auditorijā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Asoc. profesore, Dr.sc.ing. Inga Zicmane  
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, Enerģijas resursu laboratorijas vadītājs, Dr.habil.sc.ing. Pēteris Šipkovs  
Latvijas Zinātņu akadēmija, Fizikālās Enerģētikas institūts

Elektrisko sistēmu izpētes vecākais inženieris, Dr.sc.ing. Andrejs Svalovs  
Alstom, Šveice

**APSTIPRINĀJUMS**

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

Svetlana Berjozkina .....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, tas satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus un rekomendācijas, literatūras sarakstu un 12 pielikumus. Darba kopapjoms ir 170 datorsalikuma lapaspuses, kurās ietverti 65 attēli un 14 tabulas un pielikuma 12 lapaspuses. Literatūras sarakstā norādīti 154 izmantotās literatūras avoti.

## SATURS

SATURS .....	4
PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE.....	5
DARBA MĒRĶIS UN ATRISINĀTIE UZDEVUMI .....	5
PĒTĪJUMU METODEDES UN LĪDZEKĻI .....	6
DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE.....	6
PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS .....	6
AUTORES PERSONISKAIS IEGULDĪJUMS.....	7
PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA.....	7
PUBLIKĀCIJAS .....	8
PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS .....	9
1. AUGSTSPRIEGUMA ELEKTROLĪNIJU OPTIMIZĀCIJAS UZDEVUMA FORMULĒJUMS, IZMANTOJAMĀS METODEDES UN RĪKI.....	9
1.1. Augstsprieguma elektroliņiju loma energosistēmās .....	9
1.2. Augstsprieguma elektroliņiju konstrukcijas, parametri, ierobežojumi un cenas .....	10
1.3. Jaunās tehnoloģijas EPL projektos .....	11
1.4. GEL projektēšanas metodes un rīki .....	11
1.5. GEL optimizācijas pieejas .....	11
1.6. Investīciju projekta novērtēšanas metodes .....	12
1.7. GEL režīmu vadības iespējas un algoritmi.....	12
1.8. Augstsprieguma elektroliņiju ietekme uz vidi.....	12
2. AUGSTSPRIEGUMA ELEKTROLĪNIJU OPTIMIZĀCIJAS UZDEVUMA MATEMĀTISKAIS FORMULĒJUMS .....	13
2.1. Pamatpieejas uzdevuma nostādne .....	13
2.2. Vairbūtiskie un nenoteiktie parametri un to ietekme .....	13
2.3. Mērķa funkcijas un ierobežojumi .....	14
2.4. Scenāriju un Pareto pieeja .....	15
2.5. Optimizācijas uzdevuma atrisināšanas algoritms un metode .....	16
2.6. Koalīciju dibināšana un Šeplija sadalījums .....	17
3. IEROBEŽOJUMU MODEĻI, TO VERIFIKĀCIJA UN VADĪBA .....	18
3.1. GEL parametru eksperimentālā pārbaude .....	18
3.2. Esošo GEL galveno parametru mērījumu rezultāti.....	19
3.3. GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmas modeļu verifikācijas rezultāti .....	21
3.4. Esošo GEL režīmu vadības un vadu maiņas iespējas .....	24
4. GEL PROJEKTĒŠANAS PIEMĒRI UN REZULTĀTI .....	26
4.1. Projekts „Kurzemes loks” .....	26
4.2. Augsttemperatūras vadu izmantošanas perspektīvas un iespējas .....	26
4.3. Projekta „Kurzemes loks” GEL optimizācijas rezultāti.....	28
4.4. Projekta „Kurzemes loks” GEL optimizācija ar koalīcijas dibināšanas piemēru .....	30
5. SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS TURPMĀKAM DARBAM .....	32
5.1. Kopējie secinājumi.....	32
5.2. Rekomendācijas turpmākam darbam .....	33
LITERATŪRA.....	34

## PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE

Elektroenerģijas nozares pašreizējā attīstība, kuras galvenais mērķis ir nodrošināt nepārtrauktu un kvalitatīvu elektroenerģijas piegādi patērētājiem, balstās uz spēcīgi sazartu energosistēmu rašanos, kurās ietilpst lielas elektrostacijas, iekšējās un starpsistēmu elektropārvades līnijas (EPL) un plašs sadales tīkls. Kā redzams, viens no galvenajiem energosistēmu elementiem ir gaisvadu elektrolīnijas (GEL), kuru loma nākotnes enerģētikas attīstībā pieaug lielos tempos, jo elektriskā tīkla (ET) paplašināšana būs nepieciešama gan valsts, gan starptautiskā mērogā.

Pieprasījums pēc elektroenerģijas nepārtraukti pieaug, tāpēc, ievērojot to, ka 2030. gadā darbosies visi šobrīd plānotie starpvalstu savienojumi, piemēram, „Estlink-2” (starp Igauniju un Somiju 2013. gadā), „NordBalt” (starp Lietuvu un Zviedriju, pēc 2014. gada), „LitPol” (starp Lietuvu un Poliju, pēc 2015. gada) un projekts „Kurzemes loks” (2018. gads), jau tagad nepieciešams izstrādāt, realizēt un ievest esošajā elektropārvades tīklā (EPT) jaunas tehnoloģijas, jo jauno elektrisko savienojumu realizācijas, atjaunojamo energoresursu lielās ietekmes (vēja un saules elektrostacijas), enerģijas tirgus liberalizācijas un atomelektrostaciju (AES Kaļiņingradā, Visaginas un Baltkrievijas AES) būvniecības rezultātā būtiski palielināsies Baltijas pārvades tīklu tranzīta jaudas plūsmas noslodze. Turklāt nepieciešams atzīmēt, ka liels procents no visām EPL, kuras šobrīd atrodas ekspluatācijā, celtas pirms 40...60 gadiem, kas norāda uz EPT fizisku un morālu novecošanu, kas savukārt prasa papildu atjaunošanas pasākumu ieviešanu. Tā rezultātā rodas daudz mērķtiecīgu uzdevumu, kas ir tieši saistīti ar ET jaudas palielināšanu, nodrošinot drošu un kvalitatīvu patērētāju elektroapgādi.

Ņemot vērā iepriekšminētos apsvērumus, par aktuālu kļūst izskatīto problēmu risināšana, veicinot iespējas „mākslīgi” palielināt ET caurlaides spēju, piedāvājot un realizējot vairākus augstsprieguma elektrolīniju optimizācijas paņēmienus, kas formulēti un izstrādāti šajā promocijas darbā. Izmantojot izstrādātos tehniski ekonomiskos risinājumus, būs iespējams palielināt esošajās un projektējamās GEL pārvadāmo jaudu (slēptās jaudas rezerves noteikšana), precīzi un operatīvi pieņemot pareizo lēmumu dažādos EPT pastāvošo problēmu gadījumos, rezultātā minimizējot kapitālieguldījumus.

## DARBA MĒRĶIS UN ATRISINĀTIE UZDEVUMI

**Darba mērķis** ir energosistēmu ekonomiskās efektivitātes un drošuma līmeņa paaugstināšana, kā arī kaitīgās ietekmes uz vidi samazināšana.

Lai sasniegtu definēto mērķi, darbā **atrisināti šādi uzdevumi**:

1. Veikta augstsprieguma elektrolīniju galveno elektriskās jaudas pārvades spēju ietekmējošo parametru analīze, kā arī apskatītas GEL caurlaides spējas palielināšanas metodes un rīki.
2. Sintezēts GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa algoritms (no termiskā viedokļa), kas ļauj palielināt esošo līniju caurlaides spēju vairumā režīmu praktiski bez papildu kapitālieguldījumiem.
3. Esošo GEL vadu temperatūras un slodzes strāvas novērtēšanas metožu pārbaudei tika veikti eksperimentāli mērījumi vairākos augstsprieguma līniju darba režīmos, kas ļāva izvēlēties vietējiem klimatiskajiem apstākļiem vispiemērotāko metodi.
4. Veikta augsttemperatūras vadu ar kompozītmateriālu serdeni izmantošanas iespēju un efektivitātes analīze vietējiem klimatiskajiem un ekonomiskajiem apstākļiem.
5. Pamatota GEL daudzkritēriju optimizācijas uzdevuma nostādne ar Pareto pieejas un scenāriju pieejas izmantošanu galīgā lēmuma pieņemšanai.

6. Veikti projekta „Kurzemes loks” 110 un 330 kV līniju vada temperatūras un slodzes strāvas aprēķini pie uzdotās GEL noslodzes, kā arī elektriskā un magnētiskā lauka parametru aprēķini un izstrādātas rekomendācijas vadu izvēlei.
7. Sintezēta GEL kapitālieguldījumu sadales metode, kuru izmanto dažādiem akcionāriem piederoši uzņēmumi.

## **PĒTĪJUMU METODES UN LĪDZEKĻI**

1. Augstsprieguma līniju vadu un klimatisko apstākļu parametru mērīšanai izmantotas mūsdienīgas mērījumu iekārtas: termovīzijas iekārta – *FLIR ThermaCAM P65* [1]; vadu augstuma mērītājs, termohigrometrs – *Testo 635-1*, kabatas laika apstākļu mērītājs – *Kestrel 4000* [2].
2. Līniju parametru aprēķiniem izmantoti specializētie programmatūras kompleksi: *PLS-CADD* [3] un *SAPR LEP* [4].
3. Līniju parametru tehniski ekonomiskā optimizācijas uzdevuma formulēšanai un atrisināšanai izmantoti statisko lēmumu teorijas [5]-[10], spēļu teorijas [11] – [13], kooperatīvo spēļu teorijas paņēmieni.
4. Ietekmes uz vidi novērtēšanai izmantoti elektromagnētiskā lauka teorijas jēdzieni un aprēķinu algoritmi.
5. Līniju parametru izvēlei izmantoti Latvijas [14]-[21], Eiropas Savienības [22] un Krievijas [23] standarti.

## **DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE**

1. Izmantojot viedo tīklu koncepciju un rīkus (viedie mērītāji, ātrdarbīgi un droši sakaru kanāli), piedāvāts sintezēts augstsprieguma līniju pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa algoritms (no termiskā viedokļa), kas ļauj paaugstināt esošo GEL caurlaides spēju vairumā režīmu.
2. Veiktie eksperimentālie mērījumi reālām GEL dažādos režīmos ļauj ievērojami precizēt esošās augstsprieguma līniju vadu temperatūru un slodzes strāvu novērtēšanas metodikas un algoritmus.
3. Piedāvātā kooperatīvo spēļu teorijas elementu izmantošana ļauj dibināt dažādu uzņēmumu koalīcijas GEL izbūves gaitā. Pierādīta šādu koalīciju dibināšanas nosacījumu esamība un racionalitāte.
4. Pierādīta daudzkritēriju uzdevuma atrisināšanas pieejas izmantošanas racionalitāte. Pareto lēmumu kopas izdalīšana ļauj novērtēt ietekmes uz vidi indikatoru uzlabošanas izmaksas un sekmē pamatotus lēmumus.

## **PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS**

1. Augsttemperatūras vadu pielietošanas iespēju analīze, elektriskā un magnētiskā lauka aprēķinu rezultāti, vada temperatūras un slodzes strāvas aprēķinu rezultāti, vada optimizācijas uzdevuma atrisināšanas rezultāti tika izmantoti, pamatojot un projektējot nozīmīgu Latvijas un Baltijas valstu pārvades sistēmas infrastruktūras energoobjektu – „Kurzemes loks” (1. posms), kas iekļauj 330/110 kV GEL būvi.
2. Darbā pamatoto ieguldījumu sadales metodi un algoritmu var izmantot enerģētisko un sakaru un komunikāciju uzņēmumu koalīciju dibināšanai un kopējo kapitālieguldījumu samazināšanai.

## AUTORES PERSONISKAIS IEGULDĪJUMS

Augstsprieguma līniju optimizācijas uzdevuma izvēle par darba pamatvirzienu veikta ar profesora Edvīna Vanzoviča palīdzību. Daudzkriteriālā uzdevuma formulējums un kooperatīvo spēļu teorijas pielietojums piedāvāts ciešā sadarbībā ar profesoru Antanu Sauhatu. Eksperimenti veikti kopā ar AS „Latvijas elektriskie tīkli” ekspertiem.

Visi aprēķini, ieejas datu vākšana un apkopojums, rezultātu verifikācija, secinājumi pieder personiski autoriem.

## PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

1. Augsttemperatūras vadu pielietošanas iespējas, elektriskā un magnētiskā lauka aprēķinu rezultāti, vadu temperatūru un slodzes strāvu aprēķinu rezultāti, balstu izvietojuma rekomendācijas vairākkārt apspriesti ar AS „Latvijas elektriskie tīkli” un AS „Siltumelektroprojekts” („Kurzemes loka” ģenerālprojektētājs) ekspertiem.
2. Iegūtie rezultāti atspoguļoti Valsts pētījumu programmas projektā „Inovātīvas enerģijas resursu ieguves un izmantošanas tehnoloģijas un zema oglekļa emisiju nodrošināšana ar atjaunojamiem energoresursiem, atbalsta pasākumi vides un klimata degradācijas ierobežošanai – LATENERGI”.
3. Promocijas darba rezultāti ziņoti un pozitīvi novērtēti 12 starptautiskās konferencēs:
  - 3.1. The 51<sup>st</sup> Annual International Scientific Conference of Riga Technical University, Latvia, Riga, October 14, 2010.
  - 3.2. The 6<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2011, Lithuania, Kaunas, May 5 – 6, 2011.
  - 3.3. The 10<sup>th</sup> International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2011, Italy, Rome, May 8 – 11, 2011.
  - 3.4. IEEE PES Trondheim PowerTech 2011, Norway, Trondheim, June 19 – 23, 2011.
  - 3.5. The 52<sup>nd</sup> Annual International Scientific Conference of Riga Technical University Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, October 14, 2011.
  - 3.6. The International Conference on Electrical Power and Energy Systems ICEPES 2012 (WASET), Switzerland, Zurich, January 15 – 17, 2012.
  - 3.7. The 7<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2012, Lithuania, Kaunas, May 3 – 4, 2012.
  - 3.8. 9<sup>th</sup> International Conference on the European Energy Market EEM12, Italia, Florence, May 10 – 12, 2012.
  - 3.9. Riga Technical University 53<sup>rd</sup> International Scientific Conference dedicated to the 150<sup>th</sup> anniversary and the 1<sup>st</sup> Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute, Latvia, Riga, October 11, 2012.
  - 3.10. The 12<sup>th</sup> International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2013, Poland, Wroclaw, May 5 – 8, 2013.
  - 3.11. IEEE PES Grenoble PowerTech 2013, France, Grenoble, June 16 – 20, 2013.
  - 3.12. Riga Technical University 54<sup>th</sup> International Scientific Conference Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, October 14, 2013.

## PUBLIKĀCIJAS

### 1. Starptautiski referējamos zinātniskos žurnālos:

- 1.1. Berjozkina S., Bargels V., Sauhats A., Vanzovichs E. Elektropārvades līniju vadu ar kompozītmateriālu serdeni izmantošanas iespēju salīdzinošs vērtējums// Scientific Journal of Riga Technical University. - 2011. - Vol.28. - pp. 13.-18.
- 1.2. Berjozkina S., Sauhats A., Bargels V., Vanzovichs E. Detecting the Capacity Reserve in an Overhead Line// International Journal of Electrical, Electronic Science and Engineering. - 2012. - Vol.61. - pp. 327-332.
- 1.3. Berjozkina S., Sauhats A., Vanzovichs E. Simulations of the Allowable Load Current of the Overhead Lines in the Latvian Power Network// Journal of Energy and Power Engineering (JEPE). - 2012. - Vol.6. (No.9). - pp. 1521-1526.
- 1.4. Berjozkina S., Sauhats A., Banga A., Jakusevics I. Evaluation of Thermal Rating Methods Based on the Transmission Line Model// Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. - 2013. - Vol.50 (No.4). - pp. 22-33.
- 1.5. Berjozkina S., Sauhats A., Vanzovichs E. Evaluation of the Profitability of High Temperature Low Sag Conductors // Scientific Journal of Riga Technical University. - 2013. - Vol.31. - pp. 18.-24.

### 2. Starptautiski referējamos zinātnisko rakstu krājumos:

- 2.1. Vanzovichs E., Aristovs T., Berjozkina S. Allowable Load Current Calculation Method with Heating Limitation for Overhead Powerlines// Abstract Book and Electronic Proceedings of the 51<sup>st</sup> Annual International Scientific Conference of Riga Technical University. - Riga, Latvia: RTU, 2010. - pp. 47-52.
- 2.2. Beryozkina S., Sauhats A., Vanzovichs E. Mechanical and Thermal Limitations of the Load Current of the Transmission Line // Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2011. - Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2011. - pp. 336-340.
- 2.3. Beryozkina S., Sauhats A., Vanzovichs E. Modeling of the load current of the transmission line// Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2011. - Rome, Italy: IEEE, 2011. - pp. 911-914.
- 2.4. Beryozkina S., Sauhats A., Vanzovichs E. Climate Conditions Impact on the Permissible Load Current of Transmission Line// Proceedings of the IEEE PES Trondheim PowerTech 2011 Conference. - Trondheim, Norway: IEEE PES, 2011. - 6. p.
- 2.5. Berjozkina S., Bargels V., Sauhats A., Vanzovichs E. A Comparative Assessment of Conductors with Composite Core// Abstract Book and Electronic Proceedings of the 52<sup>nd</sup> Annual International Scientific Conference of Riga Technical University. - Riga, Latvia: RTU, 2011. - 6. p.
- 2.6. Berjozkina S., Sauhats A., Bargels V., Vanzovichs E. High Temperature Low Sag Conductors as Method for the Improvement of Electrical Transmission Lines// Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2012. - Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2012. - pp. 200-205.
- 2.7. Berjozkina S., Sauhats A., Bargels V., Vanzovichs E. The Technical and Economic Efficiency of Using Conductors with Composite Core in the Transmission Grid// Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on the European Energy Market EEM12. - Florence, Italy: IEEE, 2012. - 7. p.
- 2.8. Moshkin I., Berjozkina S., Sauhats A. Solving of Transmission Network Development Tasks in Market and Uncertainty Conditions// Proceedings of the 9<sup>th</sup>



International Conference on the European Energy Market EEM12. - Florence, Italy: IEEE, 2012. - 7. p.

2.9. Berjozkina S., Sauhats A., Banga A., Jakusevics I. Testing Thermal Rating Methods for the Overhead High Voltage Line// Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2013. - Wroclaw, Poland: IEEE, 2013. - pp. 215-220.

2.10. Beryozkina S., Sauhats A., Neimane V. Designing a Transmission Line Using Pareto Approach// Proceedings of the IEEE PES Grenoble PowerTech 2013 Conference. - Grenoble, France: IEEE PES, 2013. - 6. p.

2.11. Berjozkina S., Sauhats A. Review of Advanced Transmission Technologies towards the Smart Grid// Digest Book and Electronic Proceedings of the 54<sup>th</sup> International Scientific Conference of Riga Technical University. - Riga, Latvia: RTU, 2013. - 6. p.

2.12. Petrichenko L., Sauhats A., Guseva S., Berjozkina S., Neimane V. The stochastic approach for determination of transmission line wire cross section// Proceedings of the 2014 International Conference on Circuits, Systems, and Control. - Interlaken, Switzerland: EUROPMENT, 2014. - 7. p.

## PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, tas satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus un rekomendācijas, literatūras sarakstu un 12 pielikumus. Darba kopapjoms ir 170 datorsalikuma lapaspuses, kurās ietverti 65 attēli un 14 tabulas un pielikuma 12 lapaspuses. Literatūras sarakstā norādīti 154 izmantotās literatūras avoti.

## 1. AUGSTSPRIEGUMA ELEKTROLĪNIJU OPTIMIZĀCIJAS UZDEVUMA FORMULĒJUMS, IZMANTOJAMĀS METODES UN RĪKI

*Šajā nodaļā pamatota augstsprieguma elektrolīniju lomas nozīme energosistēmā gan pasaules, gan valsts mērogā; aplūkoti GEL galvenie konstruktīvie elementi un parametri, kas ietekmē to mehāniskos, termiskos un vides ierobežojumus, tā rezultātā ļaujot rast optimālu elektrolīnijas projektēšanas variantu ciešā savstarpējā mijiedarbībā. Aprakstīti jauno tehnoloģiju aktuālie virzieni, kas pašlaik tiek attīstīti, izstrādāti, ieviesti, modernizēti, pielāgojoties viedo tīklu koncepcijai. Izskatītas GEL projektēšanā izmantojamās metodes, pieejas, režīmu vadības iespējas un algoritmi, kā arī analizēta moderno datorprogrammu nodrošinājuma kompleksu izmantošanas iespēja. Turklāt atsevišķi tiek skarts aktuālais jautājums par GEL ietekmi uz vidi.*

### 1.1. Augstsprieguma elektrolīniju loma energosistēmās

Viens no galvenajiem energosistēmu elementiem ir EPL, kuru nozīme līdz ar tālāku enerģētikas attīstību arvien pieaug. To nosaka vairāki iemesli:

- 1) elektroenerģijas ražošana notiek pamatā dažādu tipu lielās elektrostacijās, tostarp termoelektrostacija (TES), hidroelektrostacija (HES), AES, kuras būvē nepieciešamo enerģijas avotu tuvumā vai arī vietās, kur tas ir tehniski un ekonomiski izdevīgi – labvēlīgs teritoriālais izvietojums, ievērojot vietējos laika apstākļus;
- 2) lielā atjaunojamo enerģijas avotu, īpaši vēja un Saules elektrostaciju, ietekme, kuras, kā paredzams, dominēs Eiropas energoapgādē ilgtspējīgas nākotnes energosistēmas ietvaros;
- 3) nepieciešamība paplašināt un izveidot jaunus elektriskos savienojumus starp valstīm sakarā ar nozīmīgu enerģētikas spēlētāju ietekmi, piemēram, Krievijas Federācija, kura, kā paredzams, paaugstinās savas ģenerējošās jaudas līdz ar AES uzcelšanu

Kaļiņingradā, kā arī Visaginas AES (Lietuva) un AES Baltkrievijā ar 3000 MW un augstāku jaudu, kur jauno AES elektriskās jaudas izdošana un eksports uz Ziemeļvalstīm arī radīs nepieciešamību paplašināt Baltijas reģiona iekšējo EPT, piemēram, starp Latviju un Lietuvu (Ignalina – Līksna, pastāvoša 330 kV līnija) un starp Igauniju un Latviju (Sindi – Rīgas TEC-2, būvējama 330 kV līnija) [24].

#### 4) pārrobežu enerģijas tirdzniecība.

Tā rezultātā būs nepieciešams paplašināt EPT gan valstu, gan starptautiskā mērogā. Pieaugošā pārrobežu tirdzniecības attīstība, izmantojot starpniecības iespējas starp dažādajiem nacionālajiem tirgiem, izmanto EPT esošos pārrobežu ceļus un komunikācijas. Kā zināms, nozīmīgas gan Eiropas, gan Latvijas EPT infrastruktūras fiziski un morāli noveco, radot ET „šaurās vietas”, kas ierobežo enerģijas pārvadi. Rezultātā pastāvošo GEL caurlaides spēja kļūst nepietiekama. Visieteicamākais risinājums šajos gadījumos būtu likvidēt ET visas „šaurās vietas” un būvēt jaunas GEL. Tomēr pašlaik šī risinājuma realizācija kļūst arvien grūtāka sakarā ar dažādiem ierobežojošiem faktoriem, piemēram, sarežģītu likumdošanas ietvaru, intensīvu zemes izmantošanu, vizuālo efektu, vides jautājumiem, elektromagnētiskā lauka, iedzīvotāju protestiem, sarežģītu reljefu un laika apstākļiem (LA), kā arī, protams, komerciāla rakstura problēmām, kas izraisa daudzu elektropārvades paplašināšanas projektu aizkavēšanos vai pat atcelšanu.

Iepriekšminētie aktuālie aspekti, kas skar EPT pasaulē, ir attiecināmi arī uz Latvijas ET infrastruktūru. Zināms, ka Latvijas energosistēma, tāpat kā pārējo Baltijas valstu energosistēmas, strādā paralēlā režīmā ar Krievijas un Baltkrievijas energosistēmām vienotā gredzentīklā, tā saucamajā BRELL. Latvijas elektroapgāde ir atkarīga no bāzes režīmā strādājošām Latvijas un kaimiņu valstu elektrostacijām, un to energosistēmas operatīvais drošums ir lielā mērā atkarīgs no gredzentīkla BRELL darbības. Tādējādi energosistēmas efektīvai funkcionēšanai ir nepieciešama infrastruktūra, kas nodrošinātu pieprasītās elektroenerģijas un siltuma ražošanas jaudas vienlaicīgi ar līdzvērtīgu enerģijas pārvades tīklojumu – adekvātiem ET un sistēmas vadību. Turklāt izmaiņas Latvijas tautsaimniecībā un valsts atsevišķu reģionu attīstībā rada nepieciešamību veikt gan jaunu GEL un apakšstaciju (a/st.) celtniecību, gan esošo EPL un a/st. rekonstrukciju.

Lai veiksmīgi atrisinātu jautājumus, kas saistīti ar enerģijas bilances nodrošināšanu un energosistēmu režīmu regulēšanu, GEL jānodrošina pietiekoša caurlaides spēja, sniedzot iespēju veikt transporta, starpsistēmu un sistēmas iekšējo saišu funkciju.

### ***1.2. Augstsprieguma elektrolīniju konstrukcijas, parametri, ierobežojumi un cenas***

GEL galvenajiem konstruktīvajiem elementiem jābūt ar pietiekami lielu mehānisko stiprību, tāpēc to projektēšanas gaitā līdztekus elektriskajiem aprēķiniem veic arī mehāniskos aprēķinus, lai noteiktu ne tikai vadu tipu un šķērsriezuma laukumu atkarībā no uzstādītās pārvadāmās jaudas, bet arī izolatoru un balstu tipu, aprēķina laiduma garumu, aizsargtroši.

Tāpat kā jebkura inženiertīklu infrastruktūra, GEL piemīt īpatnējie konstruktīvie parametri, galvenie no tiem ir laiduma garums, vada nokare, gabarīts līdz zemei vai šķērsojamiem objektiem.

Lai atrastu labāko GEL projektēšanas variantu, obligāti jāņem vērā vairāki ierobežojumi, piemēram, termiskie (vada pieļaujamā temperatūra un slodzes strāva), mehāniskie (vada nokare, gabarīti), elektriskie (izolācijas līmenis) un vides (klimatoloģija, elektriskā un magnētiskā lauka (EL un ML) ietekme) [25].

Pēdējo gadu laikā nav bijis novērojams būtisks augstsprieguma elektrolīniju apjoma pieaugums, lai gan vairums EPT īpašnieku veikuši lielus ieguldījumus esošo GEL rekonstrukcijai vai modernizācijai ar mērķi palielināt pārvadāmo jaudu. Rezultātā 380/400 kV GEL kopgarums pēdējo piecu gadu laikā ir pieaudzis par 3 % (aptuveni 3000 km), savukārt GEL izbūves izmaksas variējas samērā plašās robežās no 168200 līdz 401600 EUR/km [26].

### **1.3. Jaunās tehnoloģijas EPL projektos**

Elektropārvades sistēmas attīstībā nozīmīga loma atvēlēta inovatīvu pārvades tehnoloģiju izmantošanai ar mērķi paaugstināt esošās energosistēmas „vieduma” pakāpi, padarot to elastīgāku un reaģētspējīgāku uz pēkšņām apstākļu izmaiņām, spējīgu apstrādāt lielus mainīgas ģenerācijas datu apjomus, kā arī pamatā nodrošināt optimālu un ekonomiski rentablu EPT paplašināšanu. To iespējams panākt, kombinējot tiešus tehniskus ET pastiprināšanas pasākumus (jaunas būves un plaša jaunu tehnoloģiju izmantošana) ar netiešiem informācijas un regulēšanas pastiprinājumiem. It īpaši tas kļuva aktuāli pēdējo desmit gadu laikā, kad parādījās jaunumi datoru un komunikāciju tehnoloģijās, piemēram, SCADA (dispečervadība un datu vākšana) un EMS (enerģijas vadības sistēma), kas lielā mērā uzlabojuši datu pārraides iespējas, sniedzot piekļuvi būtiskajiem reāllaika datiem, lai spētu veikt sarežģītu tiešsaistes ET analīzi. Tomēr, neskatoties uz šiem uzlabojumiem, joprojām pastāv dažāda veida problēmas [27].

Darbā sniegts galveno moderno tehnoloģiju īss pārskats, piemēram, var minēt, ka šajā promocijas darba ietvaros galveno interesi izsauca augsttemperatūras mazas nokares (HTLS) vadu apskats un to iespējamās izmantošanas perspektīvas, kā arī reāllaika sistēmas kontroles iekārtas, galvenokārt, GEL termiskās slodzes strāvas monitoringa sistēmas.

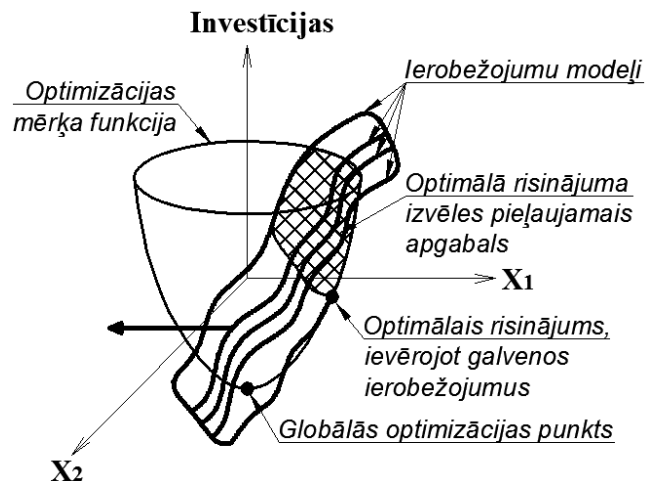
### **1.4. GEL projektēšanas metodes un rīki**

GEL un EPT projektēšanas uzdevuma būtība ir tādu risinājumu un tehniski ekonomisko pamatojumu izstrāde, kas nosaka to attīstību pie vismazākajiem kapitālieguldījumiem un nodrošina kvalitatīvu elektroenerģijas piegādi patērētājiem, ievērojot pastāvošos tehniskos ierobežojumus. EPL projektēšana nosacīti ir trīs pamatkomponentu kopums (EPL projektēšana, EPL projektēšanas process un EPL projekts kā gala produkts), kuri nepārtraukti savā starpā mijiedarbojas laikā. Lai nodrošinātu iepriekšminētā pamatkomponentu kopuma efektīvu darbību, jāizmanto moderni programmatūras kompleksi, piemēram, *PLS-CADD* [3] un *SAPR LEP* [4]. Tā rezultātā šādu rīku izmantošana līdztekus projektēšanas ātruma paaugstināšanai sniedz iespēju optimizēt pieņemtos lēmumus konkrētiem augstsprieguma elektrolīniju projektēšanas apstākļiem.

### **1.5. GEL optimizācijas pieejas**

Vispārīgā gadījumā, lai atrisinātu konkrētu uzdevuma pamatnostādni elektroenerģijas pārvadē, izmanto dažādas metodes, pieejas un konstrukcijas, veidojot variantu kopu; un pēc tam salīdzina un izvēlas vislabāko no piedāvātajiem variantiem. Optimālā varianta izvēle balstās uz konkrētu efektivitātes rādītāju kopumu un to atbilstošo tehniski ekonomisko modeli, obligāti ievērojot visus tehniskos ierobežojumus un izskatāmo variantu salīdzināšanas apstākļu atbilstību. Rezultātā var secināt, ka šodienas GEL optimizācijas pamatuzdevuma nostādnei jābūt kompleksai, dinamiskai un multikriteriālai – sarežģīts enerģētikas optimizācijas uzdevums.

Optimizētā uzdevuma matemātiskais modelis ietver sevī trīs būtiskus pamatus: mērķa funkciju, ierobežojumus un robežas nosacījumus. Šādu uzdevuma nostādni var interpretēt 1.1. attēlā, kur skaidri redzams, ka pastāvošie ierobežojumi (galvenokārt tehniskie, ekonomiskie, ekoloģiskie un kā papildus ietekmējošie arī politiskie) ierobežo optimālā risinājuma izvēles pieļaujamo apgabalu. Kā redzams 1.1. att., investīcijas ir GEL projekta optimizācijas uzdevuma izvēles ekonomiskais pamatojums mūsdienu enerģētikas konkurējošo tirgu apstākļos.



1.1. att. GEL optimizācijas mērķa funkcijas grafiskā ilustrācija

### 1.6. Investīciju projekta novērtēšanas metodes

GEL projektēšanā visplašāk izmanto metodes, kas balstās uz izmaksu un peļņas analīzi un NPV palielināšanu vai kapitālizmaksu samazināšanu, ievērojot vairākus ierobežojumus.

Energoobjektu, ieskaitot arī GEL, projektēšanai visplašāk izmanto šādas investīciju projekta novērtēšanas metodes [5]: neto tagadnes vērtības (NPV) metode, projekta peļņas norma vai rentabilitātes indekss (PI), iekšējās peļņas (rentabilitātes) norma (IRR), modificētā rentabilitātes norma (MIRR), projekta atmaksāšanās periods (PP).

Šajā darbā izvirzītas uzdevuma nostādnes ekonomiskajam pamatojumam, kas balstās uz reālo GEL projekta piemēru – „Kurzemes loks” (1. posms), kas iekļauj 330/110 kV GEL būvi, tiks izmantota NPV metode, kas ievēro investīciju vērtības maiņu laikā un ir viena no visbiežāk izmantojamajām un visvairāk piemērotajām jebkuru investīciju projektu ekonomiskās efektivitātes novērtēšanas metodēm enerģētikā (sk. 4.3. apakšnodaļu).

### 1.7. GEL režīmu vadības iespējas un algoritmi

Esošā ET caurlaides spēja laika gaitā pasliktinās – pieaug tīkla sazarotība un sarežģās tā konfigurācija (pārvadāmo jaudu ierobežo kritērijs (n-1)), kas pašlaik ir par iemeslu vienai no aktuālajām tīklu enerģētikas problēmām – esošo GEL caurlaides spējas nepietiekamībai. Gadījumos, kad avārijas atslēgšanās uzklājas remonta shēmai, jaudas plūsmu pārdales rezultātā var notikt un notiek nepieļaujama atsevišķu ET elementu noslodzes palielināšanās un to pārslodze.

Lai likvidētu ET elementu, tostarp GEL, nepieļaujamu pārslodzi, paredzētas šādas GEL režīmu vadības iespējas:

- 1) ģenerējošo jaudu un GEL jaudas sadalījuma režīmu regulēšana;
- 2) patērētāju slodzes regulēšana;
- 3) elastīgu maiņstrāvas pārvades sistēmu, tā saukto FACTS, izmantošana;
- 4) jaunu, uz mikroprocesoru elementu bāzes balstītu automātikas ierīču izmantošana un GEL monitoringa sistēmu ieviešana.

### 1.8. Augstsprieguma elektrolīniju ietekme uz vidi

GEL kā elektroenerģētiskas sistēmas elementam ir tiešs kontakts un mijietekme ar vidi. Projektējot un būvējot GEL, nākas saskarties ar tādām visraksturīgākajām ekoloģiskajām problēmām kā zemes atsavināšana un konfiskācija, kas ietekmē lauksaimniecību; meža zemes izciršana; lauksaimnieciskās darbības ierobežošana EPL zemes atsavināmajā zonā, apdraudot lauku un ganību integritāti; EL un ML ietekme; tele- un radio traucējumu rašanās; akustiskais troksnis; sakaru līdzekļu darba pasliktināšanās; ainavas estētiskās uztveres pasliktināšanās

GEL trases izvietojuma vietās. Daļa norādīto iedarbju uz vidi ir kvantitatīvi novērtējamas un izsakāmas ekonomisku rādītāju veidā. Taču vairumu iedarbju uz biosfēru un sociālajām sistēmām novērtēt ir sarežģīti, bet dažkārt arī neiespējami. Tā rezultātā var secināt, ka GEL ietekme uz vidi ir ārkārtīgi daudzveidīga, tomēr kā galvenos specifiskos vidi ietekmējošos faktorus var minēt EL un ML, akustisko troksni, kā arī GEL estētisko iedarbību [28].

## 2. AUGSTSPRIEGUMA ELEKTROLĪNIJU OPTIMIZĀCIJAS UZDEVUMA MATEMĀTISKAIS FORMULĒJUMS

*Šajā nodaļā apskatīts GEL daudzkritēriju optimizācijas uzdevuma formulējums, pamatpieejas uzdevuma nostādne. Formulētas mērķa funkcijas un ierobežojumi, kā arī definēta scenāriju un Pareto pieeja. Sniegts izvirzītā augstsprieguma līniju optimizācijas uzdevuma atrisināšanas algoritms un metode. Turklāt apskatīta sintezētās GEL kapitālieguldījumu sadales metodes teorētiskā bāze, kas balstās uz koalīciju dibināšanas un Šeplija sadalījuma pieejām.*

### 2.1. Pamatpieejas uzdevuma nostādne

Šī darba pētījums attiecas uz EPL projektēšanas metodi, kas ir daļēji balstīta uz stohastiskās pieejas un spēļu teorijas kritērijiem, ko izmanto galīgā lēmuma pieņemšanai par energoobjektu realizāciju [29]. Šim nolūkam tika definēti šādi pieci posmi:

1. Pamatojoties uz aplūkojamā reģiona attīstības plānu analīzi, tika izstrādāti slodzes strāvas pieauguma scenāriji un novērtētas prasības attiecībā uz GEL pārvades jaudas izmaiņām;
2. Ievērojot mūsdienu programmatūras automatiskās iespējas elektrolīniju projektēšanā, kas ietver sevī ievērojamu tehnoloģisko un zināšanu bāzi, pastāv konkurētspējīgu GEL struktūras variantu un parametru izvēles dažādība. Turklāt šajā posmā nosaka arī visvairāk ietekmējošo ierobežojumu;
3. Tālāk tiek novērtēti kapitālieguldījumi un NPV vērtības visiem variantiem, gan ievērojot pastāvošos ierobežojumus, gan pārkāpjot vienu no tiem;
4. Tiek veidota konkurētspējīgu lēmumu dažādība, izmantojot konstruēto plakni – kapitālieguldījumu izmaksas un parametrs, kas raksturo visvairāk ietekmējošo ierobežojumu;
5. Tiek novērtēta apstākļu rašanās varbūtība, kas noved pie noteicošā ierobežojuma pārkāpšanas, to sekas un novēršanas pasākumi.

### 2.2. Variābilitātie un nenoteiktie parametri un to ietekme

Lai formulētu GEL projektēšanas uzdevumus, ņemot vērā gadījuma un nenoteikto faktoru ietekmi, pieņemsim, ka [29]:

- Uzņēmums, kas ir GEL īpašnieks, cenšas minimizēt ieguldītās investīcijas  $I_C$  un palielināt savu peļņu  $R_{it}$  (neto naudas plūsma, t.i., ieejošā naudas plūsma – izejošā naudas plūsma par katru gadu  $t_i$  plānošanas periodā  $T$ ,  $T=m \cdot t_i$ );
- Uzņēmuma peļņa  $R_{it}$  un ieguldītās investīcijas  $I_C$  ir atkarīgas no šī uzņēmuma izvēlētajām GEL struktūras  $\Sigma_j$  un parametriem  $\Pi_j$ . Parametrus  $\Pi_j$  raksturo nepārtrauktu mainīgo kopums (laiduma garumi, balstu koordinātas, balstu tipi u.c.). Lai vienkāršotu optimālā risinājuma meklēšanas uzdevumu, nepārtrauktie mainīgie tiek aizvietoti ar diskretu mainīgo lielumiem ar pietiekami mazu diskretizācijas soli precizitātes nodrošināšanai;
- Rezultātā, ņemot vērā to, ka nepārtraukti mainīgie tika aizvietoti ar diskrētiem un struktūras  $\Sigma_j$  arī tiek aprakstītas kā diskretu mainīgo kopums (vadu skaits fāzē, tipveida balstu augstums un parametri, vadu šķērsriezums un to mehāniskie un elektriskie parametri u.c.), var konstatēt, ka EPL realizācijai ir iespējams izvēlēties jebkuru

struktūras un parametru kombināciju. Katru šādu kombināciju sauc par alternatīvu. Pieņemsim, pirmkārt, ka  $N$  alternatīvas ir  $A_j$ , kur  $j = 1, \dots, N$ . Uzņēmuma struktūras un parametru brīvā izvēle ir ierobežota dažādu pastāvošo ierobežojumu dēļ. Otrkārt,  $S_j$  ir visu GEL pieļaujamo struktūru un parametru kopa un  $s_j = \{\Sigma_j, \Pi_j\}$  kā izvēlēta struktūras un parametru kombinācija,  $s_j \in S_j$ . Pieļaujamās struktūras apgabala robežu nosaka pēc nevienādības, kas apraksta tehnisko ierobežojumu un likumdošanas noteikumus;

- GEL mērķa funkcijas ietekmē vide, kas raksturojama ar gadījuma un nenoteikto parametru kopu  $X_{ti}$  (GEL slodzes strāva, gaisa temperatūra, vēja ātrums un virziens, gaisa mitrums u.c.). Vispārīgā gadījumā  $X_{ti}$  mainās laikā. Mēs pieņemam, ka katra gada laikā  $t_i$   $X_{ti}$  paliek nemainīgs.

### 2.3. Mērķa funkcijas un ierobežojumi

Sakarā ar gadījuma un nenoteikto parametru ietekmi arī peļņai piemīt nenoteikts raksturs. Šajā gadījumā var izmantot scenāriju pieeju kombinācijā ar iespējamajiem mainīgajiem, lai risinātu GEL plānošanas uzdevumu. Nenoteikta informācija tiks vienmēr modelēta pēc vairākiem scenārijiem, līdz ar to var apgalvot, ka katra scenārija  $SC_n$  ( $n = 1, \dots, k$ ) peļņa  $R_{tij}$  ir varbūtības vērtība, kuru var izteikt ar šādas izteiksmes palīdzību [29]:

$$R_{tij} = R_{tij}(s_j, X_{tijn}) \quad (2.1)$$

Pieņemsim, ka sadalījuma funkcijas, kas ir izteiktas šādā veidā, var uzdot ar katru scenāriju  $SC_n$  un alternatīvas  $A_j$  kombināciju; tādā gadījumā:

$$F_{tij} = F_{tij}(R_{tij}(s_j, X_{tijn}) | SC_n, A_j). \quad (2.2)$$

Ja ir zināma sadalījuma funkcija, tad sagaidāmo peļņas vērtību par katru gadu  $t_i$ , katrai scenārija  $SC_n$  un alternatīvas  $A_j$  kombinācijai var noteikt, izmantojot šādu vienādojumu:

$$E[R(s, X)] = \int_{\Omega} \dots R(s, X) dF(R(s, X)), \quad (2.3)$$

kur  $\Omega$  – integrācijas laukums, kuru ierobežo gadījuma un nenoteikto parametru  $X_{ti}$  esošais apgabals. Turklāt pieļaujamo parametru un struktūru  $S_j$  apgabala robežu limitē ierobežojumi:

$$FR(s_j, X_{ti}) > 0. \quad (2.4)$$

Vienādojumā (2.3) tika izmantots Lebeaga-Stiltjesa integrālis [30].

Zinot sagaidāmās peļņas vērtību, var atrast NPV noteikšanas vienādojumu, kas kalpo kā galvenais optimizācijas kritērijs:

$$NPV = -I_C + \sum_{i=1}^m \frac{E(R)}{(1+I)t_i}, \quad (2.5)$$

kur  $I_C$  – ieguldītās investīcijas, kas ir funkcija no  $s_j$ ;  $I$  ir diskonta likme.

Tad GEL optimālās plānošanas uzdevumu var izteikt sekojoši:

$$s_{jn}^* = \arg \max \left( -I_C + \sum_{i=1}^m \frac{E(R)}{(1+I)t_i} \right), \quad (2.6)$$

kur  $\arg$  nozīmē „arguments par” objekta maksimizāciju.

Izteiksmē (2.6) formulēto uzdevumu atrisinājums novedīs pie sistēmas struktūrām un parametriem  $s_{jn}^*$ , kas maksimizēs NPV plānošanas periodā  $T$  visiem izvēlētajiem scenārijiem  $SC_n$  un alternatīvām  $A_j$ . NPV vērtību var noteikt katrai scenāriju  $SC_n$  un alternatīvu  $A_j$  kombinācijai. Realizējot NPV maksimizācijas procesu, papildus izvēlas optimālā plānošanas uzdevuma paplašinājuma apgabalu  $s_{jn}^*$  ar mērķi noteikt alternatīvas un parametru vērtības, kas ir tuvu pieļaujamā apgabala robežai un aiz tās. Šādu parametru  $Pr_i$  pārskatīšana darbosies kā papildu optimizācijas kritērijs. Rezultātā, nosakot NPV un  $Pr_i$  vērtības visām scenāriju un alternatīvu kombinācijām, var iegūt matricu (sk. 2.1. tabulu). Pēc tam atliek izvēlēties

vislabāko no alternatīvām. Šī pētījuma jēga ir tāda, ka dotajā alternatīvas kopā tiek aplūkoti arī tie risinājumi, kas noved pie visvairāk ietekmējošā ierobežojuma pārkāpšanas.

Kā redzams 2.1. tabulā, katra tās aile var saturēt Pareto kopu, ja indeksi  $Pr_i$  ievēro otru optimizācijas kritēriju; protams, jāņem vērā tas, ka vispārīgā gadījumā šo rādītāju skaits var būt liels.

2.1. tabula

NPV un ierobežojumu rādītāju  $Pr_i$  sagaidāmās vērtības

Alternatīvas	Scenārijs 1	...	Scenārijs k
$A_1$	$NPV_{11}    Pr_{11}$	...	$NPV_{1k}    Pr_{1k}$
.....	.....	...	.....
$A_N$	$NPV_{N1}    Pr_{N1}$	...	$NPV_{Nk}    Pr_{Nk}$

Meklējot vislabāko GEL optimizācijas uzdevuma alternatīvu, jāņem vērā termiskie, mehāniskie, elektriskie un vides ierobežojumi [24]. Projektējot EPL, jānodrošina uzstādītā maksimālā slodzes strāva, gabarīts līdz zemei un šķērsojamiem objektiem, kā arī EL un ML intensitāte. Sakarā ar to, ka liels optimizācijas parametru skaits ir diskrets, var apgalvot, ka, lai atrisinātu izteiksmē (2.6) formulēto GEL optimizācijas uzdevumu, jāaprēķina investīcijas visām iespējamajām parametru kombinācijām  $s_j$  atbilstoši pieņemtajam ierobežojumu paplašinājuma apgabalam:  $s_j \in S_j$ . Parasti, ja kāds no esošajiem ierobežojumiem neizpildās, tad optimizācijas uzdevumā šādu alternatīvu neņem vērā, noraidot to. Savukārt šis pētījums ļauj izskatīt alternatīvas pat ar ierobežojumu pārkāpšanu, jo mūsdienās pastāvošo tehnisko iespēju, piemēram, viedo tīklu (VT), dažādu monitoringa sistēmu, HTLS vadu, attīstīšana un realizēšana sniedz papildu priekšrocības, lai tiktu apmierinātas izvirzīto ierobežojumu prasības. Tādējādi piedāvātā EPL optimizācijas uzdevuma atrisināšanas pieeja ļauj izmantot visvairāk ietekmējošā ierobežojuma pārkāpšanas iespēju, vienlaicīgi novērtējot šāda pārkāpuma rašanas varbūtību.

#### 2.4. Scenāriju un Pareto pieeja

Jaunās GEL būvniecības nepieciešamību pamato aplūkojamā ģeogrāfiskā reģiona ekonomiskās attīstības prognozes, galvenokārt tas attiecas uz jaunām prognozējamām slodzēm vai esošo slodžu pieaugumu; jauniem ģenerācijas avotiem; nespēju sniegt drošu un kvalitatīvu elektroenerģijas pieprasījumu, izmantojot pastāvošos ET. Sakarā ar pozicionēto nenoteiktības ietekmi jāreķinās ar vairākiem scenārijiem, piemēram, attiecībā uz slodzes pieaugumu. Pēc energosistēmas attīstības scenāriju izvēles tiek izskatītas vairākas alternatīvas ar mērķi izvēlēties optimizācijas parametrus  $S_j$  (sk. 2.3. apakšodaļu).

Par GEL optimizācijas parametriem var tikt izvēlēts līnijas nominālais spriegums, vada mehāniskie un elektriskie raksturlielumi (vada diametrs, šķērsgriezums, lineārās izplešanās koeficients, elastības modulis; vada pieļaujamā temperatūra un slodzes strāva; vada īpatnējā, lineārā un destruktīvā slodze), vadu marka, to skaits fāzē; balstu tips, to ģeometrija, augstums, pieļaujamie vēja, svāra un gabarīta laidumi; izolatoru tips; vibroslēpētāju tips; zibensaizsardzības troses un optisko šķiedru kabeļa (OPGW) marka; zemēšanas un zibensaizsardzības sistēmas, GEL optimālā trase. Tādējādi, lai sasniegtu labāko GEL tehnisko un ekonomisko projektēšanas risinājumu, jāievēro liels optimizācijas mainīgo skaits. Kā jau iepriekš minēts, GEL darbību ietekmē apkārtējās vides apstākļi, kas raksturojami ar gadījuma un nenoteikto parametru  $X_{ii}$  kopu.

Lai vienkāršotu sarežģīto peļņas novērtēšanas uzdevumu lielam scenāriju un to alternatīvu kombināciju skaitam, kā arī daudzu optimizācijas mainīgo izvēli, tiek formulēts un atrisināts konkurētspējīgo variantu ierobežotā skaita filtrēšanas uzdevums, noraidot acīmredzami dārgus vai tehniski nepamatotus variantus. Vēl nesen izvirzītā uzdevuma atrisināšanai izmantoja uzkrātās pieredzes bāzi, kas atspoguļojās dažādos vadlīniju

dokumentos, kuros bija sniegti standarta sadarbības risinājumu un noteikumu apraksti. Pēdējos gadu desmitos situācija ir mainījies spēcīgu programmatūras rīku ieviešanas un izmantošanas rezultātā, piemēram, [3, 4], kas dod iespēju veidot ievērojami mazāku izejas konkurētspējīgo alternatīvu kopu. Tad pastāv problēma, kas saistīta ar efektivitātes novērtēšanu un tehnisko un likumdošanas ierobežojumu piemērotību katrai alternatīvai katrā scenārijā.

Vairāku konkurētspējīgu variantu papildu atmešanu var panākt, izmantojot vienkāršoto GEL optimizācijas uzdevuma formu, kuru var definēt šādi:

$$S_{ij} \approx \arg \min I_C, \quad (2.7)$$

Rezultātā, izmantojot vienkāršotu problēmas formulējumu, kas sniegts (2.7) formulā, uzreiz var noraidīt acīmredzami nekonkurētspējīgos GEL projekta variantus. Jāņem vērā tas, ka problēmas formulējums (2.7) izteiksmē neņem vērā daudzus svarīgus faktorus, piemēram, līnijas jaudas zudumus, un to iespējams īstenot tikai izteiksmes (2.6) izmantošanas gadījumā tālākai izskatīšanai paredzēto variantu skaitu samazināšanas nolūkā.

Šajā darbā Pareto risinājumu kopas plakne konstruēta uz divu pretrunīgu kritēriju bāzes – investīcijas un EL intensitāte, ļaujot pieņemt galīgo lēmumu konkrēta uzdevuma atrisināšanai – izvēlēties visefektīvāko (rentablo) GEL projektēšanas investīciju projektu (sk. 4.3. apakšnodaļu) [29].

## 2.5. Optimizācijas uzdevuma atrisināšanas algoritms un metode

Jaunas EPL būvniecībai ir šādi galvenie mērķi: savienot jaunu ģenerācijas un resursu zonu ET (pastāv atjaunojamo resursu, fosilā kurināmā, hidroenerģijas un kodolenerģijas integrācija); uzlabot EPT drošumu (ekonomiskie un pārslodzes iemesli); kontrolēt elektroenerģijas nepiegādāšanas risku, nodrošinot piekļuvi papildu enerģijas ģenerācijas avotiem; paaugstināt EPL darbības efektivitāti, samazinot līnijas jaudas zudumus; padarīt vairumtirdzniecības tirgu konkurētspējīgu un efektīvāku; samazināt tīkla noslodzes, veidojot jaunus jaudas mezglus un koridorus [31]. Ņemot vērā iepriekšminēto iemeslu nozīmīgumu, optimizācijas uzdevuma atrisināšanas algoritmu var uzrādīt blokshēmas veidā (sk. 2.1. att.).

NPV aprēķināšana ir sarežģīts un ļoti laikietilpīgs uzdevums, jo pastāv grūtības, kuras nosaka šādi galvenie faktori:

- jāņem vērā GEL elementu cena, kuru nosaka „eksperimentāli”, sadarbojoties ar iesaistītajām pusēm (kompensācija par zemes vienību, kur tiek izvietota GEL trase; vadu, balstu un līniju armatūras izmaksas; īpašie nosacījumi kredīta iegūšanai u.c.);
- nav vispārārstītas peļņas noteikšanas metodoloģijas, kuru jāievēro, aprēķinot GEL celtniecības izmaksas.

Šajā pētījumā pieņemsim šādas hipotēzes:

- GEL celtniecību nosaka ET attīstības nepieciešamība, kas paredz nodrošināt plānoto elektroenerģijas patēriņa pieaugumu un jaudas tranzītu;
- aplūkojamais GEL projekts tiek realizēts, dibinot koalīciju, kas sastāv no diviem uzņēmumiem: esošā EPT īpašnieka (C1) un jaunās GEL īpašnieka (C2);
- jaunās GEL celtniecība ļauj EPT gūt papildu ikgadējo peļņu, kas vienāda ar enerģijas tranzīta vidējo izmaksu normalizētajiem procentiem (parasti 7-12 % [26]);
- šajā gadījumā kopējās papildu peļņas sadalījums ( $R_{ad}$ ) un katra uzņēmuma papildu peļņa ( $R_{C1}$ ) un ( $R_{C2}$ ) balstās uz Šeplija vērtības izmantošanu, kas divu spēlētāju gadījumā ir vienkāršs uzdevums [32]:

$$R_{C1} = R_{C2} = \frac{R_{ad}}{2} \quad (2.8)$$

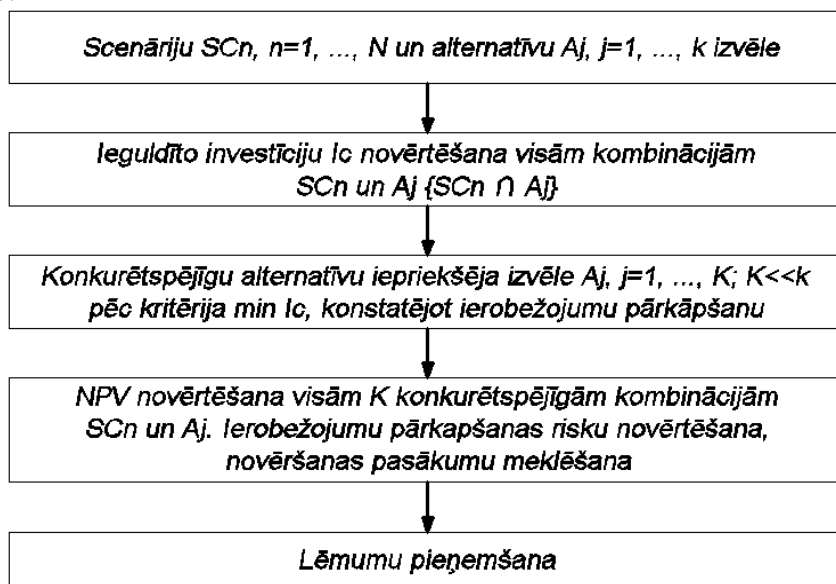
Šeit pieņemam, ka EPT papildu peļņa tiek sadalīta starp jau esošo tīklu un jaunuzcelto GEL līdzvērtīgā proporcijā, un tad iegūstam ikgadējās peļņas apjomu:



$$R_{inc} = \left( \frac{I_l}{I_s} \right) \frac{R_{ad}}{2}, \quad (2.9)$$

$$\text{kur } R_{ad} = \beta(E_{an} + E_{antr}), \quad (2.10)$$

kur  $I_s$  – EPT ikgadējās investīcijas;  $I_l$  – GEL celtniecības investīcijas;  $E_{an}$  – elektroenerģijas patēriņa ikgadējais pieaugums;  $E_{antr}$  – elektroenerģijas tranzīta pieaugums;  $\beta$  – enerģijas izmaksu likme.



2.1. att. Optimizācijas uzdevuma atrisināšanas algoritma blokshēma

## 2.6. Koalīciju dibināšana un Šeplija sadalījums

Šajā pētījumā tiks apskatīts otrais gadījums, kad pieņem papildu nosacījumu, ka konkurējošie uzņēmumi var veidot koalīcijas ar galveno mērķi gūt papildu peļņu.

Tātad definēsim energoapgādes attīstības plānošanas uzdevumu statisko spēļu formā ar pilnīgu informāciju [33]; tādā gadījumā spēle klasiskā formā atspoguļojama šādi:

$$\{I, S = \prod_i \{S_i\} i \in I, R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}\} \quad (2.11)$$

kur  $I$  ir spēlētāju kopums,  $\{S = \prod_i \{S_i\} i \in I$  ir visu situāciju kombināciju kopums un  $R$  ir katra spēlētāja peļņas kopums pie visām tā stratēģijām un pie katras konkurentu stratēģiju kombinācijas.

Pieņemsim, pirmkārt, ka spēlētāju (uzņēmumu) sastāvs un skaits ir zināms, otrkārt, ka katrs spēlētājs zina visu dalībnieku peļņu jebkurā struktūras un parametru kombinācijā. Tas nepieciešams, lai atrisinātu šādas problēmas:

- ✓ racionalitātes un iespējamības noteikšana koalīciju organizēšanai starp spēlētājiem;
- ✓ metožu izvēle koalīciju organizēšanai un papildu peļņas sadalīšanai koalīcijas dalībnieku starpā.

Ja ņemta vērā koalīcijas dibināšanas iespēja, tad optimizācijas uzdevuma formulējumu pārveido vēlreiz. Sakarā ar nepieciešamību apsvērt ne tikai atsevišķo uzņēmumu stratēģijas, bet arī iespējamo dažādo koalīciju stratēģijas, uzdevuma dimensiju skaits ievērojami palielinās. Šī uzdevuma atrisināšanas rezultātā var iegūt katra uzņēmuma un to koalīciju suboptimālo plānu kopu pie dažādām iespējamo konkurentu plānu kombinācijām.

Kooperatīvas uzvedības gadījumā pastāv problēma, kas saistīta ar peļņas sadali koalīciju dalībnieku starpā. Vienkāršais risinājums būtu katram spēlētājam izmaksāt tā ieguldījumu  $c_i$ :

$$c_i = R(S \cup \{i\}) - R(S). \quad (2.12)$$

kur  $S$  – visas iespējamās koalīcijas ar  $i$ -tā spēlētāja piedalīšanos;  $R(S)$  ir koalīcijas  $S$  peļņa,  $R(S \cup \{i\})$  ir koalīcijas  $S$  peļņa, piedaloties dalībniekam  $i$ . Taču šāda pieeja nav anonīma, jo spēlētāju secība, kādā tie iesaistās koalīcijās, ietekmē katra spēlētāja saņemtās atlīdzības lielumu.

Spēļu teorijā Šeplija vērtība [33, 34] apraksta vienu no taisnīgas peļņas sadales pieejām, izvairoties no minētā trūkuma. Taisnīga sadale tiek nodrošināta, vienmērīgi izvēloties gadījuma sakārtojumu un izmaksājot katram no spēlētājiem tā sagaidāmās marginālās izmaksas saskaņā ar šo sakārtojumu. Tā kā spēlētāji var izveidot  $n!$  iespējamus gadījuma sakārtojumus, varbūtība, ka kopa  $S$  ierindosies tieši pirms  $i$ -tā spēlētāja, ir šāda:  $\frac{|S|!(n-1-|S|)!}{n!}$ .

Tādēļ papildu atlīdzības vērtība, kādu iegūst  $i$ -tais spēlētājs, ir šāda [12]:

$$\phi_i = \sum_{i \notin S \subseteq N} \frac{|S|!(n-1-|S|)!}{n!} (R(S \cup \{i\}) - R(S)), \quad (2.13)$$

kur  $n$  ir kopējais spēlētāju skaits,  $|S|$  ir kopas  $S$  lielums, summa ietver visas kopas  $N$  apakškopas  $S$ , kurās neietilpst  $i$ -tais spēlētājs.

Visvienkāršākajā gadījumā, kad spēlē un koalīcijā piedalās tikai divi spēlētāji, vienādojums (2.13) iegūst šādu formu [12]:

$$\phi_1 = \phi_2 = \frac{(R(S \cup \{i\}) - R(S))}{2}. \quad (2.14)$$

Tas nozīmē, ka šajā gadījumā papildu peļņu sadala uz pusēm.

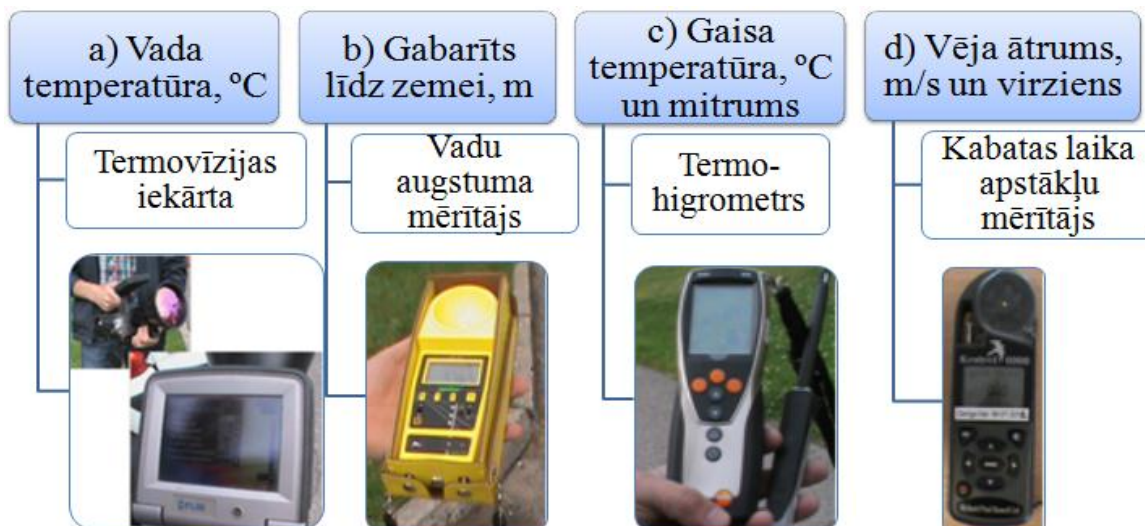
### 3. IEROBEŽOJUMU MODEĻI, TO VERIFIKĀCIJA UN VADĪBA

*Šī nodaļa veltīta GEL galveno parametru eksperimentālajiem mērījumu rezultātiem dažādām esošām Latvijas augstsprieguma līnijām vairākos darba režīmos pie vietējiem laika apstākļiem. Balstoties uz GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmas (no termiskā viedokļa) verifikācijas modeļu iegūto rezultātu analīzi, tika piedāvāts sintezēts GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa algoritms, kura izmantošana ļauj uzlabot pieļaujamās vada temperatūras un slodzes strāvas aplēses precizitāti esošām vai projektējamām GEL, kā arī ļauj pielāgoties GEL dinamiski operatīvai kontrolei un vadībai reālā laika režīmā.*

#### 3.1. GEL parametru eksperimentālā pārbaude

Šajā darbā sintezētā GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa algoritma verifikācijai tika veikti GEL galveno parametru – vada temperatūras, gaisa temperatūras, vēja ātruma un virziena, gaisa mitruma – eksperimentālie mērījumi, izmantojot vienkāršotu GEL parametru mērīšanas iekārtu komplektu (speciālas monitoringa ierīces), kas parādīts 3.1. att.:

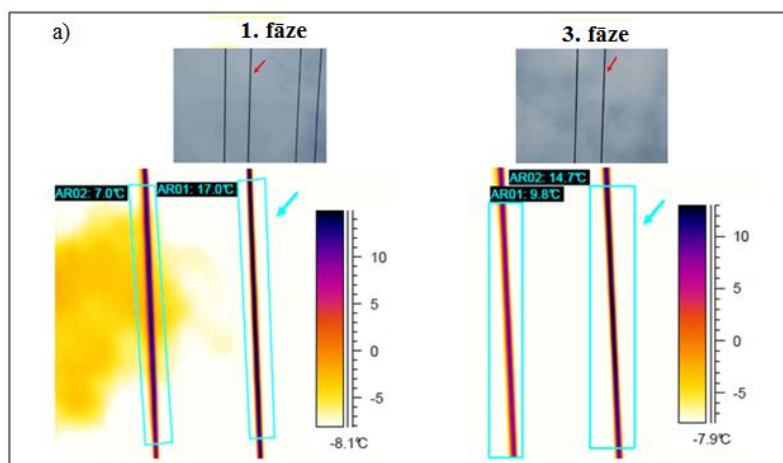
- vadu temperatūra tika mērīta, izmantojot speciālu termovīzijas iekārtu, piemēram, *FLIR ThermoCAM P65* (sk. 3.1. att. a)) [1];
- gabariāts līdz zemei – izmantojot vadu augstuma mērītāju (sk. 3.1. att. b));
- gaisa temperatūra un mitrums – izmantojot termohigrometru, piemēram, *Testo 635-1* (sk. 3.1. att. c));
- eksperimentālie vēja ātruma un virziena mērījumi tika veikti, izmantojot kabatas laika apstākļu mērītāju, piemēram, *Kestrel 4000* (sk. 3.1. att. d)) [2].

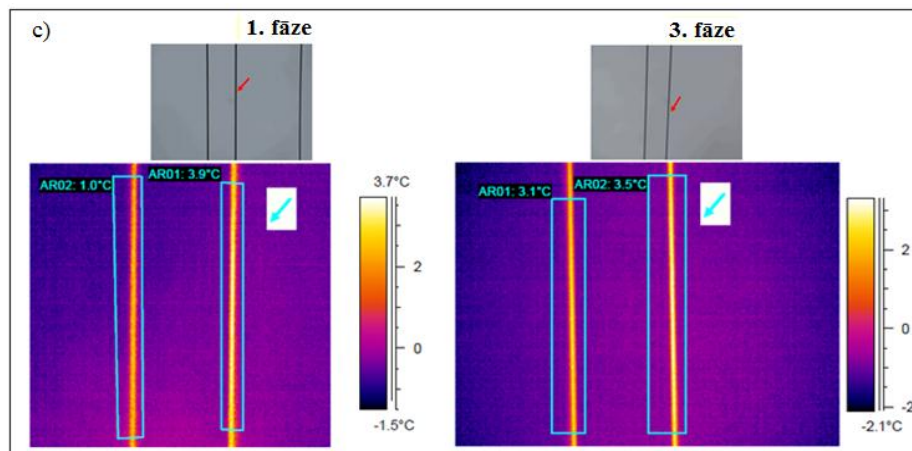
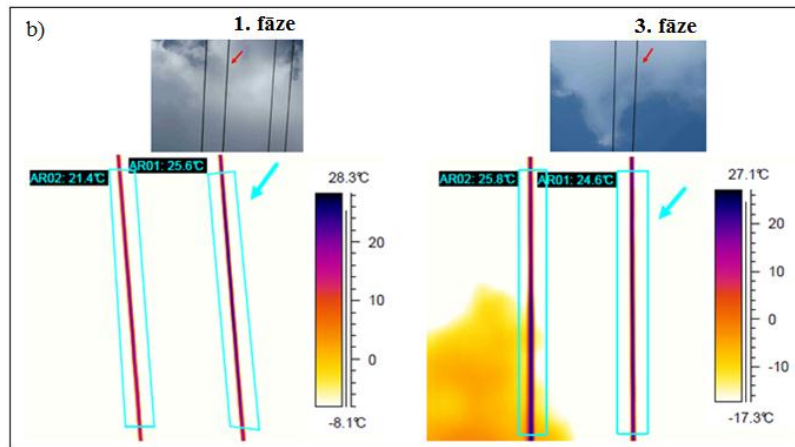


3.1. att. Izmantojamās monitoringa ierīces

### 3.2. Esošo GEL galveno parametru mērījumu rezultāti

Kā jau iepriekš minēts, viens no galvenajiem GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmas parametriem ir vada temperatūra. Līdz ar to tika veikti vairāki vada temperatūras mērījumi pie vietējiem laika apstākļiem (LA) sekojošām Latvijas enerģosistēmas esošajām GEL noteiktos to laidumos: LNr. 600 laidumam starp balstiem Nr. 1 un Nr. 2; LNr. 501 laidumam starp balstiem Nr. 53 un Nr. 54, LNr. 321 laidumam starp balstiem Nr. 17 un Nr. 18, LNr. 303 laidumam starp balstiem Nr. 59 un Nr. 60. Piemēram, LA (gaisa temperatūras, gaisa mitruma, vēja ātruma un virziena), termisko (vada temperatūras), kā arī elektrisko (slodzes strāvas, sprieguma) parametru eksperimentālie mērījumu rezultāti atspoguļoti gan grafiskā (sk. 3.2. att.), gan tabulas (sk. 3.1. tabulu) veidā. Lietderīgi piebilst, ka vada temperatūras fāzēs ir zemākas salīdzinājumā ar gaisa temperatūrām, kas nav precīzi, taču tas ir pieļaujami, jo vada temperatūras mērierīces kļūda atrodas pieļaujamajās robežās –  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  (sk. 3.1. tabulu). Tāpēc līdz ar katru izskatīto GEL gadījumu kā sākotnējo parametru termiskās slodzes strāvas aplēses metožu pārbaudīšanai pieņem visaugstāko izmērīto fāzes vada temperatūru (sk. 3.3. apakšnodaļu).





3.2. att. Eksperimentālie rezultāti GEL LNr. 600 laidumam starp balstiem Nr. 1 un Nr. 2: gadījumam A 1. un 3. fāzei (a); gadījumam B 1. un 3. fāzei (b); gadījumam C 1. un 3. fāzei (c)

3.1. tabula

GEL LNr. 600 mērījumu rezultāti

Parametri	Iegūtie mērījumu dati	Gadījums A	Gadījums B	Gadījums C
		Balsti Nr. 1 – Nr. 2		
Spriegums, kV		115	115	117
Slodzes strāva, A		37	162	73
Slodzes aktīvā jauda, MW		2	31	7
Slodzes reaktīvā jauda, MVar		7	9	13
1. fāzes vadu temperatūra (AR01), °C		17	25,6	3,9
2. fāzes vadu temperatūra (AR01), °C		-	-	-
3. fāzes vadu temperatūra (AR01), °C		14,7	25,8	3,5
Gaisa temperatūra (ta), °C		17	21	3
Vēja ātrums, m/s		2-5	1-2	3-5
Vēja virziens		rietumu	rietumu	dienvidu
Laika apstākļi		daļēji mākoņains	saulains	mākoņains
Vadu tips		2xAS-240/32		
Pieļaujamā slodzes strāva gaisa temperatūrā:		1271 A	1271 A	1452 A
+ 20°C				
+ 5°C				
GEL noslodze, %		3	13	5

### 3.3. GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmas modeļu verifikācijas rezultāti

Pastāv divi plaši izplatīti GEL vada temperatūras monitoringa veidi [35, 36]:

- I. Tiešais monitorings nozīmē tiešu vada temperatūras mērīšanu, kas ir neērti no GEL ekspluatācijas viedokļa;
- II. Netiešais monitorings nozīmē termiskās slodzes strāvas aplēses metodes, kurās izmanto pieļaujamo vada temperatūru ietekmējošo pamatparametru mērījumus.

Tālāk aplūkosim divus galvenos GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmas (no termiskā viedokļa) verifikācijas modeļus, analizējot dažādu pastāvošo problēmu nostādņu risināšanā iegūtus rezultātus:

1. tiešais monitorings, izmantojot pamatparametru, piemēram, vada temperatūras, gaisa temperatūras, gaisa mitruma, vēja ātruma un virziena, mērījumus;
2. netiešais monitorings, izmantojot iepriekšminēto pamatparametru aprēķina vērtības.
  - GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmas verifikācijas modeļi, izmantojot mērījumu rezultātus

Šajā gadījumā termisko slodzes strāvas aplēses metožu izvērtēšanas modeļi veido trīs galvenie posmi:

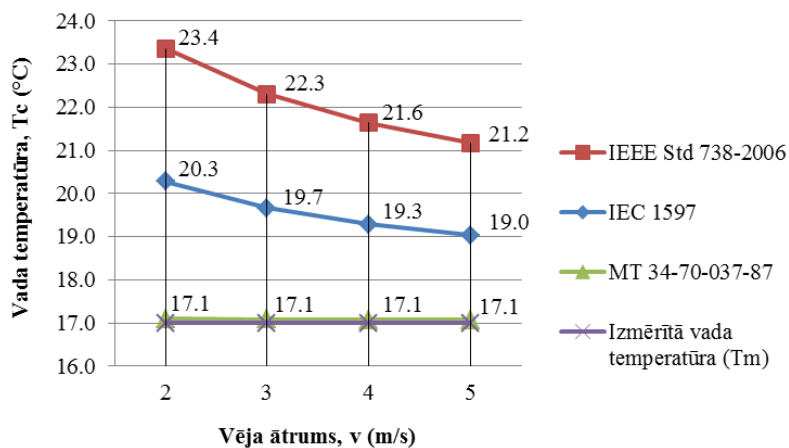
1. Izvēlēta esošā GEL, noteikti tās sākotnējie parametri – fizikālie, mehāniskie un elektriskie raksturlielumi;
2. izmērīti vai atbilstoši vietējiem apstākļiem pieņemti nepieciešamie LA, piemēram, šeit uzņemti gaisa temperatūras, vēja ātruma un virziena, gaisa mitruma mērījumi, izmantojot speciālās monitoringa iekārtas;
3. novērtētas termiskās slodzes strāvas aplēses metodes (IEEE Std 786-2006 [37], IEC 1597 [38] un MT 34-70-037-87 [39]), balstoties uz izmērīto un aprēķināto GEL vada temperatūras un nokares iegūto vērtību analīzi pie uzņemtajiem LA. Parametru aprēķināšanai izmantoti iepriekšminēto metodiku matemātiskie vienādojumi.

Piemēram [36], GEL LNr. 600 pētījuma gadījums A, kur redzams vada stacionāro temperatūru salīdzinājums gan mērījumu rezultātā iegūtām, gan aprēķinātām temperatūrām, pie dažādām vēja ātruma vērtībām atainots 3.3. a) attēlā. Šeit mērījumos noteikto vada temperatūru ( $T_m$ ), kas vienāda ar  $17,0^\circ\text{C}$  (pieņemta 1. fāzes augstākā vada temperatūra), salīdzināja ar aprēķinātajām vada temperatūrām ( $T_c$ ), kas iegūtas atbilstoši aplūkotajai termiskās slodzes strāvas aplēses metodei. Analizējot rezultātus, redzams, ka lielākā atšķirība starp mērījumos noteikto un aprēķināto temperatūru novērojama, izmantojot IEEE standarta 738-2006 metodi ( $T_c = 23,4^\circ\text{C}$ ), tad seko IEC 1597 pieeja ( $T_c = 20,3^\circ\text{C}$ ), kur procentuālā atšķirība ir mazāka, un visbeidzot MT 34-70-037-87 metode ( $T_c = 17,1^\circ\text{C}$ ) pie vēja ātruma  $2\text{ m/s}$  (visnelabvēlīgākais gadījums). Vērts atzīmēt, ka  $T_c$ , kas vienāda ar  $17,1^\circ\text{C}$  pie visiem vēja ātrumiem, izmantojot termiskās slodzes strāvas aplēses metodi MT 34-70-037-87, ir tāda pati kā mērījumos noteiktā vada temperatūra ( $T_m$  ir  $17^\circ\text{C}$ ), tādējādi var secināt, ka šī metode ir samērā precīza.

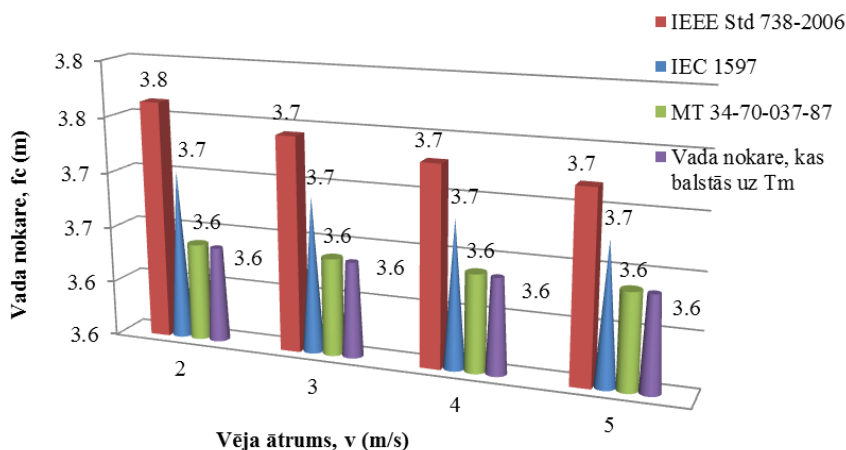
Turklāt par vienu no pamatkritērijiem termiskās slodzes strāvas aplēses metožu izvērtēšanai var uzskatīt ne tikai vada temperatūru (termiskais ierobežojums), bet arī vada nokari (mehāniskais ierobežojums), kas ir nozīmīgs ietekmējošs parametrs, pēc kura nosaka gabarītu līdz zemei vai līdz šķērsojamajiem objektiem. Analizējot iegūtos rezultātus, redzams, ka vislielākā vada nokare – līdz  $3,8\text{ m}$  – ir novērojama, izmantojot IEEE standarta 738-2006 metodi sakarā ar augstākām aprēķinātajām vadu temperatūrām (sk. 3.3. att. a)); turpretī vismazākā vada nokare –  $3,6\text{ m}$  – ir novērojama, izmantojot metodi MT 34-70-037-87 (sk. 3.3. att. b)). Acīmredzami, ka vadu nokares vērtību atšķirība pastāv, maksimālā atšķirība ir līdz  $20\text{ cm}$ . Svarīgi atzīmēt, ka gadījumam A mērījumos iegūtā strāva ( $I_m$ ) ir  $37\text{ A}$ , tādēļ GEL noslodze konkrētajā reālajā piemērā (sk. 3.1. tabulu) ir tikai  $3\%$ , bet, ja GEL noslodze

būtu lielāka (piemēram, gadījums B), attiecīgi vada nokare arī palielinātos (gadījumam B vada nokare palielinājās līdz 30 cm [35]).

Pārējo esošo GEL aprēķinu piemēru termiskās slodzes strāvas izvērtēšanas koncepcijas analīzi var aplūkot [25, 35, 36, 40].



a)



b)

3.3. att. Iegūtie aprēķinu rezultāti, balstoties uz esošās LNr. 600 eksperimentāliem datiem gadījumam A: a) vada stacionārās temperatūras; b) vada nokares

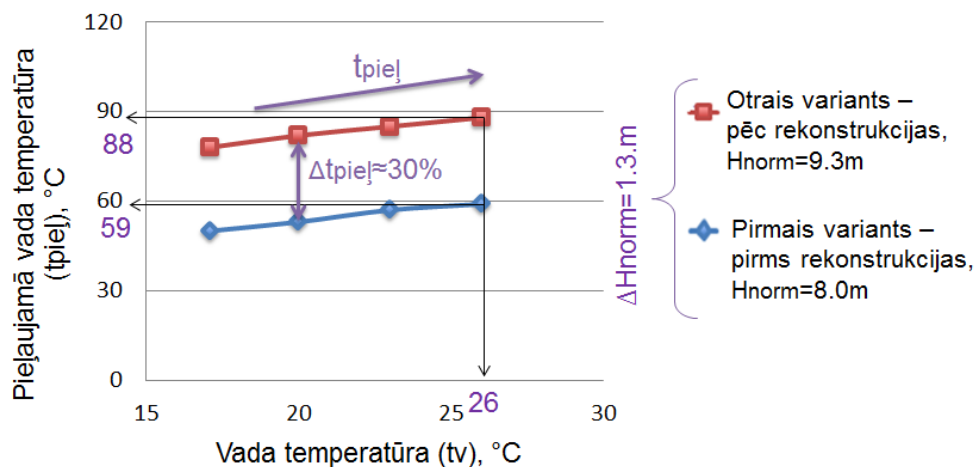
- GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmas verifikācijas modeļi, izmantojot skaitļošanas rezultātus

Šis pētījums atspoguļo termisko un mehānisko ierobežojumu ietekmi uz esošo GEL termisko slodzes strāvu ar mērķi noteikt līnijas slēpto strāvas rezervi, izmantojot vispiemērotāko MT 34-70-037-87 metodes teorētisko bāzi un balstoties uz konkrētu esošo GEL piemēru (LNr. 309) saskaņā ar to pamatprasībām. Proti, tiek aplūkota vada temperatūras ietekme uz pieļaujamo slodzes strāvu, ievērojot normatīvo gabarītu līdz zemei un LA. Šajā gadījumā maksimālo vada temperatūru pieņem kā jau zināmu lielumu, tādējādi, pamatojoties uz šo nosacījumu, aprēķina pieļaujamo slodzes strāvu.

Šajā pētījumā vadu novērtē pēc četriem dažādiem aprēķina nosacījumiem – A, B, C un D, kas balstās uz siltuma bilances vienādojuma koncepciju, izskatot divus pamatgadījumus – pirms un pēc izmantojamās GEL rekonstrukcijas [41].

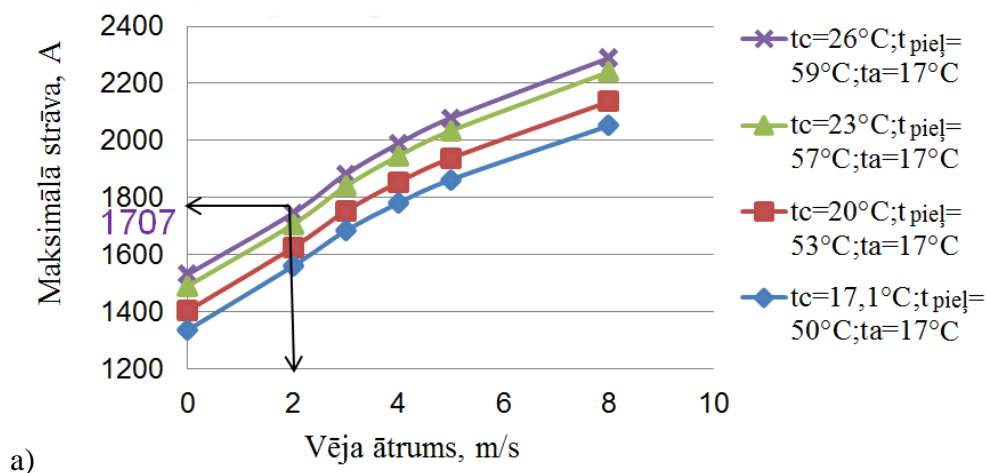
Analizējot iegūtos rezultātus, var secināt, ka pieļaujamajai vada temperatūrai piemīt pieauguma tendence līdz ar vada temperatūras palielinājumu, tas redzams abos variantos, kur pieļaujamā vada temperatūra svārstās no 50°C līdz 88°C, kas nozīmē, ka 70°C (temperatūra, kas ir reglamentēta pēc [23]) nav termiskais ierobežojums aplūkojamajai līnijai (sk. 3.4. att.). Turklāt pirmajam variantam, kas ir vissliktākais, pieļaujamās vada temperatūras vērtības ir

mazākas, salīdzinot ar otro variantu, kas ir labvēlīgs, jo šajā gadījumā ir lielāks gabarīts līdz zemei, tādējādi mehāniskā ierobežojuma ietekme (vada nokare) otrajā gadījumā ir neliela.

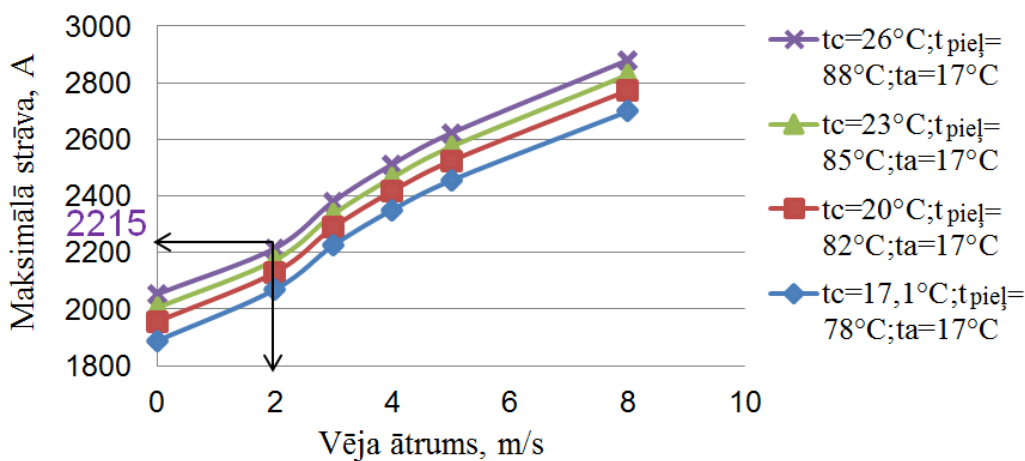


3.4. att. GEL LNr. 309 vada pieļaujamās temperatūras atkarībā no termiskā ierobežojuma – vada temperatūras un mehāniskā ierobežojuma – GEL gabarīta līdz zemei

Zinot pieļaujamo vada temperatūru, var noteikt GEL termiskās slodzes strāvas rezervi, kas ietver starpību starp diviem pārbaudītajiem variantiem, šajā gadījumā tas ir mehāniskais ierobežojums – GEL gabarīts līdz zemei. Pirmā varianta rezultāti ir atspoguļoti 3.5. attēlā a), kas norāda maksimālās strāvas atkarību no termiskā ierobežojuma – vada temperatūras, pieļaujamās vada temperatūras, mehāniskā ierobežojuma un LA. Otrā varianta rezultāti ir atspoguļoti 3.5. attēlā b), kas rāda maksimālās strāvas atkarību no tiem pašiem ierobežojumiem un LA, bet ar lielāku gabarītu starp vadu un zemi – 1,3 m. Dotā gabarīta rezerve ļauj palielināt maksimālo slodzes strāvu GEL, ņemot vērā termisko ierobežojumu un noteiktos LA. Patiešām, augstsprieguma elektrolīnijas strāvas rezerve palielinājās, palielinoties gabarītam līdz zemei. Piemēram, pirmajā variantā, ja vada temperatūra pieņemta 26°C, vēja ātrums 2 m/s, gaisa temperatūra ir 17°C (aplūkojam variantu D), tad maksimālā strāva ir 1707 A (sk. 3.5. attēlā a)), savukārt otrajā variantā, pēc rekonstrukcijas, pie tādiem pašiem nosacījumiem strāva jau palielinās līdz pat 2215 A (sk. 3.5. attēlā b)). Analizējot maksimālās strāvas starpību, var secināt, ka otrais variants konstatē termiskās slodzes strāvas rezerves esamību konkrētā GEL, kas balstās uz četriem pārbaudītajiem nosacījumiem un vairākiem LA, kas ļauj izmantot aptuveni par 30% vairāk termiskās slodzes strāvas, nepasliktinot novērotās GEL elektriskos parametrus.



a)



b)

3.5. att. GEL LNr. 309 vada maksimālā slodzes strāva, balstoties uz pamatnosacījumiem:  
a) pirmajam variantam; b) otrajam variantam

Iegūtie pieļaujamās vada temperatūras un maksimālās slodzes strāvas aprēķina rezultāti, kas balstās uz MT 34-70-037-87 metodes teorētisko bāzi, palīdz novērtēt iespējamo papildus gabarītu, ļauj atklāt slēpto termiskās slodzes strāvas rezervi un uzlabot maksimālās slodzes strāvas noteikšanas precizitāti, ņemot vērā gan termiskos, gan mehāniskos ierobežojumus, kā arī LA uz esošās GEL piemēra bāzes. Tā rezultātā starpību vai papildus rezervi nosaka, palielinot GEL gabarītu līdz zemei, tādējādi ļaujot atrast papildus esošās (jeb projektējamās) GEL caurlaides spēju.

Pārējo esošo GEL aprēķinu piemēru termiskās slodzes strāvas izvērtēšanas koncepcijas analīzi var aplūkot [24, 41, 42, 43].

### 3.4. Esošo GEL režīmu vadības un vadu maiņas iespējas

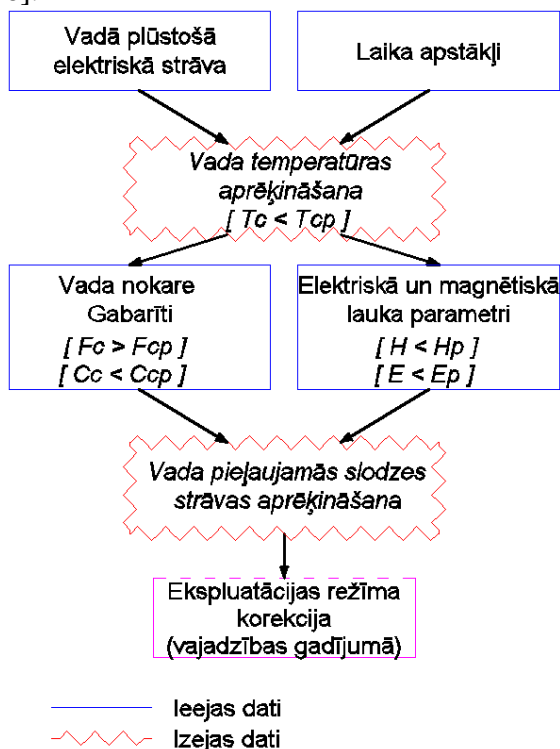
Galvenais uzdevums, gan būvējot jaunu, gan ekspluatējot esošo GEL, ir izmaksu samazināšana elektroenerģijas pārvadē, ko var panākt, piemēram, kontrolējot GEL pieļaujamās vada temperatūru, slodzes strāvu vai nokaru robežas, kā arī izmantojot jaunas konstrukcijas augsttemperatūras vadus ar kompozītmateriāla serdeni (ar iespēju saglabāt esošos līnijas balstus).

Viens no kompleksajiem risinājumiem GEL pašreizējā stāvokļa operatīvai kontrolei un to reālās caurlaides spējas izmantošanas optimizēšanai ir GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēma. Jaunās monitoringa sistēmas ieviešana ļaus praktiski tiešsaistes režīmā izsekot GEL stāvokli un līdz ar to uzrādīt tās reālo caurlaides spēju, kas ļaus operatīvi izmantot GEL „papildu” vai „rezerves” caurlaides spēju, nepārsniedzot vada pieļaujamo temperatūru, piemēram, avārijas un pēcavārijas režīmos. Šāds risinājums ir optimāls, ja nepieciešams paaugstināt esošās GEL caurlaides spēju, jo tas ļauj saglabāt esošos vadus, nepārtraucot GEL darbību.

Līdz ar to, lai izstrādātu sintezēto GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa algoritmu (no termiskā viedokļa), tika veikta GEL galveno parametru eksperimentālā pārbaude (sk. 3.1. un 3.2. apakšnodaļu), sniegta vairāku GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmas (no termiskā viedokļa) modeļu verifikācijas analīze, kas balstās gan uz mērījumu, gan uz skaitļošanas iegūtajiem rezultātiem (sk. 3.3. apakšnodaļu), tādējādi izvērtējot termiskās slodzes strāvas aplēses metožu teorētiskās bāzes validāciju. Rezultātā metode MT 34-70-037-87 tika izvēlēta par pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa algoritma pamatbāzi (sk. 3.6. att.), kur  $T_C$  – vada temperatūra,  $T_{Cp}$  – pieļaujamā vada temperatūra,  $F_C$  – vada nokare,  $F_{Cp}$  – pieļaujamā vada nokare,  $C_C$  – gabarīts līdz zemei vai šķērsojamiem objektiem,  $C_{Cp}$  – pieļaujamais gabarīts līdz zemei vai šķērsojamiem objektiem,  $H$  – aprēķinātā



ML intensitāte,  $H_p$  – pieļaujamā ML intensitāte,  $E$  – aprēķinātā EL intensitāte,  $E_p$  – pieļaujamā EL intensitāte [36].



3.6. att. Sintezētā GEL termiskās slodzes strāvas monitoringa sistēmas algoritma koncepcija

Sintezētā GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa algoritma darba procesu var atainot četros pamatposmos (sk. 3.6. att.):

- I. Zinot vadā plūstošo elektrisku strāvu un LA, var aprēķināt vai izmērīt vada temperatūru; protams, tā nedrīkst pārsniegt vada pieļaujamās temperatūras vērtību, kuru nosaka vada fizikālie raksturlielumi (jāievēro vada ražotāja tehniskā dokumentācija);
- II. Nosakot vada temperatūru, nepieciešams aprēķināt vada nokari un gabarītus līdz zemei vai šķērsojamajiem objektiem, kā arī pārbaudīt EL un ML parametrus, kuriem tāpat jābūt pieļaujamo normatīvo vērtību robežās;
- III. Ievērojot iepriekšminētos parametrus, var noteikt pētāmā vada pieļaujamo slodzes strāvu;
- IV. Vajadzības gadījumā jāveic GEL darba režīma korekcija.

Turklāt pastāv iespēja aizstāt esošo GEL ACSR tipa vadus ar jaunu konstrukciju HTLS tipa vadiem, jo lielākā daļa no visām esošajām ACSR tipa vadiem, kas šobrīd atrodas ekspluatācijā, ir fiziski un morāli novecojuši to ilga kalpošanas laika rezultātā. Līdz ar to, gadījumos, kad nepieciešams palielināt esošās GEL caurlaides spēju jeb uzlabot GEL nepietiekamus gabarītus, tas var būt efektīvi optimāls risinājums ar minimālām izmaksām (esošās GEL rekonstrukcija prasa mazākas investīcijas nekā jaunas GEL būve), jo optimizētiem augsttemperatūras vadiem piemīt tādas priekšrocības kā augsta caurlaides spēja, ilgtermiņa drošums, mazākas nokares slodzes apstākļos, ātra un vienkārša montāža, nelieli jaudas zudumi. Pēdējā laikā šis augstsprieguma elektrolīniju optimizācijas paņēmieni ir viens no visvairāk diskutējamām problēmām, veicot mūsdienu energosistēmu modernizāciju. Lai varētu detalizētāk izvērtēt vadus ar kompozītmateriāla serdeni un to izmantošanas iespējas, tika izdarīti vairāki tehniskie un ekonomiskie salīdzinājumi ar ACSR tipa vadiem, balstoties gan uz „Kurzemes loka” projektu (1. posms), kas iekļauj 330/110 kV GEL, gan uz esošajiem GEL piemēriem (sk. 4.2. apakšnodaļu).

## 4. GEL PROJEKTĒŠANAS PIEMĒRI UN REZULTĀTI

Šajā nodaļā aplūkoti augstsprieguma elektrolīniju optimizācijas piemēri un to pētījumu rezultāti – GEL projektēšanas metodes, kas ir daļēji balstīta uz stohastiskās pieejas un spēļu teorijas kritērijiem, izmantošanu galīgā lēmuma pieņemšanai par EPL realizāciju; kā arī GEL optimizācija ar energouzņēmumu koalīcijas dibināšanas piemēru. Papildus tika izskatīts aktuālais jautājums, kas saistīts ar jaunu tehnoloģiju integrēšanu – augsttemperatūras vadi ar kompozītmateriāla serdeni, rezultātā pamatojot šāda optimizācijas risinājuma racionalitāti. Iepriekšminētie pētījumu rezultāti balstās gan uz reālu nozīmīgu Latvijas un Baltijas valstu pārvades sistēmas infrastruktūras energoobjektu – „Kurzemes loks” (1. posms), kas iekļauj 330/110 kV GEL būvi, gan uz esošajiem GEL piemēriem, izmantojot mūsdienīgas programmatūras kompleksus – PLS-CADD un SAPR LEP.

### 4.1. Projekts „Kurzemes loks”

„Kurzemes loks” (KL) ir pirmais atjaunotās Latvijas Republikas laikā uzsāktais, valstij stratēģiski svarīgs pārvades sistēmas infrastruktūras projekts, kuram ir noteikts nacionālo interešu objekta statuss. KL ir daļa no kopēja ES līdzfinansētā BEMIP (*Baltic Interconnection Plan*) plāna lielākā Baltijas energopārvades drošības stiprināšanas projektā – „NordBalt”, kura realizācijas ietvaros paredzēta Lietuvas – Zviedrijas starpsavienojuma izbūve (zemūdens kabelis), kā arī Latvijas un Lietuvas EPT pastiprināšana, lai uzlabotu visas Baltijas energoapgādes drošumu, palielinātu to starpsavienojuma jaudas tranzītu un attīstītu nepieciešamo iztrūkstošo pārvades jaudu infrastruktūru Latvijā. Starptautiskā energoinfrastruktūras attīstības projekta realizācijas rezultātā tiks attīstīts Baltijas elektroenerģijas tirgus, nodrošinot elektroenerģijas pirkšanas, pārdošanas un tranzīta iespējas ar citām ES valstīm. Būtiski piezīmēt, ka KL izbūvēšana nodrošinās pietiekamu Kurzemes reģiona energoapgādes drošumu, tādējādi samazinot avāriju iespējamību pārvades sistēmā, kā arī palielināsies operatīvās avāriju novēršanas iespējas, ievērojot jaunu elektroenerģijas patērētāju pieslēgšanas potenciālu [44].

### 4.2. Augsttemperatūras vadu izmantošanas perspektīvas un iespējas

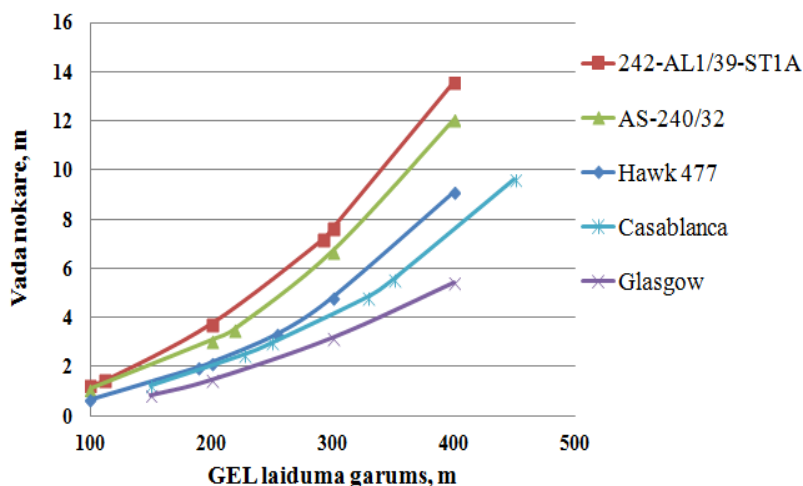
Šajā apakšnodaļā tiks aplūkoti un analizēti HTLS un ACSR tipa vadu tehniskajā un ekonomiskajā salīdzinājumā iegūtie rezultāti GEL piemēriem, kas balstās uz:

1. „Kurzemes loka” projekta 1. posma izejas datiem, piemēram, nozarojuma uz a/st. „Aizpute” 110 kV GEL projektu (sk. zemāk) [45], savukārt pārējo izskatīto GEL piemēru aprēķina rezultātu analīzi var aplūkot [46, 47] – 330/110 kV pamatlīnijai (KL priekšprojekta ietvaros); [48] – nozarojuma uz a/st. „Alsunga” 110 kV GEL projektu;
2. esošo Latvijas EPT GEL izejas datiem, piemēram, LNr. 355 un LNr. 309 [49].

Salīdzinošie aprēķini veikti gan pēc izvēlēto vadu tehniskā aspekta – pēc to mehāniskajiem ierobežojumiem (pieļaujama maksimālā ( $\sigma_{\max}$ ), minimālā ( $\sigma_{\min}$ ) un ekspluatācijas ( $\sigma_{\text{eksp.}}$ ) mehāniskais spriegums vadā; vēja, svāra un gabarīta laidumi; vada nokares), pēc termiskajiem ierobežojumiem (GEL caurlaides spēja; vada pieļaujamās temperatūras); gan pēc ekonomiskā aspekta (ietaupījums uz starpbalstu skaita rēķina, kopējo nepieciešamo materiālu un aprīkojuma izmaksu aprēķins), pamatojoties uz atbilstoša GEL piemēra izejas datiem – GEL projektēšanas klimatiskajiem apstākļiem (vēja ātrums; apledojuma sieniņas biežums; maksimālā, minimālā un ekspluatācijas temperatūra, kas piemīt izvēlētajam GEL trases reģionam), īpatnējiem konstruktīvajiem parametriem (aprēķina laiduma garums; gabarīts līdz zemei vai šķērsojamiem objektiem), nepieciešamajām konstrukcijām (vadi un aizsargtrošes, līnijas armatūra, balsti un pamati) un aprēķina nosacījumiem, ievērojot spēkā esošos normatīvus.

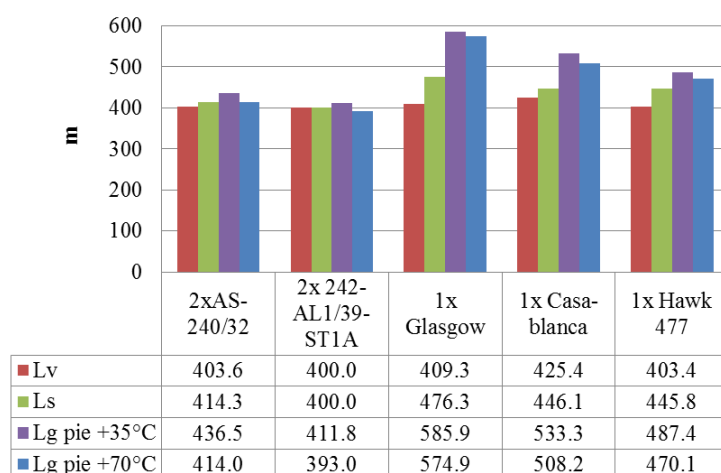
Piemēram [45], 110 kV EPL LNr. 266 projekta nozarojumam uz a/st. „Aizpute”, kas iekļauts KL projektā (1. posms), iegūtie tehniskā salīdzinājuma rezultāti atspoguļoti 4.1., 4.2. attēlā, savukārt ekonomiskā salīdzinājuma rezultāti – 4.3. attēlā. Rezultātā var secināt, ka:

- 1) mehāniskais spriegums vadā režīmā ar vada sasilšanu līdz temperatūras +35°C vadiem *Glasgow* un *Casablanca* (alumīnija vads ar kompozītmateriāla serdeni – ACCC) un *Hawk 477* (pastiprināta alumīnija vads ar kompozītmateriāla serdeni – ACCR) ir augstāks nekā tradicionālā tipa vadu gadījumā – *AS-240/32* un *242-AL1/39-ST1A* (pastiprināts tēraudalumīnija vads – ACSR), kas tieši nozīmē, ka mazāka nokare būs vadiem *Glasgow*, *Casablanca* un *Hawk 477* (sk. 4.1. att.);

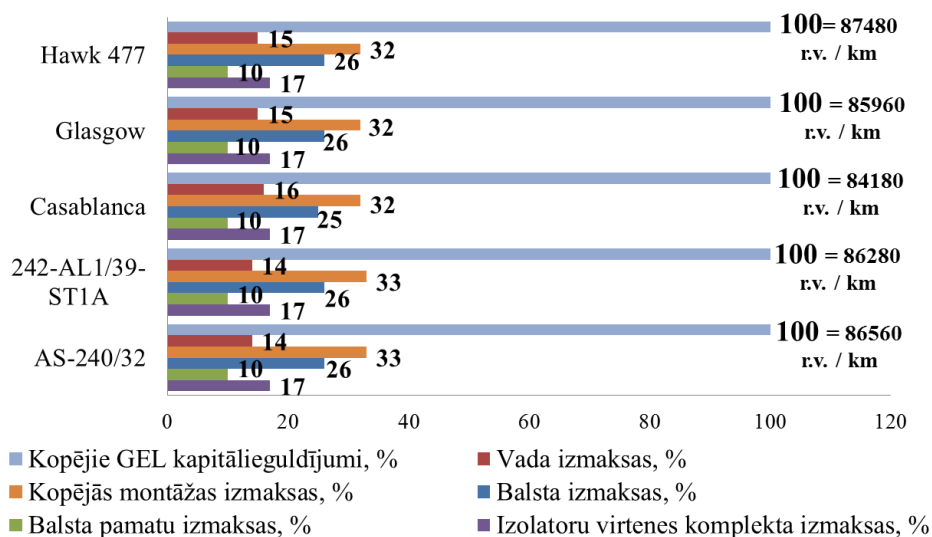


4.1. att. Vada nokares un GEL laiduma garuma attiecība režīmā ar vada sasilšanu līdz +35°C dažādajiem vadu tipiem līnijas LNr. 266 analīzei

- 2) vēja laidums ( $L_v$ ) ir noteicošais laidums visiem aplūkojamajiem vadu tipiem kā galvenais nosacījums balstu izvietojumam GEL trasē (normatīvo gabarītu līdz zemei izpildes nepieciešamība), piemēram, vadam *AS-240/32*  $L_v$  ir 403,6 m, kas ir sliktāks rādītājs, salīdzinot ar gabarīta laidumu ( $L_g$ ), kas vienāds ar 436,5 m režīmā ar vadu sasilšanu līdz +35°C. Priekšroka dodama vadam *Casablanca*, jo te maksimāli pieļaujamais  $L_v$  ir 425,4 m, kas aptuveni par 25 m pārsniedz atbilstošo rādītāju vadam *242-AL1/39-ST1A* vai aptuveni par 22 m vadu *AS-240/32* un *Hawk 477* izmantošanas gadījumā, kā arī par 16 m vadu *Glasgow*, ja visi pārējie nosacījumi paliek nemainīgi (sk. 4.2. att.);
- 3) kas attiecas uz GEL termisko ierobežojumu analīzi, var secināt, ka HTLS tipa vadiem – *Glasgow*, *Casablanca* un *Hawk 477*, ir lielāka pieļaujamā vada temperatūra nekā vadiem *AS-240/32* un *242-AL1/39-ST1A* (ACSR), kas nozīmē, ka HTLS tipa vadi nodrošina uzstādīto 850 A slodzes strāvu ar vienu vadu fāzē, piemēram, izmantojot vadu *Casablanca*, kura pieļaujamā nominālā darba temperatūra ir 120°C, var nodrošināt 922 A ar vienu vadu fāzē, savukārt salīdzinājumā ar *AS-240/32* – nepieciešami divi vadi fāzē, jo vada *AS-240/32* pieļaujamā darba temperatūra ir tikai 70°C [23];
- 4) GEL kapitālieguldījumi, izmantojot *AS-240/32*, *242-AL1/39-ST1A* un *Hawk 477* (ACCR), izrādījās augstākie nekā, izmantojot HTLS tipa vadus – *Casablanca* un *Glasgow* (ACCC). Atšķirība starp vadiem *AS-240/32* un *Glasgow* un *Casablanca* ir aptuveni 2,8%, savukārt *Hawk 477* vadiem šī atšķirība ir 3,9%. Rezultātā kā optimālo GEL projektēšanas variantu ar vismazākajiem kapitālieguldījumiem – 84180 r.v./km – izvēlējas vadu *Casablanca* izmantošanu, tad seko variants ar vadu *Glasgow* izmantošanu – 85960 r.v./km, pēc tam – vadi *242-AL1/39-ST1A* un *AS-240/32*, bet pēdējā vietā minams vads *Hawk 477* – 87480 r.v./km (sk. 4.3. att.).



4.2. att. Pieļaujamie vēja ( $L_v$ ), svara ( $L_s$ ) un gabarīta ( $L_g$ ) laidumi abos režīmos dažādajiem vadu tipiem līnijas LNr. 266 analīzei



4.3. att. GEL LNr. 266 izbūves kapitālieguldījumi

### 4.3. Projekta „Kurzemes loks” GEL optimizācijas rezultāti

GEL piemērs, kurā izmantota iepriekš aprakstītā GEL projektēšanas optimizācijas pieeja (sk. 2. nodaļu), balstās uz reālo projektu „Kurzemes loks” (1. posms), kas iekļauj 330/110 kV GEL būvi [29].

Energosistēmu analīze reģiona attīstības scenārijiem ļāva izdalīt šādas alternatīvas jaunajai GEL:

- 110 kV GEL ar maksimālo strāvu 1200 A (optimistiskais scenārijs) vai 800 A (pesimistiskais scenārijs);
- 330 kV GEL ar maksimālo strāvu 2000 A (optimistiskais scenārijs) vai 1500 A (pesimistiskais scenārijs).

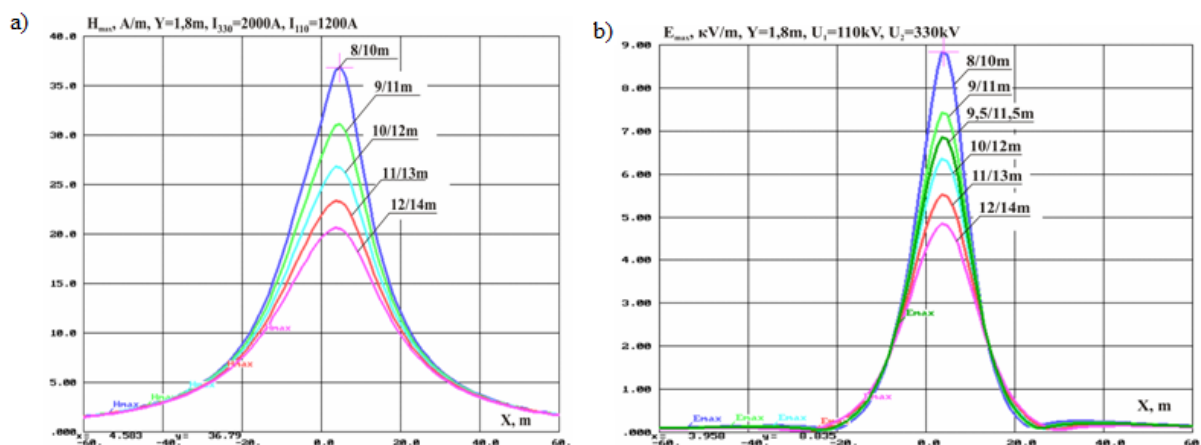
Rezultātā formulējam jaunās GEL konstrukciju un parametru optimizācijas uzdevumu.

Pārskatot optimālos risinājumus ar GEL projektēšanas programmatūras palīdzību *PLS-CADD* [3], tika atlasītas divdesmit alternatīvas, kas veidojas no dažādām balstu un vadu (HTLS un ACSR tipa vadi) kombinācijām. Lai vienkāršotu izvirzītā uzdevuma nostādni, pirmajā etapā minimizējam kapitālieguldījumus NPV maksimizēšanas vietā, savukārt galīgajā etapā iespējamo alternatīvu salīdzinājumam izmantojam laikietilpīgo uzdevumu ar NPV kritērijiem.

Balstu augstumi, GEL laidumu garumi, gabarīts līdz zemei vai šķērsojamajiem objektiem nosaka ML un EL parametrus, kuru vērtības regulē ar nolūku samazināt ietekmi uz vidi. Lai vienkāršotu šīs ietekmes noteikšanu, tika veikti EL un ML aprēķini, izmantojot specializētu datorprogrammu (sk. 4.4. att. a) un b)) [50]. Apkopojot ML un EL intensitātes sadalījuma aprēķinu rezultātus, var secināt, ka ML intensitāte pilnībā atbilst pastāvošajām normām, savukārt EL intensitāte var neatbilst izvirzītajām prasībām elektropārvades tīklā „šaurajās” vietās. Lai atrisinātu pastāvošo problēmu, tika piedāvāts zemāk aplūkots GEL projekta realizācijas optimālais risinājums.

Tad, izvēloties vadu un balstu tipus, atlasījām šādas alternatīvas:

- A1 un A10; A11 un A20 nozīmē, ka tiek izmantoti tradicionālā tipa vadi kā 110 kV, tā 330 kV GEL ķēdēm;
- A6...A9; A16...A19 – izmanto HTLS tipa vadus kā 110 kV, tā 330 kV GEL ķēdēm;
- A2...A5; A12...A15 – izmanto tradicionālā tipa vadus, kas kombinēti ar HTLS tipa vadiem, 110 kV un 330 kV GEL ķēdēm (sk. 4.5. att.).

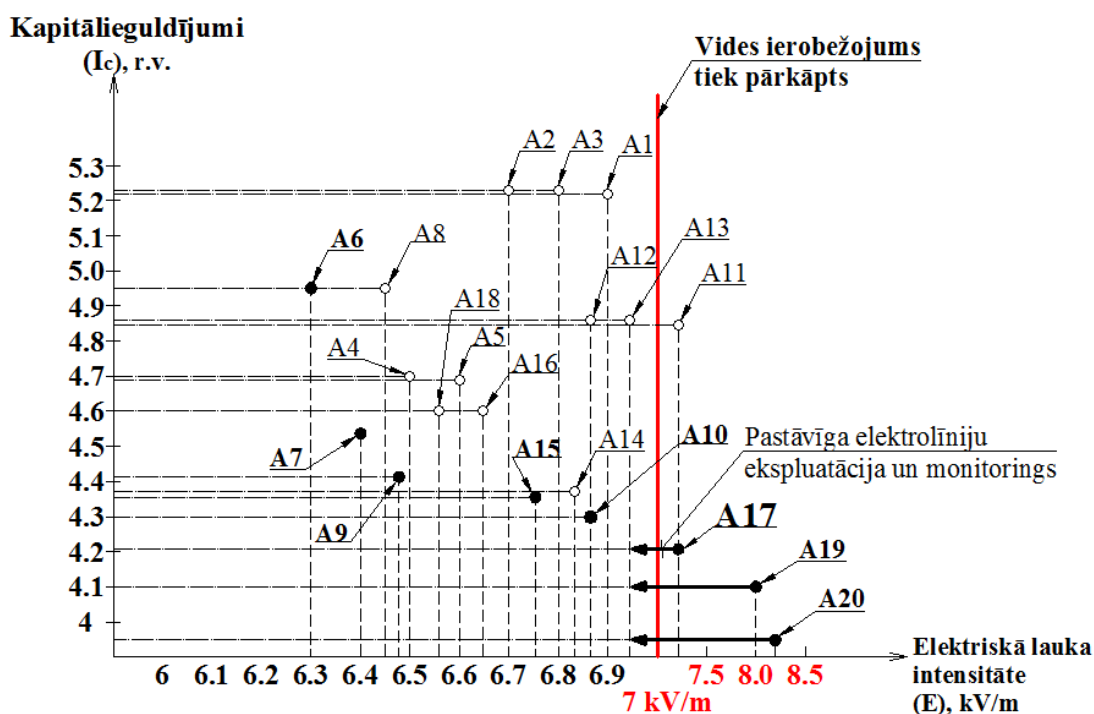


4.4. att. GEL ML (a) un EL (b) intensitātes sadalījums augstumā  $Y = 1,8$  m virs zemes 330/110 kV GEL šķērsgrīzumā minimālajiem 330/110 kV vadu gabarītiem līdz zemei: 8/10 m, 9/11 m, 9,5/11,5 m, 10/12 m, 11/13 m un 12/14 m

GEL divkriteriālās optimizācijas optimālo risinājumu iegūtie rezultāti (konstruēta divdimensiju plakne pēc divdesmit alternatīvām), izmantojot Pareto pieeju [51], kur  $I_C$  (r.v.) ir kapitālieguldījumi un  $E$  (kV/m) ir EL intensitāte, kas šajā pētījumā definēta kā visvairāk ietekmējošais ierobežojums GEL projekta realizācijā, atainoti 4.5. attēlā. Tad, izvērtējot iepriekš atlasītās divdesmit alternatīvas ar Pareto pieejas palīdzību, iegūstam, ka konkurētspējīgās alternatīvas ir A6, A7, A9, A10, A15, A17, A19 un A20. Tālāk seko tikai konkurētspējīgo alternatīvu izskatīšana, izmantojot šeit jau laikietilpīgāko un precīzāko NPV metodi vienkāršotās kapitālieguldījumu analīzes vietā (sk. 4.1. tabulu).

Rezultātā analīze rāda, ka:

- ja pastāv „klasiskais” problēmas formulējums, proti, NPV maksimizēšana, ievērojot visus GEL projekta realizācijas ietekmējošos ierobežojumus, tad jāizvēlas alternatīva A10. Galīgais lēmums jāpieņem, izmantojot un analizējot mehānisko, termisko un vides ierobežojumu kritērijus;
- ja kādu definēto ierobežojumu neievērošana ir pieļaujama, tad būtu jāizvēlas viena no alternatīvām A17 vai A19, ievērojot izvēlētās alternatīvas rašanās iespējas varbūtību.



4.5. att. Pareto kopas diagramma, kas konstruēta pēc atlasītajām alternatīvu kombinācijām GEL projekta realizācijai

4.1. tabula

NPV un ierobežojumu rādītāju  $Pr_i$  sagaidāmās vērtības

Alternatīvas	Optimistiskais scenārijs Nr. 1	Pesimistiskais scenārijs Nr. 2
	$NPV_{11}/R_{11}$	$NPV_{11}/R_{11}$
A10	4,7 // 6,9	5,4 / 5,0
A17	6,2 // 7,1	5,33 / 5,6
A19	6,7 // 8,0	5,7 / 7,3

Lai pieņemtu galīgo lēmumu par GEL projektēšanu un celtniecību, jāizvērtē riski, kas var rasties un radīt izmaiņas augstsprieguma elektrolīniju ekspluatācijas laikā, kas savukārt novestu pie papildu ekonomiskiem zaudējumiem. EL intensitātes robežvērtību pārkāpšana (7 kV/m) aplūkotajam piemēram Latvijas klimatiskajos apstākļos var notikt pie maksimālās gaisa temperatūras +35°C un maksimālās uzstādītās slodzes strāvas. Šo abu nosacījumu kombinēšanās varbūtība ir ļoti neliela. Piemēram, alternatīvai A10 varbūtības vērtība ir 0,01, savukārt alternatīvai A17 – 0,000001 (abas varbūtības vērtības noteiktas pēc optimistiskā scenārija, tātad vissliktākajam gadījumam, kad pastāv maksimālā GEL noslodze). Pēc iepriekšminēto varbūtību apsvēršanas alternatīva A17 būtu jāizvēlas kā galīgais lēmums GEL projekta īstenošanai, bet ar obligātu papildu nosacījumu – nepieciešama pastāvīga GEL ekspluatācija un monitorings, lai izpildītos pastāvošie likumdošanas noteikumi attiecībā uz EL intensitātes pieļaujamo vērtību.

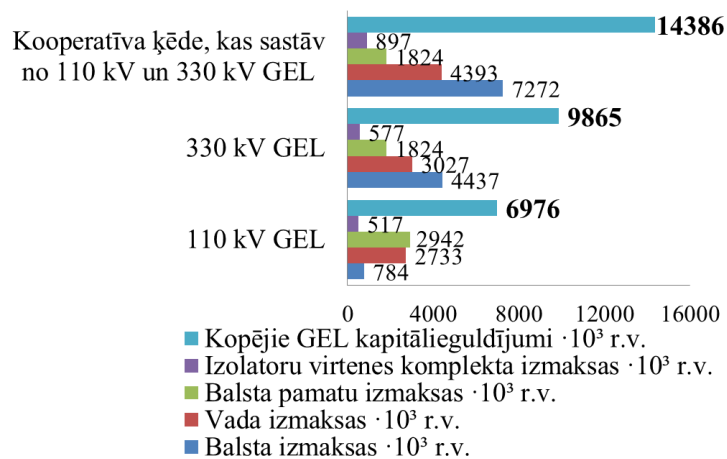
#### 4.4. Projekta „Kurzemes loks” GEL optimizācija ar koalīcijas dibināšanas piemēru

Veiktais pētījums veltīts otrajam speciālgadījumam (sk. 2.6. apakšnodaļu), papildus pieņemot, ka ir iespējams izveidot koalīciju ar citu uzņēmumu. Vairumā gadījumu ir paredzams abpusējs izdevīgums. Piedāvātā stratēģija balstās uz reāla projekta KL (1. posms) piemēru, kur pieņemts, ka augstsprieguma elektrolīniju projekta izstrādē iesaistīti divi neatkarīgi uzņēmumi. Viens no šiem uzņēmumiem būvē 110 kV GEL, bet otrs – 330 kV GEL.

Tādēļ lēmums jāpieņem, izvēloties tos variantus, kas ir izdevīgi katram no uzņēmumiem. Turklāt jāparāda arī projekta kapitālieguldījumi un iespējamā peļņa katram uzņēmumam gadījumā, ja izvēlas individuālu pieeju, īstenojot visu projektu atsevišķi, un jāpārlicinās, vai ir iespējams izveidot koalīciju. Tad seko nākamais uzdevums – izanalizēt iespējas veidot koalīcijas ar citiem energouzņēmumiem.

Ievērojot to, ka 110 kV GEL jānodrošina 1200 A slodzes strāva, savukārt 330 kV GEL – 2000 A, un balstoties uz KL 1. posma priekšprojekta izejas datiem, tika izvērtēti GEL kapitālieguldījumi trim pamatvariantiem (sk. 4.6. att.):

1. vienķēdes 110 kV GEL ar tēraudalumīnija vadu *AS-240/32*; viena fāze sadalīta divos vados (*2xAS-240/32*), rezultātā šāds variants nodrošina 1210 A strāvu;
2. vienķēdes 330 kV GEL ar vadu *AS-400/51*; fāze sadalīta trijos vados (*3xAS-400/51*) – 2475 A;
3. kooperatīva ķēde, kas sastāv no 110 kV GEL ar vadu *2xAS-240/32* – 1210 A; 330 kV GEL ar vadu *3xAS-400/51* – 2475 A.



4.6. att. GEL kapitālieguldījumi atbilstoši izvēlētajam variantam

Katram variantam aprēķinājām izskatāmās GEL kapitālieguldījumus kā galveno ekonomiskās efektivitātes rādītāju (sk. 4.6. att.). Analizējot iegūtos rezultātus, var secināt sekojošo [52]:

- I. ja pastāv GEL projekta realizācijas individuālā pieeja, kad būvuzņēmums A būvē pats savu 110 kV GEL, bet būvuzņēmums B – savu 330 kV GEL (sk. 4.6. att.), kopējie GEL kapitālieguldījumi, kādi nepieciešami katram no uzņēmumiem, vadoties pēc individuālas uzvedības principa, sniegti 4.2. tabulā;

4.2. tabula

GEL kapitālieguldījumi individuālas uzvedības gadījumā

Uzņēmums	Investīcijas, r.v.
A	6976000
B	9865000
<b>Kopējie kapitālieguldījumi A un B</b>	<b>16841000</b>

- II. ja pastāv GEL projekta realizācija, kad notiek pārrunas par koalīcijas organizēšanu no diviem uzņēmumiem un papildu peļņas sadali ar Šeplija vērtības izmantošanu, kam nepieciešama abu uzņēmumu piekrišana un akcepts, veidojas būvuzņēmumu A un B koalīcija (divi uzņēmumi, kas sadala papildu peļņu uz pusēm), un šajā gadījumā kooperatīvā 110 kV un 330 kV GEL ķēde izvietota uz vienas GEL trases (sk. 4.6. att.). Rezultātā nepieciešamie kopējie GEL kapitālieguldījumi abiem uzņēmumiem kooperatīvas uzvedības gadījumā uzrādīti 4.3. tabulā.

GEL kapitālieguldījumi kooperatīvās uzvedības gadījumā

	Investīcijas, r.v.
Uzņēmumu A un B koalīcija	14386000
Katra uzņēmuma papildus iegūtā peļņa	1227500
<b>Kopējā papildu peļņa uzņēmumiem A un B</b>	<b>2455000</b>

Acīmredzami, ka kooperatīvās uzvedības gadījumā GEL projekta investīcijas ievērojami samazinās. Tas nozīmē, ka šādas koalīcijas izveide ir racionāla, ekonomiski pamatota un iespējama no investīciju ietaupījuma viedokļa. Vērts atzīmēt, ka reālajā projektā peļņa mērāma desmitos miljonu EUR.

## 5. SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS TURPMĀKAM DARBAM

### 5.1. Kopējie secinājumi

1. GEL loma mūsdienu enerģētikā strauji pieaug, jo tiek paredzēta elektropārvades tīkla attīstība gan starptautiskā, gan nacionālā mērogā, tādējādi, no vienas puses, būs nepieciešams paplašināt esošā tīkla elektriskos savienojumus, būvējot jaunas GEL ar ievērojamu caurlaides spēju, no otras puses, šo problēmu risināšanu būs iespējams realizēt, izstrādājot un ieviešot esošajā elektrotīklā jaunas tehnoloģijas (piemēram, GEL termiskās slodzes strāvas monitoringa sistēmas, HTLS tipa vadu izmantošana), kas ļauj optimizēt GEL darbību, ekspluatāciju un vadību.
2. Lai varētu atrisināt GEL optimizācijas uzdevumu, jāievēro EPL īpatnējās konstrukcijas un parametri, kas formē to mehāniskos, termiskos un vides ietekmes ierobežojumus, tā rezultātā sasniedzot tehniski un ekonomiski pamatotu optimālo GEL projekta risinājumu tās praktiskajai realizācijai.
3. GEL projektēšanas gaitā jāizmanto moderni datorprogrammu nodrošinājuma kompleksi; piemēram, šajā darbā izmantoti *PLS-CADD* un *SAPR LEP*, kas ļauj veikt nepieciešamos aprēķinus un atbilstošu analīzi precīzi, kvalitatīvi, ekonomiski efektīvi un ātri, izpildot visas GEL projektēšanas uzdevumu izvirzītās pamatprasības.
4. Ievērojot jaunākās tendences energosistēmu attīstībā, kas būtiski ietekmē pārvades elektrotīkla plānošanas un attīstības procesu, rodas nepieciešamība pēc jaunām GEL optimizācijas pieejām, kas ļaus atvieglot lēmumu pieņemšanas procesu GEL projektēšanas optimizācijas uzdevumos, rezultātā samazinot ieguldīto investīciju apjomu un jaudas zudumus, kā arī uzlabojot sistēmas drošumu un palielinot pārvadāmās elektroenerģijas kvalitāti.
5. Lai atrisinātu GEL projektēšanas optimizācijas problēmu, tiek formulēts daudzkritēriju optimizācijas uzdevums, kas ievēro lielu stāvokļa un lēmumu mainīgo skaitu, kā arī gadījuma un nenoteikto parametru iespējamo ietekmi.
6. Darbā piedāvātā GEL daudzkritēriju optimizācijas metode, kas daļēji balstīta uz stohastisko pieeju un spēļu teorijas kritērijiem, ļauj apsvērt pat alternatīvas, kurās tiek pārkāpts visietekmējošākais ierobežojums, bet kuras, piemērojot dažus papildu pasākumus, var būt ekonomiski visizdevīgākais GEL projektēšanas risinājums.
7. Pierādītā GEL daudzkritēriju uzdevuma atrisināšanas pieejas izmantošanas racionalitāte balstās uz „Kurzemes loka” 1. posma projekta piemēru, rezultātā var secināt, ka piedāvātā metode, izmantojot Pareto lēmumu kopas izdalīšanu, ļauj novērtēt ietekmes uz vidi indikatoru uzlabošanas izmaksas un sekmē pamatotus lēmumus.
8. Darbā veikta termiskās slodzes strāvas aplēses metožu pārbaude, balstoties uz tiešu (eksperimentālie dati) un netiešu (aprēķina dati) GEL galveno parametru monitoringu, salīdzinot mērījumos un aprēķinos noteiktās vadu temperatūras un nokares vairākos



- esošo GEL darbības režīmos pie konkrētiem laika apstākļiem, lai noteiktu pieļaujamās slodzes strāvas vispiemērotāko (precīzāko) aplēses metodi (no termiskā viedokļa).
9. Vairāku GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmas verifikācijas modeļu analīzes rezultātā noskaidrojās vispiemērotākā metode – MT 34-70-037-87, tādējādi, izmantojot šīs metodes teorētisko bāzi, tika noteikta pieļaujamā vada temperatūra un slodzes strāva, balstoties, pirmkārt, uz mērījumu rezultātiem, otrkārt, uz skaitļošanas aprēķinu rezultātiem;
  10. Rezultātā darbā tiek piedāvāts sintezēts GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa algoritms, kura darbība balstās uz verifikācijas rezultātu pamatojumu dažādiem GEL piemēriem, ievērojot termiskos, mehāniskos un apkārtējās vides ierobežojumus.
  11. Piedāvātā algoritma izmantošana ļauj uzlabot pieļaujamās slodzes strāvas aplēses precizitāti pastāvošām vai projektējamām GEL, kā arī noteikt slēpto slodzes strāvas rezervi (GEL iespējamā papildu gabarīta novērtēšana), rezultātā sniedzot iespēju ievērojami palielināt GEL pārvadāmo jaudu, nosakot precīzu GEL pieļaujamo vada temperatūru pie konkrētiem laika apstākļiem. Turklāt faktisko vadu temperatūras datu izmantošana ļautu regulēt GEL pieļaujamo slodzes strāvu elastīgākā veidā, pielāgojoties dinamiski operatīvai augstsprieguma elektrolīniju kontrolei un vadībai reālā laikā režīmā un sniedzot jaunas iespējas viedā tīkla integrēšanai.
  12. Izmantotā sintezētā GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa algoritma pierādītā tehniskā efektivitāte dažādu problēmu izskatīšanā ļauj samazināt kopējo investīciju apjomu esošo GEL rekonstrukcijā, kļūstot par ekonomiski pamatotu risinājumu esošā elektropārvades tīkla uzlabošanai.
  13. Jaunu tehnoloģiju integrēšana, piemēram, augsttemperatūras vadu ar kompozītmateriāla serdeni (HTLS tipa vadi) izmantošana, ir efektīvs tehniski ekonomisks perspektīvais risinājums, modernizējot esošās GEL.
  14. Piedāvātais risinājums ir aprobēts, izmantojot praktiskā pielietojumā gan projekta „Kurzemes loks” (1. posms), gan esošā Latvijas elektropārvades tīkla GEL piemērus, analizējot HTLS un ACSR tipa vadu tehniskajā un ekonomiskajā salīdzinājumā iegūtos rezultātus, ievērojot GEL mehāniskos un termiskos ierobežojumus. Turklāt šis risinājums varētu būt ekonomiski vēl pamatotāks, ja HTLS tipa vadu cena tiktu samazināta.
  15. Metodes, kas balstās uz spēļu teoriju un tās kritērijiem, var palīdzēt pieņemt pareizo lēmumu par elektroenerģijas pārvades un enerģijas piegādes avotu attīstību.
  16. Kooperatīvo spēļu teoriju piemēro dažādu enerģētisko uzdevumu risināšanai, kur neatkarīgi energouzņēmumi var iegūt augstu peļņu, veidojot veiksmīgu koalīciju ar citiem tirgus dalībniekiem.
  17. Piedāvātā sintezēta GEL kapitālieguldījumu sadales metode ir aprobēta, izmantojot praktiskā pielietojumā projekta „Kurzemes loks” (1. posms) GEL piemēru. Darbā iegūtie rezultāti pamatoja GEL projekta iesaistīto energouzņēmumu koalīcijas izveides racionalitāti un iespējamās no investīciju ietaupījuma viedokļa ekonomiskās priekšrocības.

## **5.2. Rekomendācijas turpmākam darbam**

Piedāvātie esošo un projektējamo augstsprieguma elektrolīniju optimizācijas paņēmieni it īpaši aktualizējas pašreizējā enerģētikas nozares situācijā, kad energosistēmu attīstība tiek veicināta, pielāgojoties viedo tīklu koncepciju uzdevumiem. Līdz ar to, ievērojot vispārīgi pieņemtās nākotnes vīziju tendences enerģētikā, galvenokārt saistībā ar GEL attīstības un uzlabošanas tehniski ekonomiskajiem risinājumiem (optimizācijas paņēmieniem), turpmākajā darbā par mērķi nepieciešams izvirzīt sekojošo izklāstīto uzdevumu attīstību un modernizāciju.

1. Modernizēt izstrādāto GEL projektēšanas optimizācijas algoritmu, kas pamato GEL projektēšanas daudzkritēriālo uzdevuma nostādni ar Pareto pieejas un scenāriju pieejas izmantošanu galīgā lēmuma pieņemšanai, ieviešot to datorprogrammas realizācijā;
2. Attīstīt sintezēto GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmu/terminālu (no termiskā viedokļa), ieviešot papildu aprēķina blokus algoritmā, kas ievērotu esošo GEL vadu nomaiņu ar augsttemperatūras vadiem, tādējādi paplašinot vada pieļaujamo temperatūru un slodzes strāvu vērtību robežas, papildus izvērtējot darba un avārijas režīmu rašanās varbūtību pie noteiktajiem klimatiskajiem apstākļiem;
3. Izvērtēt šādu GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmu/terminālu izvietojuma nepieciešamības gadījumus esošā elektropārvades tīklā „šaurajās” vietās, kas ļautu minimizēt kapitālieguldījumus izmantojamo augstsprieguma elektrolīniju rekonstrukcijā;
4. Novērtēt prognozējamās klimata izmaiņas ietekmi uz Latvijas augstsprieguma elektrolīniju caurlaides spēju.

## LITERATŪRA

1. Flir systems, ThermaCAM™ P65, User's manual / Internets. - <http://www.alpinecomponents.co.uk/files/manuals-downloads/FLIR-P65-Manual.pdf>
2. Kestrel 4000 Weather Meter / Internets. - <http://kestrelmeters.com/products/kestrel-4000-weather-meter>
3. PLS-CADD™ (Power Line Systems - Computer Aided Design and Drafting) / Internets. - [http://www.powline.com/products/pls\\_cadd.html](http://www.powline.com/products/pls_cadd.html)
4. SAPR LEP Russian CAD / Internets. - [http://rubius.com/en/software\\_distribution/russian\\_cad/](http://rubius.com/en/software_distribution/russian_cad/)
5. Krišāns Z., Oļeiņikova I. Elektroenerģētisko uzņēmumu vadības pamati. - Rīga: RTU, 2007. - 157 lpp.
6. Vasiļjeva L. Vides ekonomikas būtība, 1. daļa. - Rīga: RTU, 1998. - 42. Lpp
7. Kiessling F., Nefzger P., Nolasco J.F., Kaintzyk U. Overhead Power Lines Planning, Design, Construction. - Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2003. - 759 p.
8. Morris H de Groot. Optimal Statistical Decisions. - McGraw-Hill, 1970. - 489 p.
9. Карапетян И. Г., Файбисович Д. Л., Шапиро И. М.. Справочник по проектированию электрических сетей / Под редакцией Д. Л. Файбисовича. - Москва: НИЦ ЭНАС, 2006. - 320 с.
10. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. - Москва: Энергоатомиздат, 1986. - 640 с.
11. Cooperative games: core and Shapley value / Internets. - [http://www.brown.edu/Departments/Economics/Papers/2007/2007-11\\_paper.pdf](http://www.brown.edu/Departments/Economics/Papers/2007/2007-11_paper.pdf)
12. Lloyd Shapley's Matching and Game Theory / Internets. - <http://www.econ.brown.edu/faculty/serrano/pdfs/ForthcomingSJE.pdf>
13. Osborne M. J., Publicly-available solutions for an introduction to game theory, University of Toronto, 2004 / Internets. - <http://cramton.umd.edu/econ414/osborne-public-solutions.pdf>
14. Aizsargjoslu likums / Internets. - <http://likumi.lv/doc.php?id=42348>
15. Enerģētikas likums / Internets. - <http://likumi.lv/doc.php?id=49833>
16. Elektroenerģijas tirgus likums / Internets. - <http://likumi.lv/doc.php?id=108834>
17. Latvijas energostandarts LEK 002, Energoietaišu tehniskā ekspluatācija / Internets. - [http://www.latvenergo.lv/files/text/energostandarti/LEK\\_002.pdf](http://www.latvenergo.lv/files/text/energostandarti/LEK_002.pdf)
18. Latvijas energostandarti / Internets. -

[http://www.let.latvenergo.lv/portal/page/portal/Latvian/LET/LET/latvijas\\_elektriskie\\_tikli/NO\\_RMATIVIE\\_DOKUMENTI/dokumenti/](http://www.let.latvenergo.lv/portal/page/portal/Latvian/LET/LET/latvijas_elektriskie_tikli/NO_RMATIVIE_DOKUMENTI/dokumenti/)

19. Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 262-05 „Elektronisko sakaru tīkli” / Internets. – <http://likumi.lv/doc.php?id=132352>

20. Noteikumi par ārējo inženierkomunikāciju izvietojumu pilsētās, ciemos un lauku teritorijās / Internets. – <http://likumi.lv/doc.php?id=98765>

21. Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 003-01 „Būvklimatoloģija” / Internets. – <http://likumi.lv/doc.php?id=53424>

22. CENELEC EN 50341-1/A1 standard. Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV – Part. 1: General requirements – common specifications, 2009.

23. Правила устройства электроустановок (ПУЭ): все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. 7-й выпуск. - Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2007. - 854 с.

24. Beryozkina S., Sauhats A., Vanzovichs E. Modeling of the load current of the transmission line// Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2011. - Rome, Italy: IEEE, 2011. - pp. 911-914.

25. Beryozkina S., Sauhats A., Vanzovichs E. Climate Conditions Impact on the Permissible Load Current of Transmission Line// Proceedings of the IEEE PES Trondheim PowerTech 2011 Conference. - Trondheim, Norway: IEEE PES, 2011. - 6. p.

26. ICF Consulting. Unit Costs of constructing new transmission assets at 380kV within the European Union, Norway and Switzerland, Final Report, 2002 / Internets. – [http://ec.europa.eu/energy/electricity/publications/doc/comp\\_cost\\_380kV\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/energy/electricity/publications/doc/comp_cost_380kV_en.pdf)

27. Hauer J., Overbye T., Dagle J., Widergren S. Advanced Transmission Technologies, National Transmission Grid Study / Internets. – <http://certs.lbl.gov/ntgs/issue-6.pdf>

28. Влияние воздушных линий на экологию / Internets. – <http://pdomagos.ru/post-user/1125>

29. Beryozkina S., Sauhats A., Neimane V. Designing a Transmission Line Using Pareto Approach// Proceedings of the IEEE PES Grenoble PowerTech 2013 Conference. - Grenoble, France: IEEE PES, 2013. - 6. p.

30. Lebesgue-Stieltjes integrāls / Internets. – <http://www.math.sunysb.edu/~daryl/ls.pdf>

31. Silverstein A. NCEP Transmission Technologies Workshop, 2011 / Internets. – <http://www.naruc.org/grants/Documents/Silverstein%20NCEP%20T-101%200420111.pdf>

32. Zima-Bočkarjova M., Matevosyan J., Zima M., Söder L. Sharing of Profit from Coordinated Operation Planning and Bidding of Hydro and Wind Power// IEEE Trans. on Power Systems. - 2010. - Vol.25 (No.3). - pp. 1663-1673.

33. Geert E.V. Increased Uncertainty a New Challenge for Power System Planners// IEE Colloquium. - 1998. - Digest No. 200. - pp. 1831-1837.

34. Neimane V. Towards Bayesian Solution for Network Planning Problem// RIMAPS. - Porto, Portugal: 2001.

35. Berjozkina S., Sauhats A., Banga A., Jakusevics I. Evaluation of Thermal Rating Methods Based on the Transmission Line Model// Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. - 2013. - Vol.50 (No.4). - pp. 22-33.

36. Berjozkina S., Sauhats A., Banga A., Jakusevics I. Testing Thermal Rating Methods for the Overhead High Voltage Line// Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2013. - Wroclaw, Poland: IEEE, 2013. - pp. 215-220.

37. Standard for Calculation the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors, IEEE Std. 738-2006 (revision of IEEE Std. 738-1993).

38. Overhead electrical conductors - Calculation methods for stranded bare conductors, IEC 1597.
39. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям нагрева проводов для действующих линий электропередач МТ 34-70-037-87, Москва, 1987 / Internets. - <http://www.gosthelp.ru/text/RD3420547Metodikarascheta.html>
40. Berjozkina S., Sauhats A., Vanzovichs E. Simulations of the Allowable Load Current of the Overhead Lines in the Latvian Power Network// Journal of Energy and Power Engineering (JEPE). - 2012. - Vol.6. (No.9). - pp. 1521-1526.
41. Berjozkina S., Sauhats A., Bargels V., Vanzovichs E. Detecting the Capacity Reserve in an Overhead Line// International Journal of Electrical, Electronic Science and Engineering. - 2012. - Vol.61. - pp. 327-332.
42. Beryozkina S., Sauhats A., Vanzovichs E. Mechanical and Thermal Limitations of the Load Current of the Transmission Line // Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2011. - Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2011. - pp. 336-340.
43. Vanzovichs E., Aristovs T., Berjozkina S. Allowable Load Current Calculation Method with Heating Limitation for Overhead Powerlines// Abstract Book and Electronic Proceedings of the 51<sup>st</sup> Annual International Scientific Conference of Riga Technical University. - Riga, Latvia: RTU, 2010. - pp. 47-52.
44. Kurzemes loks / Internets. - [http://www.ast.lv/lat/par\\_ast/parvades\\_tikls/kurzemes\\_loks/](http://www.ast.lv/lat/par_ast/parvades_tikls/kurzemes_loks/)
45. Berjozkina S., Sauhats A., Vanzovichs E. Evaluation of the Profitability of High Temperature Low Sag Conductors // Scientific Journal of Riga Technical University. - 2013. - Vol.31. - pp. 18.-24.
46. Berjozkina S., Bargels V., Sauhats A., Vanzovichs E. Elektropārvades līniju vadu ar kompozītmateriālu serdeni izmantošanas iespēju salīdzinošs vērtējums// Scientific Journal of Riga Technical University. - 2011. - Vol.28. - pp. 13.-18.
47. Berjozkina S., Bargels V., Sauhats A., Vanzovichs E. A Comparative Assessment of Conductors with Composite Core// Abstract Book and Electronic Proceedings of the 52<sup>nd</sup> Annual International Scientific Conference of Riga Technical University. - Riga, Latvia: RTU, 2011. - 6. p.
48. Berjozkina S., Sauhats A., Bargels V., Vanzovichs E. High Temperature Low Sag Conductors as Method for the Improvement of Electrical Transmission Lines// Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2012. - Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2012. - pp. 200-205.
49. Berjozkina S., Sauhats A., Bargels V., Vanzovichs E. The Technical and Economic Efficiency of Using Conductors with Composite Core in the Transmission Grid// Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on the European Energy Market EEM12. - Florence, Italy: IEEE, 2012. - 7. p.
50. Мисриханов М.Ш., Иостсон Ю.А., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю. Электромагнитные параметры воздушных линий электропередачи (ЭМП ВЛ). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006613744, 27.10.2006// Программы для ЭВМ, базы данных и топология интегральных микросхем. Официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и торговым знакам - № 1 (58) - М. - ФГУ ФИПС - 2007.
51. Pareto V. Cours D'Economie Politique, Vol. I and II. F. Rouge, Lausanne, 1896.
52. Moshkin I., Berjozkina S., Sauhats A. Solving of Transmission Network Development Tasks in Market and Uncertainty Conditions// Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on the European Energy Market EEM12. - Florence, Italy: IEEE, 2012. - 7. p.