

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Laila ZEMĪTE

Doktora studiju programmas «Enerģētika un elektrotehnika» doktorante

**ELEKTROSADALES TĪKLU DROŠUMA APRĒĶINA
METODES UN TO REALIZĀCIJA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
J. GERHARDS

RTU Izdevniecība
Rīga 2016

Zemīte L. Elektrosadales tīklu drošuma aprēķina metodes un to realizācija. Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU Izdevniecība, 2016. – 36 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Promocijas padomes P-05 (Enerģētika) 2016. gada 18. janvāra lēmumu Nr. 25/16.



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

ISBN 978-9934-10-778-8

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. gada 11. februārī Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 306. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

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

Dr. sc. ing. Aleksandrs Ļvovs,
Režīmu un plānošanas dienesta vecākais inženieris,
AS «Augstsprieguma tīkls»

Dr. sc. ing. Viktorija Neimane,
Vattenfall Research and Development,
Head of Section Power Technology,
Stockholm, Sweden

APSTIPRINĀJUMS

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

Laila Zemīte (Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi un priekšlikumi, informācijas avotu saraksts un seši pielikumi. Darba kopapjoms ir 174 lappuses, kurās ietvertas 35 tabulas, 36 attēli, seši pielikumi un 117 izmantotās informācijas avoti.

SATURS

SATURS.....	4
PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE	5
PROMOCIJAS DARBA MĒRĶIS UN ATRISINĀTIE UZDEVUMI.....	5
PĒTĪJUMA LĪDZEKĻI UN METODES.....	6
PROMOCIJAS DARBA ZINĀTNISKĀ NOZĪME	6
PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKAIS LIETOJUMS	6
PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA	7
PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS	8
1. ELEKTROAPGĀDES DROŠUMA ANALĪZE	8
1.1. Elektroapgādes tīkla drošuma aprēķina metodes	8
1.2. Elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķina metodes	10
2. ELEKTROAPGĀDES DROŠUMA STĀVOKLIS UN ATTĪSTĪBAS TENDENCES LATVIJĀ.....	11
2.1. Elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas iemesli un secība.....	11
2.2. Elektroapgādes drošuma palielināšanas risinājumi.....	13
2.3. Elektroapgādes tīklu atslēgumu analīze	13
2.4. Atslēgumu ilgumu varbūtību sadalījumu atbilstības hipotēžu pārbaude	15
3. ELEKTROAPGĀDES DROŠUMA UN ATSLĒGUMU RADĪTO ZAUDĒJUMU APRĒĶINA METODOLOĢIJA	16
3.1. Elektroapgādes drošuma un atslēgumu radīto zaudējumu aprēķina uzdevums	16
3.2. Elektroapgādes tīkla modeļa izvēle.....	18
3.3. Elektroapgādes drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķina metožu izvēle	19
3.4. Elektroapgādes drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķina apraksti	21
4. ELEKTROAPGĀDES DROŠUMA UN ATSLĒGUMU RADĪTO ZAUDĒJUMU APRĒĶINS.....	23
4.1. IEAR aprēķinu rezultāti	24
4.2. Ar A-zvaigznes metodi veikta drošuma aprēķina rezultāti	25
4.3. Ar Montekarlo metodi veikta drošuma un atslēgumu radīto zaudējumu aprēķina rezultāti.....	26
5. ELEKTROAPGĀDES TĪKLU OPTIMIZĀCIJA NO DROŠUMA VIEDOKĻA	28
5.1. Jaudas slēdžu skaita un izvietojuma optimizācijas rezultāti, ņemot vērā kapitālieguldījumu un atslēgumu novēršanas izmaksas.....	29
5.2. Jaudas slēdžu skaita un izvietojuma optimizācijas rezultāti, ņemot vērā kapitālieguldījumu un atslēgumu novēršanas izmaksas.....	29
5.3. Ar ģenētisko algoritmu veiktas atdalītāju skaita un izvietojuma optimizācijas rezultāti.....	31
SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI	33
IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI.....	34

PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE

Līdz ar ekonomikas un cilvēces attīstību mainās arī elektrosadales tīkli un tiem pieslēgto elektroietaišu tehniskie un tehnoloģiskie risinājumi, to izmantošanas iespējas un prasības piegādātās elektroenerģijas kvalitātei. Savukārt, attīstoties ekonomikai Latvijā, pieaug lietotāju prasības elektroapgādes drošumam. Elektroapgādes tīklu operatora galvenā funkcija ir nodrošināt elektroapgādi ar pēc iespējas mazākiem finansiāliem līdzekļiem, nodrošinot pieļaujamu drošuma un kvalitātes līmeni lietotājiem. Lai veiktu elektroapgādes sistēmas bojājumu risku novērtēšanu, ir nepieciešams zināt tīkla struktūru, slodzes un lietotāju datus [3]. No visiem elektroenerģijas traucējumiem 90 % gadījumu elektroapgādes drošuma problēmas ir sadales tīklu līmenī – elektroapgādes tīklu elementos (gaisvadu līnijās, kabeļlīnijās, transformatoru apakšstacijās, atdalītājos, jaudas slēdžos u. c.), tādēļ sadales tīklu drošuma paaugstināšanai ir īpaši liela nozīme [13]. Promocijas darbā pētīti tieši sadales tīkli un īpaši — 20 kV tīkli, kādi ir lielākā daļa sadales tīklu Latvijā [1].

Latvijā tīkla automatizācijas apjoms vēl arvien nav pietiekams. AS «Sadales tīkls» atslēgumu biežuma un ilguma rādītāji joprojām atpaliek no Eiropas valstu vidējā līmeņa.

Latvijā elektrotīkla atslēgumu rezultātā elektroapgāde tiek pārtraukta ievērojami vairāk lietotājiem, jo tehniski nav iespējams automātiski nodalīt pēc iespējas mazāku elektrotīkla atslēgto posmu un atjaunot elektroapgādi neskartajās tīkla daļās [5]. Lai nodrošinātu ātru un efektīvu bojājumu vietas lokalizāciju un atslēgumi ietekmētu pēc iespējas mazāk lietotāju, nepieciešams palielināt tīkla sekcionējošo elementu skaitu un novērtēt to optimālo izvietojumu. Lai uzlabotu elektrolīniju sekcionēšanas iespējas un samazinātu atslēgumu īpatsvaru, kas radušies bojājumu rezultātā, tīklā nepieciešams uzstādīt papildu sekcionējošos elementus [1]. Ņemot vērā brīvā tirgus apstākļus un arvien pieaugošās lietotāju prasības pēc nepārtrauktas elektroapgādes, nepieciešams noteikt kapitālieguldījumu lietderību, kā arī veikt elektroapgādes atslēgumu rezultātā radušos zaudējumu un elektroapgādes drošuma aprēķinus [5].

Lielu ieguldījumu elektroapgādes drošuma jautājumu risināšanā devuši pasaulē zināmi zinātnieki: *Billinton R.*; *Brown R. E.*, kā arī Latvijas zinātnieki: *Dr. habil. sc. ing. Zigurds Krišāns*, *Dr. sc. ing. J. Gerhards* u. c.

Pēdējos gados elektroapgādes drošuma jautājumu izpētei veltīti vairāki darbi Latvijā, piemēram:

- 1) Kutjuns Antons. Elektroapgādes drošuma faktora novērtēšanas metodikas izstrāde. Promocijas darbs. Rīga: [RTU], 2006. 112 lpp.
- 2) Runčs Jānis. Pilsētu videsprieguma tīklu attīstības variantu izvēle un pamatojums. Promocijas darbs. Rīga: [RTU], 2007. 94 lpp.
- 3) Ļvovs Aleksandrs. Elektroapgādes drošuma līmeņa tehniski–ekonomiskās regulēšanas metodoloģijas izstrāde. Promocijas darbs. Rīga: [RTU], 2013. 156 lpp.

PROMOCIJAS DARBA MĒRĶIS UN ATRISINĀTIE UZDEVUMI

Promocijas darbā izvirzīts šāds mērķis: elektroapgādes drošuma līmeņa paaugstināšana, ņemot vērā sekcionējošo elementu skaita un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu un elektroapgādes drošuma aprēķināšanas rezultātus.

Promocijas darba galvenie uzdevumi ir:

- 1) 20 kV sadales tīklu elektroapgādes drošuma aprēķina, drošuma paaugstināšanas risinājumu ar sekcionējošo elementu skaita un izvietojuma izmaiņām un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķina metožu izstrāde;

- 2) 20 kV sadales tīklu izpētes un analīzes procesā iegūtās informācijas, piemērojot to tālākai aprēķinu metožu izstrādei, strukturēšana;
- 3) elektroapgādes drošuma, elektroapgādes sekcionējošo elementu optimālā skaita un izvietojuma un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķinu veikšana un iegūto rezultātu analīze.

PĒTĪJUMA LĪDZEKĻI UN METODES

Darbā izmantoti, analizēti un apkopoti informācijas avoti angļu, krievu un latviešu valodā no pieejamajām datubāzēm, grāmatām, publikācijām un citas literatūras.

Promocijas darbs balstīts uz elektroapgādes drošuma aprēķinu, elektroapgādes drošuma optimizācijas un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu empīriskā un statistiskā aprēķina analīzes, metožu izstrādes un piemērojamības izvērtējuma.

Promocijas darba uzdevumu risināšanai tika izstrādātas elektroapgādes drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķina metodes, uz kuru bāzes izveidotas datorprogrammas un elektroapgādes drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu programmatūras, kā arī veikta datu analīze un aprēķini. Aprēķinu veikšanai un salīdzināšanai tika izmantota *Microsoft Excel* programmatūra.

PROMOCIJAS DARBA ZINĀTNISKĀ NOZĪME

Promocijas darbā:

- 1) veikta detalizēta elektroapgādes drošuma un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķina metožu un sekcionējošo elementu skaita un izvietojuma optimizācijas analīze, salīdzināšana, kā arī priekšrocību un trūkumu identificēšana;
- 2) izstrādātas metodikas, kas ietver elektroapgādes drošuma un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķinu, balstoties uz A-zvaigznes, Montekarlo modelēšanas un ģenētisko algoritmu;
- 3) izstrādātas metodikas ļauj izvēlēties optimālo sekcionējošo elementu izvietojumu un skaitu un samazināt atslēgumu ilgumu, minimizēt elektroapgādes atslēgumu rezultātā lietotājiem, sadales tīklam un sabiedrībai radītos zaudējumus, kā arī minimizēt elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas, elementu ekspluatācijas un kapitālieguldījumu izmaksas.

PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKAIS LIETOJUMS

Galvenā darba praktiskā nozīme ir, ka:

- 1) izstrādātās metodes dod iespēju aprēķināt elektroapgādes drošumu, atslēgumu rezultātā radušos zaudējumus un sekcionējošo elementu skaita un izvietojuma lietderību;
- 2) izvērtēts un ekonomiski pamatots sekcionējošo elementu skaits un izvietojums; aprēķinātais elementu skaits un izvietojums var sniegt maksimālo ieguvumu pie minimāliem kapitālieguldījumiem, paaugstinot elektroapgādes drošumu, samazinot atslēgumu rezultātā radītos zaudējumus un elektroapgādes atslēgumu ilgumu;
- 3) metožu izmantošana ļauj aprēķināt un prognozēt iespējamās atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu apmērus sadales tīkliem, sabiedrībai un lietotājiem, kas ir būtiski, arī izvērtējot iespējamās kompensācijas lietotājiem;
- 4) izstrādātās metodes var tikt izmantotas AS «Sadales tīkls» kapitālieguldījumu lietderīguma priekšizpētē;
- 5) izstrādātās elektroapgādes drošuma, sekcionējošo elementu skaita un izvietojuma aprēķina un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķina metodes var

praktiski izmantot ne tikai Latvijas apstākļos un ne tikai 20 kV elektroapgādes tīklos, bet arī citās valstīs un dažādiem nominālā sprieguma līmeņiem.

Darba rezultāti izmantoti AS «Sadales tīkls» pārejas no divlīmeņu operatīvā darba organizācijas modeļa uz vienlīmeņa operatīvā darba organizācijas modeli plānošanā un realizācijā, bojājumu novēršanas plānošanā un iepriekšējā kapitālieguldījumu lietderības izvērtējumā.

PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

Par darba izstrādē iegūtiem rezultātiem tika ziņots un tie tika apspriesti septiņās starptautiskajās konferencēs:

- 1) Zemīte L., Gerhards J. Evaluation of Distribution Network Customer Outage Costs, 50th International Scientific Conference Power and Electrical Engineering, Latvija, Rīga, 2009. gada oktobris, (EBSCO, CSA/ProQuest, VINITI, ISSN 1407 – 7345).
- 2) Kutjuns A., Zemīte L., Power network system reliability and methods of calculation, IEEE Bucharest Power Tech, Rumānija, Bukareste, 2009. gada jūnijs, (IEEE Xplore, SCOPUS, ISI, INSPEC).
- 3) Zemīte L., Gorobecs M., Gerhards J., Ribickis L., Ļevčenko A. A-Star Algorithm for Reliability Analysis of Power Distribution Networks, The 5th International Conference on Electrical and Control Technologies (ECT2010): Conference Proceedings, Lietuva, Kaunas, 6.–7. maijs, 2010. (SCOPUS, ISSN 1822–5934).
- 4) Kutjuns A., Zemīte L., Bērziņa K. Practical and Theoretical Methods of Reliability Securing in Transmission and Distribution Network, Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2010, Čehija, Brno, 4.–6. maijs, 2010. (SCOPUS, EBSCO, CSA, Ulrich's International Directory, CEPS, OCLS).
- 5) Zemīte L., Gerhards J. Reliability Evaluation of Distribution Systems, 9th International Conference on Electrical and Control Technologies (ECT–2014), Lietuva, Kaunas, 8.–9. maijs, 2014. (SCOPUS, ISSN 1822. – 5934).
- 6) Zemīte L., Gerhards J., Gorobecs M., Ļevčenko A. Optimization of Switch Allocation in Power Distribution Systems, DEMSEE 2015 proceedings, Ungārija, Budapešta, 24.–25. septembris, 2015. (Trivent Publishing, SCOPUS, ISBN 978–615–80340–0–5).
- 7) Zemīte L., Gerhards J., Gorobecs M., Ļevčenko A. Optimization of Distribution Systems Reliability with the Stochastic Behavior, Proceedings, Latvija, Rīga, 14. oktobris, 2015. Rīga: RTU Press, 2015. (IEEE Xplore, SCOPUS).

Publikācijas

Par darba izstrādē iegūtiem rezultātiem starptautiski referējamajos izdevumos un zinātnisko rakstu krājumos:

- 1) Zemīte L., Gerhards J. Evaluation of Distribution Network Customer Outage Costs, 50th International Scientific Conference Power and Electrical Engineering, Latvija, Rīga, 2009. gada oktobris, (EBSCO, CSA/ProQuest, VINITI, ISSN 1407 – 7345).
- 2) Kutjuns A., Zemīte L., Power network system reliability and methods of calculation, IEEE Bucharest Power Tech, Rumānija, Bukareste, 2009. gada jūnijs, (IEEE Xplore, SCOPUS, ISI, INSPEC).
- 3) Zemīte L., Gorobecs M., Gerhards J., Ribickis L., Ļevčenko A. A-Star Algorithm for Reliability Analysis of Power Distribution Networks, The 5th International Conference on Electrical and Control Technologies (ECT2010): Conference Proceedings, Lietuva, Kaunas, 6.–7. maijs, 2010. (SCOPUS, ISSN 1822–5934).

- 4) Kutjuns A., Zemīte L., Bērziņa K. Practical and Theoretical Methods of Reliability Securing in Transmission and Distribution Network, Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2010, Čehija, Brno, 4.–6. maijs, 2010. (SCOPUS, EBSCO, CSA, Ulrich's International Directory, CEPS, OCLS).
- 5) Zemīte L., Gerhards J. Reliability Evaluation of Distribution Systems, 9th International Conference on Electrical and Control Technologies (ECT-2014), Lietuva, Kaunas, 8.–9. maijs, 2014. (SCOPUS, ISSN 1822. – 5934).
- 6) Zemīte L., Gerhards J., Gorobecs M., Ļevčenko A. Optimization of Switch Allocation in Power Distribution Systems, DEMSEE 2015 proceedings, Ungārija, Budapešta, 24.–25. septembris, 2015. (Trivent Publishing, SCOPUS, ISBN 978–615–80340–0–5).
- 7) Zemīte L., Gerhards J., Gorobecs M., Ļevčenko A. Optimization of Distribution Systems Reliability with the Stochastic Behavior, Proceedings, Latvija, Rīga, 14. oktobris, 2015. Riga: RTU Press, 2015. (IEEE Xplore, SCOPUS).

PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi un priekšlikumi, informācijas avotu saraksts un seši pielikumi. Darba kopējums ir 174 lappuses, kurās ietvertas 35 tabulas, 36 attēli, seši pielikumi un 117 izmantotās informācijas avoti.

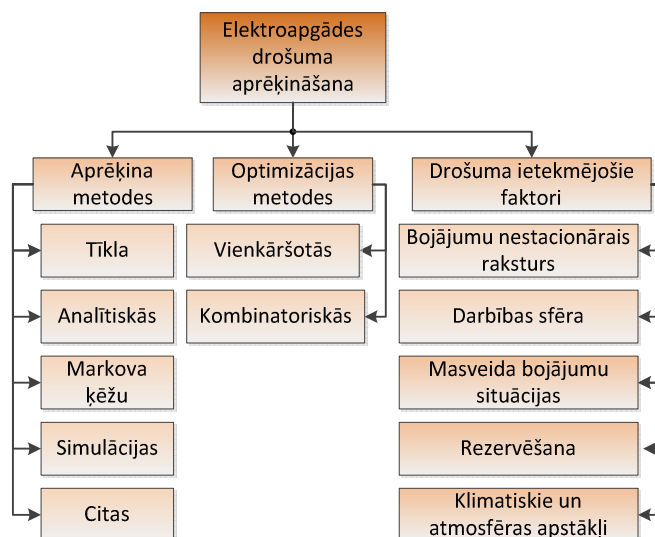
1. ELEKTROAPGĀDES DROŠUMA ANALĪZE

Elektroapgādes tīklu galvenā funkcija ir nodrošināt lietotājiem nepārtrauktu un kvalitatīvu elektroapgādi ar pēc iespējas mazākiem finansiāliem līdzekļiem. Pastāv vairāki drošuma definīcijas varianti. Atbilstoši ISO 9000:2007 A/L standartam drošums tiek definēts kā elementa spēja noteiktā periodā izpildīt noteiktas funkcijas. Drošumu var apzīmēt ar darbības vai darbības spējas varbūtību raksturlielumiem. Lai aprēķinātu elektroapgādes tīkla drošumu, ierasti tiek izmantoti lietotāju elektroapgādes sistēmas atslēgumu ilguma un biežuma rādītāji. Elektroapgādes tīkla drošuma rādītāji var atspoguļot slodžu punktu drošuma rādītājus, kas raksturo elementu kopas darbību, vai elektroapgādes sistēmas drošuma rādītājus, kas raksturo kopējo sistēmas darbību. Slodžu punktu rādītāji ļauj aprēķināt drošumu ikvienā punktā [17]. Lielākajā daļā elektroapgādes drošuma aprēķina metožu tiek aprēķināta darbības spējas varbūtība, darbības spējas vidējais ilgums un elektroapgādes atjaunošanas ilgums, elementu remonta vai nomaiņas ilgums, lokalizēšanas ilgums un ilgums līdz bojājumiem.

Elektroapgādes atslēgumu rezultātā radītos zaudējumus var iedalīt trīs līmeņos: sadales tīkla, lietotāju un sabiedrības līmenī, un katrā no tiem ir citi priekšnosacījumi un prioritātes [12, 31]. Lai aprēķinātu atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu summāro vērtību, nepieciešams apskatīt atslēgumu radītos zaudējumus visos līmeņos [6, 28].

1.1. Elektroapgādes tīkla drošuma aprēķina metodes

Elektroapgādes drošuma aprēķina metodes var iedalīt trīs pamatkategorijās: pēc aprēķina veida, pēc elektroapgādes drošumu ietekmējošiem faktoriem un pēc elektroapgādes drošuma optimizācijas (1.1. att.) [6, 14, 23, 27, 28, 41, 42, 43, 44].



1.1. att. Elektroapgādes drošuma aprēķina metožu iedalījums

Tīkla metodēs drošuma diagrammas tiek pakāpeniski pārveidotas vienkāršā paralēlo vai virknes slēgumu sistēmā. Veicot loģisku iespējamo sistēmas stāvokļu noteikšanu un izmantojot paralēlo vai virknes slēgumu vienādojumus, aprēķina nepieciešamos drošuma rādītājus [6, 13, 14, 23, 27, 28].

Markova ķēžu metodes plaši izmantotas konkrētu problēmu simulēšanā, un tās tiek veiksmīgi lietotas arī drošuma analīzē [6, 15, 44]. Stāvokļus Markova ķēžu procesos raksturo ar pārejas procesiem no viena stāvokļa uz citu [15, 23, 27, 28].

Ar analītisko metožu palīdzību sistēma tiek attēlota kā matemātisks modelis. Svarīgi atzīmēt, ka ar analītiskajām metodēm drošumu faktori tiek aprēķināti, balstoties uz reālu procesu un nejaušu sistēmas darbību. Tādēļ metode aplūko problēmu kā reālu eksperimentu virkni definētā laikā [13]. Ar analītiskajām metodēm iespējams iegūt vienmēr nemainīgu rezultātu vienai un tai pašai sistēmai, tam pašam modelim un tiem pašiem datiem [6, 14, 23, 27, 28].

Ar simulācijas metožu palīdzību aprēķina notikumu radīto ietekmi uz katru elementu, kā arī notikuma varbūtības, iegūstot gaidāmo notikumu varbūtiskos drošuma rādītājus. Izmantojot šīs metodes, iespējams precīzi simulēt sarežģītas sistēmas darbību un dinamiski uzskaitīt katru iespējamo sistēmas stāvokli. Simulācijas metožu pamatā ir uzdevums precīzi simulēt notikumu secību pēc nejaušības principa, iegūstot atšķirīgus rezultātus dažādiem lietotājiem. Šādi detalizēti simulēti notikumi uzskatāmi atspoguļo nelielas drošuma izmaiņas pie nelielām izmaiņām sistēmā [34].

Viena no populārākajām simulācijas metodēm ir Montekarlo metode. Ar tās palīdzību elementu datus iespējams modelēt kā varbūtības funkciju. Tāpat iespējams modelēt sarežģītas sistēmas, notikumus un aprēķināt dažādus iespējamus rezultātus, nevis vienu noteiktu vērtību. Ar Montekarlo metodi iespējams pārraudzīt retus, bet svarīgus sistēmas režīmus. Katra iterācija dod atšķirīgu rezultātu, tāpēc jāveic liels iterāciju skaits, pie kura iegūtais rezultāts mainās iepriekš definētās robežās [7, 13, 34]. Ja vēlamo rezultātu ir vidējā vērtība, aprēķini veicami, līdz visu rezultātu vidējā vērtība kļūst stabila.

Ar optimizācijas metodēm iespējams veikt dažādu problēmu iespējamo risinājumu analīzi. Piemēram, elementu skaita un izvietojuma sekcionēšanas analīze tiek veikta, lai aprēķinātu kapitālieguldījumu lietderīgumu un atrastu optimālākās elektroapgādes tīkla sekcionēšanas vietas [32, 41, 42, 43]. Vienkāršotās elektroapgādes tīklu optimizācijas metodes izmanto, lai atsevišķi aprēķinātu katra elektroapgādes tīklu elementa ietekmi uz elektroapgādes drošumu [32]. Viena no visbiežāk lietotajām optimizācijas stratēģijām ir dažādu sekcionējošo elementu izmantošana atkarībā no to attāluma līdz elektroenerģijas lietotājiem un/vai apakšstacijai,

un/vai līdz tuvākajam elementam. Kombinatoriskās elektroapgādes tīklu optimizācijas metodes tiek atvasinātas no bioloģiskiem vai kognitīviem procesiem — rūdīšanas simulācijas, tabu meklēšanas, ģenētiskā algoritma, skudru koloniju optimizācijas u. c.

Pēc tam, kad izvēlēta kāda no iepriekš aprakstītajām metodēm, nepieciešams veikt elektroapgādes drošuma aprēķinu, kurā ņemti vērā dažādi elektroapgādes drošumu ietekmējošie faktori un to kombinācijas.

Pēc rezervēšanas pamatuzdevuma elektroapgādes elementus var iedalīt trīs pamatgrupās — nerezervējamās, rezervējamās un papildu. Nerezervējamie elementi ir tie, kuru bojājumu rezultātā nav iespējams nodrošināt elektroapgādi pa rezerves līnijām vai no citas puses. Rezervējamie elementi ir tie, kuru bojājumu gadījumā apskatāmajam elementam iespējama elektroapgāde no citas puses. Papildu elementi ir tie, kuru bojājumu gadījumā var atjaunot elektroapgādi apskatāmajā elementā, kamēr bojātais elements atrodas atslēgtā stāvoklī [4, 20, 22, 24, 34].

Masveida bojājumu situācija veidojas noteiktos laika apstākļos, kas izraisa bojājumu biežuma vairākkārtēju pieaugumu, tādēļ drošuma aprēķinā nepieciešams masveida bojājumu gadījumu apskatīt atsevišķi [10].

1.2. Elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķina metodes

Elektroapgādes atslēgumu rezultātā radītos zaudējumus, kam ir ekonomiska vai sociāla ietekme uz sabiedrību, iespējams iedalīt tiešos un netiešos zaudējumos. Tiešie zaudējumi saistīti ar nepiegādāto elektroenerģiju. Netiešie zaudējumi nav saistīti ar pašiem atslēgumiem, bet gan ar to radītajām sekām. Pastāv vairāki elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķina veidi atkarībā no dažādiem atslēgumu ilgumiem, lietotāju grupu sadalījuma, rezultātu aprēķina metodēm, datu iegūšanas metodēm u. c. (1.1. tabula) [16, 26].

1.1. tabula

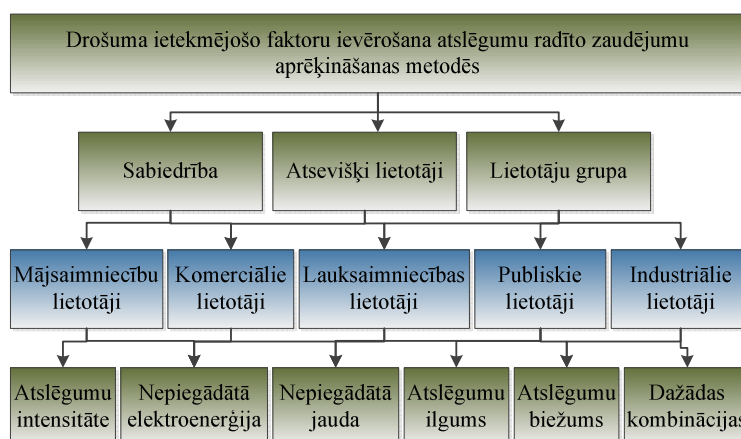
Atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķinu veidu salīdzinājums

Anālītiskās metodes	Simulācijas metodes	Lietotāju aptauju metodes
Nav nepieciešams aprēķina metodi vienkāršot	Jebkuru parādību iespējams modelēt	Objektīviem rezultātiem nepieciešams liels aptaujājamo skaits
Nepieciešams relatīvi īss aprēķina ilgums	Nepieciešams liels rezultāta atrašanas ilgums	Nepieciešams liels aptaujāšanas, statistikas apkopošanas ilgums un datu ticamības novērtēšana
Iegūtie rezultāti atkarīgi no datu precizitātes	Rezultāti atkarīgi no iterāciju skaita	Rezultāti atkarīgi no lietotāju sniegto datu precizitātes un atsaucības
Iegūst vidējās vērtības	Varbūtības sadalījumā norādīti rezultāti	Rezultātā iegūst vidējās subjektīvās vērtības

Elektroapgādes atslēgumu rezultātā radušos zaudējumu aprēķina metodes pēc aprēķina veida iespējams iedalīt trīs apakšgrupās — analītiskajās, simulācijas un lietotāju aptauju metodēs [9, 16]. Analītiskās metodes, līdzīgi kā drošuma aprēķins, balstītas uz elektroenerģijas izmaksām, atslēgumu rezultātā dažādām lietotāju grupām radīto zaudējumu statistikas datiem, tirgus tendencēm un lietotāju elektroapgādes rezervēšanas iespējām. Izmantojot simulācijas metodes, visbiežāk tiek ņemti vērā tādi paši pamatdati kā analītiskajās metodēs [11, 24, 25]. Ar lietotāju aptauju metožu palīdzību sākotnējos datus iespējams iegūt pēc anketēšanas, statistikas vai interviju veidā. Vērtējumu iespējams salīdzināt pēc tiešiem un netiešiem zaudējumiem un pēc iespējamā bojājumu riska [16, 25, 26].

Pēc iepriekš aprakstīto metožu izvēles — analītiskās, simulācijas vai lietotāju aptauju metodes — nepieciešams veikt atslēgumu rezultātā lietotājiem radīto tiešo un netiešo zaudējumu analīzi un aprēķinu. Drošumu ietekmējošos faktorus iespējams iedalīt apakšgrupās pēc elektroenerģijas lietotājiem, nepiegādātās elektroenerģijas vai jaudas, atslēgumu ilguma, biežuma, kā arī veidot dažādas šo apakšgrupu kombinācijas. Lietotāju grupu iedalījums tiek

veidots, ņemot vērā lietotāju līdzīgu elektroenerģijas patēriņu un līdzīgus atslēgumu radītos zaudējumus (1.2. att.) [6].



1.2. att. Elektroapgādes atslēgumu radītos zaudējumus ietekmējošie faktori

2. ELEKTROAPGĀDES DROŠUMA STĀVOKLIS UN ATTĪSTĪBAS TENDENCES LATVIJĀ

Elektroapgādi AS «Sadales tīkls» sadales sistēmas 1,126 milj. lietotāju objektiem nodrošina 94 780 km elektroapgādes tīklu, 132 110/6–20 kV apakšstacijas, 26 407 sadales transformatoru apakšstacijas, 29 251 sadales elektrotīklu transformators, ~1,4 milj. gab. gaisvadu līniju balsti. Lietuvā un Igaunijā ir relatīvi mazāk teritoriju ar mežiem, tāpēc arī bojājumu iespēja vētru un snieglauzes gadījumos ir mazāka [5]. Lietuvā un Igaunijā ir lielāks 6–35 kV tīklu barojošo apakšstaciju skaits, un tā rezultātā ir mazāks līnijas vidējais garums līdz normālām dalījuma vietām. Tas samazina atslēgto lietotāju skaitu, taču palielina elektrotīklu ekspluatācijas izmaksas. Daļēji tas izskaidro arī faktu, ka Latvijā ir lielāks atslēgumu ilgums, jo darbu veikšanai 20 kV tīklā ir jāatslēdz garāki līnijas posmi.

2.1. Elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas iemesli un secība

Atslēgumi sadales tīklos dabas izraisītu traucējumu rezultātā ir tiešā veidā atkarīgi no masveida bojājumu esamības/neesamības un to apjoma gadā, kā arī trašu tīrīšanas apjoma šajā laika periodā [1]. Putnu un dzīvnieku radītie bojājumi atkarīgi no meža dzīvnieku un putnu migrācijas un trases atrašanās vietas [1]. Materiālu izmaiņas ekspluatācijas laikā ir atkarīgas no laika apstākļiem, lietus un negaisu intensitātes un apkārtējās vides temperatūras [2]. Visbiežāk elektroapgādes bojājumus Latvijā gaisvadu elektroapgādes tīklā izraisa dabas apstākļi. Esošā sadales elektrotīkla analīze liecina, ka ir vairāki faktori, kas samazina elektroapgādes kvalitāti, kā arī uzņēmuma darbības efektivitāti: lielais 20 kV kailvadu gaisvadu līniju īpatsvars (79 %), no kurām 35–40 % atrodas mežainā apvidū, laikus neatjaunotais un fiziski nolietotais līniju īpatsvars, nepietiekams elektrotīkla sekcionēšanas apjoms un vienotas dispečervadības sistēmas trūkums, nepietiekams 110 kV apakšstaciju skaits, nepietiekams resursu apjoms uzskaites elementu plānveida apsekošanai. Pašreiz elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršana un reģistrēšana notiek pēc 2.1. att. redzamās shēmas [33]. Elektroapgādes atjaunošanas summārais ilgums ir atkarīgs no atslēgumu un lietotāju atrašanās vietas tīkla struktūrā

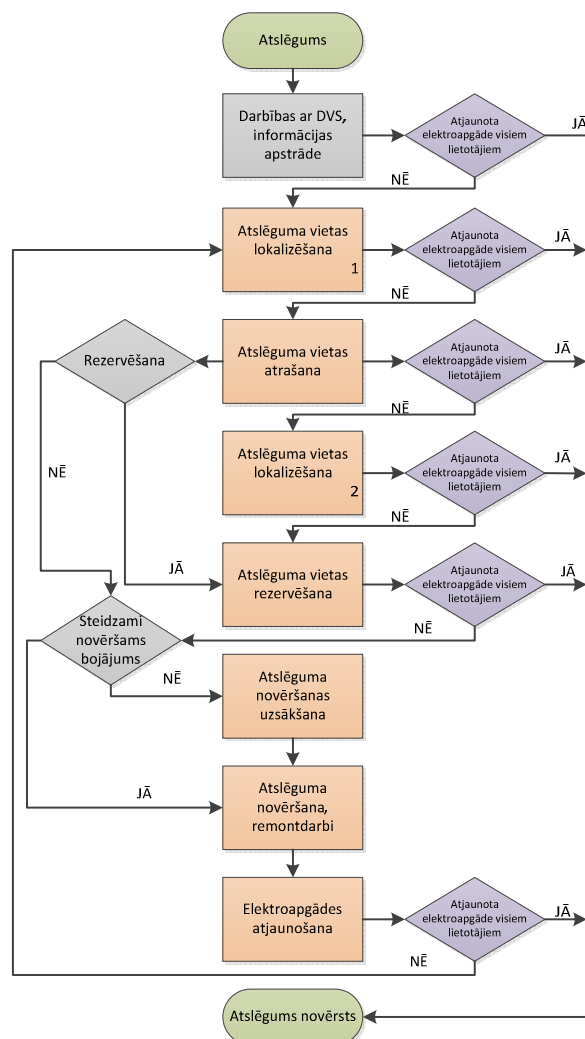
$$t_d = t_{rem} + t_{atj}, \quad (2.1)$$

kur

t_d — darbu norises ilgums,

t_{rem} — remontdarbu veikšanas ilgums,

t_{atj} — elektroapgādes atjaunošanas ilgums.



2.1. att. Atslēgumu novēršanas shēma

Pārejošu bojājumu gadījumā tas ir vienāds ar t_{lok1} , nepārejošu bojājumu gadījumā, izmantojot sekcionēšanu, nesaistītajiem lietotājiem tas ir vienāds ar

$$t_{kom} = t_{lok1} + t_{atr} + t_{rez} + t_{lok2}, \quad (2.2)$$

kur

$t_{lok(1,2)}$ — bojājumu lokalizācijas ilgums,

t_{atr} — bojājumu vietas atrašanas ilgums,

t_{rez} — bojājumu vietas rezervēšanas ilgums,

t_{kom} — komutācijas ilgums [35].

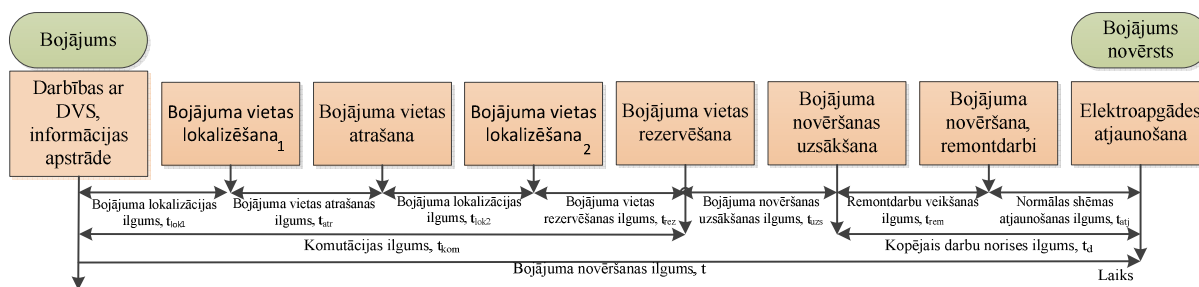
Nepārejošu bojājumu gadījumā lietotājiem atslēgtā tīkla posmā tas ir vienāds ar atslēgumu summāro ilgumu (2.2. att.).

$$t = t_{kom} + t_d + t_{uzs}, \quad (2.3)$$

kur

t — atslēgumu ilgums,

t_{uzs} — bojājumu novēršanas uzsākšanas ilgums [29, 37, 39].



2.2. att. Elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas ilguma skala

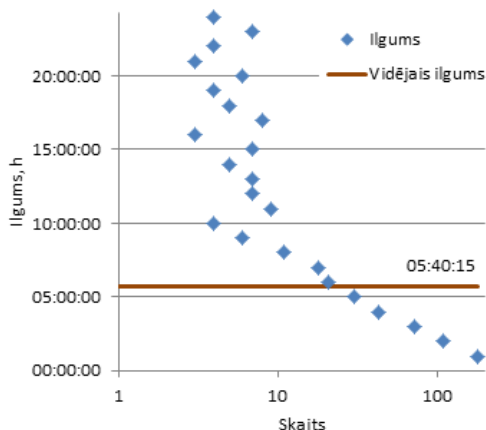
2.2. Elektroapgādes drošuma palielināšanas risinājumi

Drošumu ir lietderīgi paaugstināt tikai līdz tādām noteiktām līmenim, pēc kura drošuma uzlabošanai vairs nav ekonomiska pamatojama [4]. Samazināt bojājumu biežumu 20 kV sadales tīklos iespējams ar izolētu vadu vai kabeļlīniju lietošanu gaisvadu līniju vietā, trašu tīrīšanu, nokalpojušo elementu savlaicīgu nomaiņu, profilaktisko apkalpošanu un kritisko elementu uzraudzību. Samazināt elektroapgādes atslēgumu ilgumu iespējams ar bojājumu vietas uzrādītājiem, tīkla optimālu rekonfigurāciju pēc bojājuma, sadales tīkla sekcionēšanu, papildu apakšstaciju izbūvēšanu, rezerves sadales transformatoru lietošanu, pārvietojamo elektroenerģijas ģeneratoru izmantošanu, ātrāku personāla darbību, labāku darba koordināciju, sacilpota tīkla veidošanu, sekcionējošo elementu skaita palielināšanu, viedo skaitītāju ieviešanu. AS «Sadales tīkls» mērķis ir līdz 2050. gadam sasniegt šādus rezultātus: neplāna elektroapgādes sistēmas vidējo pārtraukumu biežumu (SAIFI) vienu atslēgumu gadā, plāna SAIFI — 0,3 atslēgumus gadā, neplāna elektroapgādes sistēmas vidējo pārtraukumu ilgumu (SAIDI) — 40 min gadā, plāna SAIDI — atslēgumu ilgumu līdz 50 minūtēm gadā [5].

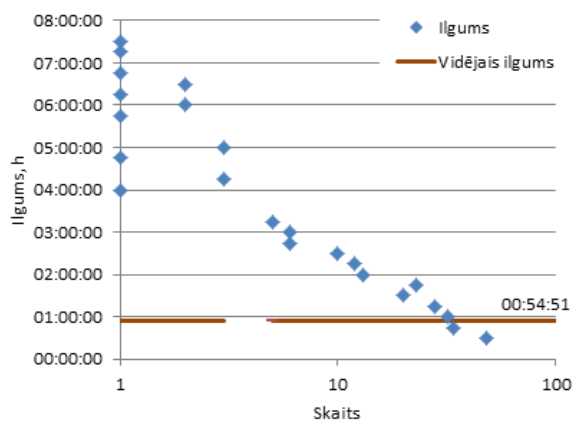
2.3. Elektroapgādes tīklu atslēgumu analīze

Darba gaitā tika izpētīta atslēgumu norise 20kV tīklos, ņemot vērā masveida bojājumus. Analizēti ne tikai bojājumi attiecīgajā laika periodā, bet arī katra elektroapgādes sistēmas atslēguma novēršanas process, ilgums un tā sadalījums. Ņemot vērā vienmērīgo 20 kV slodzes izkliedi, elektroapgādes tīklu bojājumu analīze veikta vienā Latvijas reģionā, kur ir 711 transformatora apakšstaciju (TA), 1095 km — 20 kV līnijas, 1688 km — 0,4 kV līnijas un 14 927 lietotāju. Atbilstoši reģistrētajiem operatīvo bojājumu statistikas datiem tika analizēta ziņojumā par bojājumiem ietvertā informācija: par notikuma sākšanās laiku, par komutācijas aparātu atslēgšanos, ieslēgšanos, sekcionēšanas darbību, par sprieguma pazušānu, par pārslodzēm vai pēkšņām elementa darba režīma izmaiņām (slodze, spriegums, temperatūra u. c.) vai par sprieguma novirzi ārpus pieļaujamām robežām [35, 37]. Tika veikta arī apkopoto datu analīze par elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas ilgumiem, iemesliem, bojājumu vietām, atslēgto lietotāju skaitu. Izpētot bojājumus, katra atslēguma summārais ilgums tika sadalīts sešās daļās — bojājumu novēršanas uzsākšanas, bojājumu vietas izolēšanas, bojājumu vietas atrašanas, rezervēšanas, remonta un elektroapgādes atjaunošanas ilgumā, ņemot vērā arī atslēgto lietotāju un atslēgto transformatoru skaitu, bojājuma vietu un iemeslus. Vienā bojājumā elektroapgāde tika atslēgta vidēji 241,06 lietotājiem, un atslēgtas vidēji 14,35 TA. Maksimālais atslēgto lietotāju skaits vienam

bojājumam ir 4725, un maksimālais atslēgto TA skaits — ir 244 (2.3. att.). Atslēgumiem, kuriem tika reģistrēts bojājumu vietas lokalizācijas ilgums, atslēgto lietotāju skaits un atslēgto TA skaits ir vidēji 277,09 lietotājiem vienā bojājumā atslēgta elektroapgāde un vidēji 16,72 vienā bojājumā atslēgtas transformatora apakšstacijas. Lokalizēšanas ilgums tika reģistrēts 75,26 % atslēgumu. Tas saistīts ar komutāciju biežumu, releju aizsardzības darbību (2.4. att.) [37].

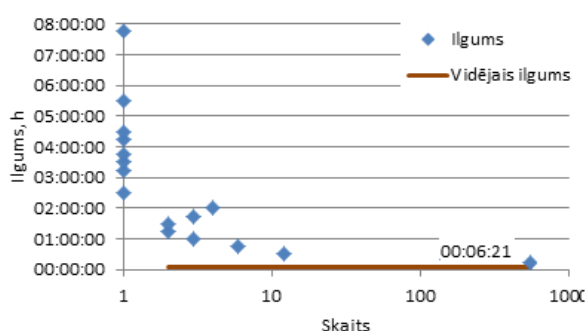


2.3. att. Atslēgumu ilguma sadalījums

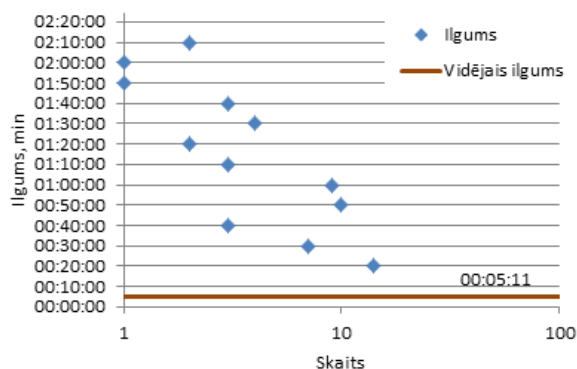


2.4. att. Lokalizācijas ilguma sadalījums

Atslēgumiem, kuriem tika reģistrēts bojājumu vietas atrašanas ilgums, atslēgto lietotāju skaits un atslēgto TA skaits ir vidēji 185,35 lietotājiem vienā bojājumā atslēgta elektroapgāde un vidēji 12,65 vienā bojājumā atslēgtas TA. Bojājumu vietas atrašanas ilgums tika reģistrēts 7,85 % atslēgumu (2.5. att.). Atslēgumiem, kuriem tika reģistrēts bojājumu vietas rezervēšanas ilgums, atslēgto lietotāju skaits un atslēgto TA skaits ir vidēji 493 lietotājiem vienā bojājumā atslēgta elektroapgāde un vidēji 27,82 vienā bojājumā atslēgtas TA. Tas saistīts ar bojājumu vietu, piemēram, bojājums uz maģistrālās līnijas rada lielāka skaita lietotāju atslēgumu. Rezervēšanas ilgums tika reģistrēts 24,06 % bojājumu (2.6. att.) [37].



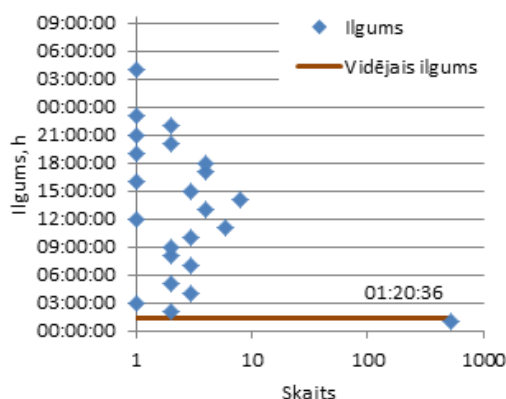
2.5. att. Atrašanas ilguma sadalījums



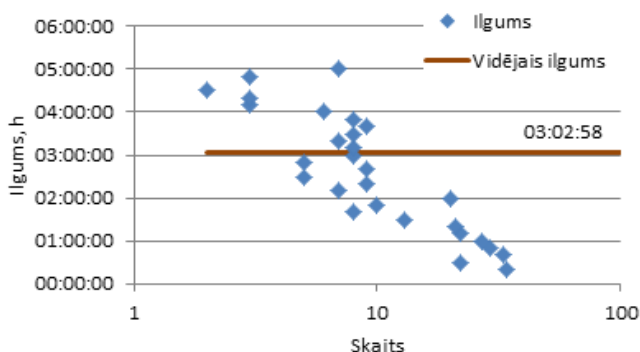
2.6. att. Rezervēšanas ilguma sadalījums

Atslēgumiem, kuriem tika reģistrēts bojājumu novēršanas uzsākšanas ilgums, atslēgto lietotāju skaits un atslēgto TA skaits ir vidēji 245,33 lietotājiem vienā bojājumā atslēgta elektroapgāde un vidēji 15,75 vienā bojājumā atslēgtas TA. Bojājumu novēršanas uzsākšanas ilgums tika reģistrēts 10,41 % bojājumu, visiem no tiem bojājums noticis un/vai turpinājies nakts stundās (2.7. att.). Atslēgumiem, kuriem tika reģistrēts bojājumu vietas remonta ilgums, atslēgto lietotāju skaits un atslēgto TA skaits ir vidēji 207,15 lietotājiem vienā bojājumā atslēgta elektroapgāde un vidēji 12,52 vienā bojājumā atslēgtas TA. Remonta ilgums tika

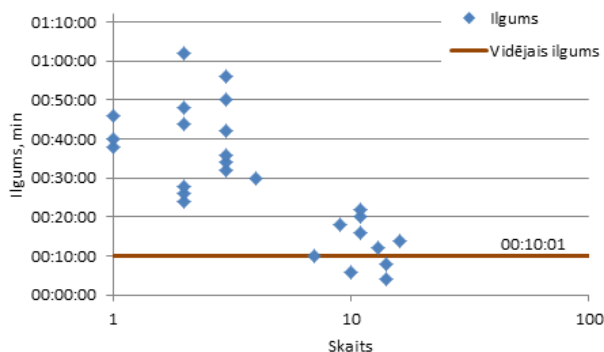
reģistrēts 82,08 % bojājumu (2.8. att.). Atslēgumiem, kuriem tika reģistrēts elektroapgādes atjaunošanas ilgums, atslēgto lietotāju skaits un atslēgto TA skaits ir vidēji 244,14 lietotājiem vienā bojājumā atslēgta elektroapgāde un vidēji 14,89 vienā bojājumā atslēgtas TA. Elektroapgādes atjaunošanas ilgums tika reģistrēts 59,22 % bojājumu (2.9. att.) [37].



2.7. att. Bojājumu novēršanas uzsākšanas ilguma sadalījums



2.8. att. Remonta ilguma sadalījums



2.9. att. Elektroapgādes atjaunošanas ilguma sadalījums

2.1. tabula

20 kV atslēgumu biežuma un ilguma analīzes kopsavilkums

Elements/drošuma dati	Latvijas 20 kV tīklu elektroapgādes drošuma statistiskie dati		Eiropas Savienības vidējie elektroapgādes drošuma dati	
	Ilgums, h	Biežums, 1/gadā/gab. vai km	Ilgums, h	Biežums, 1/gadā/gab. vai km
Atdalītāji (gab.)	3,22	0,0048	4	0,06
Gaisvadu līnijas (km)	4,12	0,0935	5	0,065
Jaudas slēdži (gab.)	1,74	0,0440	4	0,02
Kabeļlīnijas (km)	0,52	0,0217	30	0,019
20/04 kV TA (gab.)	5,19	0,1038	10	0,05

Veicot bojājumu analīzi trīs gadu periodā normālos laika apstākļos un izmantojot ST datus, tika veikts atslēgumu biežuma un ilguma aprēķins jaudas slēdžiem, gaisvadu līnijām, kabeļlīnijām, atdalītājiem un 20/0,4 kV TA. Salīdzinājumam pievienoti vidējie atslēgumu ilguma un biežuma rādītāji pasaulē (2.1. tabula) [37].

2.4. Atslēgumu ilgumu varbūtību sadalījumu atbilstības hipotēžu pārbaude

Ņemot vērā analizētās 20 kV elektroapgādes bojājumu statistikas apjomu, pieņēmumu izmantojuma samazināšanai un drošuma aprēķina rezultātu precizēšanai nepieciešams

aprēķināt katra atslēgumu ilguma varbūtību sadalījumu. Sadalījumu hipotēžu pārbaude tika veikta pēc Hī-kvadrāta un Kolmogorova-Smirnova sadalījuma funkcijām. Hī-kvadrāta un Kolmogorova-Smirnova sadalījuma funkciju atbilstības pārbaudes rezultāti parādīti p-vērtību veidā. Parasti, jo lielāka ir p-vērtība, jo labāk sadalījuma funkcija atbilst datiem. Piemēram, ja p-vērtība ir lielāka par 0,10, mēs nevaram noliegt nulles hipotēzi ar līmeni 0,10 (2.2. tabula) [40].

2.2. tabula

Atslēgumu ilgumu varbūtību sadalījumu atbilstības hipotēžu pārbaude

	20/04kV TA	Atdalītāji	Jaudas slēdži	Gaisvadu līnijas
Kopējais atslēguma ilgums	Beta	Eksponeenciāls	Eksponeenciāls	Gamma
Atslēguma novēršanas uzsākšanas ilgums				Beta
Remontdarbu ilgums	Veibula	Eksponeenciāls	Eksponeenciāls	Veibula
Rezervēšanas ilgums	Veibula	Veibula	Normālais	Beta
Atslēguma vietas atrašanās ilgums	Veibula	Eksponeenciāls		Veibula
Atslēguma lokalizēšanas ilgums	Veibula	Beta	Beta	Eksponeenciāls
Elektroapgādes atjaunošanas ilgums	Veibula	Eksponeenciāls	Eksponeenciāls	Veibula

3. ELEKTROAPGĀDES DROŠUMA UN ATSLĒGUMU RADĪTO ZAUDĒJUMU APRĒĶINA METODOLOĢIJA

Ņemot vērā Latvijā esošo sadales tīklu nelielo slodzes blīvumu, salīdzinoši ar citām Eiropas Savienības valstīm zemo noslodzes koeficientu un lielo gaisvadu līniju īpatsvaru, drošuma un atslēgumu radīto zaudējumu līmeņa aprēķināšana tika veikta pēc darbā piedāvātā sadales tīkla modeļa. Elektroapgādes drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu vērtības aprēķināmas, ņemot vērā šādus faktorus: elektroapgādes tīklu, nepiegādāto elektroenerģiju, atslēgumu ilgumu varbūtību sadalījumu funkcijas, elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas ilgumus rezervējamiem, nerezervējamiem un papildu elementiem, kā arī atslēgumu rezultātā sadales tīklam, sabiedrībai un lietotājiem radītos zaudējumus [18, 21, 38].

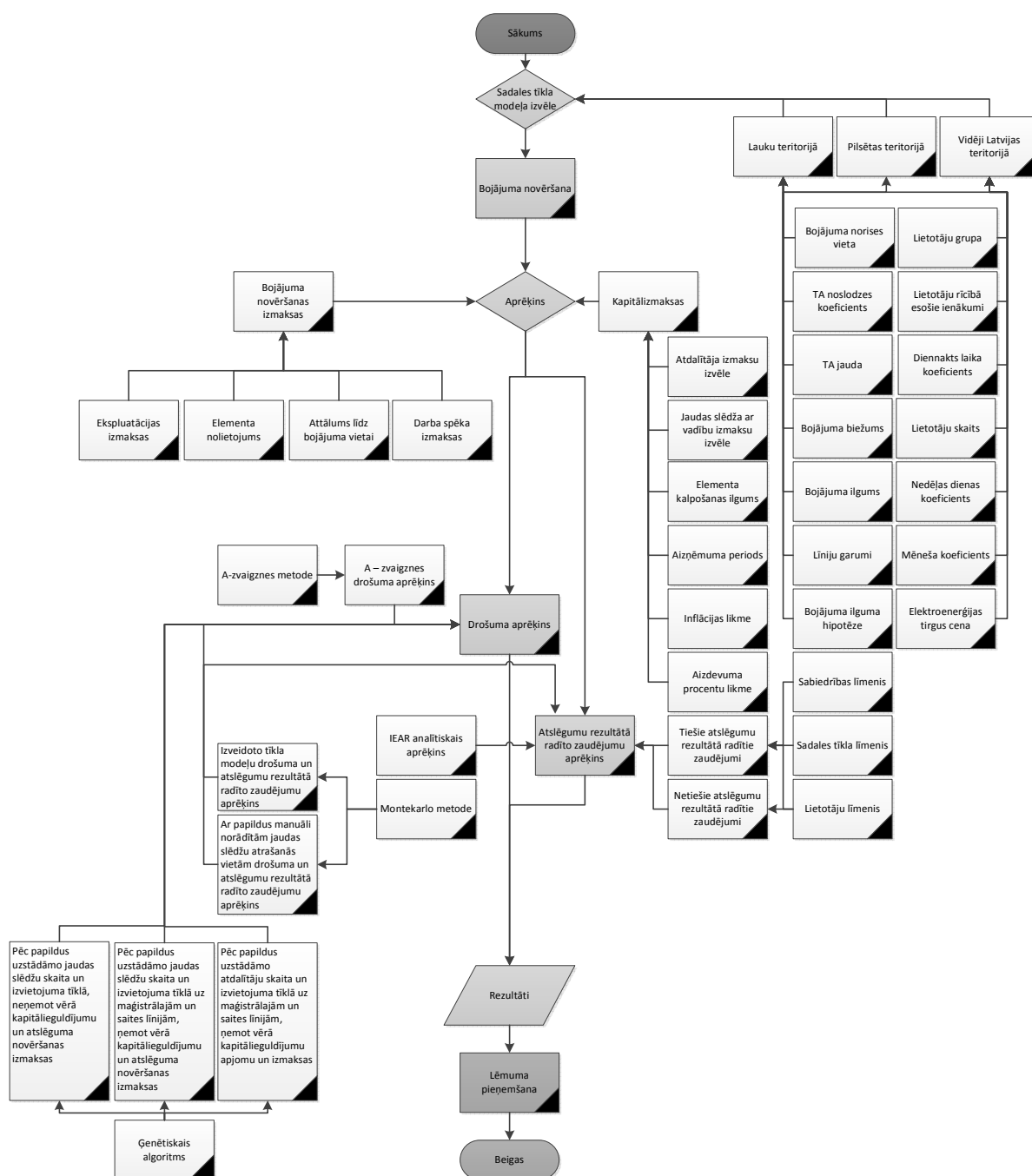
Aprēķinu mērķis darbā ir apskatīt vairākus scenārijus, kā arī veikt sekcionējošo elementu optimizācijas aprēķinu ar mērķi minimizēt atslēgumu ilgumus un atslēgumu rezultātā radītos zaudējumus. Lai veiktu drošuma un atslēgumu rezultātā radušos zaudējumu aprēķinu, tika definēti šādi uzdevumi:

- veikt tīkla modeļu un drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu kritēriju izvēli;
- nodrošināt iespēju veikt elektroapgādes drošuma aprēķinu;
- nodrošināt iespēju veikt elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķinu;
- izstrādāt elektroapgādes drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķinu metodes dažādiem laika periodiem un tīkla modeļiem, ņemot vērā elektroenerģijas patēriņu, noslodzes koeficientu, līniju garumu, tīkla struktūru, lietotāju skaitu, atslēgumu novēršanas izmaksas un kapitālieguldījumu izmaksas u. c.;
- izstrādāt optimāla sekcionējošo elementu izvietojuma aprēķina metodi ar iespēju veikt drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķinu dažādām tīkla modeļu modifikācijām;
- veikt elektroapgādes drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķinu un analizēt iegūtos rezultātus.

3.1. Elektroapgādes drošuma un atslēgumu radīto zaudējumu aprēķina uzdevums

Summāro atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu un drošuma aprēķinos dažādiem sekcionējošo elementu skaita un izvietojuma scenārijiem, kapitālieguldījumu scenāriju

analīzei tika ņemti vērā daudzkritēriju analīzē apskatītie drošumu ietekmējošie faktori. (3.1. att.) [8, 18].



3.1. att. Elektroapgādes drošuma un atslēgumu radīto zaudējumu aprēķina daudzkritēriju analīze

Ņemot vērā esošā tīkla struktūru un tīklu attīstības tendences, drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķinam tika izvēlēta A-zvaigznes, Montekarlo un ģenētiskā algoritma metode, rezultātu precizēšanā piemērojot daudzkritēriju analīzi [30].

Lai veiktu elektroapgādes tīklu sekcionējošo elementu optimizāciju, šajā darbā tika izmantots ģenētiskais algoritms.

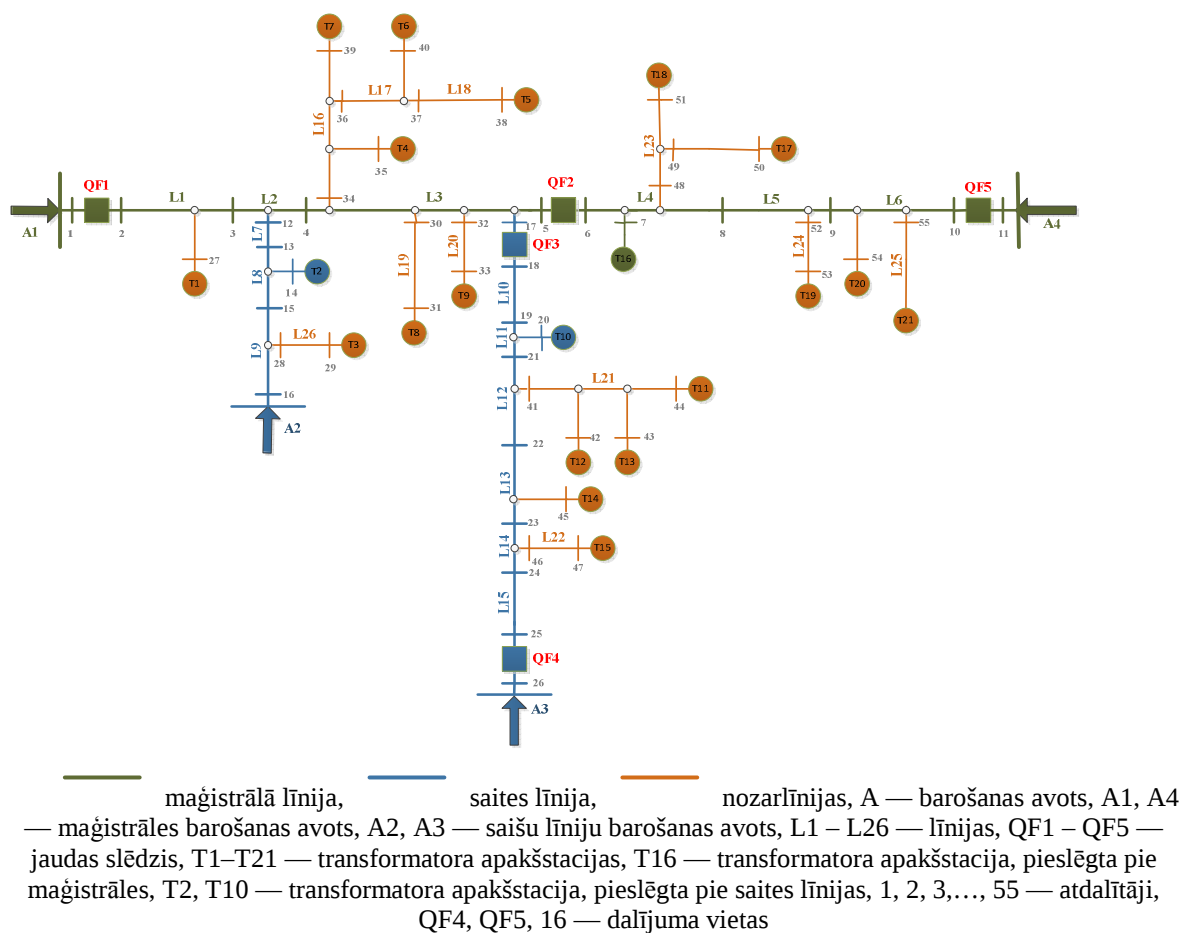
Atbilstoši daudzkritēriju analīzei tika definēti šādi scenāriji:

- 1) elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķins;
- 2) elektroapgādes drošuma aprēķins ar A-zvaigznes metodi;

- 3) drošuma un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķins ar Montekarlo modelēšanu ar manuāli norādītām jaudas slēdžu papildu atrašanās vietām;
- 4) jaudas slēdžu skaita un izvietojuma optimizācija ar ģrētisko algoritmu (ĢA), ņemot vērā kapitālieguldījumu un elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas izmaksas;
- 5) jaudas slēdžu skaita un izvietojuma optimizācija uz maģistrālajām un saites līnijām ar ĢA, ņemot vērā kapitālieguldījumu un elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas izmaksas;
- 6) atdalītāju skaita un izvietojuma optimizācija uz maģistrālajām un saites līnijām ar ĢA, ņemot vērā kapitālieguldījumu un elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas izmaksas.

3.2. Elektroapgādes tīkla modeļa izvēle

ST 20 kV tīklam tika veikta detalizēta analīze un nepieciešamie aprēķini. Rezultātā sastādīts tīkla modelis ar tālāk tekstā aprakstītiem atbilstošiem datiem (3.2. att.). Elektroapgādes rezervēšana iespējama pa saišu līniju barošanas avotiem A2, A3 un A4. Normālā režīmā jaudas slēdži QF1, QF5, QF3 ir ieslēgtā stāvoklī. QF4 un QF2 jaudas slēdži normālā režīmā ir atslēgtā stāvoklī. Punktos 16, QF4 un QF5 ir dalījuma vietas.



3.2. att. 20 kV sadales tīklu modelis

Apkopojot informāciju par Latvijas sadales tīkliem dažādos reģionos un teritorijās ar dažādu apdzīvotības blīvumu, mājāsaimniecību ienākumiem un citiem rādītājiem, tika sastādīti trīs dažāda veida elektroapgādes tīkla modeļi: pilsētas, lauku teritorijas un vidēji, atbilstoši veiktajiem statistikas datu varbūtību sadalījuma aprēķiniem. Elektroapgādes sistēmas

atslēgumu novēršanas analīze un katra lietotāju atslēgumu ilguma noteikšana tika veikta atbilstoši 2.1. att. Lai aprēķinātu atslēgumu rezultātā lietotājiem radītos zaudējumus, tika izvēlēta lietotāju grupa atkarībā no TA atrašanās tīklā, TA jaudas, noslodzes koeficienta un tīkla struktūras. Lai atvieglotu aprēķinu veikšanu un aprēķinātu elektroapgādes atslēgumu rezultātā radītos zaudējumus katrai lietotāju grupai, tika pieņemts, ka pie viena TA ir pieslēgti vienas grupas lietotāji. Aprēķinos pieņemts, ka vidējais pie TA pieslēgto lietotāju skaits ir 40, lauku teritorijā — 20 un pilsētas teritorijā — 60. Gaisvadu līniju garumi tika izvēlēti atkarībā no veiktās līniju detalizētas analīzes rezultātiem un šo līniju attiecības. Ņemot vērā vidējos ST datus Latvijas teritorijā un attiecīgi pilsētu un lauku teritorijās, tika pieņemts, ka kopējais vidējais gaisvadu līniju garums Latvijas teritorijā ir 35 km, attiecīgi lauku teritorijā — 50 km un pilsētas teritorijā — 20 km. Maģistrālās līnijas, saites līnijas un nozarlīnijas garumu attiecība vidējam elektroapgādes tīkla modelim ir attiecīgi 1:2:1, tīkla lauku teritorijas modelim šī attiecība ir 1:2:2 un tīkla pilsētu teritorijas modelim — 1:2:2.

3.3. Elektroapgādes drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķina metožu izvēle

Ņemot vērā esošā tīkla struktūru un tīklu attīstības tendences, drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu, aprēķinam tika izvēlētas IEAR aprēķina, Montekarlo un ģenētiskā algoritma metodes, rezultātu precizēšanā piemērojot daudzkritēriju analīzi [8, 30].

Izstrādājot algoritmu, tika izveidota arī tāda struktūra, kurā tiks glabāta informācija, ievērojot visus ierobežojumus. Izvēlēta metode ir vairāku algoritmu apvienojums vienotā veselumā. Šim algoritmam aprēķina ilgums ir pieņemams, un algoritma struktūru nav nepieciešams pārveidot, ja nemainās tīkla sākotnējie dati. Piedāvātā algoritma veikspējas aprēķinam salīdzināts dažāds jaudas slēdžu un atdalītāju skaits un izvietojums izveidotajos tīklu modeļos. Drošuma aprēķina metodē netika ņemta vērā masveida bojājumu iespējamība. Drošuma aprēķina metodē tika pieņemts, ka visus elementus attiecībā pret konkrēto transformatora apakšstaciju iedala rezervējamos, nerezervējamos un papildu elementos [8].

Rezervēšanas iespēju analīzē salīdzināti dažādi kapitālieguldījumu veikšanas risinājumi, rezultātā izveidojot metodi ar iespēju mainīt tīkla struktūru un rezervēšanas iespējas, tādējādi palielinot rezultātu precizitāti un radot iespēju apskatīt dažādus iespējamus attīstības risinājumus.

Elektroapgādes atslēgumu rezultātā radītie zaudējumi konkrētai lietotāju grupai vispārējā gadījumā ir atkarīgi no pieslēgto lietotāju skaita (N), mēneša $f_m(t)$, nedēļas dienas $f_n(t)$, diennakts laika $f_h(t)$. Jāņem vērā arī attiecīgo lietotāju rīcībā esošos vidējos ienākumus $C(d)$ (€/gadā) un t_d . — atslēgumu ilgumu, h [6].

$$ECOST(t, N, d) = N \cdot f_m(t) \cdot f_n(t) \cdot f_h(t) \cdot C(d) \cdot t_d. \quad (3.1)$$

Lietotāju rīcībā esošos ienākumus $C(d)$ iespējams aprēķināt, ievērojot ienākumu, izdevumu un peļņas likumsakarību

$$C_i(d) = \frac{\sum_{i=1}^n [S_i \cdot (1 + r_i) - E_{ai}]}{12}, \quad (3.2)$$

kur

S_i — ikgadējie primārie izdevumi (piemēram, materiāli, loģistikas izdevumi, komunālie maksājumi, īres maksājumi, nodokļu maksājumi),

r_i — ikgadējā peļņa,

E_{ai} — citi no elektroenerģijas patēriņa atkarīgi izdevumi (piemēram, darbinieku algas, līgumsodi, pārplānošana) [36].

Tādējādi atbilstoši [39] $C_i(d)$ var tikt izteikta kā

$$C_i(d) = P_i \text{ (€/gadā)}, \quad (3.3)$$

kur

P_i — ikgadējie lietotāju rīcībā esošie ienākumi.

Ikgadējā lietotāju peļņa var tikt izteikta kā

$$I_i = P_i - E_i, \quad (3.4)$$

kur

I_i — ikgadējā lietotāju peļņa,

E_i — ikgadējie lietotāju izdevumi [29].

Ņemot vērā informācijas avotus [6, 19], pieņemam, ka mēneša, nedēļas un diennakts laika koeficienti ir piemērojami elektroenerģijas lietotājiem Latvijā.

Izmantojot daudzkritēriju analīzē izmantotos faktorus, faktori tiek pārveidoti uz vienu mērķa funkciju, ņemot vērā kapitālieguldījumu izmaksas, bojājumu novēršanas izmaksas, lietotāju tiešos un netiešos zaudējumus, elementu un lietotāju skaitu. Atslēgumu radītie zaudējumi veidojas šādi:

$$C = \sum_{i=1}^n C_{ki} + \sum_{i=1}^m C_{EUi} + C_{AN} \rightarrow \min \quad (3.5)$$

kur

C — atslēgumu radītie zaudējumi aprēķinu periodā (€/gadā),

C_{ki} — kapitālieguldījumu izmaksas (€/gadā),

C_{ANi} — bojājumu novēršanas izmaksas (€/gadā),

C_{EUi} — lietotāju tiešie un netiešie zaudējumi (€/gadā),

n — jauno elementu skaits.

m — lietotāju skaits [4].

Kapitālieguldījumu aprēķins laika periodam tika veikts, balstoties uz NPV metodi

$$C_{ki} = \frac{C_0(1+\frac{int_r}{100})^{t_{cr}}}{(1+\frac{inf}{100})^{t_{cr}*t_{ei}}}, \quad (3.6)$$

kur

C_0 — elementa izbūves izmaksas (€);

int_r — aizņēmuma procentu likme (%);

t_{cr} — kredītiņš periods (gadi);

inf — inflācija (%);

t_{ei} — elementa kalpošanas ilgums (gadi).

Ņemot vērā ražotāju un celtniecības un montāžas uzņēmumu aptaujas rezultātus, aprēķinos tika pieņemts, ka laukos viena brīvgaisa jaudas slēdža ar aizsardzību un vadību izmaksas ir 30 000 EUR, savukārt pilsētu teritorijās, veicot kompakto transformatoru apakšstaciju izbūvi ar jaudas slēdzi, izmaksas ir 50 000 EUR. Tika pieņemts, ka vidējās izmaksas vienam jaudas slēdzim ir 40 000 EUR un atdalītāju izmaksas — 5 000 EUR. Iegādātiem elementiem tika piemērota lineārā metode ar ikgadējo norakstījuma normu 4 %. Tika pieņemts, ka ikgadējās elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas izmaksas ir 2 % apmērā, ikgadējās inflācijas apjoms — 3 % apmērā. Procentu likme atbilstoši Eiropas Centrālās Bankas rekomendācijām un kredītiestāžu pievienotajām procentu likmēm — 7 %. Par aizņēmuma periodu tika pieņemti 10 gadi un 25 gadi. Daudzkritēriju analīzē tika veikta elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu novērtšana visos trīs līmeņos. Nepiegādātās elektroenerģijas apjoma aprēķinam analizēts lietotāju elektroenerģijas patēriņš un atslēgumu ilgums. Atslēgumu rezultātā sadales tīklam radīto zaudējumu aprēķinam tika piemērota elektroenerģijas tirgus vidējā cena.

3.4. Elektroapgādes drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķina apraksti

Atbilstoši [36, 37] salīdzinot vairāku valstu statistiskos datus, nepieciešams veikt nepiegādātās elektroenerģijas aprēķina cenas (IEAR) aprēķinu visām lietotāju grupām, vidēji, lauku teritorijā un pilsētas teritorijā atkarībā no diennakts laika, mēneša, nedēļas dienas, lietotāju vidējiem ienākumiem. Lai veiktu iegūto datu analīzi un salīdzināšanu ar citu valstu IEAR, nepieciešams aprēķināt maksimālās un minimālās IEAR vērtības. Ņemot vērā esošos statistikas datus, ar IEAR aprēķina metodi nepieciešams aprēķināt elektroapgādes atslēgumu rezultātā lietotājiem radītos vidējos zaudējumus [37].

A-zvaigznes algoritms ir heuristiskā metode, kas paredzēta ceļa meklēšanai uzdotā grafā. Algoritms atrod, vai eksistē ceļš no sākuma punkta uz definēto beigu punktu. Darbā izstrādātas šā algoritma modifikācijas, kas paredzētas pārbaudei, vai lietotājs ir savienots ar elektroenerģijas avotu. Algoritma modifikācijās tiek ņemti vērā papildu ierobežojumi — iespējamo rezerves avotu meklēšana tīkla elementa bojājuma gadījumā, ievērojot tīkla mezgla stāvokļus. A-zvaigznes metode ir metode, kas ievēro rezervēšanas principu. Tās pamatā ir iespējamo atslēgumu ilgumu atkarība no elementa, kurā ir noticis bojājums, attiecībā pret lietotājiem vai apskatāmo punktu, ja bojājums ir noticis tīkla elementā, ko nav iespējams rezervēt, ko ir iespējams rezervēt vai kas ir pieslēgts nozarēs (skat. 4. nodaļu). Kopējais atslēgumu biežums 20 kV elektroapgādes tīkla elementos rodas no trīs elementu grupām — rezervējamām, nerezervējamām un papildu [20, 39]. Katra lietotāja vieta tīklā ir unikāla. Ja ievēro tīkla struktūras īpatnības pret konkrēto lietotāju, iespējams iegūt precīzākus atslēgumu ilgumu un biežumu datus katram lietotājam. Galvenās grūtības aprēķinos rodas, nosakot barošanas ceļus un attiecīgo elementu sadalījumu. Lai atvieglotu šo aprēķinu veikšanu, ieteicams lietot A-zvaigznes metodi (skat. 4. nodaļu). Jebkura TA elektroapgādes ķēdes elementus var sadalīt trīs pamatgrupās: nerezervējamās, rezervējamās un papildu elementos [46]. Nerezervējamiem elementiem raksturīgi, ka šo elementu bojājumu gadījumā ir nepieciešams veikt to remontu un/vai nomaiņu. Rezervējamie elementi ir raksturīgi ar to, ka bojājumu gadījumā apskatāmo atslēgumu ilgumu nosaka tikai barošanas pārslēgumu ilgums uz rezerves ķēdēm. Papildu elementus bojājumu gadījumā var atslēgt no apskatāmās TA barošanas ķēdes un tūlīt atjaunot barošanu. Papildu elementiem nav rezervēšanas pamatuzdevuma. Elementu bojājumu biežumu attiecībā pret apskatāmo TA var atrast kā

$$\begin{cases} \omega N[x] = \omega N_{TA}[x] + \omega N_{lin}[x] + \omega N_{AT}[x] + \omega N_{JS}[x], \\ \omega R[x] = \omega R_{lin}[x] + \omega R_{AT}[x] + \omega R_{JS}[x], \\ \omega P[x] = \omega P_{lin}[x] + \omega P_{AT}[x] + \omega P_{JS}[x], \end{cases} \quad (3.7)$$

kur

$\omega N[x]$ — nerezervējamu elementu bojājumu biežums,

$\omega N_{TA}[x]$ — nerezervējamu TA bojājumu biežums,

$\omega N_{lin}[x]$ — nerezervējamu līniju bojājumu biežums,

$\omega N_{AT}[x]$ — nerezervējamu atdalītāju bojājumu biežums,

$\omega N_{JS}[x]$ — nerezervējamu jaudas slēdžu bojājumu biežums,

$\omega R[x]$ — rezervējamu elementu bojājumu biežums,

$\omega R_{lin}[x]$ — rezervējamu līniju bojājumu biežums,

$\omega R_{AT}[x]$ — rezervējamu atdalītāju bojājumu biežums,

$\omega R_{JS}[x]$ — rezervējamu jaudas slēdžu bojājumu biežums,

$\omega P[x]$ — papildu elementu bojājumu biežums,
 $\omega P_{lin}[x]$ — papildu līniju bojājumu biežums,
 $\omega P_{AT}[x]$ — papildu atdalītāju bojājumu biežums,
 $\omega P_{JS}[x]$ — papildu jaudas slēdžu bojājumu biežums.

Kopējais elementu bojājumu biežums izsakāms ar formulu

$$\omega[x] = \omega N[x] + \omega R[x] + \omega P[x]. \quad (3.8)$$

Kopējo elementu atslēgumu biežumu $a[x]$ var izteikt

$$a[x] = aN[x] + aR[x] + aP[x], \quad (3.9)$$

kur

$aN[x]$ — nerezervējamu elementu atslēgumu skaits,
 $aR[x]$ — rezervējamu elementu atslēgumu skaits,
 $aP[x]$ — papildu elementu atslēgumu skaits.

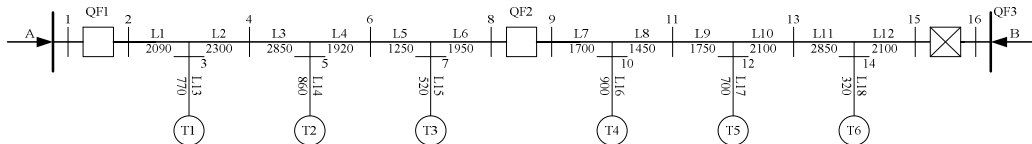
Kopējais elementu atslēgumu ilgums $\tau[x]$ ir

$$\tau[x] = aN[x] \cdot tN + aR[x] \cdot tR + aP[x] \cdot tP, \quad (3.10)$$

kur

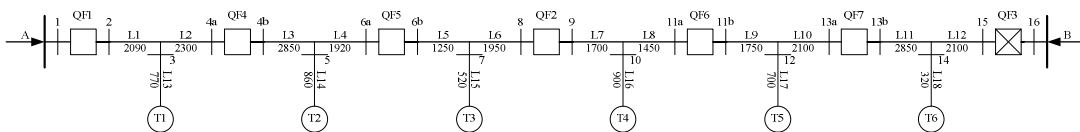
tN — nerezervējamu elementu atslēgumu ilgums,
 tR — rezervējamu elementu atslēgumu ilgums,
 tP — papildu elementu atslēgumu ilgums.

Šis princips izmantots A-zvaigznes metodē. Ar A-zvaigznes metodi analizēti divu veidu elektroapgādes modeļi — pirmā veida elektroapgādes modelis (3.3. att.) un otrā veida elektroapgādes modelis (3.4. att.) ar norādītām jaudas slēdžu papildu atrašanās vietām.



A, B — barošanas avoti, QF — jaudas slēdzis, L1 – L18 — līnijas, 1– 14 — atdalītāji

3.3. att. A — zvaigznes un analītiskajā drošuma aprēķināšanā izmantotais pirmā veida elektroapgādes modelis



A, B — barošanas avoti, QF — jaudas slēdzis, L1 – L18 — līnijas, 1– 14 — atdalītāji

3.4. att. A-zvaigznes un analītiskajā drošuma aprēķināšanā izmantotais otrā veida elektroapgādes modelis

Šie divi elektroapgādes modeļi izvēlēti ar mērķi aprēķināt papildu jaudas slēdžu izvietojuma un skaita lietderību. Aprēķinos elementu drošuma dati pieņemti atbilstoši 2.2. tabulai — Latvijas 20 kV tīklu elektroapgādes drošuma statistiskajiem datiem (2.1. tabula) un modelējamo līniju garumi izvēlēti atbilstoši vidējiem līniju garumiem Latvijā.

Lai ievērotu elektroapgādes atslēgumu dažādos laika sadalījumus, paaugstinātu aprēķinu precizitāti, samazinātu pieņēmumu apjomu, elektroapgādes drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķināšanā ar Montekarlo modelēšanas metodi ieteicams izmantot A-zvaigznes metodes principu. Elektroapgādes drošuma un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķins elektroapgādes modeļiem atbilstoši 3.2. att. Aprēķins veikts,

ievērojot analīzē lietojamos drošumu ietekmējošos faktorus pilsētas un lauku teritoriju elektroapgādes tīkla modeļiem, kā arī vidējam elektroapgādes tīkla modelim ar aprēķina mērķi novērtēt tīkla drošumu un kapitālieguldījumu lietderību [30, 38]. Elektroapgādes drošuma un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķins 3.2. att. modeļiem ar manuāli norādītām jaudas slēdžu papildu atrašanās vietām veikts, pamatojoties uz Montekarlo modelēšanas metodi. Aprēķins veikts, ievērojot analīzē lietojamos drošumu ietekmējošos faktorus pilsētas un lauku teritoriju elektroapgādes tīkla modeļiem, kā arī vidējam elektroapgādes tīkla modelim ar mērķi aprēķināt paredzamos atslēgumu ilgumus, neveicot iepriekšēju jaudas slēdžu izvietojuma analīzi [7, 30, 38].

Ģenētiskais algoritms ir heuristiskā optimizācijas metode, kas modelē dabiskās evolūcijas fenomenu, kurā paliek tikai tie risinājumu varianti, kas ir vispiemērotākie apkārtējai videi un definētajiem nosacījumiem. Algoritms nemēģina optimizēt tikai vienu risinājumu grupu. Katrs risinājums tiek iekodēts vērtību virknē ar vairākiem unikālajiem mainīgumiem. Šie mainīgie ir jaudas slēdžu un/vai atdalītāju atrašanās vietas elektrotīkla modeļos. Tādā veidā algoritms meklē optimālo tīkla konfigurāciju. Drošuma un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķins pēc papildu uzstādāmo jaudas slēdžu un atdalītāju skaita un izvietojuma tīklā tika veikts ar mērķi noteikt optimālo jaudas slēdžu un atdalītāju skaitu un izvietojumu, minimizējot atslēgumu ilgumus un atslēgumu rezultātā radītos zaudējumus. Drošuma un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķins pēc papildu uzstādāmo jaudas slēdžu un atdalītāju skaita un izvietojuma tīklā tika veikts ar mērķi noteikt optimālo jaudas slēdžu un atdalītāju skaitu un izvietojumu, minimizējot atslēgumu ilgumus un atslēgumu rezultātā radītos zaudējumus. Jaudas slēdžu skaita un izvietojuma optimizācija tika veikta ar ĢA palīdzību, ņemot vērā elektroapgādes tīkla modeļa datus, nepiegādāto elektroenerģiju, atslēgumu ilgumu varbūtību sadalījumu funkcijas, elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas ilgumus rezervējamiem, nerezervējamiem un papildu elementiem un atslēgumu rezultātā sadales tīklam, sabiedrībai un lietotājiem radītos zaudējumus, bet neņemot vērā jaudas slēdžu kapitālieguldījumu izmaksas [18, 21, 38]. Drošuma un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķins pēc papildu uzstādāmo jaudas slēdžu skaita un izvietojuma tīklā uz maģistrālajām un saites līnijām tika veikts ar mērķi noteikt optimālo jaudas slēdžu skaitu un izvietojumu, ņemot vērā jaudas slēdžu kapitālieguldījumu izmaksas [21]. Ar ĢA veikts drošuma un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķins pēc papildu uzstādāmo atdalītāju skaita un izvietojuma uz maģistrālajām un saites līnijām, ņemot vērā kapitālieguldījumu un elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas izmaksas, sniedz iespēju izvēlēties atdalītāju skaitu un izvietojumu, minimizējot atslēgumu rezultātā sadales tīkliem, sabiedrībai un lietotājiem radītos zaudējumus, kā arī minimizēt atslēgumu ilgumus [21].

4. ELEKTROAPGĀDES DROŠUMA UN ATSLĒGUMU RADĪTO ZAUDĒJUMU APRĒĶINS

Datormodelis sastāv no galvenajām daļām: datubāzes modulis, modulis tīkla drošuma un atslēgumu radīto zaudējumu aprēķinam.

Elektroapgādes drošuma un atslēgumu radīto zaudējumu aprēķina metode tika realizēta:

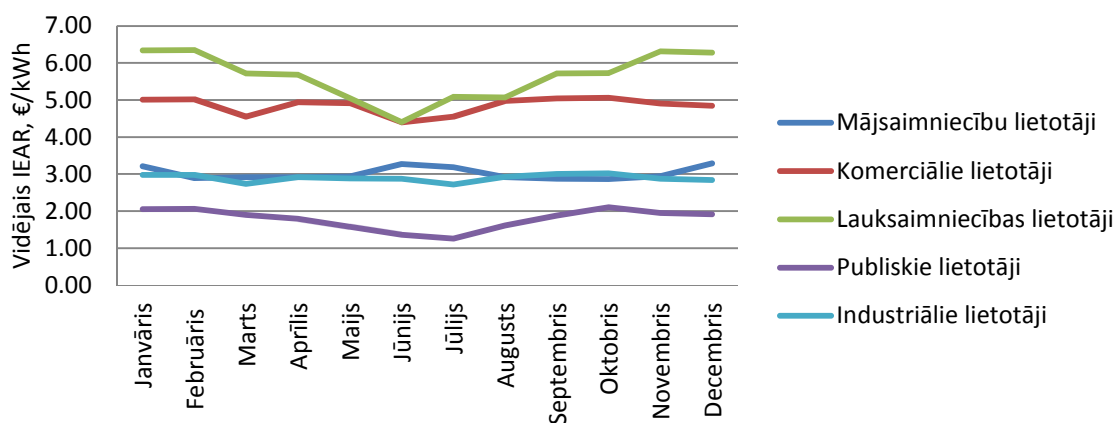
- a) izveidots elektroapgādes tīkla matemātiskais modelis, kas orientēts uz elektroapgādes drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķināšanu;
- b) izveidota datubāzes struktūra, kurā saglabāti dati par modeļu statistisko modeli;
- c) izstrādāts modeļa dinamiskās struktūras kodēšanas princips;
- d) izveidots datormodelis, kas, strādājot pēc 3.1. att. algoritma, modelē bojājumus un reakciju uz šiem bojājumiem atbilstoši modeļa statistiskai un dinamiskajai struktūrai, t. i., bojājumu vietas sākotnējo lokalizēšanu, atrašanu, rezervēšanu, precizēto

- lokalizēšanu, bojājumu novēršanas uzsākšanu, remontdarbus, elektroapgādes atjaunošanu;
- e) vienas modelēšanas rezultātā tika iegūts summārais atslēgumu ilgums, summārā katram lietotājam nepiegādātā elektroenerģija un summārie katram lietotājam elektroapgādes atslēgumu rezultātā radītie zaudējumi;
 - f) statistikas iegūšanai vairākas reizes modelēts viens tīkla modelis, lai samazinātu stohastisko efektu.

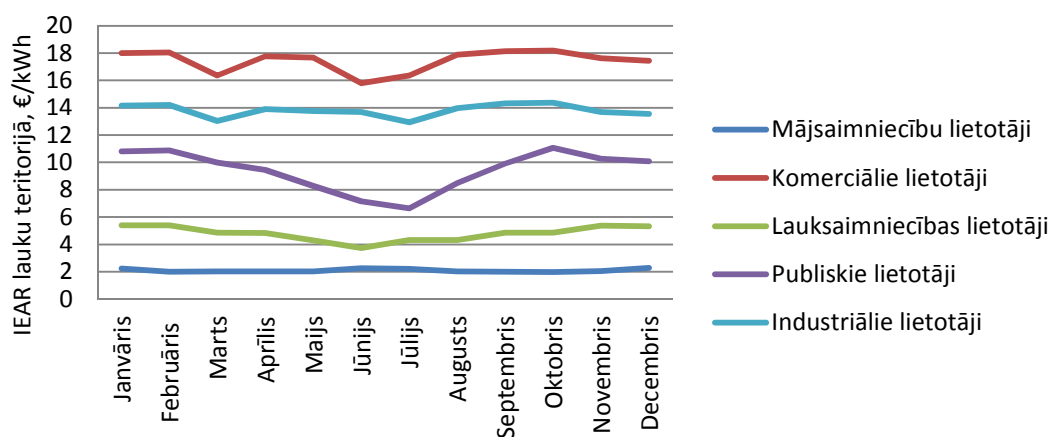
4.1. IEAR aprēķinu rezultāti

Atbilstoši informācijas avotiem [36, 37] tika salīdzināti vairāku valstu statistiskie dati, veikta nepiegādātās elektroenerģijas aprēķina cenas (IEAR) noteikšana visām lietotāju grupām, aprēķinātas maksimālās un minimālās nepiegādātās elektroenerģijas vērtības [37].

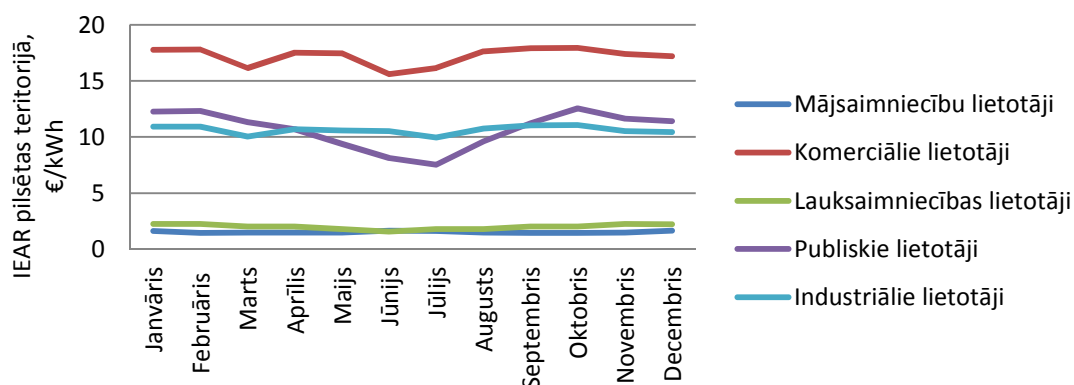
Vidējam elektroapgādes tīklu modelim aprēķinātais IEAR parādīts 4.1. att. Lauku teritorijas elektroapgādes tīklu modelim aprēķinātais IEAR parādīts 4.2. att. Pilsētas teritorijas elektroapgādes tīklu modelim aprēķinātais IEAR parādīts 4.3. att. Pēc 4.1. tabulā apkopotajiem datiem redzams, ka elektroapgādes atslēgumu rezultātā radītie zaudējumi 20 kV elektroapgādes tīklā Latvijā ir līdzvērtīgi Somijas, Norvēģijas, Nīderlandes, ASV un Zviedrijas datiem [6, 13, 37].



4.1. att. Vidējā IEAR



4.2. att. IEAR lauku teritorijā



4.3. att. IEAR pilsētas teritorijā

4.1. tabula

Elektroapgādes atslēgumu rezultātā radītie zaudējumi, €/kWh

Lietotāju grupa/ Valsts	Somija	Norvēģija	Nīderlande	ASV	Zviedrija	Latvija	Latvijā vidēji
Mājsaimniecību lietotāji	2–7	0,98	16,4	7–10	2–5	0,77–5,22	2,22
Lauksaimniecības lietotāji	3–13	1,83	3,9	15	3–10	0,68–7,58	3,53
Komerčiālie lietotāji	2–47	12,07	7,9	60	5–124	1,82–25,92	12,67
Publiskie lietotāji	5–41	1,59	33,5	80	3–30	0,31–19,07	6,85
Industriālie lietotāji	4–20	1,59–8,05	0,3–33,1	17–56	10–47	0,89–19,63	6,85

4.2. Ar A-zvaigznes metodi veikta drošuma aprēķina rezultāti

Lai nodrošinātu rezultātu pārbaudi, aprēķini tika veikti ar A-zvaigznes metodi, kur nerezervējamie, rezervējamie un papildu elementi tika aprēķināti, lietojot izstrādāto datorprogrammu, un salīdzināšanas un rezultātu precizitātes novērtēšanai aprēķini tika veikti analītiski, izmantojot Excel programmatūru. Eksperimenta rezultātā ar A-zvaigznes metodi un analītiski aprēķināts elektroapgādes drošums, 4.2. tabulā parādīti iegūto aprēķinu rezultāti.

4.2. tabula

A — zvaigznes un analītiskās metodes drošuma aprēķina rezultāti

	TA	Analītiskais aprēķins		A-zvaigznes aprēķins	
		SAIFI	SAIDI	SAIFI	SAIDI
		1/gadā	min/gadā	1/gadā	min/gadā
Pirmā veida elektroapgādes modelis	T1	2,78	210,76	2,82	211,55
	T2	2,78	211,45	2,80	209,73
	T3	2,78	208,83	2,79	207,23
	T4	2,78	211,76	2,81	209,65
	T5	2,78	210,22	2,83	208,39
	T6	2,78	207,29	2,84	205,60
Otrā veida elektroapgādes modelis	T1	2,80	214,47	2,81	214,47
	T2	2,80	215,16	2,82	215,16
	T3	2,80	212,54	2,80	212,54
	T4	2,80	215,47	2,80	215,47
	T5	2,80	213,93	2,79	213,93
	T6	2,80	211,00	2,78	211,00

Ar A-zvaigznes metodi iespējams veikt aprēķinus nelieliem elektroapgādes tīkliem, kuriem sekcionējošo elementu atrašanās vietas iespējams norādīt manuāli, tādējādi palielinot

nepieciešamo aprēķinu skaitu, kas nepieciešams optimālo sekcionējošo elementu skaita un izvietojuma noteikšanai. Metodes priekšrocības ir īss aprēķinu ilgums [39].

4.3. Ar Montekarlo metodi veikta drošuma un atslēgumu radīto zaudējumu aprēķina rezultāti

Šis aprēķins tika veikts, lai aprēķinātu atslēgumu rezultātā radītos zaudējumus un drošuma rādītājus. Veicot drošuma un atslēgumu radīto zaudējumu aprēķinu ar Montekarlo metodi, iespējams iegūt precizētus rezultātus, izmantojot varbūtību sadalījumus, samazinot pieņēmumu izmantošanu.

Elektroapgādes tīkla modeļu ar Montekarlo metodi veikto drošuma un atslēgumu radīto zaudējumu aprēķinu rezultāti parādīti 4.3. tabulā un 4.4. attēlā.

4.3. tabula

Tīkla modeļu elektroapgādes drošuma un atslēgumu radīto zaudējumu aprēķina rezultāti

	Modelis		
	vidējais	lauku	pilsētas
Paredzamā nepiegādātā elektroenerģija, kWh/TA	2933,39	1432,96	5976,87
Atslēgumu rezultātā ST radītie zaudējumi, €/TA	495,74	242,17	1010,09
Atslēgumu rezultātā lietotājiem radītie zaudējumi, €/TA	948,10	931,03	2732,87
Atslēgumu rezultātā sabiedrībai radītie zaudējumi, €/TA	87,44	87,79	62,92
Bojājumu biežums gaisvadu līnijās uz 1 km	1,84	3,07	1,70
Bojājumu biežums jaudas slēdžiem uz 1 gab.	0,03	0,04	0,08
Bojājumu biežums 20/0,4 kV TA uz 1 gab.	0,22	0,21	0,24
Bojājumu biežums atdalītājiem uz 1 gab.	0,62	0,46	0,54
SAIFI, 1/gadā	2,71	3,78	2,57
SAIDI, min/gadā	189,67	265,11	152,11
IEAR, €/kWh	10,96	18,48	13,37
Atslēgumu rezultātā radītie summārie zaudējumi, € gadā/TA	1531,28	1260,99	3805,89

Aprēķinos iegūtie rezultāti ar manuāli norādītām jaudas slēdžu atrašanās vietām, t. i., ar papildu vienu, diviem vai trim jaudas slēdžiem parādīti 4.4.–4.6. tabulās.

4.4. tabula

Tīkla modeļu aprēķina rezultāti ar vienu manuāli norādītu papildu jaudas slēdzi

	Modelis		
	vidējais	lauku	pilsētas
Paredzamā nepiegādātā elektroenerģija, kWh/TA	2572,63	1442,81	5824,31
Atslēgumu rezultātā ST radītie zaudējumi, €/TA	434,77	243,83	984,31
Atslēgumu rezultātā lietotājiem radītie zaudējumi, €/TA	791,63	905,26	2024,16
Atslēgumu rezultātā sabiedrībai radītie zaudējumi, €/TA	87,79	91,26	69,12
Bojājumu biežums gaisvadu līnijās uz 1 km	1,95	3,20	1,64
Bojājumu biežums jaudas slēdžiem uz 1 gab.	0,04	0,07	0,06
Bojājumu biežums 20/0,4 kV TA uz 1 gab.	0,24	0,20	0,21
Bojājumu biežums atdalītājiem uz 1 gab.	0,58	0,75	0,71
SAIFI, 1/gadā	2,81	4,21	2,62
SAIDI, min/gadā	175,33	114,89	159,33
IEAR, €/kWh	10,73	18,05	11,10
Atslēgumu rezultātā radītie summārie zaudējumi, € gadā/TA	1314,19	1240,36	3077,59

Ar vienu manuāli norādītu papildu jaudas slēdži summārie atslēgumu rezultātā radītie zaudējumi vidējam elektroapgādes modelim samazinās par 14 %, lauku teritorijas elektroapgādes modelim — par 1,6 %, pilsētas teritorijas elektroapgādes modelim — par 19 %.

4.5. tabula

Tīkla modeļu aprēķina rezultāti ar diviem manuāli norādītiem papildu jaudas slēdžiem

	Modelis		
	vidējais	lauku	pilsētas
Paredzamā nepiegādātā elektroenerģija, kWh/TA	2471,99	1452,65	6025,36
Atslēgumu rezultātā ST radītie zaudējumi, €/TA	417,77	245,50	1018,29
Atslēgumu rezultātā lietotājiem radītie zaudējumi, €/TA	734,05	879,50	1992,90
Atslēgumu rezultātā sabiedrībai radītie zaudējumi, €/TA	86,62	94,72	70,36
Bojājumu biežums gaisvadu līnijās uz 1 km	1,72	3,31	1,78
Bojājumu biežums jaudas slēdžiem uz 1 gab.	0,01	0,02	0,05
Bojājumu biežums 20/0,4 kV TA uz 1 gab.	0,22	0,24	0,25
Bojājumu biežums atdalītājiem uz 1 gab.	0,72	0,70	0,80
SAIFI, 1/gadā	2,66	4,28	2,88
SAIDI, min/gadā	166,78	280,11	164,33
IEAR, €/kWh	10,52	17,63	10,74
Atslēgumu rezultātā radītie summārie zaudējumi, € gadā/TA	1238,44	1219,73	3081,55

Ar diviem manuāli norādītiem papildu jaudas slēdžiem summārie atslēgumu rezultātā radītie zaudējumi vidējam elektroapgādes modelim samazinās par 19 %, lauku teritorijas elektroapgādes modelim — par 3,2 %, pilsētas teritorijas elektroapgādes tīklu modelim — par 19 %.

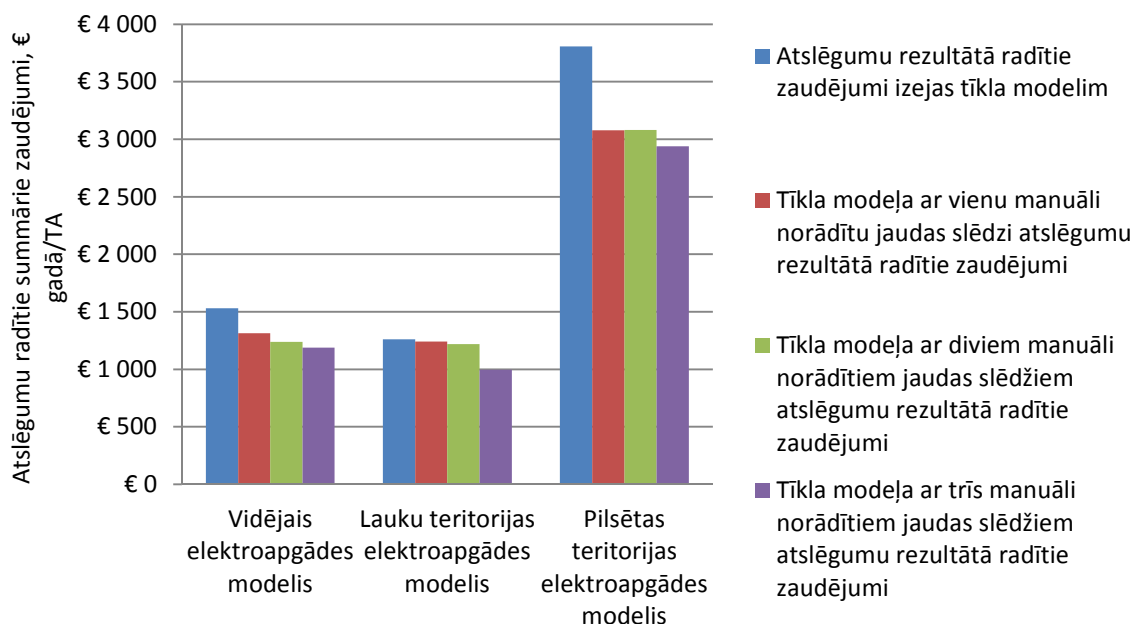
Ar trīs manuāli norādītiem papildu jaudas slēdžiem summārie atslēgumu rezultātā radītie zaudējumi vidējam elektroapgādes tīkla modelim samazinās par 22 %, lauku teritorijas elektroapgādes tīklu modelim — par 21 %, pilsētas elektroapgādes tīklu modelim — par 22,8 %.

4.6. tabula

Tīkla modeļu aprēķina rezultāti ar trīs manuāli norādītiem papildu jaudas slēdžiem

	Modelis		
	vidējais	lauku	pilsētas
Paredzamā nepiegādātā elektroenerģija, kWh/TA	2420,42	1195,60	5410,89
ST zaudējumi, €/TA	409,05	202,06	914,44
Lietotāju zaudējumi, €/TA	700,20	712,95	1961,65
Sabiedrības zaudējumi, €/TA	78,60	80,31	61,88
Bojājumu biežums gaisvadu līnijās uz 1 km	1,83	3,22	1,74
Bojājumu biežums jaudas slēdžiem uz 1gab.	0,08	0,04	0,05
Bojājumu biežums 20/0,4 kV TA uz 1 gab.	0,20	0,24	0,28
Bojājumu biežums atdalītājiem uz 1 gab.	1,28	0,70	1,04
SAIFI, 1/gadā	3,39	4,19	3,11
SAIDI, min/gadā	164,78	231,11	145,44
IEAR, €/kWh	10,31	17,48	11,40
Atslēgumu rezultātā radītie summārie zaudējumi, € gadā/TA	1187,85	995,32	2937,97

Kā redzams no 4.4.–4.6. tabulām un 4.4. att., lai uzlabotu elektroapgādes drošumu un tādējādi samazinātu elektroapgādes rezultātā radušos zaudējumus, optimālam jaudas slēdžu izvietojumam tīklā ir svarīga loma. Neveicot sekcionējošo elementu optimālu izvietojšanu tīklā, var rasties situācija, ka elektroapgādes atslēgumu rezultātā radušies summārie zaudējumi palielinās un/vai samazinās maznozīmīgi, kā arī pēc manuāli norādītām sekcionējošo elementu atrašanās vietām nav iespējams aprēķināt kapitālieguldījumu lietderību drošuma līmeņa uzlabošanā [38].



4.4. att. Elektroapgādes atslēgumu radītie summārie zaudējumi

Atslēgumu rezultātā radušos summāro zaudējumu samazināšanās ir tieši proporcionāla TA jaudai, lietotāju skaitam, elektroenerģijas patēriņam un lietotāju ienākumiem.

Ar to ir izskaidrojamas atslēgumu radīto summāro zaudējumu samazinājuma atšķirības. Metodes priekšrocība ir aprēķinu ātrums un iegūto datu dažādība [7, 30].

5. ELEKTROAPGĀDES TĪKLU OPTIMIZĀCIJA NO DROŠUMA VIEDOKĻA

Elektroapgādes drošuma un atslēgumu radīto zaudējumu optimizācija tika realizēta posmos atbilstoši 4. nodaļā aprakstītajam un papildus, balstoties uz izmaksu un atslēgumu radīto zaudējumu minimizēšanas un drošuma maksimizēšanas faktoriem, ar ĢA meklēta optimāla tīkla struktūra lauku, pilsētas un vidējam elektroapgādes tīkla modeļiem, papildinot līnijas ar jaudas slēdžiem un ar atdalītājiem. Jaudas slēdžu un atdalītāju skaita un izvietojuma optimizācija tika veikta ar ĢA palīdzību. Tīkla struktūras modelis papildināts ar ģenētiskā algoritma moduli optimāla tīkla konfigurēšanai. Lai izpētītu jaudas slēdžu un atdalītāju skaita un izvietojuma ietekmi uz atslēgumu rezultātā lietotājiem radītiem zaudējumiem, tika modelēti bojājumi TA, jo tas paaugstina atslēgumu rezultātā lietotājiem radītos zaudējumus, kas pieslēgti pie šā punkta [18, 38]. Jaudas slēdžu skaita un izvietojuma optimizācija veikta pēc iepriekšējos algoritmos izmantotajiem daudzkritēriju analīzes principiem, papildus pārtrūkot aprēķinu gaitu, izmantojot kapitālieguldījumu un elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas izmaksu faktorus. Jaudas slēdžu skaita un izvietojuma optimizācijā ņemtas vērā elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas un kapitālieguldījumu izmaksas vidējam, lauku teritorijas un pilsētas teritorijas elektroapgādes tīkla modelim ar aizņēmuma periodiem

10 gadiem, 25 gadiem, neizmantojot aizņēmumu. Drošuma un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķins pēc papildu uzstādāmo jaudas slēdžu skaita un izvietojuma tīklā uz maģistrālajām un saites līnijām, tika veikts ar mērķi aprēķināt optimālo jaudas slēdžu skaitu un izvietojumu, minimizējot atslēgumu ilgumus un atslēgumu rezultātā radītos zaudējumus [21]. Ar ĢA veiktais drošuma un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķins pēc papildu uzstādāmo jaudas slēdžu skaita un izvietojuma uz maģistrālajām un saites līnijām, ņemot vērā kapitālieguldījumu un elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas izmaksas, sniedz iespēju izvēlēties jaudas slēdžu skaitu un izvietojumu, minimizējot atslēgumu rezultātā sadales tīkliem, sabiedrībai un lietotājiem radītos zaudējumus, kā arī minimizējot atslēgumu ilgumus un samazinot aprēķinu laiku.

Ar ĢA veikts drošuma un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķins pēc papildu uzstādāmo atdalītāju skaita un izvietojuma uz maģistrālajām un saites līnijām, ņemot vērā kapitālieguldījumu un elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas izmaksas, sniedz iespēju izvēlēties atdalītāju skaitu un izvietojumu, minimizējot atslēgumu rezultātā sadales tīkliem, sabiedrībai un lietotājiem radītos zaudējumus, kā arī minimizēt atslēgumu ilgumus [21].

5.1. Jaudas slēdžu skaita un izvietojuma optimizācijas rezultāti, ņemot vērā kapitālieguldījumu un atslēgumu novēršanas izmaksas

Jaudas slēdžu optimizācija visiem elektroapgādes tīkla modeļiem, ņemot vērā kapitālieguldījumu un atslēgumu novēršanas izmaksas, veikta ar mērķi novērtēt jaudas slēdžu ietekmi uz elektroapgādes drošumu un atslēgumu rezultātā radītiem zaudējumiem.

Pie minimizēta elektroapgādes atslēgumu summārā ilguma un atslēgumu rezultātā sadales tīklam, sabiedrībai un lietotājiem radītiem zaudējumiem, ņemot vērā kapitālieguldījumu izmaksas, minimālais jaudas slēdžu skaits vidējam elektroapgādes tīkla modelim ir 18 gab., pilsētas teritorijas elektroapgādes tīkla modelim — 15 gab. Tas ir saistīts ar mazāku līniju garumu, lielāku TA noslodzes koeficientu, lielāku lietotāju skaitu un lielāku lietotāju ikgadējo elektroenerģijas patēriņu. Lauku teritorijas elektroapgādes tīkla modelim pie minimizēta elektroapgādes atslēgumu summārā ilguma un atslēgumu rezultātā sadales tīklam, sabiedrībai un lietotājiem radītiem zaudējumiem, ņemot vērā kapitālieguldījumu izmaksas, minimālais jaudas slēdžu skaits ir 17 gab. Tas ir saistīts ar lielāku līniju garumu, mazāku TA noslodzes koeficientu, mazāku lietotāju skaitu un mazāku lietotāju ikgadējo elektroenerģijas patēriņu.

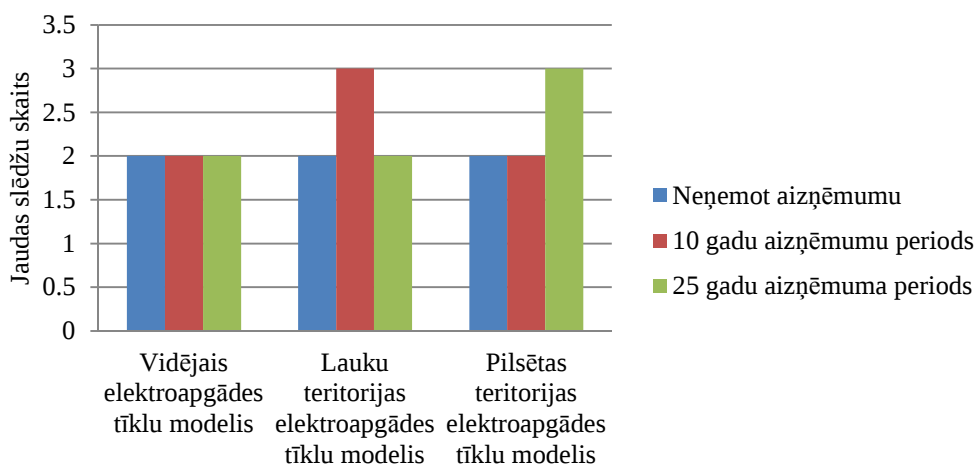
Ņemot vērā tīkla modeļu struktūru, secināms, ka jaudas slēdžu izvietojums ir galvenokārt uz maģistrālajām un saites līnijām un pie TA pieslēgtiem industriāliem, publiskiem un komerciāliem lietotājiem, retāk — māsaimniecības lietotājiem. Jaudas slēdžu izvietojums uz nozarlīnijām nesniedz pilnīgu priekšstatu par optimālo jaudas slēdžu skaitu. Tā rezultātā pieņemam turpmākajos algoritmos sekcionējošo elementu optimizāciju veikt tikai uz maģistrālajām un saites līnijām. Lai iegūtu precizētus elektroapgādes drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķina rezultātus, optimizējot jaudas slēdžu skaitu un izvietojumu tīklā, nepieciešams ņemt vērā elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas un kapitālieguldījumu izmaksas [38].

5.2. Jaudas slēdžu skaita un izvietojuma optimizācijas rezultāti, ņemot vērā kapitālieguldījumu un atslēgumu novēršanas izmaksas

Pamatojoties uz 5.1. sadaļā aprakstītajiem optimizācijas rezultātiem, tika pieņemts lēmums veikt jaudas slēdžu optimizāciju, ņemot vērā kapitālieguldījumu un atslēgumu novēršanas izmaksas. Savukārt, novērtējot jaudas slēdžu izvietojumu lauku, pilsētas un vidējā tīkla modeļos, kā arī ievērojot jaudas slēdžu kapitālieguldījumu apjomu un ietekmi uz

elektroapgādes drošuma rādītājiem un atslēgumu rezultātā radītiem zaudējumiem, tika pieņemts lēmums optimizāciju veikt uz maģistrālajām un saites līnijām.

Lauku teritorijas, pilsētas teritorijas un vidējam elektroapgādes tīklam ar ģenētisko algoritmu veikta jaudas slēdžu skaita un izvietojuma optimizācija uz maģistrālajām un saites līnijām. Optimizācijā ievērotas kapitālieguldījumu un elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas izmaksas, neņemot aizņēmumu, 10 gadu aizņēmuma periodam un 25 gadu aizņēmuma periodam. Vidējam elektroapgādes tīkla modelim pie maksimāli samazināta atslēgumu summārā ilguma un atslēgumu rezultātā sadales tīklam, sabiedrībai un lietotājiem radītiem zaudējumiem optimālais jaudas slēdžu skaits ir divi gab. — gan 10 gadu, gan 25 gadu aizņēmuma periodam, gan arī gadījumā, ja aizņēmums netiek ņemts. Pilsētas teritorijas elektroapgādes tīkla modelim pie minimizēta elektroapgādes atslēgumu summārā ilguma un minimizētiem atslēgumu rezultātā sadales tīklam, sabiedrībai un lietotājiem radītiem zaudējumiem optimālais jaudas slēdžu skaits ir divi gab. — gan 25 gadu aizņēmuma periodam, gan neņemot aizņēmumu. Savukārt 10 gadu aizņēmuma periodam optimālais slēdžu skaits ir trīs gab. Lauku teritorijas elektroapgādes tīkla modelim pie minimizēta elektroapgādes atslēgumu summārā ilguma un atslēgumu rezultātā sadales tīklam, sabiedrībai un lietotājiem radītiem zaudējumiem optimālais jaudas slēdžu skaits ir divi gab. — gan 10 gadu aizņēmuma periodam, gan neņemot aizņēmumu. Savukārt 25 gadu aizņēmuma periodam optimālais slēdžu skaits ir trīs gab. (5.1. att.). Elektroapgādes atslēgumu rezultātā sadales tīklam, sabiedrībai un lietotājiem radītie summārie zaudējumi pēc jaudas slēdžu skaita un izvietojuma optimizācijas un ar dažādiem aizņēmumu periodiem parādīti 5.2. att. Kā secināms, jaudas slēdžu skaita optimizācijas ieguvumi ir proporcionāli kapitālieguldījumu izmaksām.

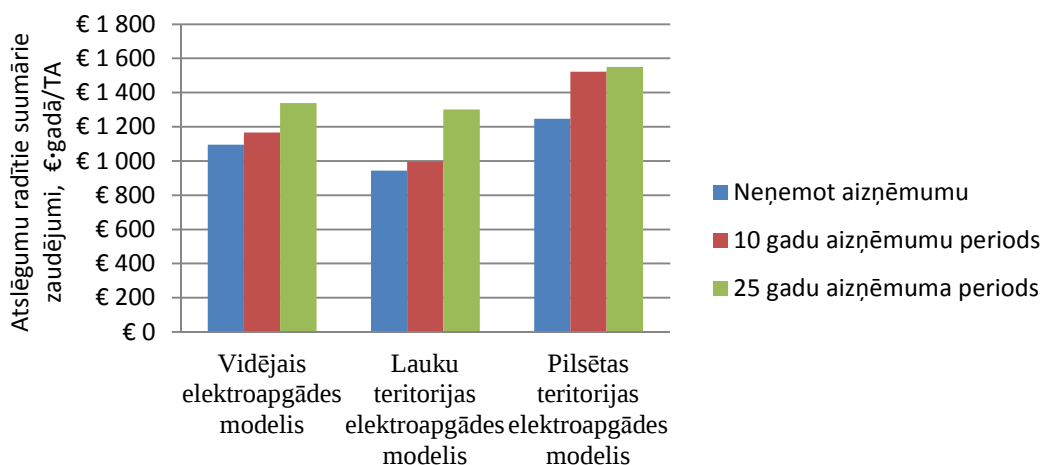


5.1. att. Jaudas slēdžu skaita optimizācijas rezultāti

Pēc jaudas slēdžu skaita un izvietojuma optimizācijas atslēgumu rezultātā radītie zaudējumi vienam jaudas slēdzim vidējā elektroapgādes modelī, neņemot aizņēmumu, samazinās par 14 %, lauku teritorijas elektroapgādes modelī — par 12,6 %, pilsētas teritorijas elektroapgādes modelī — par 33,6 %. Summārie atslēgumu rezultātā radītie zaudējumi 10 gadu aizņēmumu periodam vidējā elektroapgādes modelī samazinās par 8 %, lauku teritorijas elektroapgādes modelī — par 7 %, pilsētas teritorijas elektroapgādes modelī — par 30 %. Summārie atslēgumu rezultātā radītie zaudējumi 25 gadu aizņēmumu periodam vidējā elektroapgādes modelī samazinās par 5,8 %, lauku teritorijas elektroapgādes modelī — samazinās par 11 %, pilsētas teritorijas elektroapgādes modelī — samazinās par 20 %. Apkopojot rezultātus, secināms, ka vidējam un lauku teritorijas elektroapgādes tīkla modelim kapitālieguldījumi jaudas slēdžu iegādē samazinās proporcionāli. Pilsētas teritorijas

elektroapgādes tīklu modelim sekcionēšanas rezultātā ievērojami samazinās summārie atslēgumu rezultātā radītie zaudējumi. Tas saistīts ar lielāku elektroenerģijas patēriņu pilsētas teritorijā, augstākiem lietotāju ieņēmumiem [38].

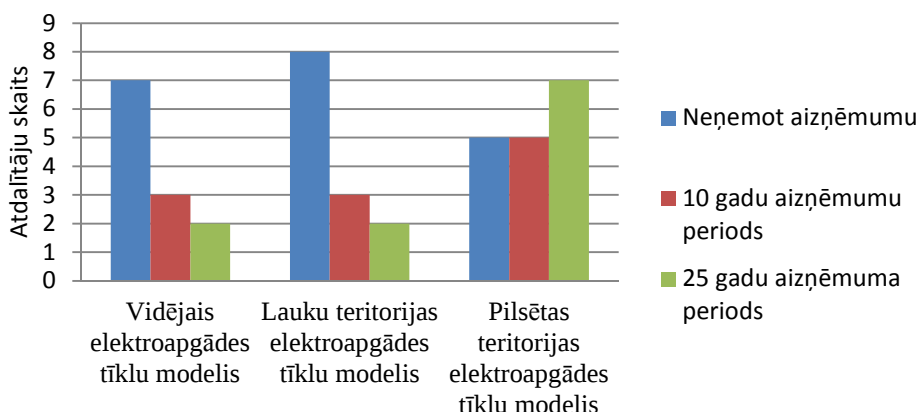
Ņemot vērā summāros elektroapgādes atslēgumu rezultātā radītos zaudējumus, papildu jaudas slēdžu ievietošana drīzāk varētu tikt apskatīta no viedo tīklu ieviešanas un ekspluatācijas ērtuma viedokļa, bet nevis no atslēgumu radīto zaudējumu samazināšanas viedokļa.



5.2. att. Jaudas slēdžu skaita optimizācijas atslēgumu radītie summārie zaudējumi

5.3. Ar ģenētisko algoritmu veiktas atdalītāju skaita un izvietojuma optimizācijas rezultāti

Ievērojot jaudas slēdžu optimizācijas rezultātus un kritērijus, tika pieņemts lēmums veikt atdalītāju optimizāciju uz maģistrālajām un saites līnijām, ņemot vērā kapitālieguldījumu un atslēgumu novēršanas izmaksas. Lauku teritorijas, pilsētas teritorijas un vidējam elektroapgādes tīklam ar ģenētisko algoritmu tika veikta atdalītāju skaita un izvietojuma optimizācija uz maģistrālajām un saites līnijām. Optimizācijā ievērotas kapitālieguldījumu un elektroapgādes sistēmas atslēgumu novēršanas izmaksas, neņemot aizņēmumu, 10 gadu aizņēmuma periodam un 25 gadu aizņēmuma periodam.



5.3. att. Atdalītāju skaita optimizācijas rezultāti

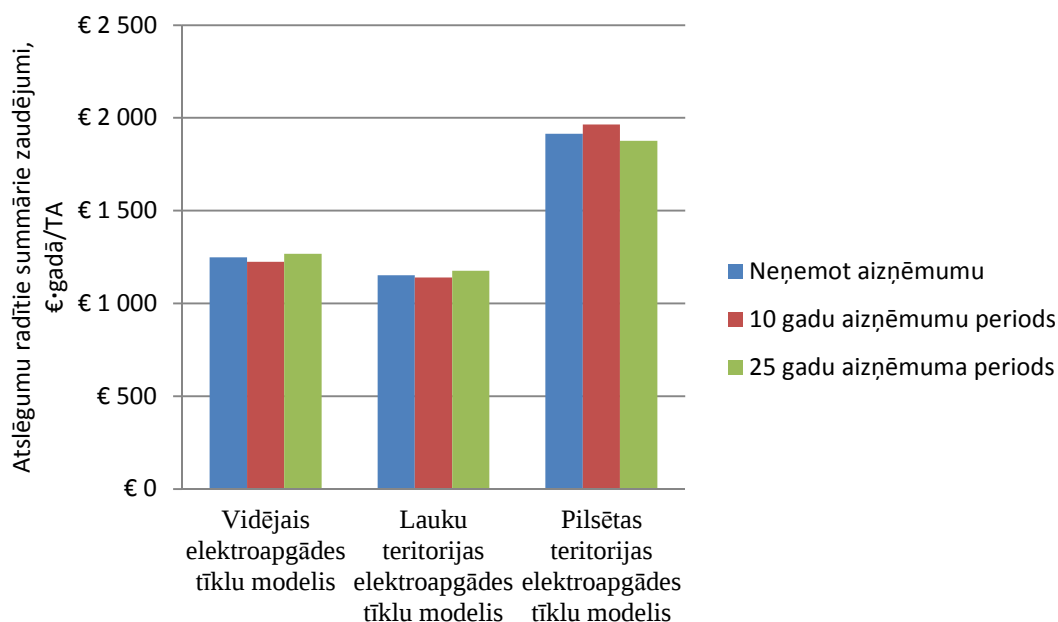
Vidējam elektroapgādes tīkla modelim pie minimizēta elektroapgādes atslēgumu summārā ilguma un minimizēto atslēgumu rezultātā sadales tīklam, sabiedrībai un lietotājiem radītiem

zaudējumiem optimālais atdalītāju skaits 10 gadu aizņēmuma periodam ir trīs gab., 25 gadu aizņēmuma periodam — divi gab., neņemot aizņēmumu — septiņi gab. Pilsētas teritorijas elektroapgādes tīkla modelim pie minimizēta elektroapgādes atslēgumu summārā ilguma un minimizēto atslēgumu rezultātā sadales tīklam, sabiedrībai un lietotājiem radītiem zaudējumiem optimālais atdalītāju skaits 25 gadu aizņēmuma periodam ir septiņi gab., savukārt, neņemot aizņēmumu un 10 gadu aizņēmuma periodam — pieci gab. Lauku teritorijas elektroapgādes tīkla modelim pie minimizēta elektroapgādes atslēgumu summārā ilguma un minimizēto atslēgumu rezultātā sadales tīklam, sabiedrībai un lietotājiem radītiem zaudējumiem optimālais atdalītāju skaits 10 gadu periodam ir trīs gab., 25 gadu aizņēmuma periodam — divi gab., neņemot aizņēmumu — astoņi gab. (5.3. att.).

Pēc atdalītāju skaita un izvietojuma optimizācijas rezultātiem secināms, ka, neņemot aizņēmumu, iespējams uzstādīt lielāku skaitu atdalītāju, iegūstot tos pašus drošuma rādītājus.

Neskatoties uz optimāla atdalītāju skaita līdzību optimālam jaudas slēdžu skaitam, atdalītāji nevar nodrošināt tīkla darbību bez atslēgumiem, līdz ar to pat minimizētas izmaksas ietver atslēgumu rezultātā lietotājiem radītos zaudējumus.

5.4. att. parādīti summārie atslēgumu radītie sadales tīkla, lietotāju un sabiedrības zaudējumi optimālam atdalītāju skaitam 10 gadu, 25 gadu aizņēmuma periodam un — neizmantojot aizņēmumu.



5.4. att. Atdalītāju skaita optimizācijas atslēgumu radītie summārie zaudējumi

Jāatzīmē, ka, optimizējot atdalītāju skaitu un izvietojumu, nav iespējams sasniegt atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu minimālo līmeni. Pēc atdalītāju skaita un izvietojuma optimizācijas atslēgumu rezultātā radītie zaudējumi vidējā elektroapgādes modelī vienam atdalītājam, neņemot aizņēmumu, samazinās par 2 %, lauku teritorijas elektroapgādes modelī — par 1 %, pilsētas teritorijas elektroapgādes modelī — par 9 %. Summārie atslēgumu rezultātā radītie zaudējumi 10 gadu aizņēmumu periodam vidējam elektroapgādes modelim samazinās par 6 %, lauku teritorijas elektroapgādes modelim — par 3 %, pilsētas teritorijas elektroapgādes modelim — par 9 %. Summārie atslēgumu rezultātā radītie zaudējumi 25 gadu aizņēmumu periodam vidējam elektroapgādes modelim samazinās par 8 %, lauku teritorijas elektroapgādes modelim — par 3 %, pilsētas teritorijas elektroapgādes modelim — par 7 %. Ņemot vērā summāros elektroapgādes atslēgumu rezultātā radītos zaudējumus, papildu

atdalītāju ievietošana drīzāk varētu tikt apskatīta no viedo tīklu ieviešanas un ekspluatācijas ērtuma viedokļa, bet nevis no atslēgumu radīto zaudējumu samazināšanas viedokļa.

SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI

Promocijas darbā iegūtie rezultāti rāda, ka:

- 1) darbā veiktais 20 kV sadales tīklu elektroapgādes tīklu drošuma aprēķina metožu, drošuma paaugstināšanas optimizācijas metožu, drošuma paaugstināšanas alternatīvu un elektroapgādes atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu apkopojums, analīze un sistematizēšana ļauj atrast iespējamus risinājumus kapitālieguldījumiem attiecībā uz sadales tīklu, lietotāju un sabiedrības līmeni, ņemot vērā tīkla attīstības tendences un perspektīvās tehnoloģijas;
- 2) riskus, zaudējumus, plānošanu un priekšrocības elektroapgādes tīklam nepieciešams analizēt atkarībā no ekonomikas, vides, elektroapgādes kvalitātes, bojājumu iespējamības, likumdošanas izmaiņu risku pamatprincipu teorijas viedokļa u. c.;
- 3) lai aprēķinātu elektroapgādes tīklu drošuma rādītāju un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu vērtību, nepieciešams apskatīt atslēgumu radītos zaudējumus lietotāju, sabiedrības un sadales tīklu līmeņos, jo katram no tiem ir aktuāli dažādi aspekti un mērķi;
- 4) lai samazinātu pieņēmumu izmantošanu, elektroapgādes atslēgumu analīzes rezultātā jāanalizē katra atslēguma novēršanas procesu, ilgumu, biežumu un tā varbūtību sadalījumus;
- 5) izvērtējot elektroapgādes drošuma paaugstināšanas risinājumus, lielāka uzmanība elektroapgādes drošuma paaugstināšanā ir jāvelta sekcionējošo elementu optimālā skaita un izvietojuma izvēlei, kas sniedz tūlītēju elektroapgādes drošuma paaugstināšanu;
- 6) elektroapgādes tīklu atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu un drošuma aprēķinos, kā arī sekcionējošo elementu skaita un izvietojuma scenārijiem un kapitālieguldījumu lietderības analīzei nepieciešams ņemt vērā drošumu ietekmējošos faktorus;
- 7) optimāla sekcionējošo elementu izvietojuma analīzi nepieciešams veikt, pirms pieņemts lēmums par kapitālieguldījumiem konkrētā objektā;
- 8) ievērojot tīklu attīstības tendences, veicot rezervēšanas iespēju analīzi un salīdzinot dažādu kapitālieguldījumu veikšanas risinājumus, tika izveidotas drošuma aprēķina metodes ar iespēju mainīt tīkla struktūru un rezervēšanas iespējas;
- 9) ņemot vērā esošā tīkla struktūru un tīklu attīstības tendences, drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķinam tika izmantotas IEAR, Montekarlo un ģenētiskā algoritma metodes, rezultātu precizēšanā piemērojot daudzkritēriju analīzi;
- 10) drošuma aprēķina un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķina metodēs visi elementi attiecībā pret konkrēto transformatora apakšstaciju iedalāmi rezervējamās, nerezervējamās un papildu elementos;
- 11) piedāvātās metodes iespējams izmantot lietotāju elektroapgādes atslēgumu risku aprēķinā un iespējamo atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu kompensāciju aprēķinā;
- 12) piedāvātās metožu iespējamās modifikācijas nākotnē izmantojamas dažādu ar elektroapgādes atslēgumu analīzi saistītu jautājumu risināšanā;
- 13) nepiegādātās elektroenerģijas aprēķina cena Latvijā ir tuva attiecīgai vērtībai citās valstīs, tādējādi varam secināt, ka atslēgumu ilgumu un biežumu iespējams uzlabot, rūpīgi izvērtējot kapitālieguldījumu nepieciešamību no elektroapgādes drošuma paaugstināšanas skatupunkta;
- 14) ar A-zvaigznes metodi un IEAR aprēķinu iespējams veikt tikai tuvinātus elektroapgādes tīklu drošuma un atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu aprēķinus;

- 15) ģenētiskā algoritma izmantošana ļauj optimizēt elektroapgādes tīkla struktūru, minimizēt atslēgumu radītos zaudējumus un maksimizējot tīkla drošumu;
- 16) izstrādātā Montekarlo elektroapgādes tīkla aprēķina metode ļauj aprēķināt drošumu un atslēgumu radītos zaudējumus jebkuras sarežģītības tīklam;
- 17) Montekarlo modelēšanas rezultāti ir līdzīgi reālā tīkla statistiskiem rādītājiem, kas pierāda, ka izstrādātais modelis ir piemērojams aprēķiniem;
- 18) ar ģenētisko algoritmu veiktā jaudas slēdžu skaita un izvietojuma optimizācija, neņemot vērā kapitālieguldījumu un ekspluatācijas izmaksas, nesniedz precīzu priekšstatu par optimālo jaudas slēdžu skaitu;
- 19) atkarībā no aizdevuma termiņa un tīkla modeļa rakstura ar ģenētisko algoritmu veikto jaudas slēdžu skaita un izvietojuma optimizācija ļauj atslēgumu rezultātā radītos zaudējumus samazināt no 5,8 % līdz 33,6 %;
- 20) atkarībā no aizdevuma termiņa un tīkla modeļa rakstura ar ģenētisko algoritmu veiktā atdalītāju skaita un izvietojuma optimizācija ļauj atslēgumu rezultātā radītos zaudējumus samazināt no 1 % līdz 9 %;
- 21) kapitālieguldījumu lietderīguma priekšizpēte sniedz iespēju elektroapgādes drošuma paaugstināšanā ar iespējami mazākiem līdzekļiem sasniegt augstāku rezultātu;
- 22) ņemot vērā summāros elektroapgādes atslēgumu rezultātā radītos zaudējumus, papildu jaudas slēdžu un/vai atdalītāju ievietošana drīzāk var tikt apskatīta no viedo tīklu ieviešanas un ekspluatācijas ērtuma viedokļa, bet ne no atslēgumu radīto zaudējumu samazināšanas viedokļa;
- 23) palielinoties elektroenerģijas patēriņam un/vai mainoties lietotāju raksturam, iespējamo atslēgumu rezultātā radīto zaudējumu apjoms var mainīties;
- 24) ir svarīga iepriekšēja tīkla analīze, lai iegūtu maksimālo ekonomisko efektu un ieguldīto līdzekļu efektivitāti, veicot AS «Sadales tīkls» attīstības plānā paredzēto plašo sekcionēšanas iekārtu uzstādīšanas programmu;
- 25) optimizējot sekcionējošo elementu skaitu un izvietojumu, iespējams sasniegt AS «Sadales tīkls» attīstības plānā definētos drošuma rādītāju mērķus tīkla nākotnes attīstībā.

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

1. Budahs M. Prezentācija «AS «Sadales tīkls» modernizācija un attīstības perspektīvas». «Dienas Biznesa» rīkotā konference «Enerģētikas forums 2011», 07.12.2011., Rīgā
2. Budahs M., Zviedrītis M. Elektrisko sadales tīklu elektroietaišu ekspluatācija. – Rīga, RVT, 2012. – 107. lpp.
3. Gerhards J. Elektroapgāde. – Rīga: Zvaigzne, 1989. – 329. lpp.
4. Ļvovs A. Elektroapgādes drošuma līmeņa tehniski-ekonomiskās regulēšanas metodoloģijas izstrāde. – Promocijas darbs. Rīga: RTU, 2013. – 156 lpp.
5. Pinkulis A. Sadales tīklu izaicinājumi un attīstība. Prezentācija konferencē «Latvenergo koncerna attīstība brīvā tirgus apstākļos», Rīga, Latvija, 07.11.2012.
6. Alevehag K. Impact of Dependencies in Risk Assessments of Power Distribution Systems. – Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering, Electric Power Systems, Stockholm: Sweden, 2008. – p. 155.
7. Amelin M. On Monte Carlo Simulation and Analysis of Electricity Markets. – Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering, Stockholm, 2004. – p. 315.
8. Bernardon D. P., Sperandio M., Garcia V. J., Russi J., Canha L. N., Abaide A. R., Daza E. F. B. Methodology for allocation of remotely controlled switches in distribution

- networks based on a fuzzy multicriteria decision making algorithm. – *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 2, 2011. – pp. 414. – 420.
9. Billinton R. Reliability of power supplies. In *Electronics and Power*, vol. 24, no. 4, April 1978. – pp. 307. – 310.
 10. Billinton R., Acharya J. R. Weather-based distribution system reliability evaluation. – in *Generation, Transmission and Distribution*, IEE Proceedings, vol. 153, no. 5, September 2006. – pp. 499. – 506.
 11. Billinton R., Allan R. N. Reliability Evaluation of Power Systems. – Plenum, Press, 2nd edition, 1996. – p. 540.
 12. Bradd A., Jantunen A., Saksa J-M., Partanen J., Bergman J-P. Electricity distribution network operation services – An analysis on market dynamics from the service provider's perspective. – in *Clean Electrical Power, 2007. ICCEP '07. International Conference*, 21–23 May 2007. – pp. 101. – 109.
 13. Brown R. E. Electric Power Distribution Reliability. – Marcel Dekker, New York, 2002. – p. 365.
 14. Carpaneto E., Mosso A., Ponta A., Roggero E. Comparison of Reliability and Availability Evolution Techniques for Distribution Network Techniques. – in *Reliability and Maintainability Symposium, 2002. Proceedings. Annual, 2002.*, – pp. 563. – 568.
 15. Casteren J. Assessment of Interruption Costs in Electric Power Systems using the Weibull–Markov Model. – Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Göteborg, 2003. – p. 161.
 16. Chayakulkheeree K. Economy of Power System Reliability. – A Training Workshop on Power System Economics and Planning, Asian Institute of Technology, 2006. – p. 68.
 17. Council of European Energy Regulators. 5th Benchmarking Report on Quality of Electricity Supply 2011. – Brussels, 2011. – pp. 260.
 18. Distribuzione C. N. Optimal Placement of Automation Devices in Enel Distribution Network. – in *Electricity Distribution – Part 1, 2009. CIRED 2009. 20th International Conference and Exhibition*, 8–11 June 2009. – pp. 1. – 4.
 19. European Communities. How Europeans spend their time Everyday life of women and men. Office for Official Publications of the European Communities, 2004. – pp. 36.
 20. Gerhards J., Gorobetz M., Levchenkovs A. A-Star Algorithm for Intelligent Agents in Electric Power Supply Network Tasks. – *Scientific Journal of RTU, Enerģētika un elektrotehnika*, Vo. 18., 2006. – pp. 1–6.
 21. Haghifam M. R. Optimal allocation of tie points in radial distribution systems using a genetic algorithm. – *Eur. Trans. Elect. Power*, vol. 14, no. 2, 2004. – pp. 85. – 96.
 22. He Y. Modeling and Evaluating Effect of Automation, Protection, and Control on Reliability of Power Distribution Systems. – Stockholm, 2002. – p. 234.
 23. Helseth A. Modeling Reliability of Supply and Infrastructural Dependency in Energy Distribution Systems. – Thesis for the degree of philosophy doctor, Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, 2008. – p. 132.
 24. Helseth A., Holen A. T. Impact of Energy End Use and Customer Interruption Cost on Optimal Allocation of Switchgear in Constrained Distribution Networks. – *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 3, July 2008. – p. 1419. – 1425.
 25. Kivikko K., Makinen A., Jarventausta P., Silvast A, Heine P., Lehtonen M. Comparison of reliability worth analysis methods: data analysis and elimination methods. – in *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 2, no. 3, May 2008. – pp. 321–329.
 26. Kjølle G. H., Samdal K., Singh B., Kvitastein O. A. Customer Costs Related to Interruptions and Voltage Problems: Methodology and Results. – *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 3, Aug. 2008. – pp. 1030. – 1038.

27. Kutjuns A., Zemīte L., Bērziņa K. Practical and Theoretical Methods of Reliability Securing in Transmission and Distribution Network. In: Proceedings of the 11th International Scientific Conference «Electric Power Engineering 2010» (EPE 2010), Czech Republic, Brno, 4–6 May, 2010. Brno: Brno University of Technology, 2010, pp. 569. – 572.
28. Kutjuns A., Zemīte L. Power Network System Reliability and Methods of Calculation – Sc. Proceedings, IEEE Bucharest PowerTech' 2009 Conference «Innovative Ideas toward the Electrical Grids of the Future», 2009. – pp. 260. – 266.
29. Molochko F. I., Molochko A. F., Ekmanis J. Estimation of the energy security level and definition of the criteria for damage forecasts. – Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, vol. 1, 2009 – pp. 15. – 24.
30. Sljivac D., Nikolovski S., Kovac Z. Distribution Network Restoration Using Sequential Monte Carlo Approach. – The 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, June 11–15, 2006. – p. 6.
31. Solver T. Reliability in Performance-Based Regulation. – Licentiate Thesis, Electrical Power Systems department of Electrical Systems, Royal Institute of Technology, Sweden, 2005. – p. 132.
32. Stojanovic M. S., Tasic D. S., Ristic A. T. Optimal Allocation of Distribution Automation Devices in Medium Voltage Network. – Elektronika ir Elektrotehnika, vol. 19, No. 4, 2013. – pp. 1. – 6.
33. Theil A., Theil M. Medium Voltage network reliability: efficiency oriented supply restoration strategies. – 15th PSCC, Session 8, Paper 5, Liege, 2005. – pp. 1–6.
34. Theil M., Theil G. Reliability Assessment of Medium Voltage Networks with Simulation of the Restoration Process. – 14th PSCC, Session 25, Paper 1, Sevilla, 2002. – pp. 1. – 7.
35. Wang P., Li W. Reliability evaluation of distribution systems considering optimal restoration sequence and variable restoration times. – in Generation, Transmission & Distribution, IET, vol.1, no.4, July 2007. – pp. 688. – 695.
36. Zemīte L., Gerhards J. Evaluation of Distribution Network Customer Outage Costs. – Scientific Journal of RTU, Enerģētika un elektrotehnika, 2009. – pp. 7. – 12.
37. Zemīte L., Gerhards J. Reliability Evaluation of Distribution Systems. – No: Proceedings of the 9th International Conference on Electrical and Control Technologies, Lietuva, Kaunas, 2014. Kaunas: Technologija, 2014. – pp. 94. – 100.
38. Zemīte L., Gerhards J., Gorobecs M., Ļevčenko A. Optimization of Switch Allocation in Power Distribution Systems – International Workshop on Deregulated Electricity Market Issues (DEMSEE 2015), Ungārija, Budapešta, 2014. – pp. 166. – 173.
39. Zemīte L., Gorobecs M., Gerhards J., Ribickis L., Ļevčenko A. A-Star Algorithm for Reliability Analysis of Power Distribution Networks. – The 5th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT2010, Lietuva, 2010. – pp. 261. – 264.
40. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – Москва: Наука, 1969. – 576 с.
41. Горбунова Н. Р. Выбор мероприятий и средств повышения электробезопасности сельских распределительных сетей 10 кВ по многокритериальной модели. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Москва, 2012. – 128 с.
42. Гук Ю. Б. и др. Оценка надежности электроустановок. – под ред. Проф. Б. А. Константинова. М.: «Энергия», 1974. – 200 с.
43. Жуковский Ю. Л. Повышение надежности и эффективности систем электроснабжения с автоматическим секционированием на стороне 6 (10) кВ. – СПб., 2006. – 20 с.

44. Непомнящий В. А. Надежность оборудования энергосистем. – Москва: Электроэнергия передача и распределение, 2013. – 196 с.