

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Antons KUTJUNS

ELEKTROAPGĀDES DROŠUMA FAKTORA
NOVĒRTĒŠANAS METODIKAS IZSTRĀDE

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga - 2006

Ievads

Promocijas darbā risinātas augstsprieguma pārvades tīkla drošuma problēmas.

Enerģētikā uz problēmas risinājuma izvēli ietekmē ļoti daudz faktoru. Salīdzinājumā ar citiem faktoriem, drošumam ir īpaša vieta, jo drošums jāievēro vienmēr un visur. Patērētāju elektroapgādi ietekmē neparedzēti apstākļi, kas ir saistīti ar energosistēmu avārijām vai energoobjektu iekārtu atteicēm. No elektroapgādes drošuma ir atkarīgi patērētāji: rūpniecība, lauksaimniecība utt. Šī atkarība ir tik liela, ka energoapgādes pārtraukšana noved pie lieliem materiāliem zaudējumiem, kuriem ir nacionālu zaudējumu mērogs. Zaudējumi, ko rada lieli un ilgstoši elektroapgādes pārtraukumi, ir tik nozīmīgi, ka, vadoties no tehniskiem un tautsaimnieciskiem apsvērumiem, ir nepieciešams, lai elektroapgādei būtu augsts drošuma līmenis. Drošuma trūkuma sekas energosistēmā ir tik nopietnas, ka nepieciešama energosistēmas projektēšanas, būvēšanas un ekspluatācijas metožu nepārtraukta uzlabošana. Tāpēc enerģētisko sistēmu drošuma pētīšana un nodrošināšana bija un būs mūsdienu enerģētikas svarīgākā problēma.

Pētītas problēmas elektrotīklu drošuma joma parāda, ka elektroenerģētisko sistēmu un tīklu drošuma jautājumi ir aktuāli visā pasaulē.

Šodien visā Eiropā, ka arī Baltijā un pie mums Latvijā, notiek elektroenerģijas tirgus liberalizācija, kuras apstākļos rodas jaunas elektroapgādes nodrošināšanas problēmas. Elektroenerģijas tirgus liberalizācija prasa ražošanas, pārvades un sadales pārkārtošanu. Tās nozīme, ka daudzos agrāk monopolizētā vispasaules elektriskā tirgus rajonos notiek pārvades un sadales atdalīšana no ražošanas. Tā kā pakalpojumu kompānijas ir pakļautas pieaugošam cenu iespaidam, tās ir spiestas samazināt gan investīcijas, gan ekspluatācijas izdevumus. Šie pasākumi uz piedāvāto pakalpojumu kvalitāti atstāj galvenokārt negatīvu efektu.

Darba mērķi un uzdevumi

Promocijas darba mērķi:

1. Izstrādāt ilgtermiņa metodiku, kas pēta un analizē pārvades tīkla drošuma problēmas un jautājumus.
2. Izstrādāt atslēgumu modelēšanas algoritmu apskatot tīkla elementu atslēgumus pa vienam ($n-1$) un pa diviem ($n-2$).
3. Izstrādāt 330kV un 110kV apakšstaciju sadalietaišu drošuma faktoru novērtēšanas metodiku.
4. Piemērot drošuma aprēķina metodiku Latvijas un Baltijas pārvades tīklam.

Pētīšanas metodes

Darbā izmantotās sistēmas pētīšanas metodes: analīze un sintēze. Darbā izmantoti sistēmas pieejas pamatprincipi - uzdevumi, mērķu un kritēriju izvēles vienotība, sistēmas būtisko īpašumu noteikšana un matemātiskās modelēšanas metodes. Bez tam izmantotas arī matemātiskās statistikas metodes.

Darba zinātniskā novitāte

1. Izstrādāts atslēgumu modelēšanas algoritma oriģināls, kas apskata tīkla atslēguma elementus pa vienam ($n-1$) un pa diviem ($n-2$).
2. Izstrādāta 330kV un 110kV apakšstaciju sadalietaišu drošuma faktoru novērtēšanas oriģināla metodika, kas izmantojama pārvades tīkla attīstības optimizācijas procesā.

Darba praktiska nozīme

Darba rezultāti veido programmu *LDM-AD '04*, kas paredzēta augstsprieguma pārvades tīkla drošuma analīzei. Šo programmu izmanto VAS *Latvenergo Augstsprieguma Tīkls (AST)*, tas dod iespēju palielināt augstsprieguma pārvades tīkla drošumu un ekonomisko efektivitāti.

Darba aprobācija

Par darba rezultātiem tika ziņots, un tie tika apspriesti 11 starptautiskās konferencēs:

1. RTU 44. starptautiskā zinātniskā konference;
2. 11th International Power Electronics and Motion Control Conference "EPE-PEMC 2004", Rīga, Latvija;
3. Krievijas Zinātņu akadēmijas Sibīrijas nodaļas zinātniskais seminārs "Lielo enerģētisko sistēmu drošuma pētīšanas metodiskie jautājumi", Minska, Baltkrievija;
4. Starptautiskā zinātniskā konference "Energosistēma: vadība, kvalitāte, konkurence", Jekaterinburga, Krievija;
5. International Scientific Conference 2005 IEEE St.Petersburg PowerTech'05, St.Petersburg, Russia;
6. Krievijas Zinātņu akadēmijas Sibīrijas nodaļas 76. starptautiskais zinātnes seminārs "Enerģētisko sistēmu drošuma pētīšanas metodiskie jautājumi", Pleskava, Krievija;
7. The 3rd International Scientific Symposium ELEKTROENERGETIKA 2005. Stara Lesna, Slovak Republic;
8. RTU 46. starptautiskā zinātniskā konference;
9. The 1st International Scientific Conference, Electro-Tech 2005, Budapest, Hungary;
10. The 7th International Scientific Conference EPE-2006, Brno, Czech Republic.
11. The 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems PMAPS-2006, Stockholm, Sweden.un citās.

Publikācijas

Iznākušās publikācijas referējamos žurnālos:

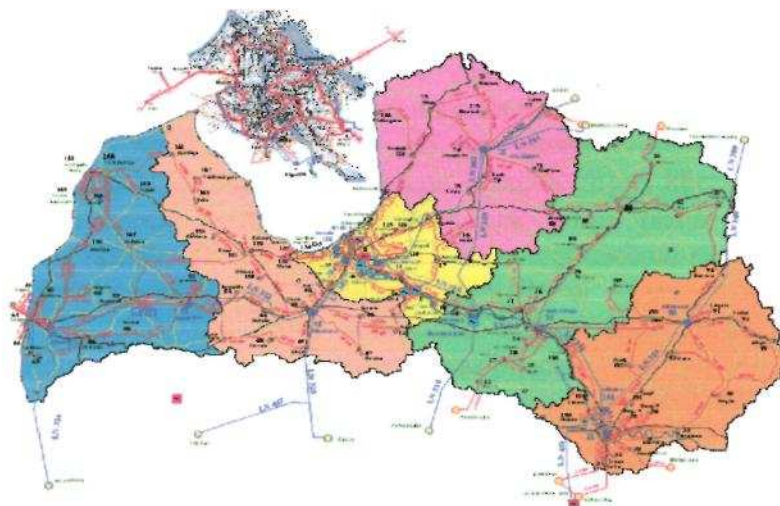
1. Krišāns Z., Kutjuns A., Mutule A. *330 kV komutācijas shēmu drošuma novērtēšanas matemātiskais modelis* //Latvian journal of physics and technical sciences, 2002, Nr. 5, 16-26. lpp.
2. Krišāns Z., Oļeinikova L, Kutjuns A, Mutule A. *Latvijas 110-330 kV pārvades tīkla drošuma novērtēšanas metode* //Latvian journal of physics and technical sciences, 2002, Nr. 6, 30-38. lpp.
3. Krišāns Z., Oļeinikova I., Kutjuns A. *Network Reliability optimization under liberalizēs electricity market* //Latvian journal of physics and technical sciences, 2003, Nr. 5, 3-10. lpp.
4. Krišāns Z., Oļeinikova I., Kutjuns A. *Elektriskā tīkla drošuma līmeņa izmaksu aprēķina principi brīvā elektroenerģijas tirgū* //Rīgas Tehniskās universitātes zinātniskie raksti. RTU-2003, 4.sērija, 9.sējums, 42-48.lpp.
5. AKutjuns, I.Oļeinikova. *Latvijas, Lietuvas un Igaunijas elektroenerģijas tirgus galvenie aspekti II* Rīgas Tehniskās universitātes zinātniskie raksti. RTU-2004, 4.sērija, 11.sējums, 55-62.lpp.

6. Z.Krišāns, A.Kutjuns, I.Oļeinikova. // *Baltic countries power networks reliability problems under market conditions and methods of reliability improvement*. The 7th International Scientific Conference EPE-2006, Brno, Czech Republic, 2006, Conference Proceeding on CD.
7. Z.Krišāns, A.Mutule, I.Oļeinikova, A.Kutjuns. *Application of risk assessment method for Baltic States power system development optimization*. // The 9 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems PMAPS-2006, Stockholm, Sweden. Conference Proceeding on CD.
8. Z.Krišāns, I.Oļeinikova, A.Mutule, A.Kutjuns. *Optimization method of power system development under uncertainty* // The 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems PMAPS-2006, Stockholm, Sweden, June - 2006. Conference Proceeding on CD.

1. Latvijas elektroenerģijas pārvades tīkla drošuma problēmas.

1.1. Latvijas energosistēmas pārvades tīkls.

Latvijas Republikas augstsprieguma pārvades tīkls sastāv no 330 kV un 110 kV līnijām, kas savieno savā starpā sadales punktus, apakšstacijas un ģenerācijas avotus Latvijas teritorijā, ka arī ar kaimiņu sistēmām. Latvijas energosistēmas pārvades tīkls ir ļoti sazarots (skat. 1.1. att).



1.1. att. Latvijas augstsprieguma pārvades tīkla shēma.

Esošais pārvades elektrotīkls apmierinās tuvākos desmit gadus prognozēto elektroenerģijas un jaudas patēriņu. Atsevišķu reģionu attīstība (tādu, ka lielas pilsētas: Rīga, Liepāja, Ventspils, u.c), kur notiek esošo slodžu pārgrupēšanos un sagaidāmo slodžu pieaugums, rada nepieciešamību jaunu apakšstaciju, elektrostaciju un elektropārvades līniju celtniecībai.

Lai palielinātu pārvades tīkla drošumu, tiek pētīti projekti jaunu elektrostaciju un jaunu elektropārvades līniju būvniecībai Rīgā, Ventspilī, un citās lielās Latvijas pilsētās.

Orkāns, kas plosījās Latvijā 2005.gadā janvārī, parādīja, ka drošuma jautājumi un pārvades tīkla elektriskās shēmas trūkumi un „šauras vietas” Latvijas energosistēmā ir ļoti aktuālie un tos nepieciešams efektīvi risināt. Dabas stihijas rezultātā Latvijas pārvades tīkls cieta milzīgos bojājumus. Ļoti daudz pārvades līniju atslēgumu noveda pie tā, ka Latvijas energosistēmā bija daļēji vai pilnīgi nodzēstas lielas pilsētas, daudzie Latvijas reģioni utt.

Orkāna laikā izraisītie bojājumu apjomi paradīja, ka energosistēma nav pasargāta no dabas stihijas kataklizmām un vairākos gadījumos ir bezspēcīga pret tām, tāpēc jāpalielina energosistēmas drošums, lai maksimāli nosargātu elektroapgādi.

1.2. Latvijas energosistēmas darbs elektriskajā lokā

Latvijas energosistēma strādā Baltijas energosistēmu energoapvīerībā. Baltijas valstu - Igaunijas, Latvijas un Lietuvas energosistēmas savstarpēji savienoti ar 330 kV pārvades elektrolinijām (PEL) un vienlaicīgi tie veido kādu no sastāvdaļām elektriskajam gredzenam, kurā bez tām ietilpst 330, 500 un 750 kV elektriskie tīkli, kas pieder kaimiņu valstu energosistēmām - Baltkrievijas un Krievijas.

330÷750 kV elektriskais gredzens ievērojami paaugstina katras valsts energosistēmas elektroapgādes drošību, ja tā attīstība tiek koordinēta lielas apvienotas energosistēmas ietvaros.

Iestājoties Eiropas Savienībā, Latvijas energosistēmai nepieciešams atvērt liberalizēto elektroenerģijas tirgu un savienot savus elektriskos tīklus ar Eiropas valstu pārvades tīkliem. Tā kā Latvijai tuvākās Eiropas valstis ir Lietuva un Igaunija, un citas izejas uz Eiropas tīkliem nav, tad Latvijas energosistēma piedalās Baltijas valstu kopprojektos jaunu līniju būvēšanā ar Rietumeiropas valstīm.

1.3. Elektroenerģijas liberalizētā tirgus ieviešana Latvijā

Pēc iestāšanās Eiropas Savienībā Latvijai nepieciešams izpildīt Eiropas direktīvu un atvērt brīvu elektroenerģijas tirgu. Tas ir ļoti sarežģīts un darbietilpīgs process, kas ietekmēs arī pārvades un sadales tīklu darbību, tāpēc Latvija nesteidzas ar elektroenerģijas tirgus liberalizācijas paātrināšanu un kvalificētu elektroenerģijas patērētāju noteikšanu.

Pēdējā laikā totālo avāriju viens no iemesliem ir brīvā elektroenerģijas tirgus prioritāte attiecībā pret elektroapgādes drošumu. Pasaulē tirgus liberalizācijas apstākļos, kad tiek veicināta konkurence, drošības prasības paliek otrajā plānā, un tas veicina smagu enerģētisko avāriju rašanos [13], [14], [15]. Tā kā energosistēmu rūpes vairs nav virzītas uz maksimāla drošuma garantēšanu, rodas priekšnoteikumi šādām avārijās situācijām, kur saduras pretējas intereses, saduroties komersantu vēlmei iegūt maksimālu peļņu un tīkla operatoru interesēm saglabāt drošu elektroenerģijas piegādi.

1.4. Latvijas energosistēma - kā deficīta sistēma

Pagaidām Latvijas energosistēma salīdzinājumā ar kaimiņu sistēmām Lietuvu un Igauniju, kur elektroenerģijas izstrāde pārsniedz patēriņu, ir deficītā sistēma. Šobrīd Latvija ir spiesta pirkt apmēram 40% elektroenerģijas no kaimiņu energosistēmām: Igaunijas, Lietuvas un Krievijas. Elektroenerģijas izstrāde Latvijā notiek siltumelektrostacijas un hidroelektrostacijās.

No savas nesenās pagātnes Baltijas energosistēmas ir mantojušas pietiekami modernu un spēcīgu enerģētikas saimniecību. Taču pateicoties dažām darbībām, šis jaudu pārpalikums ātri samazināsies, un pēc neilga laika (apmēram 2010.-2015. gadā) energosistēmām vajadzēs ieviest jaunas jaudas. Jauno ģenerējošo jaudu ieviešanas nepieciešamība saistīta vairākkārt ar Lietuvas galvenā ģenerācijas avota - Ignalinas atomelektrostacijas slēgšanu. Ignalinas AES apturēšana būtiski iespaidos ne tikai visas Lietuvas enerģētikas kompleksu attīstību, bet arī tuvākos kaimiņus, ieskaitot Latviju. Viss Baltijas reģions zaudēs lielāko, efektīvāko un lētāko elektroenerģijas ražošanas avotu un palielināsies jaudas plūsmas uz Lietuvu no kaimiņu energosistēmām, un tas viss atspoguļosies uz pārvades tīkliem, kad Lietuva būs spiesta pirkt sev trūkstāšo elektroenerģiju kaimiņvalstīs.

Lai palielinātu Latvijas energosistēmas ģenerējošo jaudu, notiek plaši elektrostaciju rekonstrukcijas darbi ar jaunu un moderno iekārtu uzstādīšanu. Pēc elektrostaciju

rekonstrukcijas un modernizēšanas pasākumiem un jaunu elektrostaciju būvēšanas pasākumiem Latvijai tuvākajā laikā jāklūst par pašbalansējošu enerģosistēmu, kas lielākā mērā palielinās Latvijas patērētāju elektroapgādes drošumu.

1.5. Latvijas pārvades tīkla rekonstrukcijas

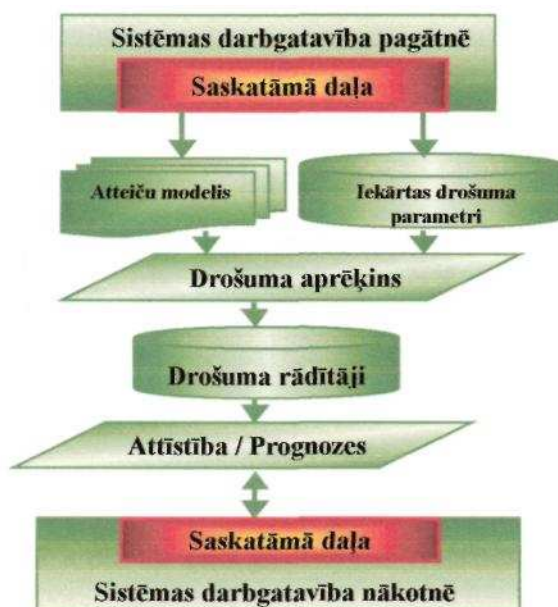
Viens no svarīgākajiem faktoriem, kas kopā ar lēno elektrisko tīklu attīstību un enerģosistēmu sarežģītiem funkcionēšanas apstākļiem mūsdienās samazina enerģoapgādes drošumu, ir elektrostaciju un apakšstaciju elektrisko iekārtu novecošana. Ir zināms, ka tādas iekārtas pielietošana noved pie enerģosistēmas tehniski ekonomisko rādītāju pasliktināšanās, iekārtu avārijām un ilgām un biežiem plānotiem remontiem.

Ir pagājuši vairāk kā 30 gadi, kopš Latvijā uzbūvētas pirmās 330 un 110 kV līnijas un apakšstacijas, un ir pienācis laiks tās atjaunot. Līdz pagājušā gadsimta 90. gadu sākumam galvenokārt tika būvētas jaunas apakšstacijas, bet maz tika darīts, lai modernizētu vecās iekārtas. Līdz ar to Latvijas pārvades elektriskā tīkla modernizācija un rekonstrukcija atbilstoši Eiropas enerģosistēmu standartu prasībām pašreiz ir ļoti aktuāla. Notiek pārvades tīkla darba drošuma palielināšana: veco iekārtu nomaina ar modernām un tīkla struktūras konfigurācijas maiņa.

2. Ārzmēs izmantojamo drošuma izvērtēšanas metodiku apkopojums

Drošums brīvā elektroenerģijas tirgū - no analīzes līdz riska vadībai

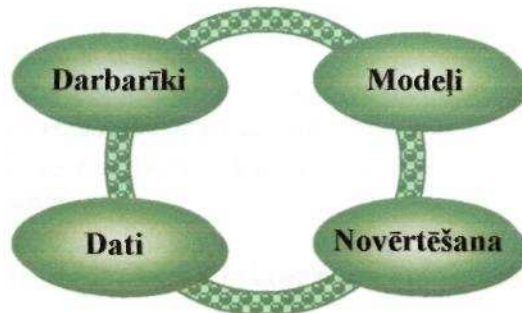
Enerģosistēmas drošuma novērtēšanas metodes ir attīstījušās pēdējos 30 gados [1-4]. Lai arī pētījumi visu laiku turpinās, meklējot vislabākos modeļus un metodes, tomēr jau izpētītās metodes veido drošu zināšanu bāzi, ko var efektīvi pielietot, lai risinātu drošuma analīzes un vadības problēmas. Drošuma analīzes galvenā ideja parādīta 2.1. attēlā. Pieredze rāda, ka darbnespējas stāvokļu modeļu komplektu un attiecīgos ievades datus iegūst, izmantojot atbilstošo atteicu statistiku. Aprēķina veidu nosaka izmantotā metode, savukārt aprēķina veids nosaka sistēmas darbīgā rādītājus.



2.1. att. Drošuma analīzes parasta secība.

Atkarībā no situācijas drošuma analīze prasa pilnīgu sistēmas operatīvā darba stāvokļa imitāciju zināmā apjomā, ieskaitot arī manuālās un automātiskās darbības, ar kurām reaģē uz atteicēm. Tāpēc, salīdzinot ar parastu $(n-1)$ - jaudas plūsmas analīzi, drošuma aprēķins ir

daudz sarežģītāks uzdevums. Ir nepieciešams modelis, kas var attēlot sistēmu un tās elementus. Nepieciešami arī darbarīki un dati, lai veiktu aprēķinus ar šiem modeļiem, rādītājiem un metodēm un iegūtos rezultātus varētu izmantot tālākā analīzē. Šis drošuma analīzes aspekts parādīts 2.2. attēlā [6].



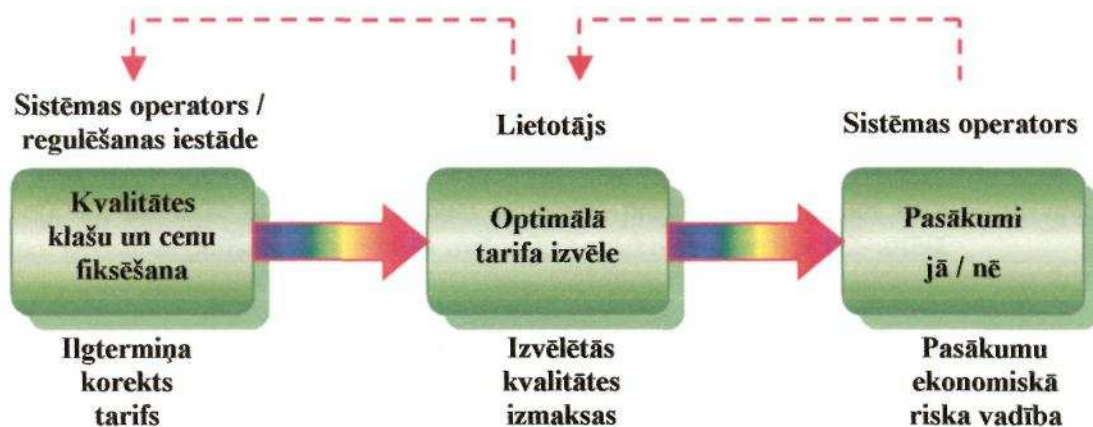
2.2. att. Elektroenerģijas sistēmas drošuma analīzes aspekti.

Energosistēmas drošuma novērtēšanu var veikt dažādos līmeņos, ģenerācija, pārvade, sadale, utt, un ar dažādiem modeļiem: ģenerācijas modelis, pārvades līniju modelis, transformatoru modelis utt.

2.1. Drošums no patērētāju viedokļa

Galvenā drošuma novērtēšanas problēma ir tā, ka noteikta energoapgādes kvalitātes līmeņa uzturēšana prasa sistēmas īpašnieka izmaksas, turpretim kvalitātes trūkums galvenokārt rada patērētāja izmaksas. Energoapgādes kvalitāte kopā ar cenu ir visinteresantākais elektroenerģijas raksturojums, īpaši attiecībā uz rūpnieciskajiem patērētājiem.

No patērētāju viedokļa ir vēlams radīt tādu struktūru, kur patērētājs varētu izvēlēties apgādes kvalitāti un attiecīgas izmaksas. Kā piemērs literatūrā [4] ir piedāvāts, lai patērētāji varētu izvēlēties sev individuālu drošuma pakāpi, maksājot par pieslēgumu un apkalpošanu, kā arī apdrošināšanas maksu par papildus drošumu. 2.3. attēlā parādīti šīs pieejas vispārējie principi.



2.3. att. Uz lietotāju orientēta kvalitātes struktūra

Visiem trim soļiem ir nepieciešams ne tikai aprēķināt lietotāja drošuma rādītājus, bet arī pārvērst tos izmaksās. Tā kā drošuma rādītāji ir pakļauti prognozes nenoteiktībai, tad izmaksām, kas aprēķinātas no drošuma rādītājiem, arī ir varbūtējs sadalījums. Šis izmaksu varbūtības sadalījums veido attiecīgā riska novērtēšanas pamatu.

Slēdziens

Straujās izmaiņas elektrības jomā ir izveidojušas jaunu attieksmi pret drošuma jautājumiem. Interese par apmierinoša drošuma līmeņa izveidošanu nākotnē pieaug gan no lietotāju, gan arī no regulējošo iestāžu puses. Drošuma uzturēšanai daudzās valstīs ir izmēģināti dažādi uzņēmumu ekonomiskās stimulēšanas paņēmieni. Pagaidām vēl nav identificēta vispārēji pielietojama struktūra.

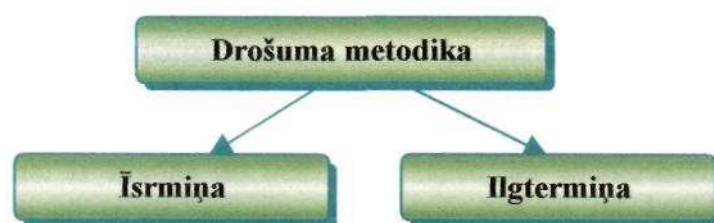
Pagātnē ir veikti daudzi pētnieciski un attīstības darbi, kuru rezultāts ir datorprogrammas (darbarīki), kas pašreiz ir neizbēgami nepieciešami riska analīzei. Tomēr ir gandrīz acīmredzams, ka vēl ir ejams garš ceļš, lai izveidotu riska vadības datorprogrammu, kura ievēro drošumu, ikdienas lēmumu pieņemšanai.

3. Pārvades tīkla drošuma faktora novērtēšanas metodes izstrāde

3.1. Problēmas nostādne

Pārvades sistēmas kontroles un komunikāciju infrastruktūrām jāattīstās. Ģenerācijas sadales integrācija jāveic saistībā ar pilnīgu izpratni par to, kādas būs priekšrocības. Pārvades sistēmas atbalsts ar ģenerācijas sadali var dot savstarpēju labumu energoapgādes uzņēmumiem un patērētājiem, bet negatīvi ietekmēt drošumu. Kur un kā ģenerācijas sadale tiek piesaistīta - tas jānosaka tās izmaksu sistēmai. Lai šīs izmaksas kļūtu redzamas, nepieciešams pārveidot tradicionālos drošības pasākumus.

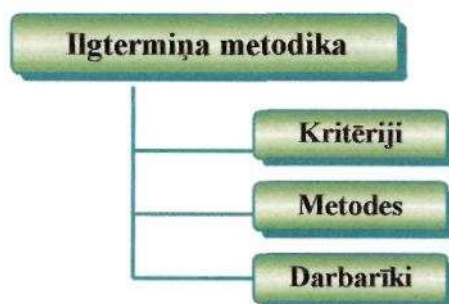
Drošuma pētīšanas metodiskos jautājumus iedala divos pamatvirzienos (skat. 3.1. att).



3.1. att. Darba drošuma metodikas jomu struktūra.

Īstermiņa metodika ir tāda metodika, kas neprasa būtiskus kapitālieguldījumus. Īstermiņa metodika domāta energosistēmas un lokālu tīklu operatīvai vadībai pēcavārijas režīmos, lai samazinātu atslēgumu apjomu un ilgumu.

Ilgtermiņa metodika ir paredzēta kapitālieguldījumu palielināšanai, lai paaugstinātu drošuma līmeni. Ilgtermiņa metodika domāta sistēmas un tīklu attīstības analīzei (attīstības stratēģijas izstrādei), kā arī tīklu un tīklu elementu (mezglu) projektēšanai, ņemot vērā elektroapgādes drošumu. Drošuma pētīšanas ilgtermiņa metodikas struktūra parādītā 3.2. attēlā.



3.2. att. Ilgtermiņa metodikas jomu struktūra

Promocijas darba gaitā tiek strādāts ar mūsdienās ļoti aktuāliem jautājumiem par energosistēmu drošuma uzlabošanu gan Latvijā, gan ārzemēs un izstrādāts sekojošais:

1. Ilgtermiņa metodika, kas pēta un analizē pārvades tīkla drošuma problēmas un jautājumus, un kas ir dinamiskās optimizācijas attīstības procesa neatņemama sastāvdaļa.
2. Atslēgumu modelēšanas algoritms, apskatot tīkla elementu atslēgumus pa vienam ($n-1$) un pa diviem ($n-2$). Salīdzinot ar kritēriju $n-1$, drošuma aprēķins ir daudz sarežģītāks uzdevums - tāpēc, ka atkarībā no situācijas drošuma analīze prasa pilnīgu sistēmas operatīvā darba stāvokļa imitāciju zināmā apjomā, ieskaitot arī manuālās un automātiskās darbības, ar kurām reaģē uz atteicēm.
3. Drošuma aprēķina metodika piemērota Latvijas un Baltijas pārvades tīklam. Tā kā Latvijas un Baltijas pārvades tīklam ir savas īpatnības, tiek izstrādāta drošuma aprēķina metodika tādiem apstākļiem, kādi ir Latvijā un Baltijā.

Promocijas darbā pārvades tīkla drošuma problēmu risināšanai tiek izmantotie šādi drošuma kritēriji (skat. 3.1. tab.).

3.1.tabula

Drošuma kritēriji 330,110 kV tīkla variantu salīdzinājumam

Nr.	Nosaukums
1.	Nepiegādātā enerģija W [MWst/gadā]
2.	Nepiegādes izmaksas C [tūkst. Ls/gadā]
3.	Elektroapgādes pārtraukuma laiks (asimptotiskais darbnegatavības parametrs) U [st./gadā]

1. kritērijs. Ir svarīgs un tiek pētīts tāpēc, ka energosistēmu pamatuzdevums ir patērētāju apgāde ar elektroenerģiju vajadzīgajā apjomā un kvalitātē. Sekas no katra nenodotā megavata var būt ļoti bēdīgas, īpaši ja tās skar nopietnus objektus un patērētājus.

2. kritērijs. Patērētāji - rūpniecība, lauksaimniecība utt. ir atkarīgi no elektroapgādes drošuma. Šī atkarība ir tik liela, ka elektroapgādes pārtraukums noved pie lieliem materiāliem zaudējumiem, kuriem ir nacionālu zaudējumu mērogs. Var minēt lielākās avārijas pasaulē: avārija Ņujorkā 1965. gadā; Černobiļas avārija 1986. gadā; avārijā ASV un Kanādā 2003.gadā augustā [13]; enerģētiskā krīze Eiropā 2003.gadā [13]; orkāna postījumi Baltijas valstīs 2005.gadā 9.janvārī, tai skaitā Latvijā [14]; enerģētiskā krīze Maskavā 2005.gada 25.maijā [15]. Katrā gadījumā materiālie zaudējumi no nepiegādātas elektroenerģijas bija milzīgi, tāpēc vienmēr jāaprēķina, cik lielas katrā gadījumā būs nepiegādātās elektroenerģijas izmaksas.

3. kritērijs. Jebkurā avārijas situācijā, lai cik liels arī nebūtu tās mērogs, nepieciešams pēc iespējas ātrāk nodrošināt ar elektroenerģiju atslēgtos patērētājus, īpaši, ja tie ir svarīgi objekti. Tāpēc nepieciešams aprēķināt elektroapgādes pārtraukuma laiku un mēģināt paredzēt avārijas attīstības gaitu, tas ir, prognozēt iespējamus atslēgumus, to vietas un to radītās sekas.

3.2. Avārijas atslēgumu modelēšanas principi

Elektriskās enerģijas pārvade no ģenerācijas avotiem līdz sadales kompānijām vai patērētājiem ir svarīgs posms kopējā elektroapgādes nodrošināšanas procesa.

Baltijas valstu energosistēmu pārvades tīkls ir noslēgts, tam daudz kontūru un gandrīz visiem slodzes mezgliem energoapgāde notiek no divām vai vairāk pusēm (skat. 3.3. att). Pārvades tīkla shēmās ir arī izņēmumi: trīsgalu līnijas, kur nozarojums pievienots galvenajai

līnijai bez jaudas slēdža. Baltijas 330 kV pārvades tīklā tāda līnija ir starp Latviju un Lietuvu (LN305/457 Jelgava-Šauļi-Telši), no kuras atiet nozarojums uz Telšiem. 110 kV pārvades tīklā tādi gadījumi ir vairāk izplatīti: Latvijā 110 kV nozarojums uz Aizputi, Valdemārpili, Ilūkstei u.c.

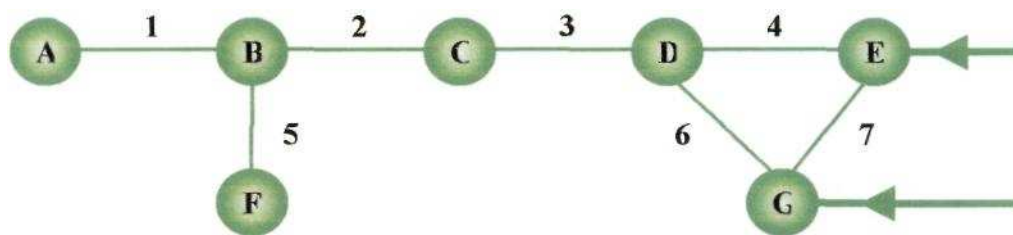
Ja uz trīsgalu līnijas notiek avārija (īsslēgums vismaz vienā no trim galiem), tad no relejaizsardzības tiek atslēgta visa līnija ar jaudas slēdžiem. Tas nozīmē, ka no tīkla tiek atslēgts vesels pārvades tīkla elements. Vispārējā gadījumā, modelējot atslēgumu, nepieciešams izmantot jaunu jēdzienu mūsu metodikā - **atteices elements**.

Atteices elements - tās ir pārvades līniju kopa, kuru ierobežo jaudas slēdži (konkrētā piemērā ar 330 kV trīsgalu līniju Jelgava-Šauļi-Telši, atteices elementi ir jaudas slēdži trīs apakšstacijās: Jelgavā, Šauļos un Telšos). Bet, ja pētāmā sistēma ir pārvades tīkls, tad 330 un 110 kV tīklā pētāmais objekts ir pārvades līnija.



3.3. att. Baltijas energosistēmu 330 kV pārvades tīkls.

3.4. attēlā ir parādīta pārvades tīkla daļa ar elementiem (pārvades līnijām). Līnijas ir sadalītas gan virknē, gan paralēli, un objekti (mezgli) var baroties gan no vienas puses, gan no divām un vairākām pusēm.



3.4. att. Tīkla aprēķina shēma

kur mezglos **A, C, D, E, F** un **G** ir sadalietais ar jaudas slēdžiem visās pieslēgtajās līnijās; mezglā **B** nav sadalietais un jaudas slēdža; 1, ..., 7 - pārvades līnijas

Atslēgumu modelēšana. Aprēķina procesā atslēgumi tiek modelēti šādi:

- atslēgumi pa vienam atslēguma elementam,
- atslēgumi pa diviem atslēguma elementiem.

Atslēdzot elektropārvades līnijas (elementus) pa diviem, izveidojas liels kombināciju skaits. Piemēram, Baltijas 330 kV pārvades tīklā ir 60 pārvades līnijas (elementi), tad

$$C_n = \frac{n(n-1)}{1 \cdot 2} = \frac{60 \cdot 59}{1 \cdot 2} = 1770$$
 ir kombināciju skaits apskatītajam režīmam. 110 kV pārvades tīklā līniju skaits ir lielāks, līdz ar ko 2 elementu atslēgumu skaits būs daudz lielāks.

Kombināciju skaits, atslēdzot elementus pa diviem, Latvijas 110 kV pārvades tīklā

būs
$$C_n = \frac{n(n-1)}{1 \cdot 2} = \frac{150 \cdot 149}{1 \cdot 2} = 11175$$

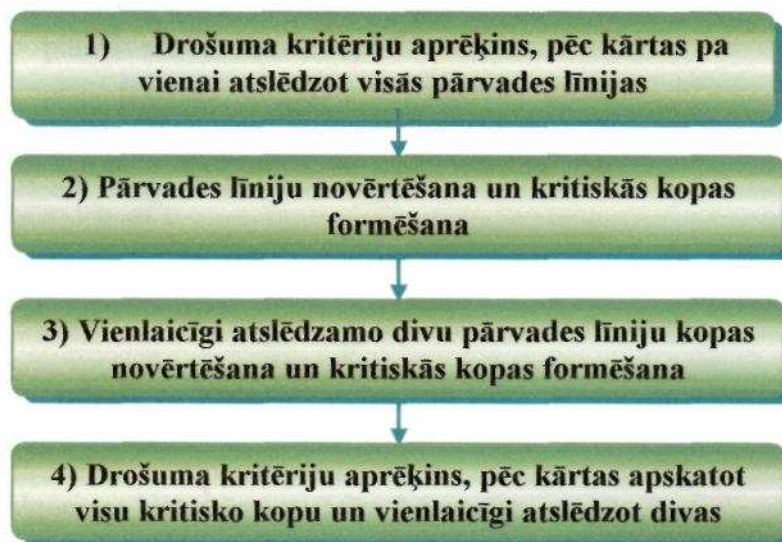
Dinamiskās modelēšanas procesā katrā aprēķina solī jābūt vismaz 10 elementiem (10 dažādām aprēķina shēmas). Tas nozīmē, ka tiek ievērots pārvades līniju jaudas plūsmu sadalījums. Normālai un kvalitatīvai drošuma analīzei nepieciešams aprēķināt vismaz 100 tīkla jaudas plūsmu sadalījuma stāvokļus, kā rezultātā sanāk ļoti liels aprēķina operāciju skaits. Promocijas darba gaitā izstrādātais algoritms nosaka, kura energosistēmas daļa paliek bez elektroapgādes, cik liela ir nepiegādātā slodze un elektroenerģija, un kā jāaprēķina šīs daļas nepiegādātā enerģijā. Algoritms nosaka nepiegādātās enerģijas atkarību no pārvades līniju stāvokļa, to elementu darbības un darbnespējas, ka arī no pārvades līniju tehniskajiem parametriem. Visus šos rezultātus nepieciešams iegūt ātri un pēc katra aprēķina. Lai samazinātu aprēķina apjomus un aprēķina kļūdas, promocijas darbā piedāvāts aprēķināt drošumu ar nosacītas slodzes nepiegādes kritēriju.

3.3. Pārvades tīkla drošuma aprēķina algoritms

Pārvades tīkla drošuma kritēriju aprēķina procesā tiek apskatīti atslēgumi pa vienam un pa diviem vienlaicīgi. Atslēgumu rezultātā:

- viens vai vairāki mezgli var palikt bez elektroapgādes,
- var rasties pārslodzes citās līnijās.

Tīkla drošumu aprēķina pēc sekojošās blokshēmas (skat. 3.5. att.)



3.5. att. Tīkla drošuma aprēķina blokshēma

1. un 4. blokā vispirms nosaka mezglus, kuri atslēgumu rezultātā zaudē elektroapgādi visos slodzes režīmos, aprēķina tiem:

- 1) pārtraukuma laiku,
- 2) nepiegādāto elektroenerģiju,
- 3) nepiegādes izmaksas.

1. bloks. 1. bloka, atslēdzot pēc kārtas visas līnijas, sākumā pārbaudām, vai ir atslēgta slodze. **Ja slodze ir atslēgta**, tad aprēķina nepiegādātās enerģijas daudzumu W_{L_i} .

$$W_{L_i} = \sum_{re=1}^{rem} \cdot U_{re,L_i} \cdot P_{re} [kWst], \quad (3.1)$$

kur re - režīma kārtas numurs;
 rem - režīmu skaits;
 P_{re} - režīmā re atslēgtā slodze;
 L_i - atslēgtā pārvades līnija;
 U_{re,L_i} - režīmā re līnijas L_i bojājuma novēršanas laiks (asimptotiskais darbnegatavības parametrs):

$$U_{re,L_i} = \frac{\lambda_{L_i} \cdot DL_{L_i} \cdot r_{L_i} \cdot Tre_{re}}{100 \cdot 8760} [st]; \quad (3.2)$$

kur λ_{L_i} - līniju L_i atteicu skaits gadā uz 100 km (atteices parametrs; pieņemts, ka atteicēm ir vienmērīgs sadalījums gada laikā) [at./100 km gadā];
 DL_{L_i} - līnijas L_i garums [km];
 r_{L_i} - līnijas L_i remonta laika ilgums [st];
 Tre_{re} - režīma re ilgums [st].

Šajā gadījumā nepiegādātā elektroenerģija būs vienāda ar nepiegādātās elektroenerģijas daudzumu konkrētā līnijā $W_{nep} = W_{L_i}$.

Ja slodze nav atslēgta no tīkla, tad pārbauda, vai ir pārslodzes citās līnijās L un nosaka pārslodzes:

$$\Delta P_L = P_{S_{L, re}} - P_{\max_L} [kW], \quad (3.3)$$

kur $P_{S_{L, re}}$ - plūsma saite L režīmā re ;
 P_{\max_L} - pieļaujamā slodze saitē L .

Pieņemts, ka normālai tīkla darbības nodrošināšanai pārslogotās līnijas L_i atslēguma laikā slodzi samazina par ΔP_L .

Līnijas L_i atslēguma laikā nepiegādātās enerģijas daudzumu aprēķina pēc formulas.

$$W_{L_i} = \sum_{re=1}^{rem} \sum_{L \in M_{re,L_i}} \Delta P_L \cdot U_{re,L_i} [kWst], \quad (3.4)$$

kur M_{re,L_i} - režīma re līnijas L_i atslēguma laika pārslogoto elektropārvades līniju kopa.

1. bloka algoritma blokshēma parādīta 3.6. attēlā.

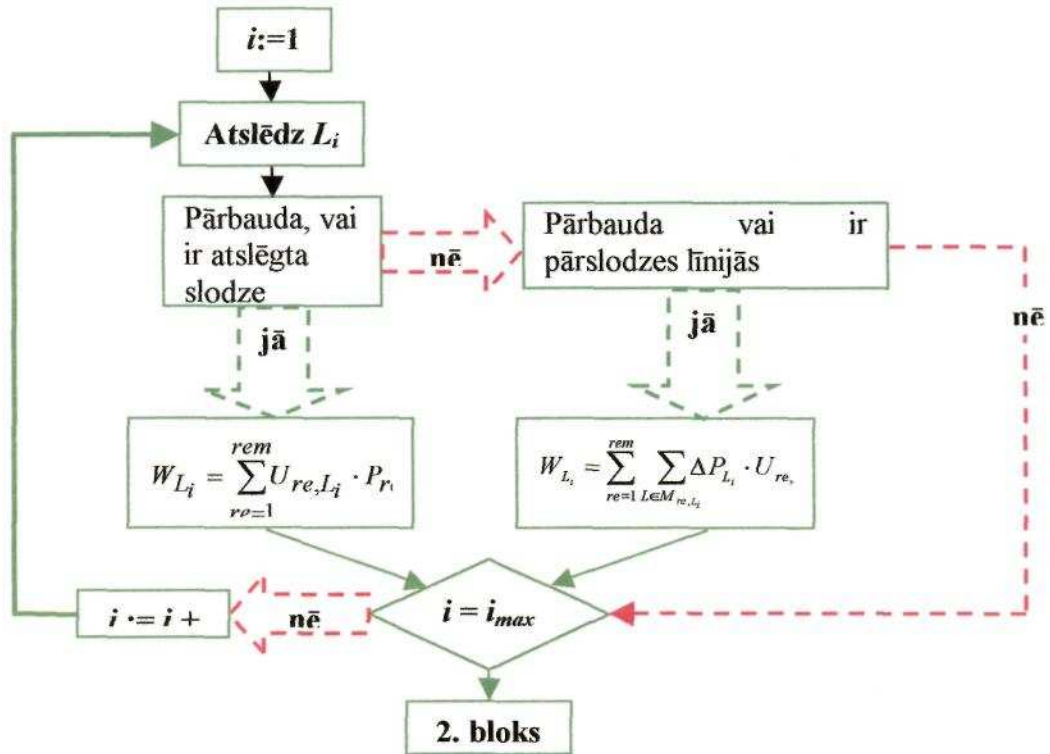
Patērētājiem nepiegādātā elektroenerģija ir

$$W_{nep} = \sum_{L_i=M_i} W_{L_i} [kWst], \quad (3.5)$$

Nepiegādātā elektroenerģijas izmaksas

$$C_{nep} = c_{nep} \cdot W_{nep}, \quad (3.6)$$

kur c_{nep} - elektroenerģijas nepiegādes īpatnējās izmaksas [Ls/kWst],



3.6. att. 1. bloka algoritma blokshēma

2. bloks. 2. blokā atlasa elektropārvades līnijas pēc šāda kritērija:

$$K_{L, re}^* = \sum_{L \in M} Tre_{re=1} \cdot \chi_L \cdot Ps_{L, re=1} [MWst], \quad (3.7)$$

- kur
- L - pārvades līnijas kārtas numurs, $L \in M$;
 - M - atslēgto pārvades līniju grupa;
 - re - režīma kārtas numurs;
 - $Tre_{re=1}$ - režīma $re=1$ (maksimālās slodzes, vietējās elektrostacijas nestrādā) ilgums [h/gadā];
 - $Ps_{L, re=1}$ - pārvades līnijas L plūsma [MW] režīmā $re=1$;
 - $\chi_L = \frac{\lambda_L \cdot DL_L \cdot r_L}{100 \cdot 8760}$ - pārvades līniju atslēgšanas varbūtība
 - λ_L - īpatnējais atteicu skaits uz 100 km līniju gada;
 - DL_L - elektropārvades līniju garums [km];
 - r_L - elektropārvades līnijas bojājuma novēršanas ilgums [st].

Šo kritēriju sauc par nosacīto slodzes nepieģādi.

3. bloks. 3. blokā apskata divas vienlaicīgi atslēgtas elektropārvades līnijas. Pieņemts, ka drošuma aprēķinā jāievēro tikai tādi elektropārvades līniju pāri, kuriem ir lielākās vienlaicīga atslēguma varbūtības vērtības. 3. blokā atlasa elektropārvades vienlaicīgi atslēgtas līnijas pēc šāda kritērija:

$$K_{L\{i,j\}, re}^* = \sum_{L \in M} Tre_{re=1} \cdot \chi_{L\{i,j\}} \cdot Ps_{L\{i,j\}, re=1} = \sum_{L \in M} Tre_{re=1} \cdot \chi_{L\{i\}} \cdot \chi_{L\{j\}} \cdot Ps_{L\{i,j\}, re=1} [MWst], \quad (3.8)$$

kur $\chi_{L\{i,j\}}$ - pārvades līniju vienlaicīgas atslēgšanas varbūtība.

Atlasīto kopu sauc par divelementu atslēgumu kritisko kopu.

4. bloks.

4. blokā turpina 3. blokā iesākto tīkla drošuma kritēriju aprēķinu. Drošuma kritēriju aprēķina algoritms, pēc kārtas vienlaicīgi atslēdzot divas pārvades līnijas. 4. bloka algoritma blokshēma līdzīga 1 bloka shēmai, tikai L_i vietā ir $L_k = L_{i+j}$ - divu atslēgto līniju kopa.

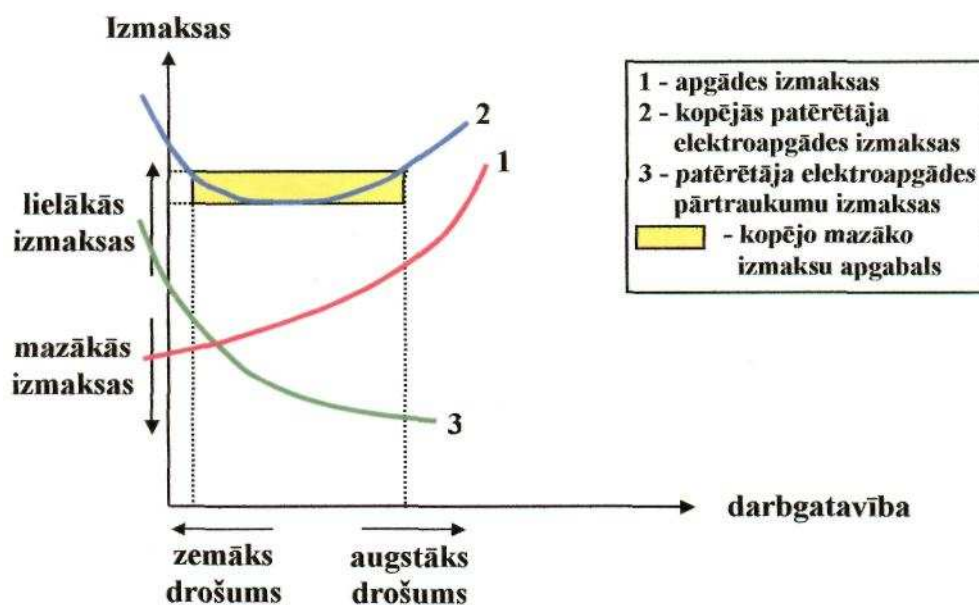
Slēdziens.

Pārvades tīkla drošuma aprēķina gaitā ar nosacītās slodzes nepiegādes kritērija K^* palīdzību tiek atlasīts būtiskākais, tas ir, visnoslogotākās līnijas, lai samazinātu aprēķinu apjomus, līdz ar to samazinot kļūdas. Šis kritērijs tiek izmantots tikai pētāmām energosistēmām ar lielu elektropārvades līniju skaitu.

3.4. Drošuma faktora ekonomiskā novērtējuma metodiskās problēmas

Sistēmas drošumu var palielināt, tikai piesaistot papildizmaksas. Tāds drošuma palielinājums saistīts ar patērētāju elektroapgādes pārtraukumu izmaksu samazinājumu.

Elektroapgādes drošums ir saistīts ar divu veidu izmaksām: ar elektroapgādes izmaksām un patērētāju ciestajiem zaudējumiem elektroapgādes pārtraukumos. Pievienojot papildus iekārtas elektroapgādes sistēmā, palielinās elektroapgādes izmaksas, bet samazinās patērētāju zaudējumi elektroapgādes pārtraukumos. Savukārt, samazinot iekārtu skaitu, samazinās elektroapgādes izmaksas, bet palielinās patērētāju zaudējumi elektroapgādes pārtraukumu dēļ (skat. 3.7. att).



3.7. att. Elektroapgādes drošuma izmaksas

Lai aprēķinātu elektroenerģijas nepiegādes izmaksas C_{nep} , daudzas valstis izmanto elektroenerģijas **nepiegādes īpatnējās izmaksas** c_{nep} - elektrotīkla elektroapgādes traucējumu izraisīto visu kopēju izmaksu attiecību pret nepiegādāto elektroenerģiju kilovatstundās.

Īpatnējās izmaksas tiek izveidotas ilggadēju novērojumu rezultātā. Izmantojot nepiegādes īpatnējās izmaksas, jāzina atslēgtā slodze un pārtraukuma ilgums. Šos lielumus viegli aprēķināt sadales tīklos, jo tur bojājuma gadījumā tiek atslēgti viens vai vairāki slodzes mezgli. Ārzemju pētījumi rāda, ka īpatnējo nepiegāžu izmaksu atkarība no lietotājiem sastāda 0,5-100 \$/kWh [7]. Latvijā diemžēl šādi pētījumi nav veikti, un pašreizējiem Latvijas apstākļiem nepiegādes izmaksas nav zināmas.

3.5. Drošuma līmeņa ekonomiskais kritērijs.

Kā drošuma līmeņa ekonomisko kritēriju pētījumos izmanto tīkla operatora pašizmaksu. Kritēriju nosaka elektriskā tīkla ikgadējā pašizmaksa C_{et} , kas sastāv no trim pamatkomponentēm [10]:

$$C_{et} = C_{O\&M} + C_K + C_{zud}, \quad (3.9)$$

kur $C_{O\&M}$ - ekspluatācijas un uzturēšanas ikgadējie izdevumi tīklam;
 C_K - kapitālieguldījumu ikgadējās izmaksas:

$$C_K = \sum_{n=1}^{n=m} \frac{(p_{am} + i)}{100} \cdot K_n; \quad (3.10)$$

K_n - kapitālieguldījumi tīkla n -tajā elementa (līnija vai apakšstacija);
 m - tīkla elementu skaits;
 p_{am} - amortizācijas atskaitījumi %:

$$p_{am} = \frac{100}{T_{LC_n}} \%; \quad (3.11)$$

T_{LC_n} - $tā$ elementa ekonomiskā dzīves cikla ilgums gados;
 i - interešu lielums %;

C_{zud} - enerģijas un jaudas zudumu ikgadējās izmaksas.

Visas trīs komponentes ir atkarīgas no nepiegādātās enerģijas W_{nep} drošuma līmeņa.

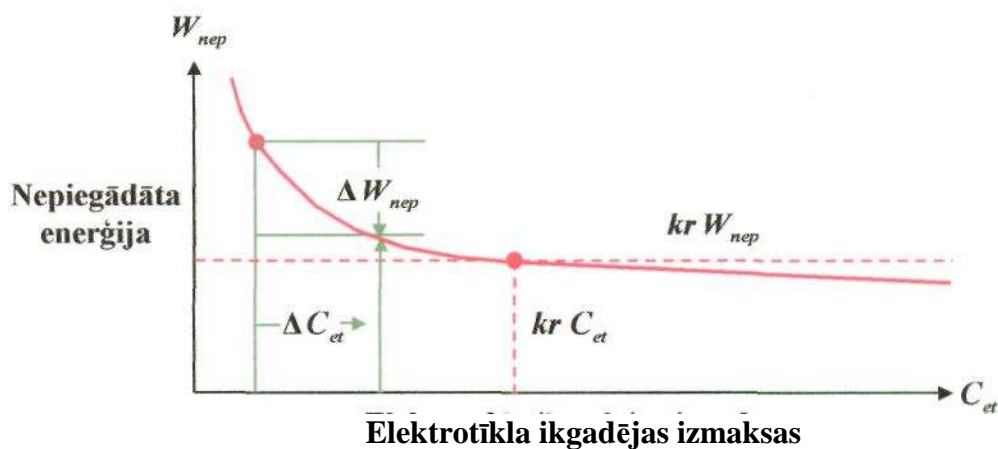
Samazinot $C_{O\&M}$, pieaug tīkla elementu atteicu skaits un remonta ilgums. Lai samazinātu C_K , bieži atsakās no pasākumiem, kas palielina elektroapgādes drošumu, proti, no rezerves līniju un apakšstaciju būves. Kapitālieguldījumu palielināšana var samazināt C_{zud} , ja tīkli ir noslogoti, tad C_{zud} samazinājums var kompensēt pat C_K pieaugumu.

T_{LC} palielināšana (p_{am} samazināšana) palielina atteicu skaitu un remonta ilgumu: tas ir W_{np} .

Drošuma palielināšanas i -tajam pasākumam atbilst noteikts ikgadējo izmaksu palielinājums (pazeminājums) (ΔC_{et}) _{i} un nepiegādātās enerģijas samazinājums (ΔW_{nep}) _{i} . Izmantojot šos lielumus, varam ievest pasākumu drošuma efektivitātes koeficientu

$$ED_i = \frac{(\Delta W_{nep})_i}{(\Delta C_{ef})_i}. \text{ Sakārtojot pasākumus pēc } ED_i \text{ vērtībām, iegūstam, ka drošuma līmenis}$$

W_{nep} ir atkarīgs no tīkla ikgadējām izmaksām C_{et} . 3.8. attēlā ir parādīts $W_{nep} = f(C_{et})$ raksturs.



3.8. att. Drošuma līmeņa W_{np} izmaiņas, palielinot ikgadējos izdevumus tīklā

Abscisu asi C_{et} nosacīti var sadalīt divos intervālos: 1) $0 \div krC_{et}$ un 2) $krC_{et} - \infty$. Pirmajā intervālā atrodas pasākumi, kurus realizējot, būtiski samazinās W_{np} un palielinās drošums. Pie $C_{et} \geq kr C_{et}$ drošuma līmenis W_{np} izmainās nebūtiski pat pie lieliem ieguldījumiem.

4. 330 un 110 kV apakšstaciju un sadalietaišu drošuma faktora novērtēšanas metodikas izstrāde

4.1. Problēmas nostādne

Latvijas elektrisko pārvades tīklu modernizācija un rekonstrukcija atbilstoši Eiropas Savienības valstu apvienoto energosistēmu prasībām pašreiz ir ļoti aktuāla, un tiek veikti tādi pasākumi kā veco iekārtu nomaiņa ar moderno un pārvades tīkla struktūras konfigurācijas izmaiņas. Šie pasākumi ir apjomīgi, prasa daudz laika, veido remontu shēmas pārvades tīklos, bet viennozīmīgi palielina elektroapgādes drošumu.

Viens no galvenajiem uzdevumiem, kas tiek risināts promocijas darbā - 330 un 110 kV apakšstaciju sadalietaišu drošuma faktoru novērtēšanas metodikas izstrāde. Ir izstrādāta ilgtermiņa drošuma novērtēšanas metodika, kas dod iespēju izvēlēties optimālo sadalietais konfigurāciju un aparatūru, ņemot vērā pārvades tīklu kopumā. Izvēle izdarāma perspektīvas informācijas neviennozīmības apstākļos, izmantojot tīrās pašreizējas vērtības (NPV) kritēriju un ierobežojumus pēc drošuma kritērijiem. Izvēlei jānodrošina iespēja:

- 1) Izslēgt investīcijas, kas palielina pašizmaksu, tas ir, noraidīt variantus ar sliktākiem ekonomiskiem rādītājiem;
- 2) Ranžēt pieprasītās investīcijas pēc to ekonomiskās efektivitātes.

Uzdevums ir ļoti sarežģīts, to nosaka sadalietaišu tipu daudzveidīgums un nepieciešamība salīdzinājumu veikt ātri un dažādiem sadalietaišu tiptiem.

4.2. Latvijas 330 un 110 kV apakšstaciju analīze

Pašlaik *Latvenergo* AST ir četrpadsmit 330 kV sprieguma apakšstacijas, 7 no kurām ir vecākas par 30 gadiem un ir 125 110 kV apakšstacijas, 60 no kurām ir vecākas par 30 gadiem. Lielākajai daļai (91) apakšstaciju ir divi transformatori, ar trim transformatoriem strādā 4 apakšstacijas, ar četriem - 2 apakšstacijas, ar vienu - 25 apakšstacijas.

Latvijā tiek izmantotas šādas sadales iekārtu shēmas, kur katrai shēmai ir vairāki paveidi:

1. Blokslēmu līnija - transformators;
2. Tiltiņa shēma bez kopnēm;
3. Tiltiņa shēma ar kopnēm;
4. Dubultiltiņš;
5. Vienkopņu sistēma;
6. Divkopņu sistēma;
7. Divkopņu sistēma ar apejas kopni;
8. Četrstūra shēma;
9. Pusotrkārtīga shēma.

4.3. Sadalietaišu shēmas drošuma galvenie rādītāji

Elektrisko staciju un apakšstaciju elektriskajām shēmām ir svarīga loma elektroapgādes drošuma nodrošināšanā. Tādējādi jebkuras apakšstacijas elektrisko savienojumu galvenās shēmas kopējo ekspluatācijas drošumu nosaka pašas shēmas konfigurācija, izvēlēto aparātu parametri un tips, slēdžu un citu komutācijas aparātu racionāls izvietojums shēmā, kā arī tajā

pielietotās sistēmas automātikas tips un raksturs. Apakšstacijas shēmai jābūt izveidotai tā, lai jebkura tās elementa atteices gadījumā elektroapgāde netiktu pārtraukta. Kā pamatrādītājus, kuri nosaka sadales galveno shēmu no drošības viedokļa, var minēt:

- apakšstacijas pilna (100 %) atslēgšanās varbūtība;
- 50 % pievienojumu (līniju, transformatoru) vienlaicīgas atslēgšanās varbūtība;
- divu līniju (viena no tām bojāta, bet otra nebojāta) vienlaicīgas atslēgšanās varbūtība nebojātās līnijas slēdža atteices gadījumā.

4.4. Sadalietaišu drošuma novērtēšana

Visatbildīgākais elements sadalietaišu shēmās ir jaudas slēdzis. Pašlaik plašu pielietojumu ieguvusi elegāze, kurai ir vislabākā loka dzēšanas un izolācijas vide, salīdzinājumā ar spiesto gaisu un eļļu. Parādīsim sadalietais shēmas jaudas slēdžu atslēgšanās varbūtību, un līdz ar to noteiksim, kura shēma ir drošāka: ar elegāzes slēdžiem vai ar spiesta gaisa slēdžiem.

Ir svarīgi zināt, kāda ir sekojošo stāvokļu varbūtība:

- visi slēdži ir darbstāvoklī;
- viens noteikts slēdzis ir nestrādes stāvoklī;
- divi noteikti slēdži ir nestrādes stāvoklī utt.

Tādu aprēķinu mēs veiksime ar binomālā sadalījuma palīdzību.

Ja pavisam tiek izdarīti n izmēģinājumi, tad notikums A var notikt vai nu visas n reizes, vai $n-1$ reizi, vai $n-2$ reizes, ..., vai 1 reizi, vai nevienu reizi. To var aprēķināt kā Ņūtona binoma sadalījuma locekļus:

$$(p + q)^n = p^n + np^{n-1}q + C_n^{n-2} p^{n-2} q^2 + C_n^{n-3} p^{n-3} q^3 + \dots + C_n^m p^m q^{n-m} + \dots + q^n \quad (4.1)$$

kur p - notikuma notikšanas varbūtība viena izmēģinājuma;
 q - notikuma nenotikšanas varbūtība vienā izmēģinājumā.

Tādējādi varbūtību, ka n izmēģinājumos notikums A iestājas tieši m reizes, var aprēķināt kā Ņūtona binoma vispārīgo locekli pēc Berulli formulas:

$$P_{n(m)} = C_n^m p^m q^{n-m} = \frac{n!}{m!(n-m)!} p_{(A)}^m q_{(A)}^{n-m} \quad (4.2)$$

kur C_n^m - kombināciju skaits no n elementiem pa m elementiem. Jāievēro, ka $0! = 1$

Spīstā gaisa slēdžiem varbūtība, ka slēdzis atrodas nestrādes stāvoklī, ir 0,05, darbstāvoklī - 0,95. Savukārt elegāzes slēdžiem - nestrādes stāvoklī ir 0,008, darbstāvoklī - 0,992.

Binomālais sadalījums ir diskrēta gadījuma lieluma sadalījums no 0 līdz n . Binomālo lielumu kā jebkura diskrēta gadījuma lieluma sadalījumu var pierakstīt tabulas veidā.

4.1. tabula

Binomālais sadalījums

m	$P_{n(m)}$
n	p^n
$n-1$	$np^{n-1}q$
$n-2$	$C_n^{n-2} p^{n-2} q^2$
...	...

m	$C_n^m p^m q^{n-m}$
...	...
1	npq^{n-1}
0	q^n

Četrstūrveida elektriskai shēmai aprēķina piemērs paradīts 4.2.tabula:

4.2. tabula

Nr.	Slēdžu stāvoklis	Varbūtība	
		Spiestā gaisa	Elegāzes
1.	Visi darbstāvokļi	0,815	0,968
2.	1 nestrādes stāvokļi	0,171	0,031
3.	2 nestrādes stāvokļi	0,014	0,0004
4.	3 nestrādes stāvokļi	0,00002	0,000002
5.	Visi nestrādes stāvokļi	0,000006	0,00000004

Varbūtība, ka visi slēdži ir darba stāvoklī:

$$\text{Spiestā gaisa slēdžiem: } P_4^{(0)} = p^n = 0,95^4 = 0,815;$$

$$\text{Elegāzes slēdžiem: } P_4^{(0)} = p^n = 0,992^4 = 0,968.$$

Varbūtība, ka divi slēdži ir bojāti pēc (4.2):

Spiestā gaisa slēdžiem:

$$P_4^{(2)} = C_n^{n-2} p^{n-2} q^2 = \frac{n!}{m!(n-m)!} p^2 q^2 = \frac{4!}{2!(4-2)!} 0,95^2 \cdot 0,05^2 = 0,014;$$

Elegāzes slēdžiem:

$$P_4^{(2)} = C_n^{n-2} p^{n-2} q^2 = \frac{n!}{m!(n-m)!} p^2 q^2 = \frac{4!}{2!(4-2)!} 0,992^2 \cdot 0,008^2 = 0,0004.$$

utt.

Ir redzams, ka elektroapgādes drošuma palielināšanai elegāzes pielietošana jaudas slēdžos ir krietni labāka nekā spiestā gaisa saimniecības uzturēšana.

4.5. Drošuma kritēriji

Daudzās pasaules valstīs elektroenerģētikā eksistē 3 drošuma kritēriju tipi, kurus izmanto pasākumu izvēlei elektroenerģētiskās sistēmas drošuma palielināšanai [3]:

- 1) Drošuma kritēriji normatīvo noteikumu veidā - **determinētie drošuma kritēriji** (var apskatīt līdz piecu elementu vienlaicīgu atslēgumu $n = 5$);
- 2) Drošuma kritēriji, kas pamatoti ar **mērķa funkciju izmaksu minimizāciju**. Izmaksas veido elektroenerģētiskās sistēmas drošuma palielināšanas izmaksas kopā ar energonepiegādes izmaksām (tiek ņemtas vērā līniju un transformatoru reālās plūsmas dažādos slodzes režīmos);
- 3) Drošuma rādītāju normēšana - **varbūtības drošuma kritēriji**.

- Asimptotiskais darbnegatavības parametrs U [st./g.];

Šo kritēriju aprēķina, ņemot vērā apakšstacijas remonta darba stāvokļus un shēmas pārslēgšanas laiku.

- Darbnespējas stāvokļa varbūtība χ [a.v.].

Eiropas Savienībā praksē izmanto šādus elektroapgādes drošuma kritērijus [2-3]:

1. Darbnegatavības stāvokļa varbūtība;
2. Darbgatavības stāvokļa varbūtība;
3. Nepiegādātā jauda;
4. Nepiegādātā enerģija W ;
5. Elektroenerģijas nepiegādes izmaksas;
6. Shēmas pieļaujamības novērtējums.

Elektrotīklu darbnegatavības stāvoklī veido:

- plānotie remontu;
- atteices, kas rodas bojājumu rezultātā.

Darbnegatavības stāvokli kvantitatīvi raksturo ar darbnegatavības parametru U - sagaidāmo darbnegatavības stāvokļa ilgumu stundas/gadā:

$$U = U_a + U_{pr} \text{ [stundas/gadā]}, \quad (4.3)$$

kur U_a - bojājuma sagaidāmais ilgums stundas/gadā;
 U_{pr} - plānoto remontu ilgums stundas/gadā.

Plānotie remontu un to ilgums tiek normēti. Sagaidāmo bojājumu ilgumu aprēķina, izmantojot atteicu statikas datus:

- 1) atteicu matemātisko cerību λ - vidējais atteicu skaits gadā, pieņemot, ka atteices vienmērīgi sadalās laikā;
- 2) remonta ilgumu r (stundas/atteice).

Darbnegatavības parametru U_a aprēķina pēc formulas:

$$U_a = \lambda \cdot r \text{ [stundas/gadā]}. \quad (4.4)$$

Darbnegatavības stāvokļa varbūtību aprēķina pēc formulas:

$$\chi = U_a / 8760 \text{ [a.v.]}, \quad (4.5)$$

Nepiegādāto enerģiju W aprēķina šādi:

$$W = U_a \cdot P \text{ [MWh/gadā]}, \quad (4.6)$$

kur P - atslēgtā jauda, MW.

Nepiegādes izmaksas aprēķina pēc formulas:

$$C_{nep} = c_{nep} \cdot W \text{ [tūkst. Ls]}, \quad (4.7)$$

kur c_{nep} - nepiegādes īpatnējās izmaksas.

Plānoto remonta ilgumu U_{pr} un darbnespējas stāvokļa varbūtību no plānotā remonta X_{pr} aprēķina pēc formulām, kas ir analogas formulām (4.5) un (4.6):

- 1) atteices parametru λ_{pr} ;
- 2) remonta laiku r_{pr} .

Shēmai, kas sastāv no daudziem elementiem, kopējos shēmas atteices raksturlielumus aprēķina, izmantojot klasiskās varbūtības teorijas formulas.

Energosistēmas drošumu kopuma skaitliski raksturo darbnespējas stāvokļa varbūtība q un darbstāvokļa varbūtība p , kuru summa ir viens:

$$p + q = 1. \quad (4.8)$$

Darbstāvokļa varbūtību var izteikt ar darbnespējas stāvokli

$$p = 1 - q. \quad (4.9)$$

Jo augstāks ir shēmas vai elementa drošums, jo lielāka ir p vērtība un mazāka q vērtība. Pieņemts, ka augsta drošuma pakāpe ir shēmai, kurai $p \geq 0,9998$ (shēmas pieļaujamības kritērijs) [2].

5. 330 un 110 kV sadalietaišu drošuma kritēriju aprēķina tehnoloģiju izstrāde

5.1. Ilgtermiņa drošuma novērtējumu aprēķina nosacījumu vispārējs raksturojums

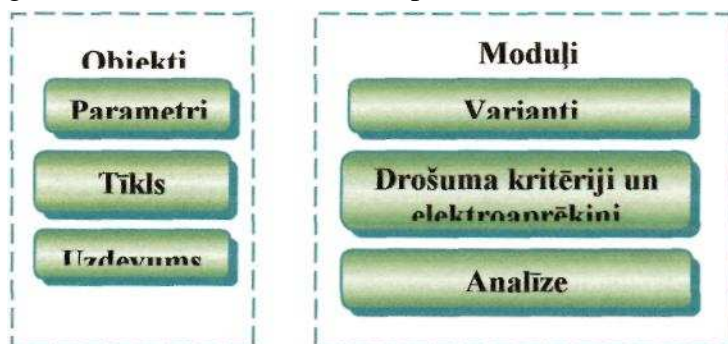
Ilgtermiņa metodes galvenais uzdevums ir sadalietais un aparatūras tipu izvēle pēc drošuma un ekonomiskajiem kritērijiem, ņemot vērā sistēmas operatīvo un attīstības procesu.

Lai šīs prasības realizētu, drošuma novērtējumu veic datorprogrammas *LDM-AD '04* ietvaros. Programma *LDM-AD'04* ir pirmā *LDM* saimes programma, ar kuru var veikt pārvades tīklu apakšstaciju un sadalietaišu darba un elektroapgādes drošuma analīzi, kā arī vairāku dinamiska attīstības procesa variantu tehnisko un ekonomisko analīzi, ievērojot drošuma ekonomiskos rādītājus.

330 un 110 kV pārvades tīkla drošuma novērtēšanas programma *LDM-AD '04*:

1. novērtē drošumu pārvades tīklam;
2. aprēķina elektroapgādes pārtraukuma laiku (starp rezultātā izvadot sagaidāmo elektroapgādes pārtraukuma laiku (stundas/gadā));
3. paredz iespēju novērtēt drošumu pārvades tīkla shēmai, kad elektroapgāde tiek veikta pa divām (vairākām) līnijām, tajā skaitā arī izskatīt gadījumu, kad viena līnija atrodas plānotā remontā, un notiek otras līnijas neplānota atslēgšana;
4. radiālās līnijas gadījumā ņemt vērā plānoto remonta laiku.

Datorprogrammas *LDM-AD* struktūra ir parādīta 5.1. att.



5.1. att. Programmas *LDM-AD* struktūra

Augstas prasības tiek izvirzītas drošuma novērtēšanas kritērijiem (skat. 5.2. att.). Šo kritēriju aprēķinam nepieciešama informācija, kas ir atkarīga no aprēķina nosacījumiem (, no sadalietais konfigurācijas tipa un aparatūras tipa.

Sadalietais drošums	
Sadalietais drošuma kritēriji	
mazolam: Līvāni sadalietais: DTKkop ar 11.st	
1.BAROJOŠO LĪNIJU VIENLAICĪGS ATSLĒGUMS	
1.1.Darba stāvokļa varbūtība (a.v.)	0,9885307
1.2.Pārtraukuma laiks(st.ģ)	100,4709
2.TRANZĪTLĪNIJU VIENLAICĪGS ATSLĒGUMS	
2.1.Darba stāvokļa varbūtība (a.v.)	0,9790324
2.2.Pārtraukuma laiks(st.ģ)	183,6759
3.SLODZES VIENLAICĪGS ATSLĒGUMS	
3.1.Darba stāvokļa varbūtība (a.v.)	0,9998509
3.2.Pārtraukuma laiks(st.ģ)	1,3062
4.VIENAS LĪNIJAS ATSLĒGUMS	
3.1.Darba stāvokļa varbūtība (a.v.)	0,9790324
3.2.Pārtraukuma laiks(st.ģ)	183,6759
5.NEPIEGĀDĀTĀ ENERĢIJA TRANZĪTAM(MWh/g)	62,31
6.NEPIEGĀDĀTĀ ENERĢIJA (MWh/g)	269,29
7.NEPIEGĀDES IZMAKSAS (t.Ls/g)	269,29

5.2. att. Sadalietais drošuma kritēriji.

5.2. Jēdziens *aprēķina elements*

Lai varētu izrakstīt visiem sadalietaišu tipiem aprēķina izteiksmes vienā vispārinātā formā, tiek ieviests jēdziens *aprēķina shēmas*.

Apskatāmās konfigurācijas tipa sadalietais tiek sadalīts aprēķina *elementos*

Definīcija: **Aprēķina elements veido sadalietais daļu, kas bojājuma novēršanas laikā tiek atvienota no energosistēmas ar atdalītājiem.**

Īpašības:

- **Aprēķina elementi ir kritisko aparātu kopa, kas kaut viena aparāta bojājuma novēršanas laikā tiek atdalīta no energosistēmas;**
- **Jaudas plūsmas un īsslēguma strāvas sadalietais plūst pa virknē vai paralēli savienotiem elementiem.**

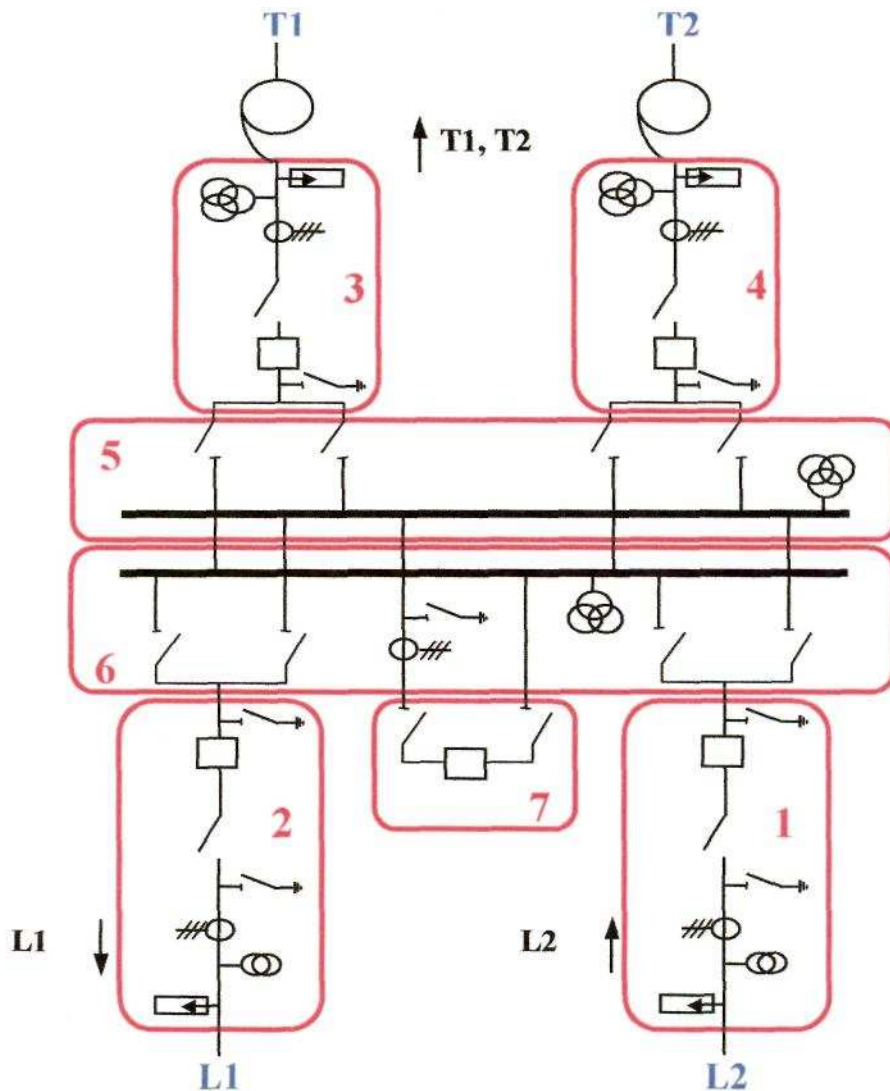
Elementa *i* asimptotisko darbnegatīvības parametru aprēķina pēc formulas:

$$\begin{aligned}
 U_i = & N_{j,i} \cdot \lambda_j \cdot r_j + N_{k,i} \cdot \lambda_k \cdot r_k + N_{a,i} \cdot \lambda_a \cdot r_a + N_{pn,i} \cdot \lambda_{pn} \cdot r_{pn} + N_{st,i} \cdot \lambda_{st} \cdot r_{st} + \\
 & + N_{LN,i} \cdot \lambda_{LN} \cdot r_{LN} + N_{AT,i} \cdot \lambda_{AT} \cdot r_{AT} + N_{LN(RA),i} \cdot \lambda_{LN(RA)} \cdot r_{LN(RA)} + \\
 & + N_{LN(RA),i} \cdot \lambda_{LN(RA)} \cdot r_{LN(RA)} + N_{AT(RA),i} \cdot \lambda_{AT(RA)} [st./g.],
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

- kur $\lambda_j \dots \lambda_{sp}$ - atteices param. jaudas slēdzim un citiem kritiskiem aparātiem [sk./g.];
 r_j $\mathbf{K} r_{sp}$ - remonta laiks jaudas slēdzim un citiem kritiskiem aparātiem [st.];
 $N_{j,i}$ - jaudas slēdžu skaits elementā *i*;
 $N_{k,i}$ - kopņu ligzdu skaits elementā *i*;
 $N_{a,i}$ - atdalītāju skaits elementā *i*;
 $N_{pn,i}$ - pārsprieguma novadītāju skaits elementā *i*;
 $N_{sp,i}$ - spriegummaiņu skaits elementā *i*;

- $N_{st,i}$ - strāvmaiņu skaits elementā i ;
- $N_{AT,i}$ - autotransformatoru skaits elementā i ;
- $N_{LN,i}$ - gaisvadu līniju skaits elementā i ;
- $N_{AT(AR),i}$ - autotransformatoru relejaizsardzības skaits elementā i ;
- $N_{LN(AR),i}$ - gaisvadu līniju relej aizsardzības skaits elementā i ;

5.3. attēlā ir parādīts 330 kV sadalietais (divkopņu sistēma) sadalījums *aprēķina elementos*.



5.3. att. 330 kV sadalietais (divkopņu sistēma) sadalījums *aprēķina elementos*,
 1 - elementa numurs, L1- līnijas pieslēguma apzīmējums,
 T1 - transformatora pieslēguma apzīmējums

Plānoto remonta asimptotisko darbnegatīvības parametru U_{pr} aprēķina pēc formulas, kas ir analoga formulai (5.1), aizvietojojot r un λ ar

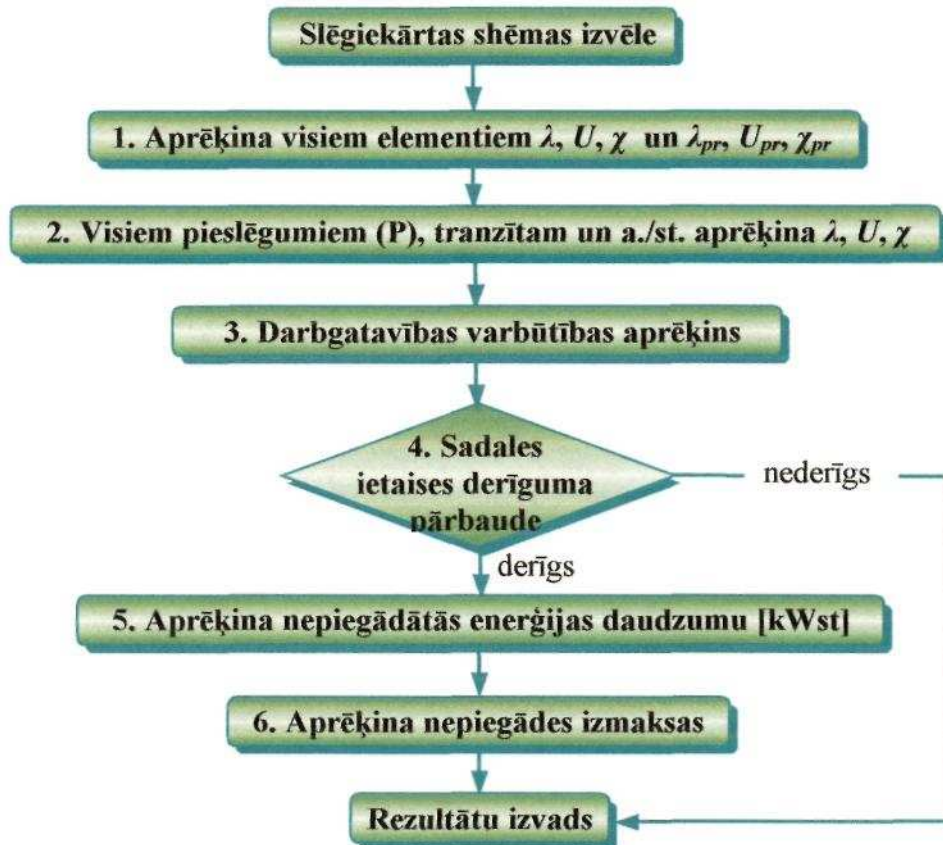
1. atteices parametru λ_{pr} ,
2. remonta laiku r_{pr} .

Elementa i darbnespējas varbūtība:

$$\chi_i = \frac{U_i}{8760} \quad [\text{a.v.}] \quad (5.2)$$

5.3. Drošuma kritēriju aprēķina algoritms

Aprēķinam izmanto katram sadalietaišu tipam iepriekš sagatavotas formulas no datu bāzes (skat. piemēru) un aprēķina elementu parametrus χ un U . Algoritma blokshēma dota 5.4. attēlā.



5.4. att. Sadalietais kritēriju aprēķina algoritma blokshēma;
 λ - vidējais atteicu parametrs, χ - darbnespējas stāvokļa varbūtība,
 U - darbnespējas parametrs.

5.1. tabula

330 kV sadalietasei (divkopņu sistēma konfigurācija) aprēķina elementu parametri

i	$N_{j,i}$	$N_{a,i}$	$N_{st,i}$	$N_{sp,i}$	$N_{pn,i}$	$N_{k,i}$	$\lambda, \text{st/g}$	$U, \text{st/g}$	$\chi, \text{a.v.}$
1	1	1	1	1	1	0	0,0126	0,141	0,000016
2	1	1	1	1	1	0	0,0126	0,141	0,000016
3	1	1	1	1	1	0	0,0126	0,141	0,000016
4	1	1	1	1	1	0	0,0126	0,141	0,000016
5	0	5	0	1	0	5	0,0268	0,2346	0,000026
6	0	5	0	1	0	5	0,0268	0,2346	0,000026
7	1	2	1	0	0	0	0,0108	0,1316	0,000015

1.bloks. Visiem elementiem aprēķina atteicu matemātisko cerību λ un darbnegatavības parametru U (5.1) un elementa darbnegatavības stāvokļa varbūtību χ . Aprēķins tiek veikts avārijas atteicēm un plānota remonta stāvoklim.

2.bloks. Otrajā blokā aprēķina.

- 1) Pieslēgumu **L1, L2, ...** atteicu parametru, $\lambda_{L1}, \lambda_{L2}, \dots$ darbnespējas varbūtību $\chi_{L1}, \chi_{L2}, \dots$ un darbnegatavības parametru U_{L1}, U_{L2}, \dots ;
- 2) Tranzīta darbnegatavības stāvokļa varbūtību % un darbnegatavības parametru U .

Aprēķinam izmanto katram sadalietais konfigurācijas tipam iepriekš sagatavotās formulas un pirmā bloka aprēķina rezultātus. Aprēķina formulas dotas 5.2. un 5.3. tabulās.

5.2. tabula

Otrā bloka aprēķina formulu piemērs 330 kV sadalietasei (divkopņu sistēma)

Pieslēguma nr.	χ aprēķina formula, a.v.	U aprēķina formula, st./g
L2	$\chi_{L1} = \chi_1 + \chi_5$	$U_{L1} = \chi_{L1} \cdot 8760$
L1	$\chi_{L2} = \chi_2 + \chi_5$	$U_{L2} = \chi_{L2} \cdot 8760$
T1	$\chi_{T1} = \chi_3 + \chi_6$	$U_{T1} = \chi_{T1} \cdot 8760$
T2	$\chi_{T2} = \chi_4 + \chi_6$	$U_{T2} = \chi_{T2} \cdot 8760$
L1+L2*	$\chi_1 \cdot \chi_2 + \chi_5$	$\chi_{L1+L2} \cdot 8760$
T1+T2*	$\chi_3 \cdot \chi_4 + \chi_6$	$\chi_{T1+T2} \cdot 8760$

Piezīme. * Pieņem, ka 1. elements atrodas plānotā remontā, bet 2. elementam ir bojājums.

3. bloks. Trešajā blokā aprēķina darbnegatavības varbūtību.

5.3. tabula

Aprēķina formulu piemērs

Nr.	Nosaukums	p formula, a.v.	U , st./g
1.	Visu pieslēgumu vienlaicīgs atslēgums	$p = 1 - \chi_{L1+L2}$	0,228
2.	Tranzīta pārtraukums	$p = 1 - \chi_{L2}$	0,367
1.	Slodzes atslēgums	$p = 1 - \chi_{T1+T2}$	0,228

4. bloks - derīguma pārbaude. Ka derīguma kritērijus izmanto $p = 0,9998$.

5. bloks - nepiegādātās enerģijas aprēķins.

Nepiegādāto enerģiju aprēķina pēc šādas formulas:

$$W = P \cdot U_{T1+T2} \cdot k_{gr} \quad [\text{MWst}], \quad (5.3)$$

- kur k_{gr} - aprēķina koeficients, kas ievēro slodzes grafiku, pieņemot, ka atteices var sadalīties vienmērīgi gada laikā.
- P - sadalietais nepiegādāta jauda.

6. bloks - nepiegādes izmaksu aprēķins:

$$C_{nep} = C_{nep} \cdot W \text{ [tūkst. Ls/g]}. \quad (5.4)$$

Gala rezultātā, izvēlējoties sadalietaišu tipus ar dažādu variantu un iekārtās un aprēķinot visām šīm situācijām drošumu ar nepiegādātas slodzes kritēriju, izvēlas visizdevīgāko variantu un pārējos uzskata par nederīgiem.

Slēdzieni

- Promocijas darbā tiek izanalizētas Latvijas pārvades tīkla funkcionēšanas problēmas:
 - Esošais Latvijas un Baltijas pārvades tīkls elektrostacijās uzstādītās jaudas un patēriņa pieaugumu nodrošinās tikai tuvākajos gados. Atsevišķu reģionu attīstība, kur notiek esošo slodžu pārgrupēšanās un sagaidāmo slodžu pieaugums, rada nepieciešamību pēc jaunām apakšstacijām, elektrostacijām un elektropārvades līnijām.
 - Elektroenerģijas tirgus liberalizācija, kas pakāpeniski tiek ieviesta arī Latvijā, prasa ražošanas, pārvades un sadales pārkārtošanu, kas negatīvi iespaido uz piedāvāto pakalpojumu kvalitāti un energoapgādes drošumu.
 - Pašreiz Latvijas energosistēma ir deficīta sistēma un importē elektroenerģiju no kaimiņvalstīm, kas iespaido uz šķērsgriezumu noslogošanu ar blakus energosistēmām. Uz Latvijas energosistēmas drošumu iespaidos arī Lietuvas Ignalinas atomstacijas slēgšana.
 - Latvijā nepieciešama jauna ģenerējoša avota būvēšana un esošo elektrostaciju modernizācija, atbilstoši mūsdienu prasībām. Pēc šiem pasākumiem Latvijai tuvākajā laikā jāklūst par pašbilancējošu energosistēmu, kas lielākā mērā palielinās Latvijas patērētāju elektroapgādes neatkarību un drošumu.
 - Tā kā elektrostaciju un apakšstaciju elektrisko iekārtu novecošana samazina energoapgādes drošumu, Latvijas energosistēmas energoapgādes drošuma palielināšanai nepieciešams pamatīgi rekonstruēt energoobjektus, mainot pagājušā gadsimta 70.-80. gados uzstādītās iekārtas pret jaunām un modernām.
- Promocijas darbā veiktā literatūras analīze, kas balstās uz ārzemju valstu pieredzi drošuma jautājumos, uzskatāmi parāda, ka pasaules valstīs elektroenerģijas apgāde ir vitāli svarīga. Zaudējumi, ko rada lieli un ilgstoši elektroapgādes pārtraukumi, ir tik nozīmīgi, ka, ņemot vērā tehniskos un tautsaimnieciskos apsvērumus, ir nepieciešams, lai elektroapgādei būtu augsts drošuma līmenis.
- Promocijas darbā ir izstrādāta ilgtermiņa metodika, kas pēta tieši Latvijas pārvades tīkla drošuma jautājumus. Šī ilgtermiņa metodika paredz sistēmas un tīklu attīstības analīzi (attīstības stratēģijas izstrādi), ņemot vērā elektroapgādes drošumu, un ir vērsta uz kapitālieguldījumu palielināšanu drošuma līmeņa paaugstināšanai.
- Izstrādāts atslēgumu modelēšanas algoritms, kas apskata tīkla atslēguma elementu atteices pa vienam ($n-1$) un pa diviem ($n-2$). Algoritms modelē elementu atteices, un pēc tam, kad ir izanalizētas visas pārvades tīkla saites un atteices elementi ir zināmi, tiek modelēti paši atslēgumi.
- Promocijas darbā ir izstrādāta 330 un 110 kV apakšstaciju sadalietaišu drošuma faktora novērtēšanas metodika, kas piemērota Latvijas elektropārvades tīklam. Ir izanalizētas esošās pārvades tīkla sadalietaišu shēmas un to daudzveidīgums, kas apgrūtina

drošumaaprēķina procesu. Metodika novērtē pārvades tīkla drošumu ar nepieģādātās enerģijas kritērija palīdzību.

6. Promocijas darbā izstrādātās metodes tiek izmantotas dinamiskās optimizācijas datorprogrammā *LDM-AD'04*, kas ir izstrādāta Latvijas Zinātņu akadēmijas Fizikāla enerģētikas institūta (FEI) Energosistēmu Matemātiskās Modelēšanas Laboratorijā (EMML) pēc AS *Latvenergo* pasūtījuma. Programma veic pārvades tīkla apakšstaciju un sadalītaišu darba un elektroapgādes drošuma analīzi.

Literatūras saraksts.

- [1]. R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad, L. Settling. Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation 1996-1999, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, November 2001.
- [2]. R. Billinton, R. Allan. Reliability Evaluation of Power Systems. Plenum Press, New York & London, 1984.
- [3]. C. Singh, R. Billinton. System Reliability Modeling and Evaluation. Hutchinson Educational, London, 1977.
- [4]. H.-D. Kochs. Zuverlässigkeit elektrischer Anlagen. Springer Verlag, Berlin, New York, Tokio, 1984.
- [5]. J. Backes, H.-J. Haubrich, A. Montebaur, H.-J. Koglin, M. Schwan, A. Sorg, W.H. Weillsow, M. Zdrallek, U. Zimmermann, O. Bertoldi, C. Tagliabue. Service Reliability in a Competitive Market. Tools, Criteria and New Approaches for Risk Management and Monetary Evaluation. 38th CIGRE Session. JS 37/38/39, Paris, 2000.
- [6]. H.J. Koglin. Modelle und Methoden. Energie-wirtschaftliche Tagcsfragen 37, No. 11, pp. 886-890, 1987.
- [7]. A. Sorg, Th. Weber, W.H. Weillsow. Risk investigations in Investment Planning under Consideration of a Supply Interruption Insurance System. IEEE Porto Power Tech Conference Proceedings, Porto, 2001.
- [8]. Baltic Power System Control Centre Ltd. Annual report 2002-2005.
- [9]. The State Joint Stock Company Ltd. Latvenergo. Annual report 2002-2005.
- [10]. Z. Krišāns. Modelēšanas un optimizācijas metodes elektroenerģētisko uzņēmumu vadībai. Rīga, RTU, 1998.
- [11]. Г.С. Лисовский, М.Э. Хейфиц. Главные схемы и электротехническое оборудование подстанций 35 - 750 кВ. Москва, Энергоиздат, 1984.
- [12]. Под ред. НИ. Воропая. Надежность систем энергетики. Новосибирск, Наука, 1999.
- [13]. M. Vonsovičs, A. Sauhatas. Liela mēroga avārijas energosistēmas. Nejaušība vai likumsakarība? E&P 2003, Nr. 3.
- [14]. K. Briņķis, A. Kutjuns. Orkāna izraisītie bojājumi Baltijas valstu elektrotīklos un iespējama sistēmas sadalīšanas analīze. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2005, No 3.
- [15]. K. Briņķis. Kā Maskavā pazuda elektrība. E&P 2005, Nr. 4.