

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

**Marija BOČKARJOVA**  
Enerģētikas doktora programmas students

**STATISTISKĀ PIEEJA  
ENERGOSISTĒMU AIZSARDZĪBAS  
ALGORITMU SINTĒZĒ UN TESTĒŠANĀ**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:  
LZA kor. loc,  
Dr. habil. sc. ing., profesors  
**A.SAUHATS**  
Dr. sc, profesors  
**G.ANDERSSON**

**RTU Izdevniecība**  
Rīga 2007

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2007. gada 10. septembrī, 14.00, Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un Elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, aktu zālē.

**OFICIĀLIE OPONENTI**

Profesors, Dr.habil.sc.ing. LZA kor. loc, Leonīds Ribickis  
Rīgas Tehniskās universitāte

Dr.sc.ing., Sergejs Rubcovs  
Latvenergo

Profesors Emeritus, Mati Valdma  
Tallinas Tehnoloģiskā Universitāte, Igaunija

**APSTIPRINĀJUMS**

Es apstiprinu, ka esmu izstrādājusi doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskā universitātē inženierzinātņu doktora grādu iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Marija Bočkarjova ..... (paraksts)

Datums .....

Promocijas darbs uzrakstīts angļu valodā, darbs satur 5 pamatnodaļas, secinājumus un rekomendācijas, kā arī literatūras sarakstu. Darba kopējais apjoms ir 184 datorsalikuma lappuses. Darbā iekļautas 3 tabulas un 39 attēli. Literatūras sarakstā iekļauti 25 izmantotās literatūras avoti.

Sestā nodaļa ir izstrādāta kopīgā darbā ar Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātes doktorantu Mārtiņu Silarāju.

Šis darbs izstrādāts ar Latvijas Zinātnes padomes, kā arī Šveices ārzemju studentu stipendijas komisijas atbalstu.

## 1. Ievads

### Pašreizējā situācija un tēmas aktualitāte

Relejaizsardzības un automātikas ierīcēm ir nozīmīga loma patērētāju energoapgādes drošības un drošuma garantēšanā. Šīs ierīces kontrolē energosistēmā notiekošos procesus, atpazīst traucsmes un avārijas situācijas, piemēram, bojājumus vai pārslodzes, kuras apdraud visas sistēmas vai būtiskas tās daļas darbību; tāpat tās vada pieejamas energosistēmas aparātus ar mērķi novest sistēmu tehniski drošā un ekonomiski efektīvā stāvoklī, nepieļaujot tālāku avārijas situācijas attīstību.

Energosistēmas elektropārvades līnijas ir tie sistēmas komponenti, kuru bojājumi notiek visbiežāk. Tādēļ prasības attiecībā pret šo līniju relejaizsardzību un automātiku ir īpaši augstas. Dabas faktoru vai cilvēka darbības ietekme - negaisi, viesuļvētras, krītoši koki, ugunsgrēki u.c. - var izraisīt līniju īsslēgumu, kas ir bīstami visas sistēmas darbībai. Šādā gadījumā aizsardzībām jāizolē bojātā līnija no barošanas avotiem. Visbiežāk sastopamā un tajā pašā laikā sarežģītākā un tehniski pilnīgākā shēma augstsprieguma elektropārvades līniju aizsardzībai ir distantaizsardzība. Distantaizsardzība kontrolē līnijas strāvas un spriegumus un, balstoties uz mērījumu apstrādes rezultātiem, nosaka, vai kontrolējamā līnija vai arī blakus esošā līnija ir bojāta.

Īpaša tipa automātika - bojājuma vietas noteikšanas ierīces - nosaka iespējamo attālumu līdz bojājuma vietai, balstoties uz ierakstiem, kas veikti īsslēguma apstākļos. Šis novērtējums ļauj novirzīt bojājuma meklēšanas komandu un ātri novērst bojājuma iemeslu.

Distantaizsardzība un bojājuma vietas noteikšana veic būtiski atšķirīgus uzdevumus, tomēr tām ir daudz kopīga principu un algoritmu ziņā, jo abos gadījumos tieši vai netieši tiek noteikts attālums no mērījumu izdarīšanas vietas līdz bojājumam. Tajā pašā laikā no prasību un realizēšanas viedokļa starp distantaizsardzības un bojājuma vietas noteikšanas ierīcēm ir būtiskas atšķirības:

- Distantaizsardzības nostrādes laikam jābūt dažu milisekunžu robežās, savukārt bojājuma vietas noteikšanas ierīces var darboties ārpus reālā laika - pieļaujamais nostrādes laiks ir dažas sekundes vai pat ilgāks.
- No bojājuma vietas noteikšanas ierīču precizitātes tiešā veidā ir atkarīgs līniju apgaitai nepieciešamais laiks un izmaksas, savukārt distantaizsardzības uzdevums pirmām kārtām ir noteikt, vai bojājums atrodas konkrētā zonā vai arī neatrodas tajā, tādēļ precizitāte var nebūt tik augsta.

Augstākminētās atšķirības, neraugoties uz kopīgām iezīmēm, ilgu laiku noteica šo funkciju atsevišķo risināšanu, jo aizsardzības tika realizētas uz analogo komponentu bāzes.

Sākot no 20. gadsimta 80. gadiem, aizsardzības un automātikas ierīces ir kļuvušas par skaitļošanas iekārtām uz mikroprocesoru bāzes. Ļoti drīz tika atklātas

šis ātri attīstošās tehnoloģijas dabiskās priekšrocības - drošums, iespēja kombinēt vairākas izpildāmās funkcijas vienā ierīcē, iespēja veikt pašpārbaudi, kontrolējamo procesu ierakstīšanu un uzglabāšanu. Tajā pašā laikā straujā datortehnoloģiju attīstība veicināja daudz sarežģītākas signālu apstrādes algoritmu programmatūras realizāciju. Apstrādes ātrums un atmiņas ietilpība ir pieaugušas par vairākām kārtām. Analogciparu pārveidotāju piedāvātās izšķirtspējas, kas lielā mērā noteica digitālo ierīču precizitāti, kļuva pietiekami lielas, lai atbilstu augstākajām precizitātes prasībām.

Kļuva iespējams arī apvienot vienā termināla blokā visas nepieciešamās elektropārvades līniju aizsardzības un automātikas funkcijas, tai skaitā distantaizsardzību un bojājuma vietas noteikšanu. Modernie aizsardzības termināli izpilda visas vajadzīgās funkcijas un veido energosistēmu aizsardzības hierarhijas zemāko līmeni: iekārtu lokālas aizsardzības un sistēmu aizsardzības shēmas.

Tā kā bojājumu ieraksti tiek glabāti termināla atmiņā un tos var pārsūtīt uz operatora datoru pa sakaru kanāliem, tas ļauj atrisināt bojājuma vietas noteikšanu gan lokāli ar termināliem, gan arī no attālināti, izmantojot jaudīgus datorus ar praktiski neierobežotām iespējām attiecībā uz realizēto algoritmu sarežģītību.

Sasniegumi aizsardzības tehnoloģijas jomā neatrisināja visas problēmas saistībā ar energoapgādes drošumu un nepārtrauktību. Kā apstiprinājumu šim faktam var aplūkot energosistēmu avārijas, kas pēdējo dažu gadu laikā notikušas ASV, Itālijā, Zviedrijā, Dānijā, Lielbritānijā, Brazīlijā, Krievijā u.c. Daudzos gadījumos aizsardzības, it īpaši distantaizsardzības, kļūdainā nostrāde izraisīja sistēmas avārijas mēroga palielināšanos, kā rezultātā pieauga arī radušies zaudējumi. Problēma, kas saistīta ar bojājuma vietas noteikšanu uz augstsprieguma elektropārvades līnijām, vēl joprojām ir aktuāla, jo tās risināšanai nepieciešami ievērojami darba un laika ieguldījumi. Iepriekšminētās problēmas, kā arī iespējas, ko sniedz mikroprocesoru tehnoloģija, noteica šī promocijas darba pētījumu virziena izvēli.

### **Mērķi**

Šī darba mērķis ir bojājuma vietas noteikšanas un distantaizsardzības efektivitātes tālāka palielināšana. Lai šo mērķi sasniegtu, darbs aptver šādus uzdevumus:

- Attiecībā uz bojājuma vietas noteikšanu:
  - Veikts bojājuma vietas noteikšanas un distantaizsardzības algoritmu kritisks apskats un klasifikācija;
  - Izklaidēto parametru līnijām piedāvāti jauni, uz deterministisko pieeju balstīti bojājuma vietas noteikšanas algoritmi, kā arī novērtēta efektivitāte;
  - Izklaidēto parametru līnijām piedāvāti jauni, uz statistisko pieeju balstīti bojājuma vietas noteikšanas algoritmi, kā arī novērtēta efektivitāte un piedāvāta realizācijas metode;

- Piedāvāts jauns algoritms optimālās līnijas apgaitas stratēģijas noteikšanai.
- Attiecībā uz distantaizsardzību:
  - Sintezēts statistiskais distantaizsardzības algoritms.
- Izstrādāti līnijas parametru verifikācijas algoritmi, kuri iegūst līnijas parametrus no ārējo bojājumu ierakstiem;
- Pamatots un izstrādāts statistiskais algoritms komplekso aizsardzības ierīču darbības pārbaudei;
- Balstoties uz statistisko pieeju un Monte-Karlo metodi, izstrādāts algoritms bojājuma vietas noteikšanas un distantaizsardzības algoritmu efektivitātes pārbaudei.

### **Pētījuma metodes un līdzekļi**

Noformulētais mērķis tika sasniegts, izmantojot šādas metodes:

- bojātās elektropārvades līnijas modelēšana, pielietojot elektromagnētisko pārejas procesu teoriju, simetrisko komponentu metodi un jaudas simetrisko komponentu balansa metodi;
- varbūtību teorija un Monte-Karlo metode;
- nelineāru algebrisko vienādojumu risināšana.

### **Zinātniskā novitāte**

Šī darba ieguldījums zinātnisko inovāciju laukā ir sekojošs:

- Uzlabotas un attīstītas deterministiskās bojājuma vietas noteikšanas metodes īsām un garām elektropārvades līnijām;
- Izstrādāts algoritms optimālās līnijas apgaitas stratēģijas izvēlei, lai varētu pēc iespējas samazināt laiku, kāds nepieciešams līdz bojājuma atklāšanai;
- Izstrādāts statistiskais algoritms distantaizsardzības darbībai;
- Līnijām ar izkliedētiem parametriem izstrādāti jauni bojājuma vietas noteikšanas algoritmi, kas balstīti uz statistiskās pieejas.

### **Praktiskā nozīme**

Šī darba praktiskā vērtība izpaužas sekojoši:

- Bojājuma vietas noteikšanas algoritmus un programmas var tiešā veidā pielietot, lai apstrādātu īsslēguma režīmu digitālos ierakstus, kā arī noteiktu optimālo līnijas apgaitas zonu bojājuma cēloņa meklēšanai.
- Izstrādāto distantaizsardzības un bojājuma vietas noteikšanas algoritmu var realizēt relejaizsardzības ierīcēs; Rīgas Tehniskās Universitātes Enerģētikas institūta problēmu laboratorijā izgatavoti un Latvijas energosistēmā ieviesti šādu aizsardzības terminālu prototipi.

- Gaidāms, ka statistiskais aizsardzību pārbaudes algoritms paaugstinās kļūdu un atteicu atrašanas varbūtību un ļaus saīsināt pārbaudes procedūras laiku un izmaksas.

### **Aprobācija**

Teorētiskie rezultāti ir apstiprināti, veicot bojāto elektropārvades līniju modelēšanu, kā arī apstrādājot praktiskus atteicu ierakstus un salīdzinot tos ar līnijas apgaitas un bojājumu atrašanas rezultātiem. Publikācijas, kurās atspoguļoti pētījumu rezultāti, tika prezentētas un pozitīvi uztvertas starptautiskās konferencēs.

### **Publikācijas**

(no 25.07.1998 līdz 22.10.2003. Marija Danilova)

1. Bockarjova M., Dolgicers A., Sauhats A., Enhancing Fault Location Performance on Power Transmission Lines //IEEE Lausanne Power Tech 2007 conference proceedings .- Lausanne.- Switzerland;
2. Bockarjova M., Sauhats A., Andersson G., Statistical Algorithm Power Transmission Lines Distance Protection //IEEE PMAPS 2006 conference proceedings . - Stockholm. - Sweden;
3. Bockarjova M., Sauhats A., Andersson G., Statistical Algorithms for Fault Location on Power Transmission Lines //IEEE St. Petersburg Power Tech 2005 conference proceedings .- Russia;
4. Sauhats A., Bockarjova M., Dolgicers A., Silarajs M., New Method for Complicated Automation Systems Simulation Test //EPE-PEMC 2004 Conference proceedings.- 2004.- Latvia;
5. Sauhats A., Bockarjova M., Algorithms, means and tools of fault location on transmission lines // EPE-PEMC 2004 Conference proceedings. - 2004 . - Latvia;
6. Sauhats A., Bockarjova M., Dolgicers A., Silarajs M., New Method For Complicated Automation Systems Simulation Test//IEE 8<sup>th</sup> International conference on Developments in Power System Protection .- 2004 .- Netherlands;
7. Sauhats A., Bockarjova M., Two-Terminal Based High Voltage Line Protection and Automation// IEE 8th International conference on Developments in Power System Protection.- 2004.- Netherlands;
8. Sauhats A., Danilova M., Two terminal based fault location schemes for high and super high voltage power transmission lines // The 2nd International Scientific Symposium Elektroenerģētika 2003 proceedings.- Slovakia;
9. Sauhats A., Danilova M., Two Terminal based Fault Location Algorithms for Power Transmission Lines // Power and Electrical Engineering International Scientific Conference 2003.- Latvia;
10. Sauhats A., Utans A., Leite L., Danilova M., Vasiljevs A., Silarajs M., The Multifunction Terminal of Relay Protection and Anti-Emergency

- Automation //Scientific proceedings ofRiga Technical university.- 2003 .-Vol. 4.- Power and Electrical Engineering No.8.- Riga Technical University Latvia (in Latvian);
11. Sauhats A., Danilova M., Fault Location Algorithms for Super High Voltage Power Transmission Lines // IEEE Bologna Power Tech 2003 conference proceedings.- Italy;
  12. Sauhats A., Jonins A., Danilova M., Statistical Adaptive Algorithms for Fault Location on Power Transmission Lines based on Method of Monte-Carlo // Probabilistic Methods Applied to Power System conference proceedings . - 2002.- Naples, Italy;
  13. Sauhats A., Jonins A., Glusnevs S., Danilova M., Fault Location Systems and Algorithms Utilized in Baltic Countries for High Voltage Trānsmission Lines// Problems ofthe Present-day Electrotechnics, 7th international conference proceedings.- 2002 .- Kiev.- Ukraine .-June;
  14. Sauhats A., Jonins A., Chuvychin V., Danilova M., Fault location algorithms for power transmission lines based on Monte-Carlo method//2001 IEEE Porto Power Tech conference proceedings.- 2001.- Porto.- Portugal.- 2001;
- Citas publikācijas
15. Linkevics O., Bockarjova M., Sauhats A., Chuvychin V., Svalova I., Will distributed energy resources make a revolution in the power sector of Baltic States? //EPE-PEMC 2004 Conference proceedings.- Latvia .- 2004;
  16. Sauhats A., Danilova M., Two terminal-based transmission line protective relaying and automation // Elektros Energetika ir Tehnologijos Conference proceedings .- Kaunas University ofTechnology.- Lithuania .- 2003 (in Russian);
  17. Sauhats A. S., Dolgicers A. V., Danilova M. A., The Method of Virtual Statistical Trials // Relejnaja zashita i avtomatika energosistem 2002 conference proceedings.- Moscow.- Russia .- May 2002 (in Russian);
  18. Sauhats A., Jonins A., Danilova M., Statistical approach based fault location algorithm for power trānsmission lines // Scientific proceedings ofRiga Technical university Vol. 4.- Power and Electrical Engineering No.2 .- Latvia, 2001;
  19. Sauhats A., DolgicerA., Utans A., Bockarjova M., The System of the Generators Parameters Control // Elektros Enerģētika ir Tehnologijos conference proceedings.- Kaunas University ofTechnology.- Lithuania .- 1998 (in Russian).

### **Godalgas**

- Godalga "Labākais zinātniskais darbs" par publikāciju "Statistiskais algoritms elektropārvades līniju distantaizsardzībai" IEEE konferencē PMAPS 2006 (9. starptautiskā konference par varbūtību teorijas metožu izmantošanu energosistēmās). Stokholma (Zviedrija)

- Godalga "Labākais studenta zinātniskais darbs" par publikāciju "Bojājuma vietas noteikšanas algoritmi supraugstsprieguma elektropārvades līnijām". IEEE Boloņas 2003. gada "Power Tech 2003" konferencē. Itālija
- Latvijas Izglītības fonda, VAS "Latvenergo" un Latvijas Enerģētiķu biedrības atzinības raksts par labāko zinātnisko darbu:
  - 1998 - par darbu "Ģenerators stāvokļa kontroles sistēma";
  - 1999 - par darbu "Ģenerators vadības un kontroles sistēma";
  - 2000 - par darbu "Ēnergosistēmu aizsardzība";
  - 2001 - par darbu "Algoritmu un programmu izstrāde bojājuma vietas noteikšanai augstsprieguma elektropārvades līnijām";
  - 2002 - Darbu kopa.

### **Darba struktūra**

Darbs sastāv no ievada, 5 pamatnodaļām, kurās izklāstītas galvenās ieteiktās metodes un parādīta rezultātu novitāte un algoritmu attīstības un pielietošanas iespējas, kā arī publikāciju kopsavilkuma, secinājumiem un pielikumiem, kur ietilpst 14 pamata publikācijas, un literatūras saraksts, kurā ietilpst 25 pozīcijas. Promocijas darbā ir 184 lappuses, 3 tabulas un 39 attēli, un tas uzrakstīts angļu valodā (izņemot vienu publikāciju, kura rakstīta latviešu valodā).

Izvēlētais pētījumu tēmas praktiskā nozīme un aktualitāte pamatota ievadā, kur arī noformulēts mērķis un uzskaitīti risinātie uzdevumi, dots apmeklēto konferenču, veikto prezentāciju un saņemto godalgu saraksts.

Galvenie rezultātu (publikācijas dotas pielikumā) ir apkopoti pēc kopīga tematā 5 pamatnodaļās:

- Izstrādātie bojājuma vietas noteikšanas algoritmi;
- Statistiskās bojājuma vietas noteikšanas pieejas pielietojums līniju apgaitas optimizācijā;
- Statistiskā pieeja distantaizsardzībā;
- Elektropārvades sistēmu stāvokļa statistikas savākšana un pielietojums;
- Statistiskā pieeja aizsardzības ierīču pārbaudēm.

Otrajā nodaļā izklāstīti bojājuma vietas noteikšanas algoritmu izstrādes un algoritmu īpašību pārbaudes rezultāti, ieskaitot vienpusējās un divpusējās metodes, kā arī deterministisko un statistisko pieeju. Trešajā nodaļā ir aprakstīts statistiskā bojājuma vietas noteikšanas algoritma rezultātu pielietojums līniju apgaitas stratēģijas optimizācijā ar mērķi samazināt apgaitas laiku un izmaksas. Ceturtajā nodaļā ir ieteikta statistiskās pieeja elektropārvades līniju distantaizsardzības algoritmos un apkopoti to pētījumu rezultāti. Piektajā nodaļā apspriesta iespēja iegūt noderīgu informāciju no īsslēgumu ierakstiem, piemēram, par līnijas un sistēmas ekvivalento komplekso pretestību. Šī informācija ir noderīga bojājuma vietas noteikšanas un distantaizsardzības algoritmu darbam. Sestajā nodaļā dots izpildītā darba kopsavilkums par statistisko algoritmu pielietojumu komplicēto aizsardzības sistēmas pārbaudēm. Dots arī izstrādāto publikāciju kopsavilkums. Darbu noslēdz secinājumi un iespējamā nākotnes darba apraksts.



## 2. Bojājuma vietas noteikšanas algoritmu sintēze

Elektroenerģijas tirgus atvēršana un pieaugošais ekoloģiskā apzinīguma līmenis izvirza vairākas jaunas prasības, ar kurām jāsavienojas elektropārvades sistēmu operatori: sistēmas ekspluatācija notiek nenoteiktākos un ātri mainīgos apstākļos, ir grūtības pierādīt investīciju nepieciešamību, kā arī ir problemātiski iegūt jaunas līniju trases. Līdz ar to ekspluatācijas process ir saspringtāks un var pazemināties elektroapgādes drošuma līmenis. Tādējādi energosistēmas elementu uzturēšana darba stāvoklī kļūst izšķiroši svarīga īpaši elektropārvades līnijām, kuras ir atklātās ārējai ietekmei.

Jebkura sprieguma līmeņa elektrolīnijās var notikt bojājumi. Lai paātrinātu remontu un nodrošinātu ātru energoapgādes atjaunošanu, ir svarīgi zināt, kurā vietā bojājums atrodas. Pēdējos gadu desmitos bojājuma vietas noteikšanas algoritmu attīstība tika stimulēta ar digitālo tehnoloģiju un mikroprocesoru sistēmu attīstību [5],[9],[10]. Tomēr precizitāti, ar kādu tiek aprēķināts attālums līdz bojājuma vietai, ietekmē vairāki gadījuma faktori. Kā galvenos ietekmējošos faktorus var minēt kombinēto efektu no elektropārvades līnijas savienoto energosistēmu slodzes, pretestības īsslēguma vietā un sistēmu ekvivalentajām pretestībām [10],[11],[23], kā arī no mērījumu un līnijas parametru neprecizitātes. Tā rezultātā bojājuma vietas noteikšanas precizitāte var būt nepietiekama.

Dispečeru centrs nav apgādāts ar informāciju par iespējamās bojājuma vietas kļūdas lielumu; bez tam dispečeri parasti sastopas ar ievērojamām kļūdām bojājuma vietas noteikšanas rezultātos. Tādējādi praksē līnijas apgaitas zonas garums tiek noteikts, pieņemot maksimālās kļūdas pastāvēšanu, pat tajos gadījumos, kad ir maz ticams, ka tāda kļūda pastāv. Tas var novest pie ekspluatācijas efektivitātes mazināšanās - vai nu aizkavējas līnijas ieslēgšana darbā un elektroenerģijas plūsmas atjaunošana vai arī - dažreiz - netiek noteikts bojājuma cēlonis.

Šajā nodaļā apskatīti daži principiāli jauni algoritmi. Ar šiem algoritmiem tiek aprēķināts attāluma līdz bojājumam sadalījuma līkums papildus parasti lietojamai attāluma līdz bojājumam matemātiskai cerībai. Šādi aprēķini var balstīties uz statistiskās informācijas izmantošanu un Monte-Karlo metodi.

Pētījumu rezultāti tika prezentēti starptautiskās zinātniskajās konferencēs (1.-8., 9. pielikums).

### Statistiskā pieeja

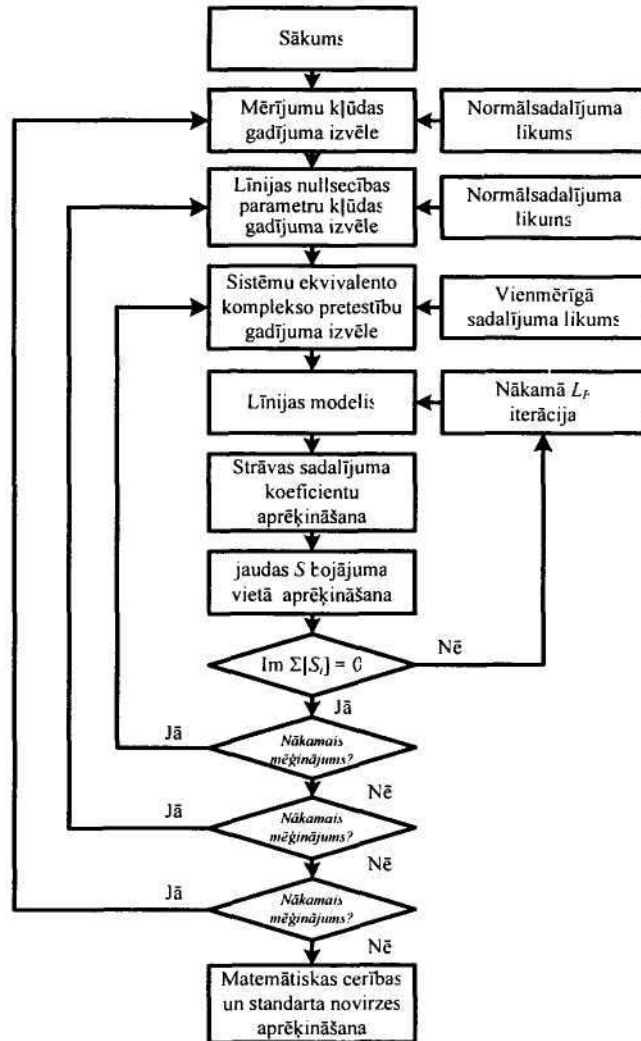
Aplūkojot izklāstītos darbā vienādojumus, var apgalvot, ka attālums līdz bojājumam  $L_F$  ir atkarīgs no strāvu  $I$  un spriegumu  $U$  vektoru mērījumiem atbilstoši šādai sakarībai:

$$L_F = \Phi(I, U) \quad (1)$$

kur  $\Phi$  apzīmē kādu attāluma  $L_F$  aprēķināšanas procedūru. Procedūrā tiek izmantoti strāvu un spriegumu mērījumu rezultāti.

No otras puses, ņemot vērā, ka strāvas un sprieguma mērījumu dati satur gadījuma kļūdas - attiecīgi  $\Delta I$  un  $\Delta U$ , vienādojumu (1) var uzskatīt par pamata vienādojumu, lai aprēķinātu attāluma līdz bojājuma vietai  $L_{est}$  sadalījuma likumu vai tā skaitliskos raksturojumus pēc Monte-Karlo metodes.

Elektropārvades līnijas parametru nenoteiktības var modelēt līdzīgā veidā; vienpusējo algoritmu gadījumā arī nekontrolējamo komplekso pretestību  $Z_{ill}$  var aplūkot kā gadījuma skaitli.



2.1. att. Ieteicamā bojājuma vietas noteikšanas algoritma struktūra

Lai noteiktu varbūtības blīvumu  $g(L_{est})$  gadījuma mainīgā  $L_{est}$  sadalījumam, izejot no (1), ir nepieciešams zināt varbūtības sadalījuma relatīvo blīvuma funkciju  $g(I, U/I_{est}, U_{est})$  - varbūtības blīvumu strāvas., un sprieguma sadalījumam pie iegūtajiem mērījumu rezultātiem  $I_{est}, U_{est}$ . Teorētiski jāizmanto Beijesa teorēma [1]. Noteikt vēlamo blīvuma funkciju  $g(I, U/I_{est}, U_{est})$  iespējams, balstoties uz bojātās līnijas procesu modelēšanu un Monte-Karlo metodi. Šajā nolūkā jāveic ievērojams skaits izmēģinājumu, līdz ar to būtu nepieciešams zināms apstrādes laiks.

Tomēr būtu iespējams iegūt efektīvāku procedūru, izmantojot linearizācijas metodi, ņemot vērā mērāmo lielumu fizisko būtību un relatīvi nelielās mērījuma kļūdu vērtības. Pieņemot, ka mērījuma kļūdu matemātiskas cerības vērtība ir nulle un tās ir saskaitāmas, var apgalvot, ka [1]:

$$\sigma[\Phi(I, U)] \cong \sigma[\Phi(I_{est} + \Delta I, U_{est} + \Delta U)] \quad (2)$$

kur  $\sigma(\dots)$  ir standarta novirze.

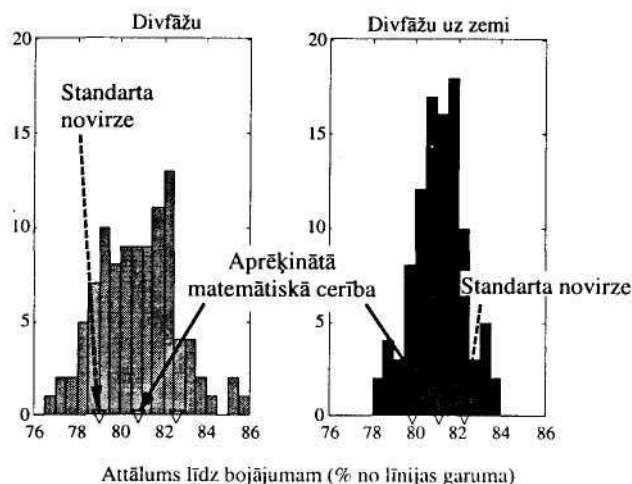
Izteiksme (2) ir pilnīgi korekta lineārām funkcijām. Apskatītajā nelineārajā gadījumā rodas kļūdas, kas ir pieļaujamas praktiskai izmantošanai. No otras puses, kļūst iespējams izmantot efektīvāku procedūru Monte-Karlo metodes pielietošanai.

Algoritms matemātiskās cerības  $E[L_F]$  un standarta novirzes  $\sigma[L_F]$  vērtību novērtēšanai, balstoties uz modelēšanu pēc Monte-Karlo metodes, parādīts 2.1. attēlā. Šo algoritmu var viegli pielietot dažādu veidu bojājumiem. Vienpusējo algoritmu pielietošanas gadījumā, papildus parametru nenoteiktībām ir nepieciešams modelēt nekontrolējamā līnijas gala sistēmas ekvivalentas kompleksās pretestības. Divpusējiem algoritmiem šis paņēmieni tiek pielietots, lai modelētu mērījumu un līnijas parametru nenoteiktības. Sīkāk šie pētījumi ir diskutēti publikācijās pielikumos 1-8, 9.

### Modelēšanas rezultāti

Tiek pētīts stohastiskais modelis. Uzsvērts, ka Monte-Karlo modelēšana izmantota divas reizes:

- lai modelētu parametru nenoteiktības bojātās līnijas modelī. Tiek iegūtas kontrolējamo spriegumu un strāvu vērtības;
- lai novērtētu attālumu līdz bojājuma vietai saskaņā ar piedāvātajiem algoritmiem. Tā kā izstrādātais algoritms nosaka attāluma aprēķina rezultātus kā gadījuma mainīgā sadalījumu, precizitāte būs raksturojama ar iegūtā sadalījuma likuma standarta novirzi.



2.2. att. Attāluma  $L_F$  sadalījums, kas noteikts mērījumu nenoteiktības gadījumā

2.2. attēlā parādīts piemērs starpfāžu īsslēgumam un starpfāžu zemsslēgumam pie mērījumu kļūdām. Algoritms tiek pielietots attāluma  $L_F$  sadalījumu noteikšanai gadījumā, kad bojājums atrodas 81% no līnijas garuma attālumā un pretestība bojājuma vietā ir  $30 \Omega$ . Matemātiskās cerības kļūda abiem bojājumu veidiem ir mazāka par vienu procentu no līnijas garuma, kamēr standarta novirzes ir 1,8% un 1,2% no līnijas garuma attiecīgi starpfāžu īsslēgumam un starpfāžu zemsslēgumam.

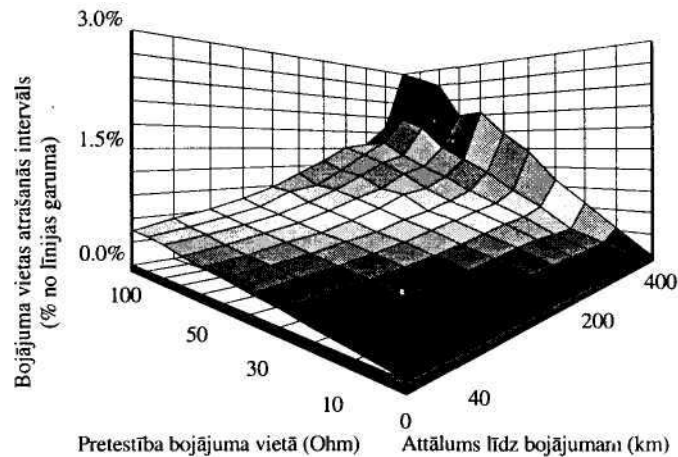
### 3. Statistiskā algoritma pielietošana līnijas apgaitas optimizēšanai

#### Bojātu elektropārvades līniju inspekcija

Elektropārvades līnija ir pārvades sistēmas visbiežāk bojātais elements. Bojājumu iemesli var būt ļoti dažādi. Jebkurā gadījumā aizsardzības uzdevums ir izolēt bojāto elektropārvades līniju no barošanas avotiem. Tad operatora darbības ir šādas: bojājuma vietas noteikšana un līnijas apgaitas brigādes norīkošana.

Literatūrā ieteikts ievērojams skaits dažādu bojājuma vietas noteikšanas metožu. Tomēr kļūdas aprēķinātajā attālumā līdz bojājuma vietai ir neizbēgamas vairāku faktoru dēļ - mērījuma kļūdas, līnijas parametru neprecizitāte, pretestības bojājuma vietā ietekme, īpašais darbības stāvoklis u.c.[2]. Tādēļ apgaitas brigāde sāk bojājuma meklēšanu aprēķinātā attāluma apkārtnē. Šī līnijas segmenta garumu iegūst, balstoties uz iepriekšējo pieredzi; konkrētā bojājuma apstākļi netiek ņemti vērā. Konkrētam gadījumam šis segmenta garums var būt arī nepiemērots, līdz ar

To tiek kavēta bojājuma novēršana. 3.1. attēla redzams, ka iespējamais bojājuma vietas atrašanās intervāls var būt liels tikai retos gadījumos, kad notiek attāli augstas pretestības bojājumi.



3.1. att. Iespējamais bojājuma vietas atrašanās intervāls ka funkcija no pretestības bojājuma vietā un attāluma līdz bojājuma vietai uz 500 kV elektropārvades līnijas

Tādējādi nepieciešamos elementus, kas vajadzīgi sekmīgai un ātrai bojājumu atklāšanai, var apkopot šādi:

- Īsslēguma strāvu un spriegumu mērījumi;
- Precīzs elektropārvades līnijas modelis;
- Bojājuma vietas noteikšanas algoritms, kas spēj novērtēt ar rezultātiem saistīto nenoteiktību;
- Laba stratēģija inspekcijas brigādei.

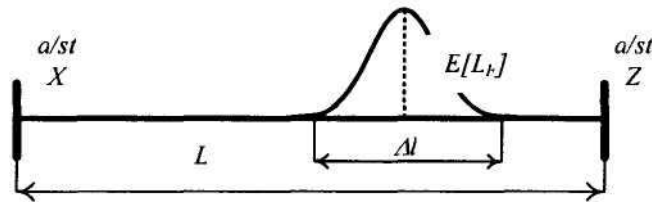
Iepriekšējā nodaļā tika ieteikti bojājuma vietas noteikšanas algoritmi, kuri, izmantojot mērījumu un parametru statistiku, aprēķina attālumu līdz bojājuma vietai, kā arī noteic iespējamās kļūdas robežas. Tiek ņemta vērā tekošā situācija enerģosistēmā un ietekmējošo faktoru kombinācija. Algoritmu var viegli realizēt modernās ierīcēs, kas veidotas uz mikroprocesoru bāzes. Šajā nodaļā turpināta diskusija par statistiskās pieejas priekšrocībām bojājuma vietas noteikšanā, parādot jauno iespēju noteikt optimālo līnijas apgaitas stratēģiju.

### Apgaitas optimizācija

Precīzāku bojājuma vietas noteikšanas algoritmu izstrādē ieguldīts daudz darba un inovatīvu ideju. Tomēr no rezultātu neprecizitātes nav iespējams izvairīties sakarā ar mērījumu kļūdām un citiem gadījuma parametriem. Tādēļ līnijas inspekcijas brigāde, balstoties uz iepriekšējo pieredzi, parasti pieņem, ka

kāda kļūda eksistē, un meklēšanu veic kāda līnijas segmentā. Konkrētos bojājuma apstākļos šī uzminētā kļūdas vērtība attālumam no bojājuma vietas var būt pārāk liela vai pārāk maza. Rezultātā līnijas apgaita prasa vairāk laika, nekā būtu nepieciešams.

Protams, no tā nav iespējams izvairīties, ja iespējamā kļūda, kas saistīta ar aprēķinātu attālumu līdz bojājuma vietai, nav zināma. Statistiskā algoritma sniegtais rezultāts ir attāluma līdz bojājuma vietai varbūtības sadalījums, kuru var interpretēt kā varbūtību, ka konkrēta līnijas segmenta inspekcija būs sekmīga.

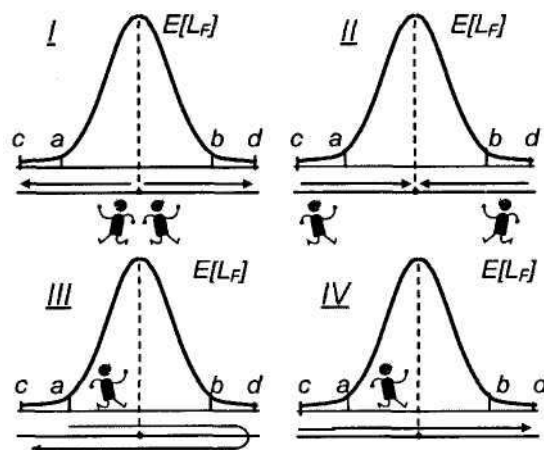


3.2. att. Statistiskā bojājuma vietas noteikšanas algoritma un apgaitas zonas optimizācijas rezultāti

Statistiskais bojājuma vietas noteikšanas algoritms dod jaunas iespējas: ir iespējams noteikt optimālu līnijas apgaitas stratēģiju no laika un izmaksu viedokļa, kā parādīts darbā. Pieņemsim, ka ja bojājums netiek atrasts posmā  $\Delta L$  (3.2. att.), jāapskata visa līnija. Šeit dabiski izriet, ka, ja ir zināma  $\sigma_{LF}$  vērtība, tad ir iespējams noteikt  $\Delta L$ , kas atbilst minimālajām paredzamajām izmaksām saistībā ar bojājuma vietas noteikšanu. Lai to ilustrētu, pieņemsim, ka iegūtajam attāluma līdz bojājuma vietai sadalījumam ir  $\sigma_{LF} = 4\%$  no līnijas garuma. Tādā gadījumā, var parādīt, kā izmaksu matemātiskās cerības minimālā vērtība atbilst ieteicamai apgaitas zonai, kas ir 16% no līnijas garuma.

Iepriekš aprakstītās bojājuma vietas noteikšanas stratēģijas vietā var izvēlēties arī citas stratēģijas. Piemēram, inspekcija var sastāvēt no šādiem trim etapiem: vispirms apgaita notiek salīdzinoši īsā segmentā, pēc tam tiek noteikta plašāka meklēšanas zona un visbeidzot, ja iepriekšējie mēģinājumi bijuši neveiksmīgi, jāveic inspekcija visā līnijā. Joprojām var izmantot aprakstīto izmaksu samazināšanas pieeju, lai atrastu optimālo segmenta garumu. 3.3. attēlā dotās shēmas rāda praksē izmantotās līniju apgaitas stratēģijas.

Atšķirībā no iepriekšējā gadījuma pirms visas līnijas apgaitas mēs izvēlamies pārbaudīt līnijas segmentu  $[cd]$ , kurā ar 99% varbūtību atradīsies bojājuma vieta. Izskaidrojuma vienkāršošanas nolūkos piemēros netiek ņemta vērā nepieciešamība pēc visas līnijas apgaitas, kura visos gadījumos ir vienādi iespējama un laikietilpīga.



3.3. att. Līniju apgaitas stratēģijas: I un II- piedalās divas apgaitas brigādes, III un IV - piedalās viena apgaitas brigāde.

Rezultātā nosaka optimālo elektropārvades līnijas apgaitas stratēģiju. Pie tam dabiski izriet sekojošais:

- II stratēģija ir ievērojami vājāka nekā I stratēģija. Šis variants (II) tiek apspriests tādēļ, ka dažkārt tas tiek izmantots energosistēmu praktiskajā ekspluatācijā.
- III stratēģija ar  $ab = 3\sigma$  ir visefektīvākā tajā gadījumā, ja piedalās viena apgaitas brigāde, arī salīdzinot ar IV stratēģiju, kam bieži tiek dota priekšroka.

Izvēle starp I un III stratēģiju jāizdara atkarībā no tā, kāda būtu līnijas atslēgšanās nozīme visai sistēmai, kā arī no līnijas inspekcijas izmaksām un ātruma: līnijas trases inspekcijai var būt vajadzīgas speciālas iekārtas, ieskaitot helikopterus vai pat alpīnisma piederumus.

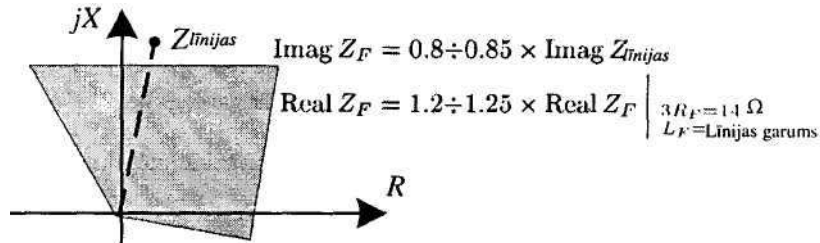
#### 4. Statistiskā pieeja distantaizsardzībā

##### Augstsprieguma elektropārvades līniju distantaizsardzībā

Distantaizsardzībā ir viena no visplašāk izmantotajām metodēm elektropārvades līniju aizsardzībai [3]. Releju distantaizsardzības pamatprincips balstās uz līnijas kompleksa pretestības salīdzinājumu ar kompleksa pretestību līdz bojājuma vietai  $Z_F$ , ko aprēķina, balstoties uz spriegumu un strāvu mērījumiem vietējos terminālos. Ja kompleksa pretestība līdz bojājuma vietai ir mazāka par līnijas komplekso pretestību, tas nozīmē, ka bojājums atrodas uz līnijas un relejs izslēdz līniju no darba (4.1. att.).

Sakarā ar vairāku nekontrolētu parametru ietekmi, kuru lielums īstenībā ir gadījuma skaitlis, piemēram, strāvu un spriegumu mērījumu kļūdas, pretestība bojājuma vietā, sistēmas noslogojums un topoloģija bojājuma rašanās brīdī, kompleksās pretestības vērtējums  $Z_F$ . satur kādu kļūdu  $\Delta Z$ , kas var izraisīt kļūdainu aizsardzības darbību. Releju darbības zonas (4.1. att.) palīdz novērst finansiālus zaudējumus un/vai tehnisku apdraudējumu, kas varētu rasties releju nepareizas darbības rezultātā [22].

Šīs zonas parasti tiek izvēlētas, izejot no pesimistiskākās prognozes [4] attiecībā uz to faktoru kombināciju, kuri ietekmē releja darbības rādītājus, ņemot vērā, ka problēmas izvērtējums ar varbūtības teorijas pielietošanu radītu papildu sarežģītību. Tādējādi, izvēloties darbības zonas, jāpanāk kompromiss starp divām galvenajām aizsardzības prasībām: jutīgumu un selektivitāti; vienlaikus abām šīm prasībām jābūt apmierinātām [25].



4.1. att. Ilustrācija aizsardzības četrstūrveida darbības zonas izvēlei;  $Z_{līnijas}$  ir aizsargājamās līnijas pozitīvās secības kompleksā pretestība.

Parasti darbības zonas garums pa  $X$  asi tiek izvēlēts atkarībā no līnijas parametriem. Kompleksās pretestības vērtības ģeometriskā projekcija uz  $R$  ass ir lielā mērā atkarīga no pieņemtajiem aprēķina apstākļiem, piemēram, pretestības bojājuma vietā un noslodzes pirms bojājuma.

Koeficients 0,8 4.1. attēlā ir bieži lietots [7] drošības koeficients, kas iegūts no novērojumiem praksē. Pieņemtā pretestības bojājuma vietā vērtība un reālas daļas pretestības koeficients 1,2 ir piemēri empīriskiem pieņēmumiem, kuri parasti ierobežo aizsardzības momentānu darbību līdz relatīvi nelielas īsslēguma pretestības gadījumiem, tādējādi nepieļaujot neselektīvas atslēgšanās īsslēguma blakus līnijā dēļ. Tomēr, kā redzams tālāk, aizsardzības darbību varētu uzlabot ar sarežģītāku, bet vienlaikus arī konkrētajiem apstākļiem labāk pielāgotu pieeju.

Energosistēmas parametru stohastiskas dabas vai energosistēmas topoloģijas neparedzēto izmaiņu dēļ, distantaizsardzība var nostrādāt nevēlami. Kā piemēru var minēt nesena pagātnē notikušās daudzās energosistēmu avārijas, kuru rašanos ietekmēja kļūdaina aizsardzības nostrāde [3].

Aizsardzības darbības efektivitātes pieaugums ir iespējams, izmantojot adaptīvo pieeju [4]. Piemēram, adaptīvā aizsardzība, kuras darbība ir atkarīga no kontrolētā procesa parametriem, var izmainīt aizsardzības zonu robežas. Releju adaptīvo īpašību realizācija kļūva iespējama sakarā ar straujo mikroprocesoru



tehnoloģijas attīstību. Turpmāka strauja šīs tehnoloģijas attīstība ļauj paredzēt arvien sarežģītāku procedūru izmantošanu lēmumu pieņemšanai attiecībā uz releju nostrādi vai nenostrādi.

Īpaši jāmin tas, ka kļūst iespējams aizstāt deterministisko pieeju ar izdevīgāko statistisko pieeju, kura prasa Monte-Karlo metodes realizāciju reālā laikā. Šajā darbā apskatīts statistiskās pieejas teorētiskais pamatojums un parādīta tās efektivitāte. Kā piemērs tiek izpētīta pirmās zonas aizsardzības darbība visbiežāk sastopamajam bojājumu veidam - vienfāzes īsslēgumam, pieņemot, ka termināla uzstādīšanas vietā ir zināmi aizsargājamās līnijas strāvas un sprieguma vektori, kas noteikti, balstoties uz analogciparu pārveidošanu un mērījumu signālu apstrādi. Iepriekšējās nodaļās tika piedāvāta statistiskās pieejas pielietošana bojājuma vietas noteikšanai. Šajā sadaļā apskatīta pieejas paplašināšana, parādot principiāli jaunas iespējas aizsardzību jomā.

### Statistiskā pieeja

Attālums līdz bojājuma vietai  $L_F$  un  $R_F$  atkarīgs no gadījuma skaitļiem: strāvu  $I$  un spriegumu  $U$  vektori satur gadījuma kļūdas un ekvivalenta kompleksa pretestība  $Z_{isl}$  sistēmai tālajā elektropārvades līnijas galā ir nezināma.

Līdzīgi kā bojājuma vietas noteikšanā, ņemot vērā mērāmo lielumu fizisko būtību un mērījuma kļūdu salīdzinoši nelielās vērtības, kā arī pieņemot, ka mērījuma kļūdas ir saskaitāmas ar nulles matemātiskās cerības vērtību, var pielietot linearizāciju [1]:

$$\begin{aligned} E[\Phi(I, U, Z_{isl})] &\cong E[\Phi(I_{est}, U_{est}, Z_{isl})], \\ \sigma[\Phi(I, U, Z_{isl})] &\cong \sigma[\Phi(I_{est} + \Delta I, U_{est} + \Delta U, Z_{isl})] \end{aligned} \quad (3)$$

kur

- $\Phi$  ir kāda procedūra attāluma  $L_F$  un  $R_F$  aprēķinām. Procedūrā tiek izmantoti strāvu un spriegumu mērījumi un informācija par kompleksās pretestības  $Z_{isl}$  vērtībām;
- $E(\dots)$  ir matemātiskās cerības vērtība,  $\sigma(\dots)$  ir standarta novirze.

Tiek piedāvāts algoritms, kas ļauj novērtēt matemātiskās cerības  $E[L_F]$ ,  $E[R_F]$  un standarta novirzes  $\sigma[L_F]$ ,  $\sigma[R_F]$  vērtības un balstās uz Monte-Karlo modelējumiem. Šos parametrus var izmantot, lai izdarītu secinājumus par nepieciešamajām aizsardzības darbībām.

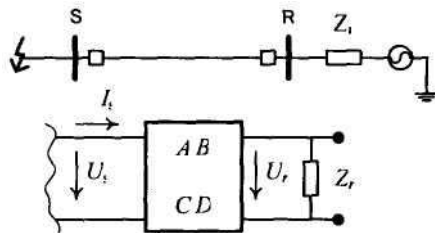
## 5. Pārvides sistēmas stāvokļa statistikas datu vākšana un pielietošana

### Elektropārvides līnijas parametru noteikšana

Šajā nodaļā apskatīti bojājuma vietas noteikšanas un aizsardzības algoritmu veiksmīgas darbības priekšnoteikumi, proti, elektropārvides līnijas modeļa un parametru aprēķins, izejot no pieejamajiem mērījumiem eksploatacijas laikā. Izstrādāti vairāki līnijas tiešsecības pretestības novērtēšanas paņēmieni [19]. Literatūrā [20] aprakstīts interesants darbs par līnijas parametru aprēķināšanu, balstoties uz divpusējiem nesinhronizētiem bojājuma procesu ierakstiem. Vēl viena metode, kam vajadzīgi sinhronizēti mērījumi, piedāvāta darbā [21]. Vērtīgs datu avots energosistēmas modeļa verifikācijai irīsslēgumu procesu ieraksti. Darbā tiek piedāvāti divi jauni algoritmi līnijas parametru aprēķināšanai, no nesinhronizētajiem divpusējiem bojājumu procesu ierakstiem, kas ir ārēji attiecībā pret kontrolējamo līniju, kā arī algoritms attālās sistēmas ekvivalentās kompleksās pretestības statistikas vākšanai.

### Elektropārvides līnijas modelis

Apskatīsim elektropārvides līnijas modeli, kas parādīts 5.1. attēlā. Apakšstacijas  $S$  un  $R$  aprīkotas ar bojājumu reģistratoriem, kas ir mūsdienīgas mikroprocesoru aizsardzības ierīces standarta daļa un var būt arī atsevišķa ierīce. Bojājuma apstākļi tīklā palaiž bojājumu reģistratorus, kuri saglabā spriegumu un strāvu analogciparu pārveidošanas rezultātus. Izmērīto signālu secību komponentes tiek aprēķinātas no fāžu vērtībām, piemēram, izmantojot Furjē transformāciju. Mērījumu atlase līniju galos  $S$  un  $R$  var būt nesinhronizēta.



5.1. att. Elektriskā shēma un ekvivalentā ķēde modelētās sistēmas ārēja bojājuma gadījumā

Vispārējā gadījumā elektropārvides līniju var uzskatīt par četrpolu ar  $ABCD$  pārvides konstantēm, kas nosaka sakarību starp spriegumu un strāvu ieejas un izejas terminālos, šādā veidā [22]:

$$U_S = AU_r + BI_r \quad (4)$$

$$I_S = CU_r + DI_r$$

kur  $U$  un  $I$  ir kompleksie spriegums un strāva. Šī izteiksme ir spēka tiešsecības, apgrieztais secības vai nullsecības parametriem.

### RLC parametru noteikšana

Vispārīgajam līnijas modelim un nesimetriskajam īsslēgumam, kas rodas ārpus līnijas  $SR$ , ekvivalento komplekso pretestību mezglā  $S$  var izteikt šādi:

$$Z_s = \frac{A + BZ_r^{-1}}{C + DZ_r^{-1}}. \quad (5)$$

Pieņemot elektropārvades līnijas  $\pi$ -modeli ar virknes komplekso pretestību  $Z_L$  un paralēlslēguma kompleksām pretestībām  $Z_c$ ,  $ABCD$ , konstantes kļūst šādas:

$$A = D = 1 + \frac{Z_L}{Z_c}, \quad B = Z_L, \quad C = \frac{2Z_c + Z_L}{Z_c^2}. \quad (6)$$

Turpinot pārveidojumus (5), iegūstam:

$$Z_L = \frac{Z_c^2 - \frac{1}{Z_r} Z_c^2 Z_s - 2Z_s Z_c}{-\frac{1}{Z_r} Z_c^2 + \frac{1}{Z_r} Z_c Z_s + Z_s - Z_c}, \quad (7)$$

kur  $Z_s$  un  $Z_r$  var noteikt no strāvas un sprieguma mērījumiem,  $Z_s = \frac{U_s}{I_s}$  un  $Z_r = \frac{U_r}{I_r}$ .

Pilno jaudu, kuru patērē ķēde, var izteikt šādi [22]:

$$U_s I_s^* = (A + BZ_r^{-1}) U_r \cdot (C + DZ_r^{-1})^* U_r^*. \quad (8)$$

No (8) un (6), atdalot līnijas virknes kompleksās pretestības reālo un imagināro daļu un vienkāršošanai apzīmējot  $y = \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_r}$ , ir iespējams ar (7) iegūt vienādojumu sistēmu, pēc kā nosaka  $R_l$ ,  $X_l$ ,  $Z_c$ .

### Ekvivalentās pretestības statistisko datu vākšana

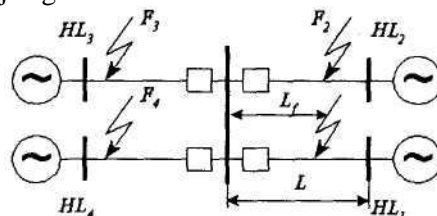
Piedāvātā bojājuma noteikšanas algoritma pielietojumam būtu vajadzīgi ekvivalentās kompleksās pretestības elektropārvades līnijas tālajā nekontrolējamajā galā  $Z_{isll}$  novērtējumi. Parādīsim iespēju novērtēt šo vērtību, veicot mērījumus ārējo pretējā virziena pret aizsargājamo līniju īsslēgumu laikā. Pēc šādu mērījumu sērijas var iegūt statistiskā (empīriskā) sadalījuma likumu.

Apskatīsim tipisko apakšstaciju, kurā ietilpst vairākas elektropārvades līnijas un kuras struktūra parādīta 5.2. Tsslēgums, kurš ir ārējs attiecībā pret aizsargājamo līniju  $HL_1$ , t.i., bojājums  $F_2$  līnijā  $HL_2$ ,  $F_3$  līnijā  $HL_3$ , un  $F_4$  līnijā  $HL_4$ , nodrošina nullsecības un apgrieztās secības strāvu un spriegumu mērījumus  $U_{0l}$

$U_2, I_{01}, I_{21}$  • Tad, ja kontrolējamās līnijas apgrieztās un nullsecības pretestības ir zināmas, sistēmas, kas baro līnijas  $HL_1$  tālo galu, ekvivalento komplekso pretestību  $Z_{isl}$  var novērtēt pēc šāda vienādojuma:

$$Z_L = \frac{Z_c^2 - \frac{1}{Z_r} Z_c^2 Z_s - 2Z_s Z_c}{-\frac{1}{Z_r} Z_c^2 + \frac{1}{Z_r} Z_c Z_s + Z_s - Z_c} \quad (9)$$

kur  $i$  nozīmē nullsecību vai apgriezto secību,  $Z_{iLsp}$  ir līnijas īpatnējā kompleksa pretestība,  $L$  ir līnijas garums.



5.2. att. Tipiskas apakšstacijas struktūra

Jāņem vērā, ka reālajos apstākļos vairākums bojājumu ir arēji attiecība pret apskatāmo līniju, tāpēc būtisko statistisko informāciju var savākt samērā ātri. Kā statistisko datu vākšana, tā arī attiecīgie aprēķini var tikt veikti automātiski.

## Rezultāti

### Līnijas parametru aprēķins

Rezultāti parāda, ka standarta novirze un tāpēc iespējamā kļūda līnijas parametrā ir apgriezti proporcionāla īsslēguma strāvas vērtībai. To var viegli izskaidrot, izanalizējot mērījumu kļūdas. Līnijas kompleksās pretestības aprēķins balstās uz strāvas un sprieguma secības komponentēm, un kļūda fāzes vērtības mērījumā transformējas par secības komponentes kļūdu. Ja bojājums ir attāls, strāvas un sprieguma secības komponentes ir nelielas. Tādējādi, neliela kļūda attiecībā pret fāzes lielumu atspoguļo lielu novirzi secības simetriskā komponentē. Tāpēc, ja sistēmu raksturo nelielas īsslēguma strāvas, līnijas parametri jānosaka no samērā tuvu īsslēgumu ierakstiem.

### Metodes pārbaude ar ekspluatācijas laika veiktiem ierakstiem

Aprakstītā vienkāršotā līnijas parametru aprēķina metode tika pielietota ekspluatācijas laikā iegūtiem ierakstiem, kad īsslēgums noticis blakus esošajā līnijā.

### Ekvivalentas kompleksās pretestības statistikas vākšana

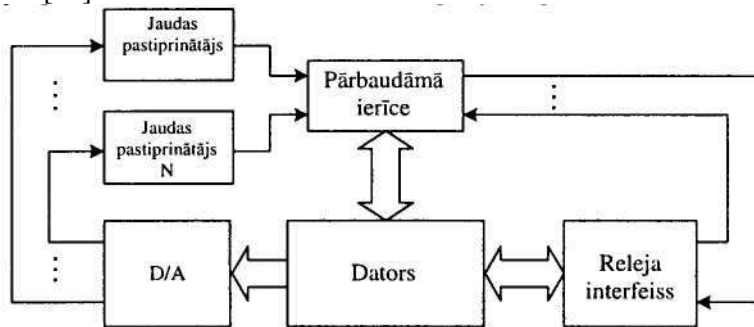
Lai apstiprinātu vienmērīgā sadalījuma likuma izvēli kompleksa pretestībām un pārbaudītu sadalījuma likumu novērtēšanas procedūru, 18 mēnešu laikā tika

veikti mērījumi vienā no 110 kV apakšstacijām, kurā ir četras izejošas elektropārvades līnijas. Darbā ir sniegtas abu kontrolējamo līniju galu kompleksa pretestības histogrammas. Sistēmu pretestību empīriskie sadalījumi un pārejas pretestība bojājuma vietā tika izmantoti, lai precīzāk novērtētu attāluma līdz bojājuma vietas sadalījumu.

## 6. Statistiskā pieeja aizsardzības testēšanā

### Aizsardzības ierīču pārbaudes nepieciešamība

Digitālo tehnoloģiju un instrumentu parādīšanās radīja jaunas kļūdu rašanās iemeslus programmās, algoritmos, kā arī aparatūras konstrukcijā, kā to parāda Bernards un citi [16] un Kezunovičs [17]. Augstāko ticamību pareizai iekārtu darbībai var iegūt, ja digitālās ierīces tiek pārbaudītas pēc to atbilstības specifikācijai, kā arī tiek pārbaudīts, vai tās var izturēt konkrēto darbības vidi. Šajā nolūkā jau kopš 80. gadu sākuma tiek izmantotas ciparu modelēšanas sistēmas. Vienkāršota testēšanas sistēmas konfigurācija redzama 6.1. attēlā; dators kontrolē testēšanas procedūru, kura modelē ieejas strāvu un spriegumu sinusoīdas un aizsardzības iestatījumus, salīdzina testa gadījumam paredzamo un reālo releja nostrādi. Šeit pārbaudāmā ierīce ieejā ar analogciparu pārveidotāju un jaudas pastiprinātāju palīdzību tiek padoti strāvas un sprieguma signāli. Komerciālā datororoerammatūra, kas veic modelēšanu ir Dieeiama nasaulē [14].



6.1. att. Pārbaudes sistēmas konfigurācija

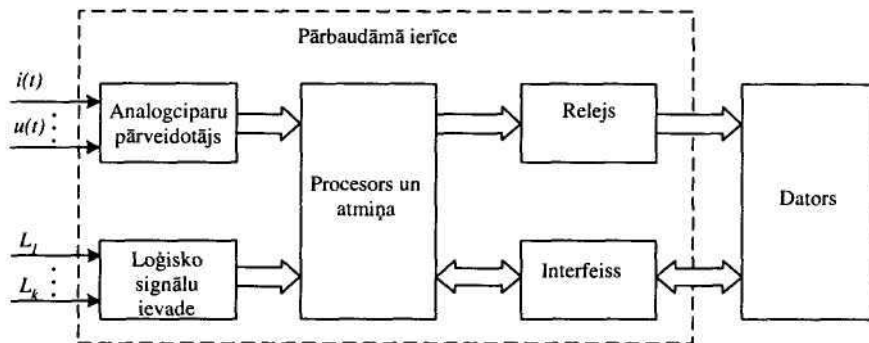
Šīs shēmas galvenās iezīmes ir šādas:

- Dators tiek izmantots gan, lai modelētu energosistēmu, gan lai kontrolētu testējamās ierīces nostrādes atbilstību specifikācijai.
- Tiek izmantoti jaudas pastiprinātāji, kuri rada lielas izmaksas, kā arī nosaka testēšanas sistēmas lielus izmērus. Liels kanālu skaits izraisa divu veidu grūtības testēšanas shēmas izveidē:
  - Katram kanālam nepieciešams dārgs un masīvs jaudas pastiprinātājs;
  - šādā shēmā nepieciešamo testa gadījumu skaits ir tieši mērā atkarīgs no kanālu un iestatījumu skaita.

Henvils un Mūnijs [18] apraksta pārbaudes sistēmas struktūru, kurā neietilpst pastiprinātāji. Ierīcēm vajadzētu būt ar speciāliem zema enerģijas ieejas kanāliem, kurus šī sistēma pārbauda [18]. Kanāli tiek izmantoti signālu ievadīšanai analogā formā. Šajā nodaļā ieteikta jauna pārbaudes metode, kurā pamatā izmantoti tikai ciparu signāli. Tādējādi, ir iespējams un ir racionāli pielietot statistisko pieeju pārbaudei un izmantot Montē-Karlo metodi testa gadījumu ģenerēšanai.

### Jaunā testēšanas metode

Jaunās pārbaudes sistēmas shēma, kura izmanto digitālo tehnoloģiju sniegtās priekšrocības, parādīta 6.2. attēlā. Galvenā prasība šai struktūrai ir pārbaudāmās ierīces spēja uzturēt sakarus ar ārējo datoru, kā arī iespēja uzglabāt iekšējā atmiņā ieejas signālu sinusoīdas.



6.2. att. Aizsardzības ierīces ieteicamā struktūra

Tādējādi, lai pārbaudītu programmatūru un ierīces aparatūru, nepieciešamie un pietiekamie noteikumi ir šādi:

- ierīces spēja uzglabāt atmiņā ieejas signālu sinusoīdu raksturlielnes;
- ierīces spēja ignorēt ieejas signālus testēšanas režīmā, tā vietā izmantojot atmiņā uzglabātos datus;
- salīdzināt "ideālās" un testējamās ierīces nostrādi, izmantojot ierīces nostrādes datorsimulāciju kā "ideālo".

Ja tiek pārbaudīti tikai digitālie signāli, tad atdalītājtransformators, analogie zemfrekvenču filtri (gludinātāji) un analogciparu pārveidotājs tiek apieti. Katru no šiem elementiem (vai arī visu ķēdi) var testēt, izmantojot stipri vienkāršotu tradicionālo procedūru un iekārtas. Bez tam ieejas ķēdes elementu darbību var pārbaudīt, izmantojot energosistēmas strāvas un spriegumus.

### Testēšanas procedūra un testa gadījumu skaits

Aizsargreleju testus var iedalīt trīs kategorijās, proti: pieņemšanas pārbaudes, pārbaudes, palaižot ekspluatācijā, kā arī tehniskās apkopes pārbaudes [16], [17]. Bez tam darbības nodrošināšanas nolūkā parasti tiek izmantoti vēl vairāki pārbažu tipi: stacionārā režīma, dinamiskās un pārejās režīma pārbaudes [18]. Lai realizētu katru no šīm testu kategorijām un tiem, var izmantot vai nu deterministisko, vai statistisko pieeju.

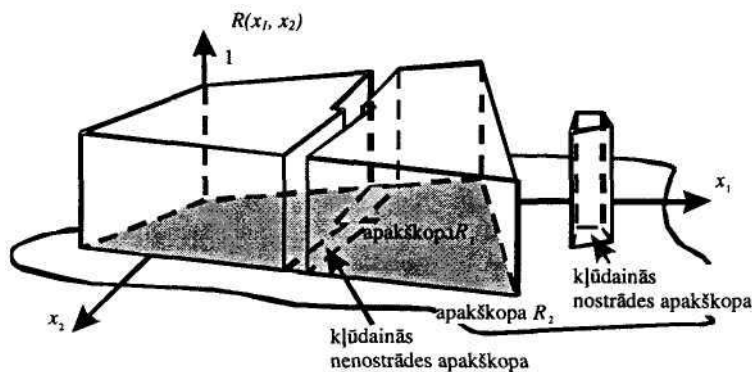
Noformulēsim pārbaudes problēmu no daudzdimensiju integrāla aprēķina viedokļa, kā tas parādīts grāmatā "Modēm Mathematics for the Engineer" [1], lai salīdzinātu šo abu fundamentālo pieeju racionalitāti. Šim nolūkam ieviesīsim  $\gamma$ -dimensiju atbildes funkciju  $R$  un "ideālā" releja definīciju. Funkcija  $R$  apraksta signāla stāvokli pārbaudāmās ierīces izejā:

$$R = R(x_1, \dots, x_n, l_1, \dots, l_k, s_1, \dots, s_e) \quad (10)$$

kur  $n$  - kontrolējamo analogo signālu parametru skaits  $\underline{X}$  (vienkāršākajā gadījumā vienāds ar mērījumu amplitūdu un leņķu skaitu),  $k$  - kontrolējamo loģisko signālu skaits,  $\underline{L}$ ,  $e$  - releja iestatījumu  $\underline{S}$  skaits,  $\gamma = n + k + e$ .

Tagad pieņemsim, ka  $\gamma$ -dimensiju parametru  $\underline{X}, \underline{L}$  un iestatījumu  $\underline{S}$  kopu var sadalīt divās apakškopās, kurām nav kopīgu elementu (6.3. att.):

- Apakškopa  $R_1$ , kura atbilst releja nostrādes prasībām.
- Apakškopa  $R_2$ , kura atbilst releja nenostādes prasībām.



6.3. att. Divdimensiju reakcijas funkcijas piemērs

Bez tam pieņemsim, ka parametru  $x$ ,  $l$  un iestatījumu  $s$  sadalījuma funkcijas  $F_1$  un  $F_2$  ir zināmas gan kopai  $R_1$ , gan  $R_2$ . Ideālais relejs tiek definēts šādi:

$$\begin{aligned}
 R &= 1, \text{ ja un tikai ja } \underline{x}, \underline{l}, \underline{s} \in R_1 \text{ un} \\
 R &= 0, \text{ ja } \underline{x}, \underline{l}, \underline{s} \in R_2.
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Nemot vērā (10) un (11), mēs varam definēt nostrādes varbūtības ideālajai ierīcei:

- $P_1$  - ierīces nostrādes varbūtība gadījumā, kad tai ir jānostrādā (vienāda ar kļūdainas nenostērādes apgriezto varbūtību)

$$P_1 = \int_{R_1} dF_1(\underline{x}, \underline{l}, \underline{s}) = 1.
 \tag{12}$$

- $P_2$  - ierīces nostrādes varbūtība gadījumā, kad tai nav jānostrādā (kļūdainās nostrādes varbūtība).

$$P_2 = \int_{R_2} dF_2(\underline{x}, \underline{l}, \underline{s}) = 0,
 \tag{13}$$

Reālām pārbaudāmām ierīcēm, ja programmatūra vai aparatūra satur kļūdas vai neprecizitātes, atbildes funkcija atšķiras no ideālās funkcijas:  $R_{RE} \neq R_{ideal}$ . Tādējādi attiecībā uz pārbaudāmo releju var apgalvot:  $P_1 \leq 1, P_2 \geq 0$ .

Tādējādi pārbaudāmās ierīces atbilstību specifikācijai var pārbaudīt, ar pietiekamu precizitāti novērtējot varbūtības  $P_1$  un  $P_2$ .

Saskaņā ar (12)-(13), varbūtības  $P_1$  un  $P_2$  var aprēķināt, izmantojot Lebeģa-Stiltes integrāli, kā parādīts [1]. Ir divas pamata pieejas (12) un (13) tipa integrāļu aprēķināšanai:

- klasiskā jeb parastā skaitliskās integrēšanas metode [1], saskaņā ar kuru integrēšanas telpa tiek sadalīta daudzos vienādos kubos. Šajā gadījumā aprēķina rezultātu kļūda ir lielā mērā atkarīga no kubu skaita;
- Monte-Karlo metode; šajā gadījumā aproksimācijas kļūdu nosaka testa gadījumu skaits.

Sniegts nepieciešamo aprēķinu salīdzinājums klasiskās un Monte-Karlo metodes pielietojumam. Mūsdienu iekārtām, ar kuru palīdzību tiek kontrolēti vairāki desmiti strāvu un spriegumu un kurās pielietotas vairāki simti iestatījumu, ieteiktās metodes priekšrocības kļūst acīmredzamas un noteicošas. Vēl vairāk, var apgalvot, ka klasiskās pieejas izmantošana nevar garantēt pārbaūu pietiekamību mūsdienu iekārtām.

## 7. Publikāciju kopsavilkums

Sniegts īss publikāciju apraksts, kā arī raksturots to zinātniskais ieguldījums.



## 8. Secinājumi un nākotnes darba perspektīva

Darba galvenie secinājumi un ieguldījums īsumā ir šādi:

- Bojājuma vietas noteikšanas algoritmu, kas spēj noteikt attāluma līdz bojājuma vietai matemātiskās cerības vērtību, kā arī iespējamās bojājuma vietas noteikšanas kļūdas robežas, var izstrādāt, ņemot vērā mērījumu kļūdu un energosistēmas parametru stohastisko raksturu. Parādīta šī algoritma vispārējā pielietojamība dažādiem bojājumu veidiem, kā arī tā spēja darboties bez nepieciešamības identificēt bojāto fāzi. Vienpusējo un divpusējo algoritmu koordinēta darbība ļauj paaugstināt bojājuma vietas noteikšanas precizitāti un drošumu.
- Statistiskais bojājuma vietas noteikšanas algoritms ļauj optimizēt līnijas apgaitas stratēģiju, kā rezultātā ir iespējams saīsināt apgaitas laiku un/vai laiku, kad līnija ir izslēgta no darba.
- Distantaizsardzības darbību iespaido virkne stohastisko parametru, kas var izraisīt kļūdainu nostrādi vai kļūdainu nenostādi, kā arī nevajadzīgu bojājuma atslēgšanas aizkavēšanos. Statistiskās pieejas pielietošana distantaizsardzībā, kas ņem vērā parametru nenoteiktību, paver jaunas iespējas lēmumu pieņemšanā par releju vēlamu darbību. Modelēšana apstiprina piedāvātās metodes drošumu un augsto efektivitāti.
- Elektropārvades līniju parametrus var novērtēt, balstoties uz īsslēgumu procesu ierakstiem. Precīzu parametru esamība tiešā veidā ietekmētu bojājuma vietas noteikšanas un aizsardzības algoritmu darbības uzlabošanu.
- Sistēmas ekvivalentās kompleksās pretestības aprēķināšana, balstoties uz mērījumu ierakstiem ārēju īsslēgumu gadījumā, nodrošina statistiskā bojājuma vietas noteikšanas un aizsardzības algoritma adaptāciju konkrētajiem līnijas ekspluatācijas apstākļiem. Tādējādi ir iespējams precīzāk novērtēt attāluma līdz bojājuma vietai sadalījumu.
- Modernās aizsardzības ierīces ir sarežģītas, un tām nepieciešama droša testēšanas procedūra. Ieejas ķēžu (ieejas transformatori, kropļojumnovērses filtri un analogciparu pārveidotāji) pārbaudes ir iespējams vienkāršot, savukārt programmatūras darbību un iestatījumus var pārbaudīt, izmantojot datorsimulācijas un ciparu signālus. Statistiskā pieeja testa gadījumu ģenerēšanai ļauj samazināt izmaksas, kā arī ļauj gūt augstāko pārlicību par pārbaudes pietiekamību.

Perspektīvā darbs būtu veicams šādos virzienos:

- Ieteikto statistisko bojājuma vietas noteikšanas un distantaizsardzības algoritmu attīstība, paredzot paralēlo mij inductivitāšu līniju ietekmi.
- Energosistēmas parametru korelāciju analīze, piemēram, nullsecības un apgrieztās secības sistēmas ekvivalentām pretestībām. Šo korelāciju ievērošana varētu samazināt iegūtā attāluma līdz bojājuma vietai sadalījuma standarta novirzi gan aizsardzības, gan bojājuma vietas noteikšanas algoritmiem.
- Nepieciešams vairāk praktisku rezultātu par parametru statistikas noteikšanu.

Pētījumi par apgaitas stratēģijas optimizāciju reālu bojājumu apstākļos. Interesants un vērtīgs darbs varētu būt pētījumi par ieteiktās pieejas izplatību uz distantaizsardzības otro un augstākām zonām.

Nozīmīgs pētījumu virziens varētu būt distantaizsardzības lēmumu loģikas izstrāde attiecībā uz izslēgšanu vai atstāšanu darbā, izmantojot ieteikto algoritmu noteiktus sadalījumus.

## 9. Literatūra

- [1] Korn G., Korn T. Mathematical handbook, - CITY: McGraw-Hill Book Company, 1968, -PAGES . Edited by E.F. Beckenbach, 1956, "Modern Mathematics for the Engineer", McGraw-Hill Book Company.
- [2] Anderson P. M., Analysis of Faulted Power Systems // IEEE/Wiley Press.-1995
- [3] De La Ree J., Yilu L, Mili L, Phadke A.G., DaSilva L, Catastrophic failures in power systems: causes, analyses, and countermeasures // Proceedings of the IEEE. - 2005.- Vol.93, Iss.5, May 2005
- [4] Horowitz S.H., Phadke A.G. Boosting Immunity to Blackouts // Power and Energy Magazine, IEEE. - 2003. - Volume 1, Issue: 5, Sep - Oct.
- [5] Takagi T, Yamakoshi Y., Yamuaura M., Kondow R., Matsushima T, Development of a New Type of Fault Locator Using One Terminal Voltage and Current Data//IEEE Trans. - 1982.- vol. PAS-101, No 8, pp. 2892-2898, Aug.
- [6] Tamronglak S., Horowitz S.H., Phadke A.G., Thorp J.S. Anatomy of power system blackouts: preventive relaying strategies // IEEE Transaction on Power Delivery.- 1996 .-Vol. 11. No. 2, April.
- [7] Zhang N, Kezunovic M., Implementing an Advanced Simulation Tool for Comprehensive Fault Analysis // 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition. -15-18 Aug. 2005.
- [8] Takagi T, Yamakoshi Y., Yamuaura M., Kondow R., Matsushima T, Development of a New Type of Fault Locator Using One Terminal Voltage and Current Data //IEEE Trans. - 1982. - vol. PAS-101.- No 8. - Aug. - pp. 2892-2898.
- [9] Eriksson L, Saha M., Rockfeller S.D., An Accurate Fault Location with Compensation for Apparent Reactance in the Fault Resistance Resulting from Remote-end infeed//IEEE Trans, on PAS.-1985.- PAS-104 .- No 2.
- [10]Novosel D., Hart D.G., Saha MM., Gress S. Optimal fault location for transmission system //ABB Review.-1994.- 8 .-pp. 20-27.
- [11]Aggarwal R.K., Coury D.V., Johns A.T., Kalam A., A Practical Approach to Accurate Fault Location on Extra High Voltage Teed Feeders // IEEE Trans, on Power Delivery.-1993 .- vol. 8.- No. 3 .- Jul.

- [12]Lundqvist B., Kronander H., Mackrell A.J., The Integration of Protection, Monitoring. Control and Communication functions in modern Electrical HV Installations //Developments in Power System Protection .- 1997.- No 434 .-1EE.- 25-27th March.
- [13]Odmansson E. and Ohlen C, Integrated information systems, protection, substation control, network management. Available solutions on the market // IEEE Stockholm Powertech.-1995.
- [14]Santoso, N.I., Avins, J.Y., Real-time software testing for microprocessor-based Protective Relays //IEEE Transactions on Power Delivery .- July 1994.- Vol. 9, No. 3, pp. 1359-1367.
- [15]Redfern, M.A., Walker, E.P., Power system simulation for the testing of protective equipment //Automatic Testing Conference, Brighton. -1977.
- [16]Bernard, P., Erhard, P., Fauquemberque, P., "Morgat" a Data processing program for testing transmission line protective relays // IEEE Trans. Power Delivery.- Oct. 1988.- Vol. 3. - pp. 1419-1426.
- [17]Kezunovic, M., Advances in digital simulator developments for protective relay testing//ICPST Beijing China, -1994.
- [18]Henville, C.F., Mooney, J.B., Low level testing for protective relays // IEEE CCECE'96.-1996.- 724-728.
- [19]Zarco P., Exposito A.G., Power system parameter estimation: a survey // Power Systems.- IEEE Transactions on .- 2000.- Volume 15.- Iss. /.- Feb. 2000.- Page(s): 216 - 222
- [20]Liao Y., Elangovan S., Unsynchronised two-terminal transmission-line fault-location without using line parameters // Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings.- 2006.- vol. 153 .- issn. 1350-2360 .- 639-643.
- [21]Chen C.S., Liu C.W., Jiang J.A., A new adaptive PMU based protection scheme for transposed / untransposed parallel transmission lines // IEEE Trans. On Power Delivery .- 2002 .- vol. 2 .- 2002 .- 201-212;
- [22]Atabekov G.I. Distant approach in long power transmissions protection, Akademija Nauk Armjanskoj SSR, 1953 (in Russian).
- [23]Jakimec I.V., Narovljanski A.V., Ivanov LA., Determination of Fault Location on Transmission Line based on Power Flow's Measurement // Electrichestvo .-1999.- No.5.-pp. 5-9(inRussian).
- [24] Korobeynikov A., Panasyuk I, Semergej N., Sauhata A. et al, The Implementation Experience of the Microprocessors-based Indicators and Digital Recorders for Fault Location Tasks on Power Transmission Lines // in Proc.70 years of ORZAUM: Topical Problems of the Protective Relaying, Emergency Automation, Stability and System Modelling Scientifical-Practical Conf. -2001.- Moscow (in Russian).
- [25]Horowitz S. H., Phadke A.G., Power system relaying //Research Studies Press ltd.