

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Mārtiņš Silarājs
Doktora studiju programmas „Enerģētika” doktorants

**RELEJASARDZĪBAS UN AUTOMĀTIKAS
KOMPLEKSU PĀRBAUDES METODES UN
LĪDZEKĻI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. ing., profesors
A.Sauhats

RTU Izdevniecība
Rīga 2012

Silarājs M. Relejaizsardzības un automātikas kompleksu pārbaudes metodes un līdzekļi.
Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU, 2012.– 32.lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Promocijas padomes P-05 (Enerģētika un Elektrotehnika) 2012. gada 2.jūlija protokolu Nr.1.

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 22.novembrī 15.00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un Elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, 117 telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Vladimirs Čuvičins
RTU EEF Enerģētikas institūts

Vadošā pētniece, Dr.sc.ing. Diāna Žalostība
RTU EEF Enerģētikas institūts

Ģenerālā direktora vietnieks zinātnes jautājumos
Dr.sc.ing. Dmitrijs Ļubarskis
a/s „Institūts „Energosetproject” (Krievija)

APSTIPRINĀJUMS

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

Mārtiņš Silarājs.....(paraksts)

Datums

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, noslēgumu un rekomendācijas nākotnes darbam, kā arī literatūras sarakstu. Darba kopējais apjoms ir 131 datorsalikuma lappuses. Darbā iekļautas 2 tabulas un 58 attēli. Literatūras sarakstā iekļauts 88 izmantotās literatūras avots.

TĒMAS AKTUALITĀTE

Elektriskā enerģija pēdējos 100 gados kļuva par mūsdienīgas civilizācijas pamatu. Tā kā elektriskā enerģija ir viegli pārvadāma un pārveidojama, tad tās pielietojums ir ļoti plašs, salīdzinot ar citiem enerģijas veidiem. Patērētāju nodrošināšanai ar elektrisko enerģiju veido energosistēmas, kuras sastāv no elektriskās enerģijas ražošanas, pārvades un sadales uzņēmumiem. Laiku pa laikam energosistēmās rodas nenormāli vai avārijas darba režīmi, daudzi no kuriem sākās ar īsslēgumiem kādā no energosistēmas elementiem. Īsslēgumu novēršanai un bojāto sistēmas elementu atvienošanai, nepieciešams izveidot ātri reaģējošas un no cilvēka neatkarīgas aizsardzības sistēmas, kuru reakcijas laiks būtu mērāms sekundes simtdaļās. Neatkarīgas aizsardzības sistēmas izveide energosistēmai ir ilgstošs un sarežģīts [2,3] process, kura pamatā tiek izmantoti relejaizsardzības un automātikas (RA un A) kompleksi ar uzdevumu, rodoties bīstamiem režīmiem, pieņemt korektu lēmumu par bojāta energosistēmas elementa atslēgšanu.

RA un A izpilda ļoti svarīgu un atbildīgu uzdevumu. Šo iekārtu nekorekta darbība var izsaukt milzīgas ekonomiskus un sociālus zaudējumus, tādēļ, jau daudzus gadus RA un A pilnveidošanai, drošuma paaugstināšanai, visā pasaulē tiek pievērsta augsta uzmanība, tiek vēltas konferences un simtiem zinātnisku publikāciju. Lielu ieguldījumu RA un A attīstībā, to drošuma paaugstināšanai ienesa Latvijas un ārzemju zinātnieki: Venjamins Fabrikants, Jānis Putniņš, Voldemārs Putniņš, Antans Sauhats, Kārlis Briņķis, Vilnis Krēsliņš, Vladimirs Čuvičins, Jānis Rozenkrions, Aleksejs Fedosejevs, Jānis Bubenko, Gorans Andersons, Mladens, Kezunovičs u.c. RA un A aparatūru ražo plaši pazīstamas visas pasaulē slavenas kompānijas: ABB, Siemens, Alstom, General Electric, Sneider Electric, Hitachi u.c. Mūsdienās RA un A iekārtu un sistēmu tehniskās pilnības un drošuma līmenis ir sasniegts ļoti augsts, bet arī šodien, kā rāda statistika, notiek iekārtu atteices, rodas atbilstoši zaudējumi un vēlme paaugstināt RA un A kvalitāti, un drošumu paliek aktuāla.

Veidojot energosistēmas RA un A ļoti svarīga loma ir sekojošām energosistēmas īpatnībām:

1. Sistēmas apmēri, kuros iekļaujas miljoni kopīgi darbojošos objektu, kā arī teritoriālā izplatība. Var apgalvot, ka RA un A iekārtu skaits pārsniedz primāro (elektropārvades līnijas, generatori, transformatori u.c.) skaitu. Vienlaicīgi RA un A iekārtas, tā pat kā primārās, var atteikt un izsaukt liela mēroga avārijas.
2. Struktūras un parametru nenoteiktība, gadījuma rakstura faktoru ietekme;
3. Attīstības dinamiskums. Energosistēmas nepārtraukti attīstās [4]. Tiek būvēti jauni enerģijas avoti, elektropārvades līnijas, tiek pieslēgti jauni enerģijas patērētāji. Tādēļ RA un A jābūt spējīgām pielāgoties jaunajiem darba apstākļiem;
4. Energosistēmas un tās vadības kapitālietilpība. RA un A jābūt saprātīgi lētai un spējīgai pildīt paredzētās funkcijas desmitiem gadu garumā;
5. RA un A darba apstākļi. Daudzi energoobjekti, kas ražo vai pārvada ievērojamas jaudas, strādā intensīvā elektromagnētiskā lauka apstākļos, līdz ar to, nepieciešams rēķināties ar traucējuma avotiem. Samērā smagi ir ekspluatācijas apstākļi (temperatūras režīms, mitrums, vibrācijas u.c.)

Nosaukto īpatnību ietekmes rezultātā var noformulēt pamatprasības RA un A:

- Drošums;
- Tehniskā efektivitāte;
- Ekonomiska efektivitāte;
- Spēja darboties mainīgos režīmos un apstākļos.

RA un A iekārtām noteikto prasību ievērošanai ir jāveic to pārbaudes izstrādes, ieviešanas un ekspluatācijas posmos. Veicot RA un A darbības statistisko datu analīzi redzams, ka augstākminēto prasību izpilde tiek nodrošināta 95÷98% gadījumū. Relejaizsardzības pareizai

ekspluatācijai, tiek izstrādātas pārbaudes metodes un līdzekļi, kuru uzdevums ir noteikt relejaizsardzības atteikumu pirms nenormāla režīma rašanās energosistēmā, kā arī pēc iespējas precīzāk norādīt uz bojāto elementu.

Pēdējos divdesmit gados ir vispārpieņemts, radot drošas, ekonomiskas un tehniski pilnīgas pretavāriju sistēmas, izmantot mikroprocesoru elementu bāzi. Mikroprocesoru tehnikas izmantošana paver jaunas iespējas izveidojot kompleksas, tehniski pilnīgas, vienotā sistēmā strādājošas relejaizsardzību (RA) un pretavārijas automātikas (PA) iekārtas. Šajā virzienā nodarbināti daudzi pētnieki, pieejamas tūkstošiem publikāciju. Acīmredzama ļoti strauja aparatūras un programmatūras līdzekļu attīstība. Energosistēmu ekspluatācijas praksē strauji ienāk jauna tehnika. Salīdzinot Baltijas valstu RA un A tehnikas stāvokli ar situāciju rūpnieciski attīstītājās valstīs var konstatēt ievērojamu atpalikšanu kā pielietojumos, tā arī , īpaši šo sistēmu ražošanā. Pasaules vadošās elektrotehniskās firmas (ABB, Siemens, Toshiba, General Electric) 80-to gadu vidū bija uzsākušas daudzu RA un A mikroprocesoru iekārtu sērijveida ražošanu. Šādu ierīču priekšrocības bija apstiprinātas ar ekspluatācijas pieredzi. Baltijas valstu enerģētikas praktiskās vajadzības, ekonomiskais stāvoklis, kā arī radušās iespējas izmantot vismodernākos mikroprocesoru elementus bija priekšnoteikums praktiskas ievirzes uzdevumam: novest pētījumus un izstrādes līdz līmenim, kas nodrošina RA un A sistēmu ražošanu Latvijā , kā arī to konkurētspēju Latvijas un kaimiņvalstu energosistēmās.

Konkurentspējas nodrošināšana ir apgrūtināta sekojošu galveno iemeslu dēļ:

1. RA un A iekārtu ražošana notiek izmantojot visjaunākās tehnoloģijas, kā arī slaveno un jaudīgo firmu iespējas;
2. Tiek nodrošināts augsts aparatūras drošuma un citu tehnisko radītāju līmenis;
3. RA un A ekspluatācijas atvieglošanai ir piedāvāta virkne papildus tehnisko līdzekļu.

Vienlaicīgi, salīdzinoši augsts RA un A terminālu cenu līmenis un programmatūru cenu īpatsvars rada vēlmi mēģināt izstrādāt un sākt ražot RA un A terminālus uz mikroprocesoru bāzes Latvijā. Plānojot ražošanu, jāņem vērā būtiskas atšķirības iekārtu cenās, ekspluatācijas un ražošanas apstākļos. Izejot no pieprasījuma Baltijas valstīs, piedāvāto iekārtu cenu līmeņa un ražošanas mazo firmu apstākļos iespējām pievilcīgāk izskatās augstsprieguma līniju un objektu RA un A izstrāde. Dotais darbs veltīts dažu tādu uzdevumu un problēmu risināšanai, kā arī universālas, piemērotas augstsprieguma (110-330 kV) RA un A uzdevumu realizācijai, iekārtas struktūrai un tās testēšanas algoritmiem.

DARBA MĒRĶIS UN ATRISINĀTIE UZDEVUMI

Promocijas **darba galvenais mērķis** ir Baltijas valstu energosistēmu drošuma un efektivitātes līmeņa paaugstināšana.

Izvirzīta mērķa sasniegšanai darbā atrisināti šādi **galvenie uzdevumi**:

1. Veikta Latvijas energosistēmas pārvades daļas relejaizsardzību funkcionēšanas statistikas analīze;
2. Veikts pārbaudes metožu un aparatūras apskats;
3. Veikta RA iekārtu, un sistēmu sintēzes posmu un uzdevumu analīze;
4. Sintezēta piemērota testēšanai un pieprasīto Baltijas valstīs relejaizsardzību uzdevumu realizācijai termināla struktūra;
5. Izstrādāta un realizēta RA un A virtuālo pārbaudžu metode;
6. Izstrādāta un realizēta izmantojamo relejaizsardzību nolūkos optisko sakaru kanālu pārbaudžu iekārta;
7. Sintezēta un realizēta augstsprieguma līniju kompleksā relejaizsardzības un automātikas iekārta.

IZVIRZĪTĀ MĒRĶA UN UZDEVUMU ATRISINĀŠANAI, IZMANTOTĀS ŠĀDAS PĒTĪJUMA METODES

1. Matemātiskas statistikas un Monte-Karlo metodes.
2. Promocijas darba uzdevumu risināšanai tika izmantota energosistēmu elektromehānisko procesu modelēšanas programmatūra EUROSTAG , reālo avārijas procesu digitālo oscilogrammu ieraksti un aizsardzību testēšanas iekārtas FREJA un OMICRON..
3. Pētījumiem tika izveidota relejaizsardzību terminālu testēšanas specializēta programmatūra .
4. Globālas pozicionēšanas sistēmas funkcijas ģeogrāfiski attālināto elementu kontroles sinhronizācijas nolūkos.

PROMOCIJAS DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

1. Apkopoti Latvijas energosistēmas relejaizsardzību un automātikas funkcionēšanas dati.
2. Izstrādāta jauna metodika sarežģītu relejaizsardzību un automātikas terminālu pārbaudei.
3. Sintezēta jauna, piemērota testēšanai relejaizsardzību un automātikas terminālu struktūra.
4. Sintezēta relejaizsardzību un automātikas sakaru kanālu testēšanas iekārta.
5. Veikta distantaizsardzību pārbaude sarežģītu elektromehānisku procesu apstākļos.

PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

Promocijas darba praktiskā nozīme izpaužas sekojoši:

1. Piedāvāto relejaizsardzību, automātikas terminālu struktūru un jauno pārbaudes metodiku var pielietot daudzām sintezējamām iekārtām, kā arī terminālu drošuma līmeņa paaugstināšanai.
2. Piedāvāts termināls, kurš realizē augstsprieguma līniju komplekso aizsardzību, izgatavots un tiek pārbaudīts Latvijas energosistēmā. Sintezētā, pārbaudītā un izgatavotā termināla struktūra nodrošina augstsprieguma līniju RA un A komplekso uzdevumu atrisināšanu. Eksperimenti un ekspluatācijas pieredze apliecina pieņemto risinājumu efektivitāti un pareizību.
3. Izstrādātā virtuālās testēšanas metodika un programmatūra metodika var tikt pielietota esošo relejaizsardzības elementu drošuma, ātrdarbības un selektivitātes pārbaudei.
4. Izstrādāta virtuālās testēšanas metodika pielietota Eiropas kopienas finansēto projektu PEGAS un ICOEURE izpildei.
5. Sintezēta aparatūra un programmatūra ātrdarbīgo sakaru kanālu pārbaudei. Aparatūra izgatavota un izmantota AS „Latvenergo” objektos.

AIZSTĀVĒŠANAI IZVIRZĪTAS PAMATNOSTĀDNES

1. Pierādīta lietderība un priekšrocības relejaizsardzību, un automātikas terminālu testēšanā statistiskās pieejas un Monte-Karlo metodes izmantošana.
2. Sintezēta un pārbaudīta ar papildus ciparu ieejas interfeisu testēšanai piemērota relejaizsardzību un automātikas terminālu struktūra.
3. Sintezēta un pārbaudīta GPS funkcijas izmantojoša sakaru kanālu pārbaudes iekārtas struktūra, savākti un apkopoti sakaru kanālu pārbaudes rezultāti, un izstrādātas rekomendācijas to izmantošanai.

4. Uz programmatūras EUROSTAG bāzes, sintezēti relejaizsardzību un automātikas pārbaudes aparatūras komplekss un programmatūra. Komplekss var būt izmantots RA un A pārbaudei energosistēmu elektromehānisko pārejas procesu gaitā.

PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

Zinātniskie rezultāti paziņoti starptautiskās konferencēs:

1. The 2nd International Conference on ELECTRICAL and CONTROL TECHNOLOGIES ECT-2007 – no 3. līdz 4. maijam 2007. gadā, Kauņa, Lietuva.
2. The 8th IEE International Conference on DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION – no 5. līdz 8. aprīlim 2004. gadā, Amsterdama, Nīderlande.
3. The 11th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE/PEMC 2004, no 2. līdz 4. septembrim, Rīga, Latvija.

PUBLIKĀCIJAS

Promocijas darba rezultāti aprakstīti šādos rakstos:

1. A. Utāns, A. Sauhats, L. Leite, M. Silarājs. „Experimental Testing of the Quality of Relay Protection Communication Channels”. Scientific proceedings of Riga Technical University. Rīga, 2010.
2. A. Sauhats, A. Utāns, M. Silarājs. “Sarežģīta relejaizsardzības un automātikas termināla uz mikroprocesoru bāzes automatizēta pārbaude”. Scientific proceedings of Riga Technical University. Rīga, 2007.
3. M. Silarājs, A. Utāns, L. Leite, A. Sauhats. „[Multifunctional Relay Protection Device for Power Transmission Lines LIDA](#)”. The 2nd International Conference on Electrical and Control Technologies, ECT-2007, Kaunas, 2007.
4. A. Sauhats, M. Bockarjova, A. Dolgicers, M. Silarājs. „New Method for Complicated Automation Systems Simulation Test”. EPE-PEMC, Rīga, 2004.
5. A. Sauhats, M. Bockarjova, A. Dolgicers, M. Silarājs. „New Method for Complicated Automation Systems Simulation Test”. THE IEE Developments in Power Systems Protection, Amsterdam, 2004.
6. A. Sauhats, A. Utāns, L. Leite, M. Daņilova, A. Vasiļjevs, M. Silarājs. „THE MULTIFUNCTION TERMINAL OF RELAY PROTECTION AND ANTIEMERGENCY AUTOMATION”. Scientific proceedings of Riga Technical University. – 2003. – Vol. 4. – Power and Electrical Engineering No. 8. – Riga Technical University, Latvia (in Latvian).

PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, darbs satur ievadu, 4 nodaļas, noslēgumu, kā arī literatūras sarakstu. Darba kopējais apjoms ir 131 datorsalikuma lappuses. Darbā iekļautas 2 tabulas un 58 attēli. Literatūras sarakstā iekļauti 86 izmantotas literatūras avoti.

Pirmajā nodaļā veikta relejaizsardzības atteikumu analīze, apkopoti statistikas dati par relejaizsardzības darbību Latvijas energosistēmas pārvades tīklā. Analizētas esošās pārbaudes metodes un līdzekļi.

Otrā nodaļā vēltīta virtuālo pārbaūžu metodei. Pārbaūžu veikšanai piedāvāts izmantot virtuālo pārbaūžu un Monte-Karlo metode kopā ar energosistēmu normālo un avārijas režīmu

programmatūrām, papildinātām ar nepieciešamiem datu formāta izmaiņas blokiem. Aplūkota speciāla testēšanas iekārtu struktūra virtuālo pārbažu iespējas nodrošināšanai.

Trešā nodaļa izstrādāts augstsprieguma elektropārvades līnijas relejaizsardzības un automātikas termināls, kurā kā pamataizsardzības realizētas garendiferenciālās un distantaizsardzības funkcijas. Dota termināla analīze reālu īsslēgumu gadījumā.

Ceturta nodaļa veikta sakaru kanālu darbības un to ietekmes uz relejaizsardzību analīze, kā arī izstrādāta skaru kanāla pārbaudes iekārta. Izstrādātā sakaru kanāla pārbaudes iekārta spējīga ne tikai novērtēt informācijas pārraides stabilitāti un sakaru kanāla kavējumu, bet arī ar GPS iekārtu palīdzību noteikt sakaru kanāla simetriju.

1. RELEJAIZSARDZĪBAS STRUKTŪRAS ATTEIKUMI, PĀRBAUDES METODES UN LĪDZEKĻI

Relejaizsardzības un automātikas attīstības etapi un struktūras

Visilgstošākais RA un A tehnikas attīstības periods, aptuveni 170 gadi, saistīts ar elektromagnētiskajiem relejiem kā automātikas struktūru pamatelementiem. Radioelektronikas elementu bāzes attīstība, jaunu elementu parādīšanās (radioelektronikas lampas, pusvadītāju diodes un tranzistori, integrālās shēmas, operāciju pastiprinātāji) izsauca mēģinājumus tos izmantot RA un A tehnikā. Tika radītas un praktiski pielietotas daudzas ierīces un sistēmas [5,6,7,8,9]. Tomēr var apgalvot sekojošo:

1. Nenotika RA un A elektromehānisko releju masveida nomaiņa;
2. Uz radioelektronikas lampu un pusvadītāju diožu bāzes radītās sistēmas neguva plašu praktisku pielietojumu. Galvenais iemesls tam bija nepietiekamas darbības drošums, salīdzinājumā ar elektromehāniskajām sistēmām;
3. RA un A pusvadītāju sistēmas (integrālās loģiskās mikroshēmas, operāciju pastiprinātāji) nodrošināja virknes tehnisko parametru uzlabojumu, paplašināja izpildāmo funkciju spektru, bet radīja jaunas problēmas: apkalpošanas, darbības drošuma, traucējumnoturības u.c. Tādas sistēmas sāka izmantot īpaši sarežģītu objektu automatizācijā, plašu pielietojumu ieguva atsevišķi relejaizsardzību veidi un automātikas elementi (bojājuma vietas fiksācijas aparāti, pusvadītāju laika un strāvas releji, distantaizsardzības u.c.);
4. Visos augšminētajos etapos tika izmantots analogais signālu apstrādes paņēmiens un atbilstoši analogie elementi. RA un A ierīces (sākot no elektromehāniskajām un līdz pat ierīcēm uz operāciju pastiprinātāju un citu vidējās integrācijas pakāpes mikroshēmu bāzes).

Interesanti atzīmēt, ka elektromehānisko iekārtu sarežģītības pakāpes sasniegšanai bija nepieciešama dažu mikroprocesoru paaudžu maiņa. Pirmie mēģinājumi izmantot principiāli citu informācijas apstrādes paņēmienu – ciparu paņēmienu tika veikti 1960-tajos gados [15]. Tajā laikā bija radītas lielas, jaudīgas ciparu elektroniskās mašīnas, kuru ražību raksturoja miljoni operāciju sekundē [16,17]. Tomēr informācijas apstrādes ciparu metožu praktiskai izmantošanai RA un A bija nepieciešams:

1. Signālu analogciparu pārveidotāji. Kontrolējamie procesi pēc fizikālās būtības bija un paliek analogie;
2. Jauno risinājumu ekonomiskais pamatojums. Lielo skaitļošanas mašīnu cena lokālu automātikas ierīču funkciju realizēšanai bija nepieņemami augsta;
3. Pietiekama darbības drošuma līmeņa nodrošināšana. Tā laika lielās skaitļošanas mašīnas sastāvēja no tūkstošiem diskrēto elementu un tādēļ skaitļošanas kompleksu atteices intensitāte bija nepieņemami augsta. Lētu, drošu ar pietiekami augstiem tehniskiem rādītājiem apveltītu analogciparu pārveidotāju (ACP) trūkums, lielo skaitļošanas mašīnu augstās cenas un zemais darbības drošums nedeva iespēju izmantot jaunus RA un A izveides principus. Mikroprocesoru radīšana 1970-tajos un tam sekojošā šo elementu tehnisko parametru ļoti strauja attīstība veicināja RA un A metožu un līdzekļu radīšanu un praktisku izmantošanu sākot no 1980-tajiem gadiem. Digitālās RA un A ierīces veido izmantojot informācijas ciparu apstrādes metodes. To realizēšanai veic signālu analogciparu pārveidošanu. Kontrolējamo analogo signālu pārveidošanai ciparu formā izmanto vienmērīgo (ar vienādiem kvantēšanas laika intervāliem) procedūru (ir arī citas ACP metodes [17], kuras praktiski neizmanto RA un A ierīču realizācijā). Mikroprocesorelementu sākotnējās iespējas bija stipri ierobežotas. Tādēļ parādījās darbi, kas bija virzīti uz šiem elementiem izvērīto prasību minimizāciju. Tika piedāvāti algoritmi, kas minimizēja mikroprocesorelementu resursu patēriņu. Tomēr visai drīz kļuva acīmredzami, ka mikroprocesoru tehnikas iespējas un attīstības tendences

nodrošina ne tikai tradicionāli izmantoto funkciju brīvu realizāciju, bet ļauj arī realizēt virkni citu RA un A funkciju, kas izrādījās ļoti svarīgas ierīču praktiskajā izmantošanā:

- Pašpārbaude un bojāto bloku identificēšana;
- Būtiski samazināta slodze strāvu un spriegumu mērmaņiem;
- Kontrolējamo procesu un iekšējā struktūrā esošo elementu stāvokļa reģistrācija;
- Iestatījumu ievadīšanas un ierakstīto iestatījumu atspoguļošanas ērtums;
- Informācijas apmaiņa ar citām digitālajām ierīcēm, tajā skaitā personālajiem datoriem;
- Tehniski vienkārša un relatīvi lēta pieslēgšana sakaru kanāliem ar mērķi saņemt un nodot informāciju.

Jauno funkciju iespējas bija izšķirošās ierīču praktiskai izplatībai. 1980-to gadu vidū to perspektīvas un priekšrocības kļuva vispāratzītas un acīmredzamas. Mikroprocesoru tehnika kļuva par pamatu daudzu nozaru un sistēmu attīstībai. Īpaši svarīgas izmaiņas (no RA un A attīstības viedokļa) notika sakaros un navigācijas sistēmās. Tika izveidoti optisko šķiedru kanālu tīkli, sasniegts milzīgs informācijas pārraides ātrums un augsts drošuma līmenis, kas deva iespēju optisko sakaru kanālu plašai izmantošanai RA un A sistēmās. Būtiski jaunas un svarīgas iespējas deva globālā pozicionēšanas sistēma (GPS) [11,12,13], ar kuras palīdzību kļuva iespējams sinhronizēt ģeogrāfiski attālinātus mērījumus.

Relejaizsardzības un automātikas iekārtu atteikumi, to iemesli un sekas

Relejaizsardzības darbības atteikumi ar smagām sekām notiek daudzās pasaules energosistēmās. Jebkura nopietna energosistēmas traucējuma gadījumā tiek veikta izmeklēšana, kas vērtē notikuma rašanās cēloņus un izdara secinājumus. Zemāk dots avārijas apraksts, kurā izšķirošu lomu ieņēma viena neprecizitāte RA un A iekārtā, kuras rezultātā radās ne tikai tehniskas problēmas, bet arī sociālas sekas.

Pasaules energokompānijās vērojama tendence paaugstināt energosistēmas drošumu. Viens no drošuma paaugstināšanas līdzekļiem ir RA un A iekārtu nekorektu darbību novēršana. Labākai problēmas izpratnei, tika veikta Latvijas energosistēmas pārvades uzņēmuma RA un A iekārtu darbības analīze. Veicot šādu analīzi, iespējams noteikt kāda ir atteikumu intensitāte un to rašanās iemesli, līdz ar to iespējams secināt, kādiem aspektiem jāpievērš pastiprināta uzmanība. Analīze veikta Latvijas energopārvades uzņēmuma AS "Augstsprieguma tīkls" ietvaros. AS "Augstsprieguma tīkli" apkalpo 330kV energopārvades tīklu ar līniju kopējo garumu 1247.9km un 110kV energopārvades tīklu ar līniju kopējo garumu 3953.8km, kā arī 14 330kV apakšstacijas un 115 110kV apakšstacijas. Kopējā uzstādīto transformatoru jauda ir 6904.8MVA. 330kV un 110kV energopārvades tīkls strādā ar cieši zemētu neitrāli. Pētījums veikts laika posmā no 1998.gada līdz 2003.gadam, nosakot RA un A iekārtu atteikumu intensitāti gadā δ :

$$\delta = \left(1 - \frac{N}{N_S}\right) \cdot 100, \quad (1.1.)$$

kur N – kopējais pareizo RA un A nostrāžu skaits gadā;

N_S – kopējais RA un A nostrāžu skaits gadā.

N_S noteikšanas pamatā ir visu īsslēguma iesaistīto RA un A iekārtu darbības analīze. Piemēram, ja pārejošs īsslēgums bijis uz līnijas, tad par sekmīgu RA un A darbību tiek uzskatīts bojājuma atslēgšana no visiem līnijas galiem ar sekojošu sekmīgu vai pamatotu nesekmīgu AAI. Laika posmā, kurā tika veikts pētījums kopumā notika 2951 RA un A iekārtu nostrādes, no kurām pamatotas bija 2874.

Relejaizsardzības un automātikas galvenie atteikumu veidi

Jebkurš RA un atteikums var izpausties trijos veidos:

1. Notiek RA un A iekārtas nostrāde apstākļos (visbiežāk normālā režīmā), kad nostrāde ir nevēlama – lieka nostrāde;
2. Notiek RA un A iekārtas atteice apstākļos, kad iekārtas nostrāde ir nepieciešama;
3. Notiek iekārtas RA un A bojājums, kurš izsauc citu, ekspluatācijas vietā izmantojamu iekārtu atteici. Piemēram, iekārta pārslogo operatīvā sprieguma avotu vai mērīšanas ķēdes, izstaro paaugstinātu elektromagnētisko enerģiju. Šāda vaida bojājumu atklāšanai veic jaudas patēriņa, izolācijas un izstarojuma līmeņa mērījumus. Šo mērījumu metodika ir labi izstrādāta un netiek izskatīta dotajā darbā, kurš veltīts pirmo divu atteikuma veidu novēršanai.

Pārbaudes metožu veidi un klasifikācija

RA un A pārbaudes uzdevums parādījās kopā ar pirmajiem relejiem, tas ir, sākot ar 1830-tiem gadiem. Uzdevuma atrisināšanai ilgu gadus tika pielietotas šādas pamatmetodes:

1. Iekārtu eksperimentāla ekspluatācijas reālos objektos;
2. Strāvu un spriegumu ģenerēšana, to mērīšana un pārbaudāmās iekārtas reakcijas pareizības novērtēšana. Šīs metodes realizācijai bija nepieciešami ar cilvēka – operatora palīdzību regulējamie, izmantojot attiecīgus mēraparātus, strāvas un sprieguma avoti. Operators veica aizsargājamā objekta darbības analīzi, novērtēja iespējamus bojājumus un strāvu un spriegumu līmeņus pie tiem;
3. Aizsargājama objekta bojājumu imitēšana, izmantojot energosistēmas un objekta fiziskos modeļus. Bija izstrādāti un tika izmantoti daudzi modeļu veidi. Sarežģītākie no tiem prasīja desmitu operatoru apkalpi, aizņēma simtus kvadrātmetru plašas telpas un attiecīgi bija ārkārtīgi dārgi izbūvē un ekspluatācijā.
4. Elektroniskās skaitļošanas mašīnas (ESM) atklāja iespēju energosistēmu un to objektu ciparu modeļu izmantošanai. Energosistēmas RA un A iekārtu darbības procesu ciparu modelēšana, atļāva risināt arī RA un A pārbaudes uzdevumus. Vienlaicīgi ar ESM, parādījās arī ceturtais RA un A pārbaudes organizācijas veids, kurš balstās tikai uz digitālo modeļu izmantošanas bāzes. Šajā gadījumā, pārbaudāmās iekārtas vietā notiek tās programatūras testēšana. Dotā pieeja atļauj vienlaicīgi pārbaudīt izmantojamo metodi, algoritmus un realizējošo programmu.

Pirms RA un A terminālu uzstādīšanas ekspluatācijas vietā, jānodrošina šīs iekārtas principiālu atbilstību pasūtītāja vēlmēm un standartizētām prasībām RA un A iekārtām.

Šim nolūkam tiek izstrādāta pārbaudes metodika un veikti zemāk aprakstītie pārbaudes veidi.

1. **Pārbaudes metodikas izstrāde.** Šajā etapā nosaka, kādā apjomā jāveic pārbaude, lai iekārta varētu tikt uzskatīta par ievadamu darbā. Pārsvārā šis darbs tiek veikts, kad speciālists iepazīstas ar iekārtas tehnisko uzdevumu un funkcionālajiem risinājumiem. Pārbaudes metodikas izstrādes laikā tiek definēta iekārtas darbības pamatprasības:
 - kādi ir nostrādes nosacījumi;
 - kādi ir nenostādes nosacījumi;
 - kādi ir iespējamie pieļaujamie atteikumi, jeb režīmi, kurus dotā iekārta nespēs atrisināt. Kā piemērus var minēt tā saucamo “mirušo” zonu distantaizsardzības gadījumā, vai iespējama situācija, kad procesa beigu parametri atbilst nostrādes nosacījumiem, bet paša procesa attīstība ir pretrunā ar īsslēguma dabu.
2. **Darbības algoritma pārbaude,** tā sintēzes gaitā. Sintēze parasti tiek veikta analizējot aizsargājamā objektā notiekošos procesus. Tiek izmantoti vienkāršotie objektu modeļi un heuristiskā pieeja [25,26]. Vairākums algoritmu var būt aprakstīti ar vienādojumiem, kuri operē ar kompleksiem un loģiskiem lielumiem:

$$\text{If: } \begin{cases} \varphi_1(\underline{X}_1, \dots, \underline{X}_K) > 0, \text{ then } L_1 = 1 \text{ else } L_1 = 0 \\ \vdots \\ \varphi_n(\underline{X}_1, \dots, \underline{X}_K) > 0, \text{ then } L_n = 1 \text{ else } L_n = 0 \end{cases} \quad (1.2.)$$

kur $\underline{X}_1, \dots, \underline{X}_K$ – strāvu un spriegumu rūpnieciskās harmonikas vektoru parametri (aktīvā un reaktīvā komponente, vai modulis un fāze).

Lēmums par aizsargājamā objekta atslēgšanu, vai neatslēgšanu tiek piemērots izejot no loģisko lielumu $\underline{L}_1, \dots, \underline{L}_n$ vērtībām un to izmaiņas laikiem. (1.2.) veida algoritmos apzināti, vai neapzināti, tiek pieņemts ļoti būtisks vienkāršojums par augstāko harmoniku un komponentu neesamību strāvu un spriegumu ķēdēs. Šāda vienkāršojuma izmantošana var būt pieļaujama tikai divos gadījumos:

- a. Ja tiek sintezēta RA un A iekārta ar lielu inerci vai nostrādes laika kavējumu. Šajos gadījumos elektromagnētiskie pārejas procesi norimst un nerūpnieciskās harmonikas, un eksponentes praktiski pazūd no strāvām un spriegumiem;
- b. Ja ieejas ķēdēs tiek izmantoti frekvenču slokšņu filtri .

Pirmais gadījums bija raksturīgs elektromehāniskām iekārtām, bet otrais realizētām uz integrālo mikroshēmu bāzes un mikroprocesoru ierīcēm. Algoritmu pārbaudes tiek veiktas, izmantojot kontrolējamo objektu un aizsardzību matemātisko modelēšanu.

3. **Atbilstības pārbaude** tiek veikta pēc izvēlēta algoritma realizācijas konkrētas iekārtas veidā. Vispirms tiek pārbaudīta iekārtas spēja darboties ekspluatācijas apstākļos (temperatūra, mitrums, vibrāciju līmenis, spiediens, izolācijas līmeņi, spēja izturēt pārspriegumus). Ekspluatācijas apstākļi tiek reglamentēti ar Eiropas un citu pasaules valstu saskaņotiem standartiem. Jāpārliecinās, ka iekārtas izgatavošanas tehnoloģiskais process ir atbilstošs.
4. Standartiem atbilstošai iekārtai tiek veikta **ražošanas pārbaude**. Ražošanas pārbaudes galvenais mērķis ir pārliecināties, ka iekārtā iebūvētais algoritms pietiekoši precīzi realizē izvēlēto. Ražošanas pārbaude tiek veikta visiem iespējamiem ekspluatācijas apstākļiem (aizsargājamā objekta sprieguma klase, jauda, dažādi īsslēguma strāvu līmeņi, līniju garumi u.t.t.). Ražošanas pārbaudi parasti veic ne vienai, bet dažām eksperimentālām iekārtām
5. **Funkcionālā pārbaude** parasti tiek veikta ar mērķi pārliecināties par iekārtas atbilstību konkrētā objekta aizsardzībai. Var apgalvot, ka funkcionālā pārbaude ir stipri vienkāršota, salīdzinoši ar ražošanas pārbaudi.
6. **Ieregulēšanas jeb tehnoloģiskās atbilstības pārbaude**. Šī pārbaude tiek veikta ekspluatācijas vietā ar mērķi pārliecināties, ka ievestie iestatījumi atbilst konkrētā objekta vajadzībām.
7. **Periodiskās pārbaudes**. Šo pārbaudu uzdevums ir laika gaitā pārliecināties par visas ķēdes – strāvmaiņi, spriegummaiņi, RA un A termināls, jaudas slēdzis darbaspēju. Jāpārliecinās ne tikai un ne galvenokārt par RA un A termināla darbaspēju, cik par ārējo ķēžu un montāžas stāvokli. Periodisko pārbaudu laikā var veikt aizsardzības iestatījumu maiņu vai izmainīta kāda principiāla elektriskās ķēdes daļa.
8. **Pēc atteikuma pārbaude**. Pārbaudi veic, ja noticis iekārtas atteikums. Īpaši noderīga informācija par iekārtas darbu ir pieejama pēc reāli notikuša īsslēguma. Uzmanīgi izvērtējot notikušo procesu ierakstus, daudzos gadījumos iespējams atklāt nepilnības aizsardzības vai automātikas algoritmā, kas saistītas ar visas sistēmas darbību kopumā,.
9. Ja nepieciešams veikt papildus pasākumus, piemēram, nenoskaidrotu atteikumu iemeslu dēļ, tad veic **speciālās pārbaudes**.

Relejaizsardzības un automātikas pārbaudes iekārtas

Rūpnieciski izgatavojamas relejaizsardzības pārbaudes iekārtas var iedalīt divās lielās grupās. Pirmo grupu veido reālā laika digitālie simulatori (RLDS), kuri dod iespēju ģenerēt notiekošus sarežģītās energosistēmās procesus.

Otrai grupai attiecināmās pārbaudes sistēmas ir spējīgas ģenerēt stipri ierobežotu strāvu un spriegumu skaitu, un paredzētas tikai lokālo RA un A iekārtu pārbaudei. Tādas pārbaudes sistēmas nosauksim par vienkāršotiem reālā laika simulatoriem (VRLS).

Reālā laika digitālie simulatori

RLDS aizvieto agrāk izmantotus energosistēmu fiziskos modeļus, tie dod iespēju konfigurēt sarežģītas energosistēmas topoloģiju, veikt tās izmaiņas, modelēt elektromehāniskos un elektromagnētiskos pārejas procesus. Izmantojot ciparu-analogos pārveidotājus un pastiprinātājus, procesi tiek pasniegti strāvu un spriegumu veidā. Strāvu un spriegumu skaits ir ierobežots tikai ar sistēmas cenu un lietotāja finansiālām iespējām.

RLDS nodrošina:

- Veidojamās sistēmas mainīgo topoloģiju. Tiek izmantoti konfigurējamie un daudzveidīgie energosistēmas elementu modeļi;
- Nodrošināta sarežģītu un kompleksu režīmu modelēšana;
- Datu ievadīšana notiek, izmantojot grafisku interfeisu un starptautiski pieņemtos apzīmējumus;
- Izmantojamo sistēmu komponentes nodrošina lielu aizsardzību iekārtu pārbaudes klāstu.

RLDS pārbaudes sistēmas pielieto energosistēmām ar augsta vai superaugsta sprieguma elektrotīklu[18].

RLDS piemīt vairākas priekšrocības. Var gaidīt, ka to pielietojums paplašināsies ar *Wide Area Protection* koncepcijas ieviešanu praksē. Kā galveno RLDS sistēmu trūkumu atzīmēsim to cenu, kura pārsniedz pat vairākus miljonus eiro.

Vienkāršotie reālā laika simulatori

Augsta RLDS cena dara par neiespējamu to plašu pielietošanu. Energosistēmu ekspluatācijas praksē tiek pielietotas stipri vienkāršotas sistēmas. VRLS faktiski attīstīja pārbaudes virzienu, kura pamatā ir strāvu un spriegumu ģenerācija ar operatora palīdzību. Pie tam, operatora darbība lielā mērā tiek automatizēta.. Ļoti būtiska loma iekārtas struktūrā piemīt ķēžu izolācija esamībai, kas ir ļoti svarīgi veicot pārbaudes reālos apstākļos. Pārbaudes rezultātu atspoguļošanai tiek izmantotas daudzas ietekmējošo parametru kombinācijas un „trešā dimensija” – krāsas, lai atvieglotu rezultātu analīzi. Var redzēt, ka pilnvērtīgai divu DA zonu pārbaudei var būt nepieciešams veikt desmitiem tūkstošu mēģinājumu. Kopumā var apgalvot, ka VRLS ir piemēroti vienkāršotiem, pirmkārt apakšstaciju apstākļiem, bet nepietiekami, lai veiktu ražošanas, funkcionālās un speciālās pārbaudes.

2. VIRTUĀLO PĀRBAUŽU METODES PAMATOJUMS UN REALIZĀCIJA

Virtuālo pārbažu metodes būtība.

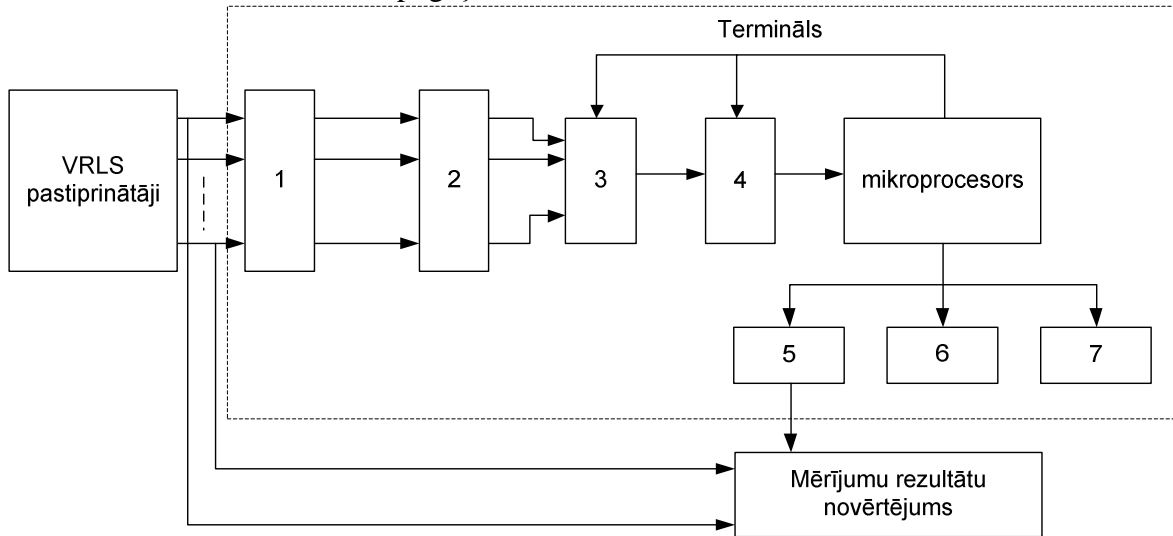
Apvienojot augstāk teikto, varam apgalvot, ka RA un A iekārtu testēšana joprojām paliek aktuāla un vienlaicīgi, visām zināmām metodēm un to realizācijas instrumentiem piemīt būtiski trūkumi. Atzīmēto trūkumu novēršanai tiek piedāvāta jauna testēšanas metode, kura nosaukta ar virtuālo pārbažu metodi., kuras būtība izpaužas šādi:

Pārbaudes procedūra tiek sadalīta divās daļās:

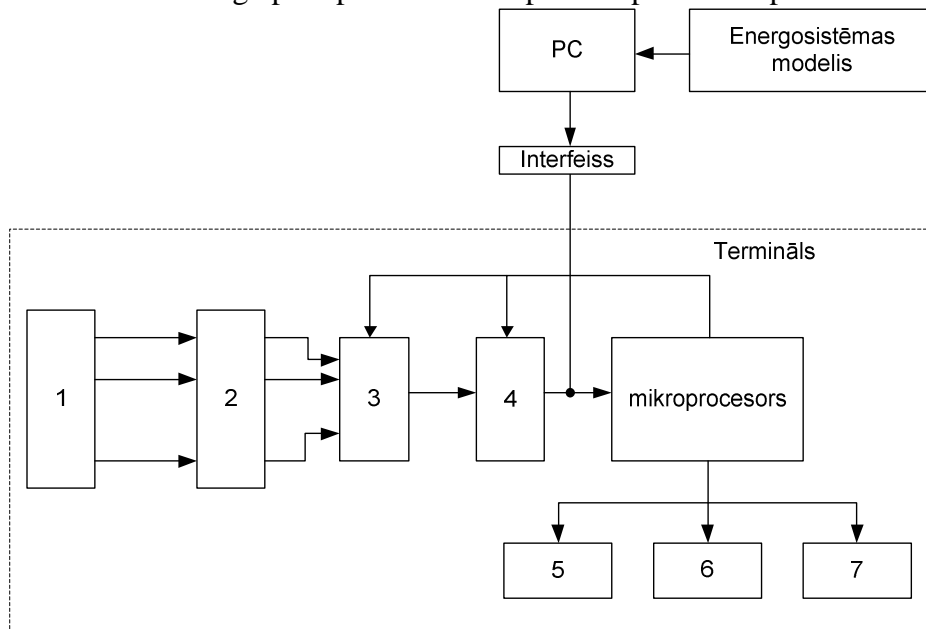
1. Tiek pārbaudītas RA un A binārās ieejas un izejas, analogās ķēdes un analogais-ciparu pārveidotājs;
2. Tiek pārbaudīta RA un A realizācijas metode, izvēlētais algoritms un algoritma realizācijas programmatūra, un aparatūra.

Pārbaudes procedūras realizācijai tiek izmantotas eksistējošas un plaši pielietojamas, rūpnieciska rakstura energosistēmu simulācijas programmas. Nepieciešamības gadījumā programmas tiek aprīkotas ar papildus blokiem, lai veiktu pēc iespējas pilnvērtīgāku pārbaudi; Pārbaudu realizācija prasa speciāla termināla izveidi: ir jānodrošina analogciparu pārveidojumu aizvietošana ar simulējošas programmas aprēķinu rezultātiem.

Piedāvātās metodes būtība atspoguļota attēlos 2.1 un 2.2.



2.1. att. Analogciparu pārveidošanas procesa pareizības pārbaude.



2.2. att. Metodes, algoritma programmatūras un ciparu aparatūras pārbaude.

Pārbaude un pārbaudu skaita noteikšana.

Pārbaudu organizācijas veida un skaita noteikšanai, veiksīm uzdevuma matemātisko formulējumu. Šim mērķim definēsim γ -dimensionālu funkciju \mathbf{R} , pieņemot, ka \mathbf{R} apraksta termināla izejas signāla stāvokli (\mathbf{R} var pieņemt tikai divas vērtības – 0 vai 1):

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}(x_1, \dots, x_n, l_1, \dots, l_k, s_1, \dots, s_e), \quad (2.1)$$

kur $\gamma = n + k + e$,

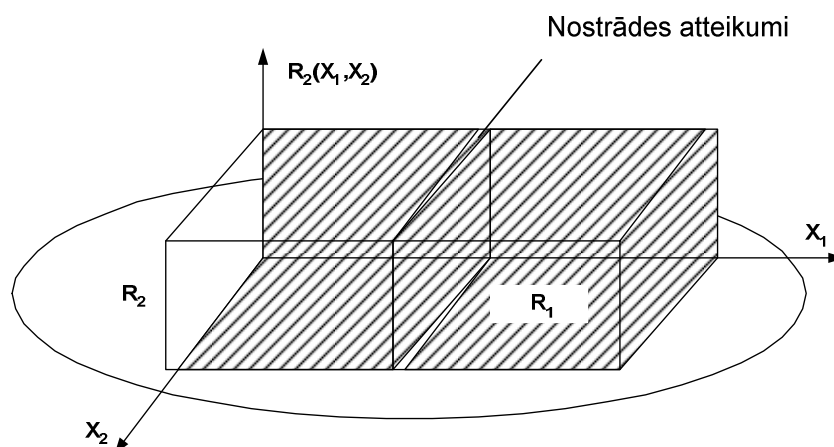
n – kontrolējamo analogo signālu skaits \underline{X} (vienkāršākajā gadījumā vienāds ar summāro strāvas un spriegumu vektoru modulu, un leņķu skaitu);

k – kontrolējamo loģisko ieeju signālu skaits;

e – termināla iestatījumu skaits \underline{S} .

Pieņemsim, ka γ dimensionālu parametru kompleksu \underline{X} , \underline{L} , \underline{S} var iedalīt divās nepārklājošās grupās, kuras parādītas 2.3.attēlā:

1. Grupa R_1 , kura atbilst termināla nostrādei,
2. Grupa R_2 , kura atbilst termināla nenostādes nosacījumiem.



2.3.att. Piemērs divdimensionālai reakcijas funkcijai.

Pieņemsim, ka parametru \underline{x} , \underline{l} , \underline{s} funkcijas ir zināmas katrai grupai: R_1 un R_2 .

Ievēdīsim arī ideālā termināla definīciju, pieņemot, ka tādām terminālam atbilst funkcija R , kuru var aprakstīt:

$$R=1, \text{ ja un vienīgi, ja } [\underline{x}, \underline{l}, \underline{s}] \in R_1, \quad (2.2)$$

$$R=0, \text{ ja } [\underline{x}, \underline{l}, \underline{s}] \in R_2.$$

Kontrolējamo analogo X un loģisko signālu L parametri ir atkarīgi no notiekošiem energosistēmā procesiem, kuros notiek daudzi gadījuma rakstura faktori (slodzes un to sadalījums, ģenerējamās jaudas, tīkla struktūra, īsslēguma esamība, īsslēguma vieta un veids u.t.t.). Tādējādi varam apgalvot, ka X un L ir gadījuma lielumi. Ja tiek veikta ražošanas pārbaude un nav zināms konkrētais energosistēmas elements, kura aizsardzībai tiks pielietots pārbaudāmais termināls, tad, arī iestatījumi var būt attiecināti gadījuma lielumu klāstā. Zināms, ka gadījuma lielumu pilnīgākam aprakstam ir jāzina varbūtības sadales funkcija. Pieņemsim, ka ir zināmas divas nosacītas sadales funkcijas F_1 un F_2 :

F_1 – sadales funkcija, kura atbilst apstākļiem, kad pārbaudāmās iekārtas nostrāde ir vēlama;

F_2 – sadales funkcija, kura tika formēta apstākļos, kad nostrāde ir nevēlama.

Ņemot vērā (2.1.) un (2.2.) izteiksmes un zinot sadales funkcijas F_1 un F_2 , varam definēt ideāla termināla nostrādes un nenostādes varbūtības:

$$P_1 = \iint_{R_1} dF_1(\underline{x}, \underline{l}, \underline{s}) = 1, \quad (2.3)$$

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

kur P_1 – varbūtība, ka aizsardzības iekārta nostrādā pie nosacījuma, ja nostrādes apstākļi tiek izpildīti;

P_2 – varbūtība, ka aizsardzība nenostādās pie nosacījuma, ja tiek ievēroti nenostādes apstākļi.

Ja pārbaudāmās iekārtas realizācijā pieļautas kļūdas vai neprecizitātes programmu nodrošinājumā, vai izmantojamos elementos, tad salīdzinot ar ideālu iekārtu reakcija atšķirsies $R_{RE} \neq R$. Reālai iekārtai jebkurā gadījumā var apgalvot:

$$\begin{aligned} P_1 &\leq 1, \\ P_2 &\geq 0. \end{aligned} \tag{2.4}$$

Aizsardzības iekārtu var uzskatīt par pārbaudītu, ja ir izrēķināti P_1 un P_2 varbūtību lielumi. Ja P_1 un P_2 ir pietiekoši tuvie „1” un „0”, tad var pieņemt lēmumu par termināla ekspluatācijas atļauju. Atbilstoši (2.4) izteiksmei, varbūtības P_1 un P_2 var noteikt izmantojot Stieltjes-Lebesga (*Stieltjes-Lebesgue*) [27] integrāli. Izteiksmes (2.4) integrāli var būt aprēķināti, izmantojot divas pieejas:

1. Klasiskā jeb regulārā metode[28], kas sadala integrēšanas telpu vairākos vienādos apgabalos. Metodes precizitāte ir tieši atkarīga no izmantojamo apgabalu skaita.
2. Monte-Karlo metode. Šajā gadījumā precizitāte tieši atkarīga no mēģinājumu skaita.

Zemāk parādīts kā abas metodes pielietojamas releju aizsardzības un automātikas pārbaudītu veikšanai. Uzdevuma vienkāršošanai, pieņemsim, ka parametri \underline{x} , \underline{s} ir doti vērtību intervālos no 0 līdz 1. Loģisko parametru \underline{l} ietekmi neņemsim vērā.

Kā zināms klasiskās metodes kļūdu var noteikt pēc izteiksmes:

$$\Delta_1 \approx N^{-2/\gamma}, \tag{2.5}$$

Monte-Karlo metodes kļūdu var noteikt pēc izteiksmes:

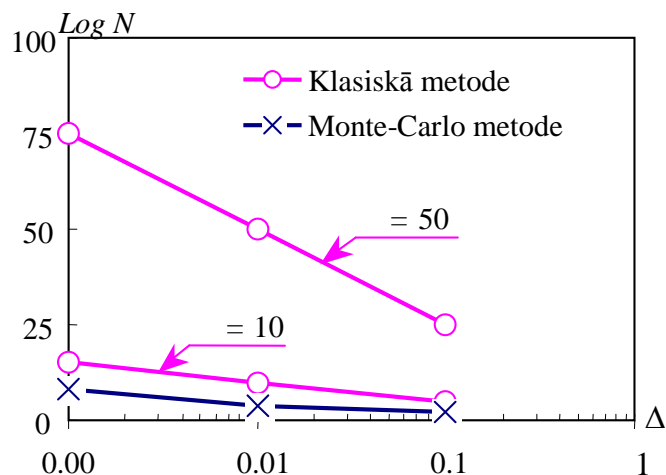
$$\Delta_2 \approx \frac{1}{\sqrt{N}}, \tag{2.6}$$

kur N – integrējamo intervālu skaits klasiskajā metodē vai mēģinājumu skaits, izmantojot Monte-Karlo metodi, $\gamma = n + e$, pieņemot, ka loģisko signālu ietekmi k neņemam vērā.

Gadījumā, ja \underline{x} un \underline{s} parametri pārbaudītu gaitā tiek pieņemti brīvi, un tiek veiktas pārbaudes ierobežotu \underline{X} , \underline{S} lielumu kombināciju skaitam, tad parādās iespēja izlaist atteikumu. Pieņemsim, ka varam atļauties nenoskaidrot esošos pārbaudāmās iekārtas atteikumus ar pietiekoši mazu varbūtību Θ . Tātad, lai pārbaudītu veiktu ar pietiekamu precizitāti nepieciešams risināt augstāk minētos integrālvienādojumus ar pieņemami augstu precizitāti, iegūstot:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &\leq \Theta, \\ \Delta_2 &\leq \Theta, \end{aligned} \tag{2.7}$$

2.4.attēls parāda nepieciešamo integrāļa sadalījumu vai mēģinājumu skaitu N izmantojot abas pieejas atkarībā no γ skaita, un, lai iegūtu nepieciešamo precizitāti Θ .



2.4.att. Mēģinājumu skaits atkarībā no izmantojamās metodes un vēlamās precizitātes.

Nepieciešamās precizitātes Θ var aptuveni noteikt, nosakot „pieļaujamo” releju aizsardzības un automātikas atteikuma varbūtību P_A . P_A viena gada laikā. Atteikuma pieļaujamības noteikšanai, izmantosim vidējo šādu iekārtu kalpošanas laiku līdz pirmajam atteikumam. Pieņemot, ka šis laiks T_{aver} ir līdzīgs un izmantojot eksponenciālo drošuma likuma:

$$P_A = 1 - \exp(-t / T_{aver}), \quad (2.8.)$$

iegūstam

$$P_A = 1 - \exp(-t / 25) = 0.04, \quad (2.9.)$$

Tā kā nepieciešamā precizitāte nosakāma kā $\Theta \leq P_A$, tad iespējams vienkārši noteikt nepieciešamo pārbaūžu skaitu pēc 2.4.attēla.

Atzīmēsim, ka iegūtais skaitlis ir diezgan tuvs 1.nodaļas atteikumu statistikas datiem.

Analizējot iegūtos rezultātus var secināt, ka Monte-Karlo metodes pielietojums, salīdzinot ar klasisko metodi, kļūst efektīvāks, ja γ lielāks vai vienāds ar 4.

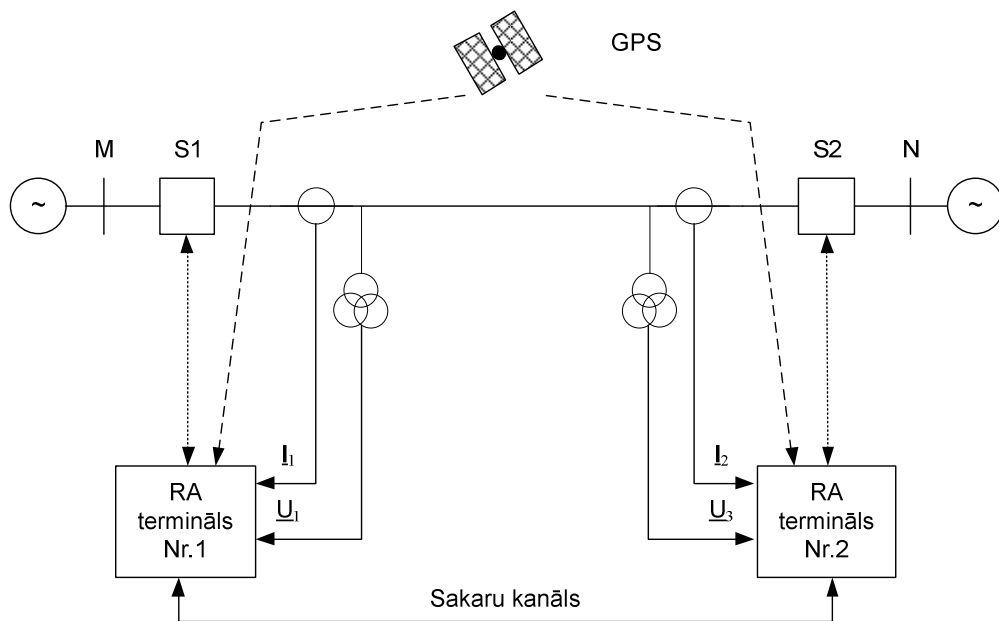
Ņemot vērā reāli pielietojamo sprieguma un strāvas ieeju, izmantojamo loģisko signālu un iestatījumu skaitu Monte-Karlo metodes pieeja ir vienīgā reāli izmantojamā, jo modernai releju aizsardzības un automātikas iekārtai γ var būt lielāks par tūkstoši. Līdz ar to klasiskā metode šādu iekārt pārbaudei izrādās maz efektīva.

Virtuālās testēšanas metodes realizācija

Aprakstītā pārbaudes metode ir paredzēta sekojošām relejaizsardzības un pretavārijas automātiku iekārtām:

- asinhronās gaitas novēršanas automātika;
- augstsprieguma (110kV/20kV/10kV/6kV) transformatoru aizsardzība un automātika;
- augstsprieguma elektropārvades līniju diferenciālās aizsardzības terminālam uz mikroprocesoru bāzes.

Testēšanas metodes konkretizācijai tiks analizēta sistēma, kas parādīta 2.5. attēlā un realizē līnijas diferenciālo un distantaizsardzību kopā.



2.5.att. Augstsprieguma elektropārvades līnijas aizsardzības shēma.

Apakšstacijās M un N ir uzstādīti divi RA un A termināli, kā datu pārraidi ir izmantots optisko šķiedru kanāls. Mērījumu sinhronizāciju nodrošina GPS globālā pozicionēšanas sistēma[29]. Terminālā iekļautas līnijas garendiferenciālā aizsardzība kā pamataizsardzība un distantaizsardzība, maksimālstrāvas un virzītā zemesslēguma aizsardzība kā rezerves aizsardzība. Papildus tam terminālā iekļauta automātiskā atkārtotā ieslēgšana, bojājuma vietas noteikšana u.c. funkcijas. Katrs termināls saņem I_A, I_B, I_C fāžu strāvas un nullsecības strāvu $3I_0$, U_A, U_B, U_C fāžu spriegumus un nullsecības spriegumu $3U_0$ un AAI vajadzībām sinhronizācijas spriegumu no kopnēm. Tādējādi parametru kopums, kurš apraksta vienam terminālam pievadīto analogo signālu fundamentālo harmoniku ir 18-dimensionāls (jāņem vērā, ka visi parametri ir kompleksi). Var secināt, ka analogo signālu parametru kopums, sistēmai, kas sastāv no diviem termināliem, ir 36-dimensionāls. Kopējais iestatījumu skaits, kuri nosaka katras relejaizsardzības un automatikas darbību katrai no četrām iestatījumu grupām, skaitāms simtos. Tādējādi koeficients γ (2.1.) sasniedz dažu simtu vērtību, un šādā gadījuma mēģinājumu (pārbaužu) skaits pēc izteiksmes (2.5.) kļūst lielāks par decimālu ciparu, ar simtu nullēm. Šādu pārbaužu skaitu ar tradicionālām metodēm praktiski (laika ziņā un ekonomiski) veikt nav iespējams un virtuālo pārbaužu metode pēc Monte-Karlo principa ir vienīgais pamatotais risinājums.

Ir iespējamas divas pieejas pārbaužu veikšanai:

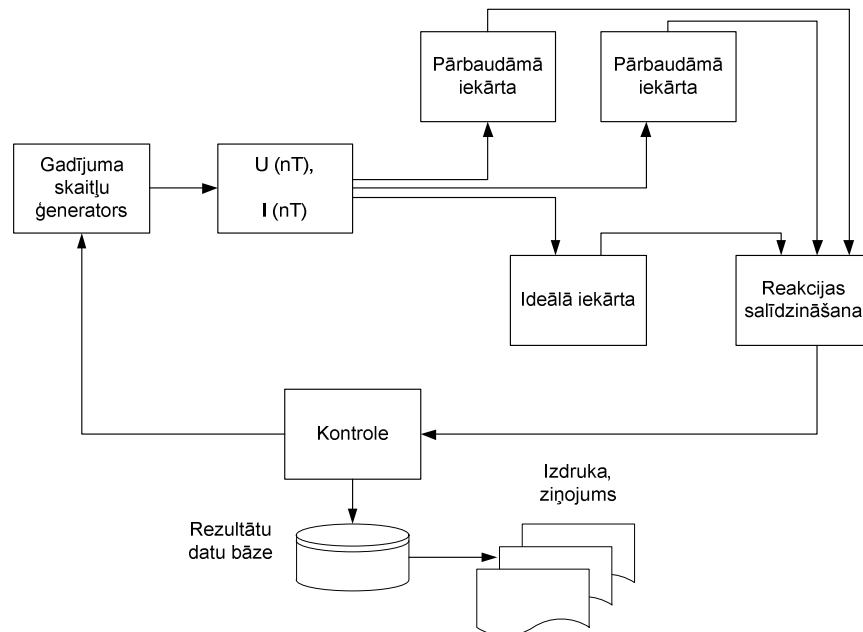
1. Testēšana signālu parametru un iestatījumu telpā;
2. Testēšana aizsargājamo objektu parametru telpā.

Testēšana signālu parametru un iestatījumu telpā

Pārbaudes procedūra parādīta 2.6.attēlā. Šajā gadījumā pārbaude nozīmē gadījuma skaitļu ģeneratora brīvi izvēlētu signālu padošanu un šo vērtību saglabāšanu pārbaudāmās iekārtas atmiņā ar sekojošu atbildes reakciju no ideālās iekārtas, un reakciju salīdzināšanu. Pieejai ir sekojoši trūkumi:

- iespējama lieku parametru kombināciju padošana, kuras neradīsies reālā energosistēmā, kā piemēru var minēt lielu īsslēgumu strāvu ģenerāciju vienlaicīgi ar spriegumu, kurš vienāds ar nominālo vai lielāku.
- sarežģīta ideālās iekārtas atbildes reakciju definēšana;

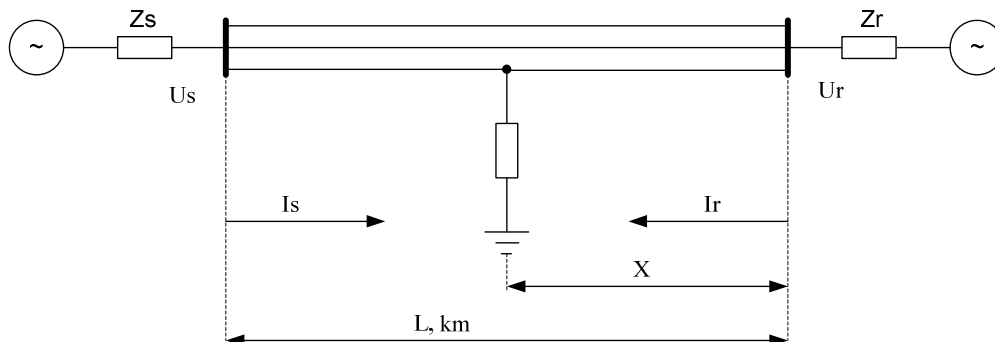
- sarežģītas neregulāras formas signālu padošana (signāli, kuri papildus pamatharmonikai ietver citas harmonikas vai eksponenciālas komponentes).



2.6. att. Termināla pārbaude padodot signālu parametru telpā.

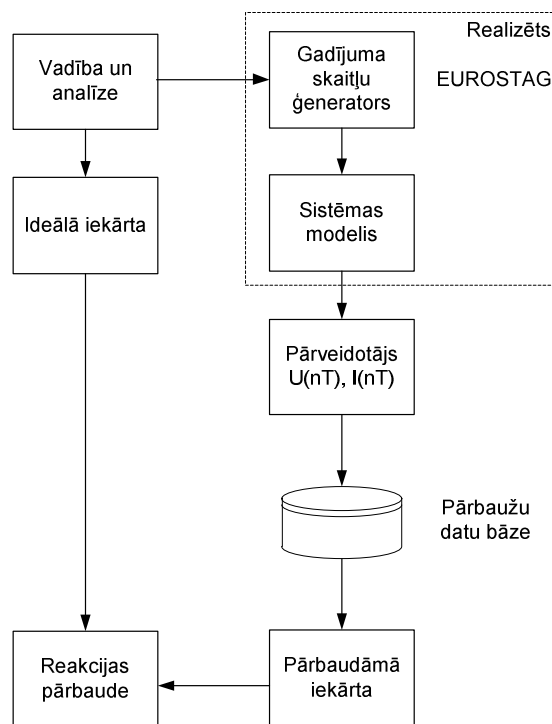
Testēšana enerģosistēmas parametru telpā

Izskatīsim stipri vienkāršotu elektriskā tīkla shēmu, kas parādīta 2.7.attēlā.



2.7.attēls. Aizsargājamā objekta modelis.

Pieņemsim, ka elektropārvades līnijā, kuru aizsargā pārbaudāmā iekārta, attālumā l_F caur bojājuma pārejas pretestību R_F ir īsslēgums. Sistēmu Z_s , Z_r un līnijas parametri ir mainīgi. Tā pat kā reālā dzīvē, attālums līdz bojājuma vietai, īsslēguma veids, pārejas pretestība bojājuma vietā ir gadījuma lielumi. Šādus enerģosistēmas apstākļus ir viegli modelēt. Veidojot gadījuma skaitļu ģenerators, var izmantot enerģosistēmas darbības statistikas datus par pirmsavārijas režīmu parametriem, īsslēgumu attālumiem un veidiem. Pārbaudes procedūra parādīta 2.8.attēlā.



2.8.attēls. Pārbaudes sistēmas struktūra.

3. DAUDZFUNKCIONĀLĀ ELEKTROPĀRVADES LĪNIJU RELEJAIZSARDZĪBAS TERMINĀLA SINTĒZE

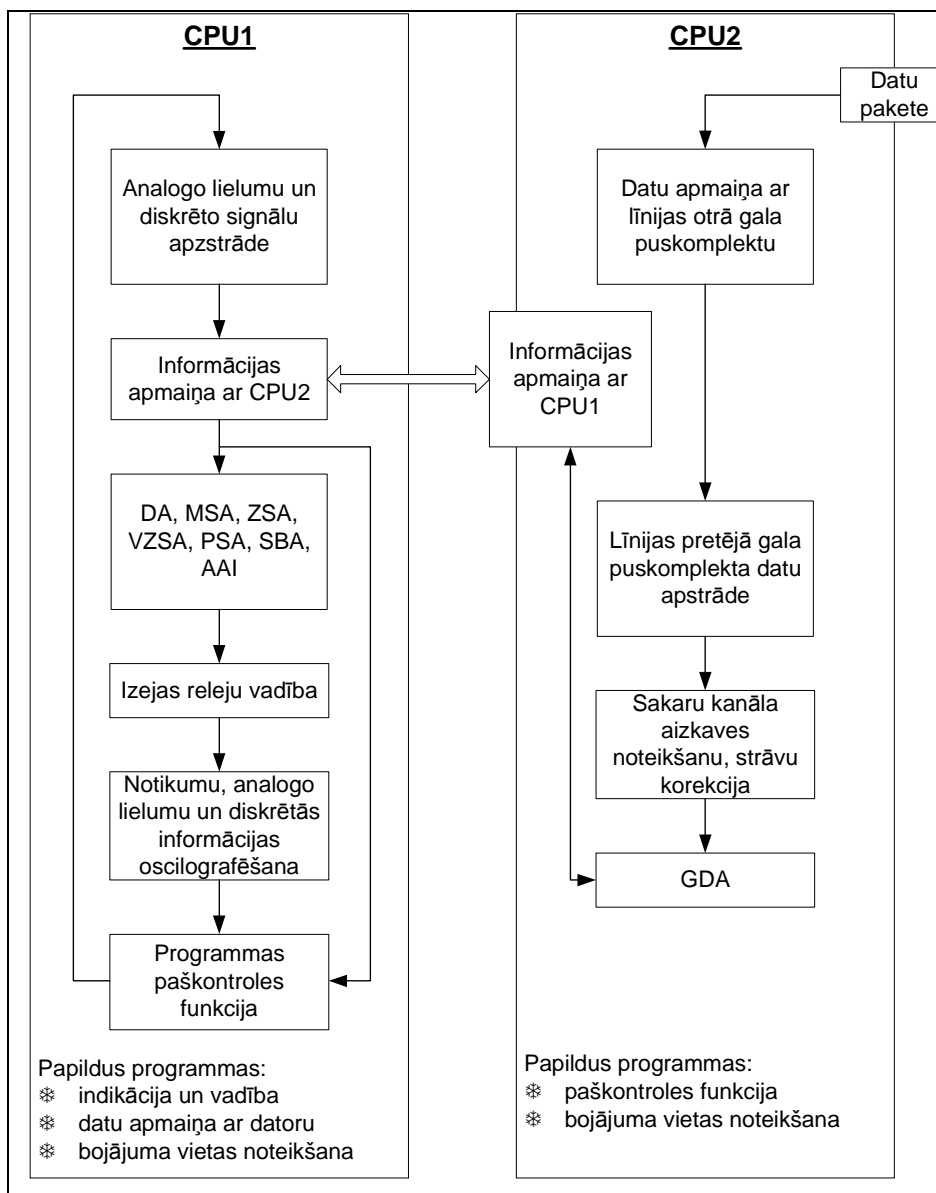
Releju aizsardzības un automātikas termināla funkcijas un programmatūras struktūra

Tā kā elektropārvaides līniju (EPL) RA un A termināla realizācijā izmantots divprocesoru risinājums, parādās uzdevums programmu sadalei starp procesoriem. Izvēlēta programmu nodrošinājuma struktūra dota 3.1. attēlā.

Iekārtas funkcijas sadalītas sekojoši:

Pirmais procesors (CPU1) nodrošina sekojošas funkcijas:

- analogciparu pārveidotāja (ACP) vadība, analogo signālu un loģisko ieeju apstrāde (Diskrēto signālu reģistrs) un izejas releju (Izejas releju reģistrs) vadība;
- distances (DA), maksimālās strāvas (MSA), virzītās (VZSA) un nevirzītās zemesslēguma (ZSA), pārslodzes (PSA) un slēdžu bojājuma (SBA) aizsardzības;
- automātiskā atkārtotā ieslēgšana (AAI);
- analogo un ciparu signālu oscilografēšana energoneatkarīgā (NVRAM) atmiņā [30];
- notikumu reģistrācija;
- attāluma līdz bojājuma vietai noteikšana;
- indikāciju displeja vadība;
- iestatījumu ievades bloka vadība;
- osciolgrammu un iestatījumu nolasīšanas/ievades RS-232 interfeisa vadība.



3.1.att. Programmas struktūra.

Otrs procesors (CPU2) nodrošina šādas funkcijas:

- abu puskomplektu informācijas apmaiņas RS-422 interfeisa vadība;
- otra puskomplekta leņķiskās kļūdas, kura rodas datu pārraides laikā, korekcija;
- GPS moduļa vadības programma;
- garendiferenciālās aizsardzības (GDA);
- attāluma līdz bojājuma vietai noteikšana, izmantojot abu puskomplektu mērījumus.

Informācijas apmaiņu starp abiem procesoriem nodrošina ātrdarbīga datu pārraides kopne. Abi procesori nodrošina paškontroles funkciju, kā arī veic viens otra kontroli. Pirmā procesora programmu var attēlot kā atsevišķu programmu bloku virknējumu, kuras tiek izpildītas reālā laikā ar 1ms ciklu. Kā jau iepriekš minēts, GDA funkciju nodrošina CPU2. Kā aprēķina lielumi tiek izmantotas pirmā un otrā puskomplekta fāzu strāvu ortogonālās komponentes[31,32]. Pirmā puskomplekta datu apstrādi CPU1 veic katru milisekundi, otrā puskomplekta datu apstrāde notiek pēc datu saņemšanas no līnijas pretējā gala. Tas nozīmē, ka GDA nostrādes laiks ir tieši atkarīgs no sakaru kanāla ātrdarbības. Apakšprogrammas, kuras veic servisa funkcijas, strādā 'fona' režīmā. RA un A termināls strādā pēc klasiska

[33,34] diferenciālo strāvu $\dot{I}_{dif} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$ un bremzēšanas strāvas $I_{bremz} = |\dot{I}_1| + |\dot{I}_2|$ salīdzināšanas principa. Datu (fāžu strāvu ortogonālās komponentes) apmaiņa starp GDA puskomplektiem notiek paketēs. Informācijas pakešu apmaiņu starp puskomplektiem nodrošina ciparu sakaru kanāls. Nosakot informācijas apjomu vienā paketē, jāņem vērā sekojošais:

- palielinot informācijas apjomu var nodrošināt efektīvākus EPL aizsardzības paņēmienus;
- palielinot informācijas apjomu, palielinās aizsardzības nostrādes laiks.

Ņemot vērā augstākminēto, vienā informācijas paketē tiek pārraidīta sekojoša informācija:

- fāžu strāvu ortogonālās komponentes;
- par puskomplekta palaišanos (noteikts bojājums);
- par puskomplekta nostrādi;
- strāvmaiņu piesātināšanās/nepiesātināšanās;
- četru bināro ieeju, kuras nodrošina atsevišķu komandu pārraidi, stāvoklis;
- ārēju diferenciālās aizsardzības bloķējošu signālu stāvoklis;
- iekšējo taimeru rādījumi, kas nepieciešami sakaru kanāla aizkaves noteikšanai;
- kontroles informācijas, kas nodrošina kļūdainu pakešu noteikšanu.

GDA darbības princips balstīts uz mērījumiem, kas veikti ģeogrāfiski attālinātās vietās. Ir nepieciešama mērījumu sinhronizācija. Zināmi divi sinhronizācijas pamatprincipi, kuri balstīti uz:

1. Sakaru kanāla iespēju izmantošana sūtot signālu uz pretējo līnijas galu un saņemot atbildi, acīmredzami var aprēķināt laiku (aizturi), nepieciešamu signāla pārraidei „turp un atpakaļ”;
2. Globālās pozicionēšanas sistēmas (GPS) iespēju izmantošana. Zināms, ka šī sistēma dod iespēju sinhronizēt laika mērījumus ar precizitāti mikrosekunžu robežās. Tāda precizitāte ir pilnīgi pietiekoša, lai nodrošinātu diferenciālās aizsardzības precīzu darbību.

Sintezētām terminālam paredzētas abas mērījumu sinhronizācijas iespējas. GPS izmantošanu saucim par ārējo sinhronizāciju. Ņemot vērā GPS sistēmu sarežģītību, nepieciešams ņemt vērā to atteices varbūtību. Šajā gadījumā sinhronizācija var būt veikta vienīgi izmantojot sakaru kanālus.

Ja abu puskomplektu ārēja sinhronizācija netiek izmantota vai ir bojāta, tad viena puskomplekta strāvas vektoru \dot{I}_1 sinhronizācija ar otru puskomplekta strāvas vektoriem \dot{I}_2 notiek, nosakot ciparu datu pārraides kanāla aizkavi.

Nevienāda pārraides laika kavējuma efekts

Līnijas abu galu strāvu mērījumu sinhronizācijai katrs puskomplekts aprēķina sakaru līnijas kavējuma laiku. Tiek pieņemts, ka sakaru kanāls ir simetrisks. Simetriska sakaru kanāla gadījumā pārraidāmās informācijas kavējuma laiks ir vienāds ar uztveramās informācijas kavējuma laiku. Sakaru kanāla nesimetrija var ietekmēt aizsardzības darbību. Pieļaujamās nesimetrijas vērtību var noteikt izejot no konkrētiem iestatījumiem, kurus nosaka ar aizsardzības nostrādes raksturlielumiem. Ja pārraides laiki abos virzienos, no *slave* uz *master* un no *master* uz *slave*, nebūs vienādi, tad tiks radīta strāvas mērījuma kļūda. Pārējas režīmā, gan amplitūda, gan fāze mainīsies un tas izsauks lielāku diferenciālo strāvu, nekā nostabilizētā režīmā. Vienīga iespēja izvairīties no nepareizas darbības, kad pārraides laiki nav vienādi, ir iestatījumu iestādīšana lielākus, nekā sagaidāma “neīstā” diferenciāla strāva.

Izmantojot sinhronizācijas signālu no GPS moduļa, var sinhronizēt GDA puskomplektu mērījumus, kurus neiespaido sakaru kanālu laika aizture un nesimetrija. GPS modulis uztver informāciju no zemes pavadoņiem ģenerējot sinhronizācijas impulsu un precīza laika

signālus. Diferenciālās aizsardzības abi puskomplekti GDA1 un GDA2 veic kontrolējamo lielumu (strāvu un spriegumu) apstrādi sinhronizācijas impulsa no GPS moduļa pienākšanas momentā. Tādā veidā abi puskomplekti apmainās ar fāzu strāvu ortogonālām komponentēm, kuras ir sinhronizētas laikā. GPS modulis sūta sinhronizācijas impulsu katras 10ms. Ja informācijas pārraides aizture no viena puskomplekta uz otru nepārsniedz 10ms, tad šī aizture neiespaido diferenciālās aizsardzības darbu. Aizsardzība nepārtraukti kontrolē GPS sinhronizācijas esamību. Ja kaut vienā puskomplektā sinhronizācijas impulss neparādās, aizsardzība automātiski pāriet režīmā, kurā sakaru kanāla laika aizture tiek aprēķināta. Kad sinhronizācijas signāli no jauna parādās abos puskomplektos, aizsardzība automātiski pāriet sinhronizēto datu apmaiņas režīmā. Tādā veidā GPS sinhronizācijas iekārtas atteikums neietekmēs GDA darbību.

Mikroprocesoru aizsardzības darbības rezultāti un to analīze

Augstāk aprakstītais mikroprocesoru termināls tika realizēts un uzstādīts 110kV elektropārvades līnijām. Pēc to uzstādīšanas uz vienas no līnijām notika divi īsslēgumi, kas ļauj novērtēt piedāvātā risinājuma darbotiespēju.

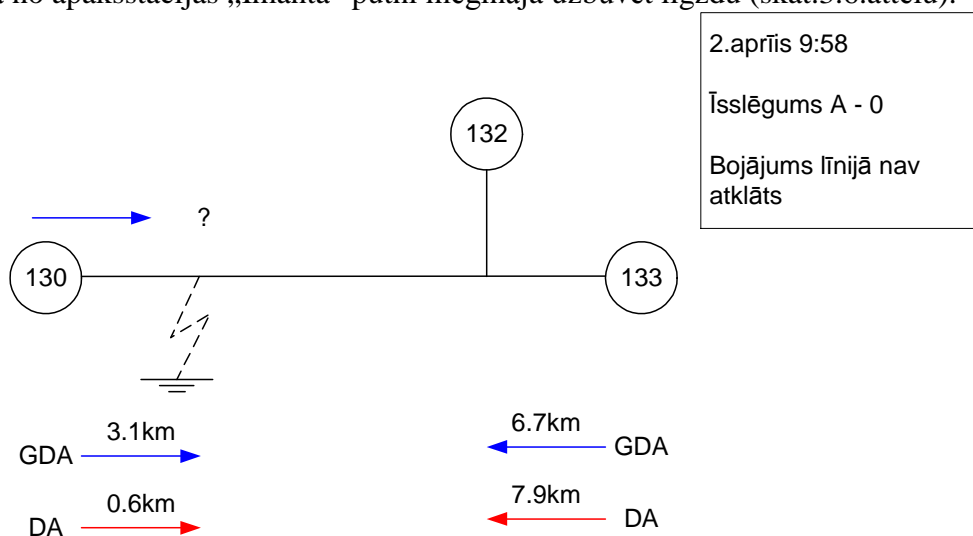
Aizsargājamā elektropārvades tīkla posma apraksts

Apakšstacijas „Bolderāja 1” (133) un „Bolderāja 2” (136) ir savienotas ar 1.7 km garu elektropārvades līniju, apakšstacijas „Bolderāja 1” un „Imanta” (130) savienotas ar 7.7 km garu līniju (skat. 3.4. att.). Starp apakšstacijām „Bolderāja 1” un „Imanta” ir 1.2km garš nozarojums uz apakšstaciju „Daugavgrīva” (132). Tā kā līniju garumi ir nelieli, tad līnijas aizsardzībai pret bojājumiem jāizmanto līnijas garendiferenciālā aizsardzība, kas nodrošinās ātru un selektīvu bojātās līnijas atslēgšanu.

Kā rezervējošā aizsardzība tiek izmantota distantaizsardzība. Pie bojājuma līnijā, ātru atslēgšanu nodrošina komandu pārraide starp abām apakšstacijām.

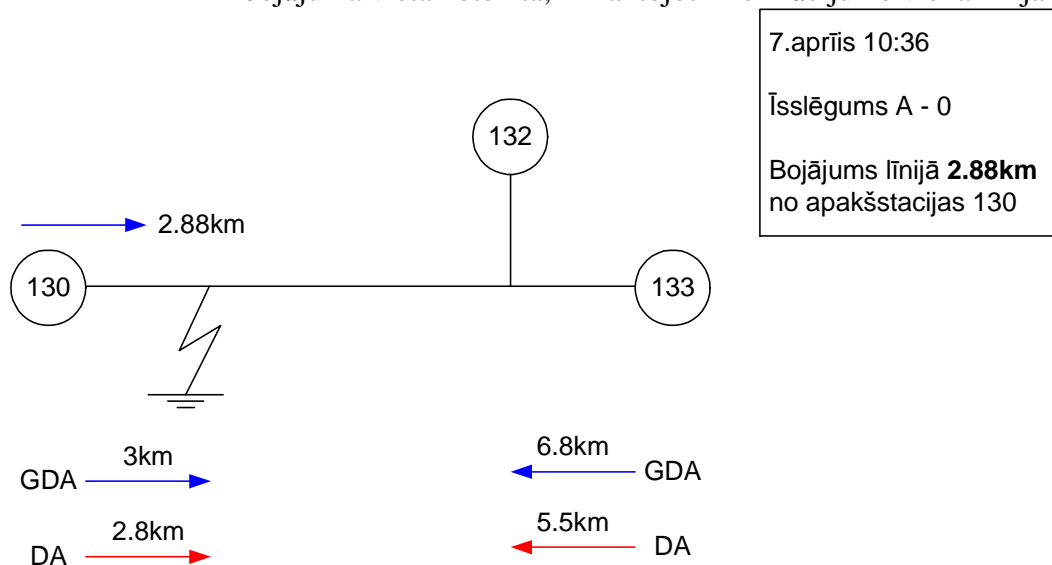
Īsslēgumu analīze un bojājuma vietas noteicēju rezultāti

18.martā 2005.gadā apakšstacijās „Bolderāja 1”, „Bolderāja 2” un „Imanta” uz jaudas slēdžu atslēgšanu tika ievestas darbā līniju garendiferenciālās aizsardzības LIDA. Nepilna mēneša laikā uz līnijas „Bolderāja 1” – „Bolderāja 2” LNr.233 2. un 7 aprīlī radās zemesslēgumi. 2.aprīlī bojājums līnijā netika atrasts (skat. 3.5. attēlu). 7. aprīlī tika konstatēts, ka 2.88km attālumā no apakšstacijas „Imanta” putni mēģināja uzbūvēt ligzdu (skat.3.6.attēlu).



3.2. att. Īsslēgums 110kV elektropārvades tīklā 2.aprīlī.

Piezīme: GDA – bojājuma vieta noteikta, izmantojot informāciju no abiem līnijas galiem;
 DA – bojājuma vieta noteikta, izmantojot informāciju no viena līnija gala.



3.3. att. Īsslēgums 110kV elektropārvades tīklā 7.aprīlī.

Īsslēguma strāvas bija samērā lielas 10.6kA no un 8. apakšstacijas Imanta. Tā kā bojājums bija pārejošs, tad līnija abos gadījumos tika ieslēgta atpakaļ ar automātiskās atkārtotās ieslēgšanas palīdzību. Īsslēgumu laikā tika noteiktas divas bojājuma vietas, jo RA kompleksos iekļauti divi bojājuma vietas noteikšanas algoritmi. Viens no algoritmiem bojājuma vietas noteikšanai izmanto mērījumus no abiem līnijas galiem. Šajā gadījumā informācijas apmaiņai tiek izmatots tas pats sakaru kanāls, kas nodrošina garendiferenciālās aizsardzības darbību. Otru attālumu līdz bojājuma vietai nosaka, izmantojot “klasisku”, izstrādātu RTU 1990-os gados, algoritmu, kurš ņem vērā mērījumus vienā līnijas galā. Abi algoritmi tiek izmantoti vienlaicīgi, lai nodrošinātu bojājuma vietas noteikšanu gadījumā, ja kādu iemeslu dēļ nav kārtībā sakaru kanāls.

4. LĪNIJAS DIFERENCIĀLĀS AIZSARDZĪBAS SAKARU KANĀLA IETEKME UN PĀRBAUDES

Laika kavējuma asimetrijas ietekme uz diferenciālās strāvas aprēķinu

Pastāv iespēja, ka laika kavējumi informāciju pārraidot un saņemot nav vienādi. Līdz ar to nav iespējams pareizi noteikt divu strāvu vektoru leņķisko kļūdu. Diferenciālās strāvas noteikšanā parādās leņķa kļūda $\Delta\varphi$ starp strāvu vektoriem. 50Hz sistēmā $\Delta\varphi$ var noteikt šādi (radiānos):

$$\Delta\varphi = 2 \pi f \Delta T_a, \tag{4.1.}$$

kur ΔT_a - laika kavējuma asimetrija, kuru nosaka sekojoši:

$$\Delta T_a = |T_{TX} - T_{RX}| / 2. \tag{4.2.}$$

Izmantojot iespējamo leņķu kļūdu, $\Delta\varphi$ var noteikt diferenciālās strāvas kļūdu:

$$\Delta I = I(\sqrt{(1 - \cos\Delta\varphi)^2 + (\sin\Delta\varphi)^2}) \tag{4.3.}$$

kur I - fāzes strāva.

Veicot šādu pārrēķinu var noteikt, piemēram, ka 1ms laika kavējuma asimetrijas gadījumā, radīsies 18° leņķa kļūda starp attālināto terminālu strāvu vektoriem [37]. Gadījumā, ja telekomunikāciju pakalpojumu sniedzējs nav spējīgs nodrošināt laika kavējuma asimetrijas kontroli un kompensēšanu, tad jāveic papildus pasākumi, kas novērstu lieku aizsardzības nostrādi. Vienkāršākais pasākums ir pacelt aizsardzības iestatījumu, lai padarītu aizsardzību nejutīgāku. Šādi tiek zaudēta viena no galvenajām garendiferenciālās aizsardzības priekšrocībām – ļoti augstais jutīgums, jo normāli aizsardzības iestatījums ir samērojams ar līnijas nominālo strāvu, kā arī šāda kompensācija ir lietderīga kavējuma laika asimetrijai līdz $50\mu s$. Ja laika asimetrija ir lielāka, tad GDA praktiski nav darba spējīga. Lai nodrošinātu selektīvu diferenciālās aizsardzības darbu, nepieciešams izveidot sekojošas papildus bloķējošas funkcijas, kuras paredzētas sakaru kanāla kvalitātes analīzei [38,39]:

- GDA funkcijas bloķēšana, ja kopējais laika kavējums pārsniedz maksimāli iespējamo, kuru nosaka terminālā iebūvētās strāvas vektoru atmiņas apjoms;
- īslaicīga GDA bloķēšana, ja noteiktā laika posmā notiek atkārtota kopējā laika kavējuma izmaiņa. Laika kavējuma maiņu var izraisīt multipleksētā sakaru kanāla ceļa maiņa. Jaunu kavējuma laiku iespējams noteikt vienīgi pēc nākamās paketes informācijas saņemšanas. Dotajā gadījumā gan pastāv varbūtība, ka, ja šajā laikā notiks īsslēgums ārpus aizsardzības zonas, notiks aizsardzības lieka nostrāde;
- GDA bloķēšana, ja bojāta saite ar GPS iekārtu vai savlaicīgi nepienāk sinhronizācijas impulss. Bloķēšana nepieciešama, ja pielietojamais sakaru kanāls ir ar neprognozējamu kavējuma laika asimetriju;
- GDA bloķēšana, ja bojāto pakešu skaits pārsniedz noteiktu skaitu. Paketes ar bojātiem datiem, parādās sakaru kanāla traucējuma gadījumā un tas nav lietojams aizsardzības vajadzībām.

Diferenciālās aizsardzības sakaru kanāla darbības statistika

Statistisko datu vākšanai tika izmantotas 29 330kV un 110kV elektropārvades līnijas, kurās tika fiksētas datu pārraides pārtraukums un traucējumi. Tabulā 4.1. uzrādītas aizsardzību bloķēšanās statistika gada laikā. Statistikas datu vākšanai tika izmantoti termināli ar iebūvēto notikumu reģistrācijas funkciju. Sakaru kanāla traucējums tiek fiksēts, ja notiek sakaru pārtraukums (T_{cilpas} lielāks par uzdoto), vai tiek fiksēts datu kropļojums (nododot datus tiek aprēķināta kontrolsumma, kura tiek nodota pretējam puskomplektam un izmantota sakaru kanāla darbības spējas pārbaudei).

4.1. tabula. Aizsardzības iekārtu diferenciālās funkcijas bloķēšanās statistika.

Aizsardzības termināla tips 7SD 3		
1	LNr.204	Līdz 2 traucējumiem dienā
2	LNr.213	Traucējumi nav fiksēti
3	LNr.214	Līdz 2 traucējumiem dienā
4	LNr.215	Traucējumi nav fiksēti
5	LNr.216	Traucējumi nav fiksēti
6	LNr.220	Vairāk, kā 2 traucējumi dienā
7	LNr.221	Vairāk, kā 2 traucējumi dienā
8	LNr.609	Līdz 2 traucējumiem dienā
Aizsardzības termināla tips 7SD 4		
9	LNr.161	Līdz 2 traucējumiem nedēļā
10	LNr.162	Līdz 2 traucējumiem dienā

11	LNr.200	Līdz 2 traucējumiem nedēļā
12	LNr.241	Līdz 2 traucējumiem dienā
13	LNr.243	Traucējumi nav fiksēti
14	LNr.244	Vairāk, kā 2 traucējumi dienā
15	LNr.245	Vairāk, kā 2 traucējumi dienā
16	LNr.246	Līdz 2 traucējumiem dienā
17	LNr.304	Līdz 2 traucējumiem dienā
18	LNr.310	Līdz 2 traucējumiem nedēļā
19	LNr.311	Traucējumi nav fiksēti
20	LNr.313	Vairāk, kā 2 traucējumi dienā
21	LNr.314	Traucējumi nav fiksēti
22	LNr.320	Traucējumi nav fiksēti
23	LNr.322	Traucējumi nav fiksēti
24	LNr.323	Līdz 2 traucējumiem nedēļā
25	LNr.451	Līdz 2 traucējumiem nedēļā
26	LNr.466	Līdz 2 traucējumiem nedēļā
		Aizsardzības termināla tips LIDA
27	LNr.233	Līdz 2 traucējumiem nedēļā
28	LNr.236	Vairāk, kā 2 traucējumi dienā
29	LNr.151	Līdz 2 traucējumiem dienā

Kā galvenie traucējumu avoti ir konstatēti šādi cēloņi:

- datu pārraides laika maiņa;
- iespējama komunikācijas kanāla asimetrija;
- sakaru pārtraukumi.

No iegūtajiem rezultātiem var redzēt, ka tikai 28% no novērotajiem diferenciālās aizsardzības komplektiem netika bloķēti. Vienu vai divas reizes nedēļā tiek bloķēti 55% no aizsardzības komplektiem. Pārējo komplektu bloķēšanas gadījumu biežums ir pietiekami liels, lai to darbību uzskatītu par nedrošu.

Datu pārraides kanāla pārbaudes iekārta

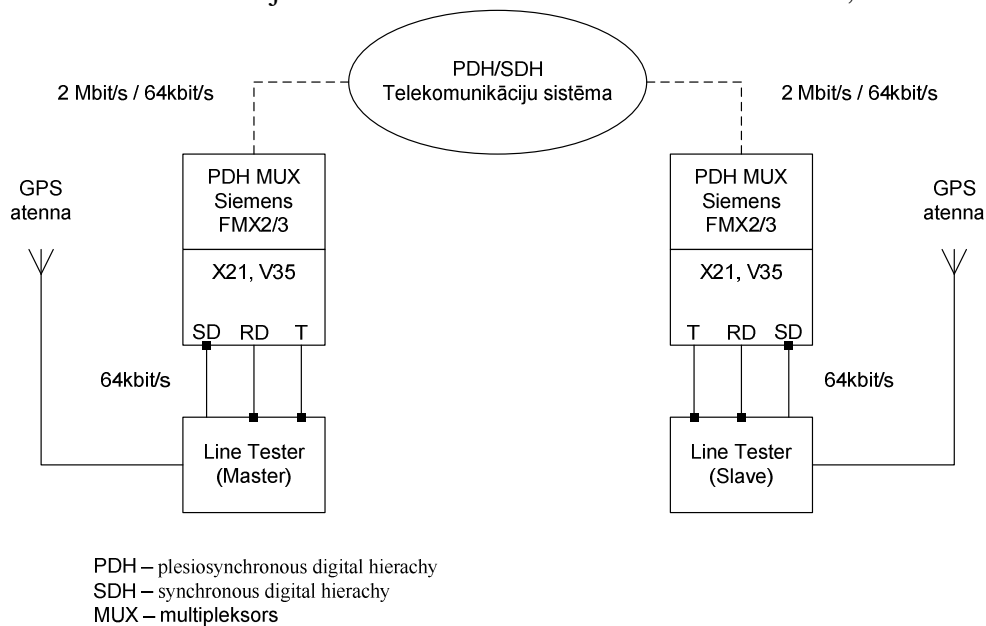
GDA bloķēšana sakaru kanāla traucējumu parādīšanās vai laika kavējuma izmaiņas dēļ samazina kopēju aizsardzības efektivitāti, bet tomēr līnija nepaliek bez aizsardzības tāpēc, ka GDA tiek rezervēta ar distantaizsardzību vai maksimālstrāvas un virzīto zemesslēguma aizsardzību. Laika posmā no 2000.gada līdz 2008.gadam notika GDA liekas nostrādes gadījumi, kad nav bijis iespējams precīzi noteikt atslēguma iemeslu, tas ir oscilogrammas bojājuma laikā neuzrāda bojājumu, un visu veidu pārbaudes neuzrādīja iespējamo nepareizas nostrādes cēloņus. Loģiski veiktas analīzes rezultātā tika dots slēdziens, ka lieka aizsardzības nostrāde varētu būt izsaukta ar sakaru kanāla laikā kavējumu īslaicīgu asimetriju.

Lai noskaidrotu GDA komplektu bloķēšanas cēloņus, kā arī izmeklētu aizsardzības nepareizas darbības cēloņus, parādījās nepieciešamība kontrolēt izmantoto sakaru kanāla raksturojumus. Sakaru kanāla parametru kontroles realizācijai reālajā laikā tika izstrādāta speciala mikroprocesoru iekārta „Line tester”, kurai būtu jānodrošina:

- komunikācijas kanāla stabilitātes pārbaude;
- datu pārraides procesa kontrole ar datu pakešu veseluma pārbaudi;
- komunikācijas kļūdu noteikšana, klasifikācija un reģistrācija;
- komunikācijas kanāla laika kavējumu noteikšana:
 - kopējā kanāla kavējuma noteikšana;
 - sakaru kanāla raidīšanas/uztveršanas laika nebalansa noteikšana;

- laika kavējuma nobīdes reģistrēšana;
- komunikācijas kanāla datu pārraides frekvences un frekvences nobīdes mērījums un reģistrācija.

Sakaru kanāla pārbaudes iekārta, kura sastāv no divām iekārtām (termināliem), tika pieslēgta SDH/PDH tīklam ar V.35 (X.21) interfeisu (skat.4.1.att.). Informācijas apmaiņa starp ierīcēm notiek nosūtot datu paketes virknes formātā. Termināli strādā pēc *master/slave* principa. Termināls, kurš izpilda *master* funkciju, uzsāk datu pārraidi un kontrolē datu paketes saturu. Termināls, kurš izpilda *slave* funkciju, veic iepriekš noteiktas izmaiņas datu paketē un pārsūta tās *master* terminālam. Daļa no informācijas, kas tiek pārsūtīta starp termināliem, piemērota datu autentiskumu kontrolei un sakaru kanāla laika kavējumu izskaitļošanai. Pamatojoties uz savu iekšējo laiku un otra termināla atsūtīto laiku, *master* termināls veic laika kavējuma aprēķinu. Noteikto laika kavējumu *master* termināls sūta *slave* terminālam, katrā datu paketē.



4.1.att. Iekārtas “Line Tester” pievienošanas shēma.

Vadoties pēc lokālās un saņemtās informācijas, tiek izskaitļota sakaru kanāla pilnā aizkave “Tloop”. Ja katrai no ierīcēm ir pieslēgta GPS antena un ierīces ir sinhronizētas laikā, tad tiek izskaitļota ne tikai pilna kanāla aizkave “Tloop”, bet arī aizkaves abos virzienos atsevišķi “Tforw” un “Tback”. Termināli pastāvīgi kontrolē laika aizkaves un salīdzina “Tloop”, “Tforw” un “Tback” ar iepriekš izskaitļotām vērtībām un, ja starpībā ir lielāka par iepriekš uzdotu vērtību (palaišanas iestatījumu), tad ierīce reģistrē visus kontrolējamus signālus vērtības kā oscilogrammu. Katra no ierīcēm kontrolē informācijas apmaiņas procesu un kļūdas gadījumā, skaita tos četrus neatkarīgas skaitītājos:

- Byte error counter, uzskaita saņemto kļūdaino baitu skaitu;
- Header error counter, uzskaita kļūdaini pārraidīto datu pakešu skaitu;
- CRC error counters, uzskaita 32- bitu kontrolsummas koda kļūdas;
- Timeout counter, uzskaita nepārsūtīto datu pakešu skaitu. Datu pakete tiek uzskaitīta par nepārsūtītu, ja tā kavējas ilgāk par 50ms.

Kļūdas skaitītāju saturs arī tiek ierakstīts oscilogrammā. Oscilogrammas tiek saglabātas ierīces energoneatkarīgajā atmiņā un tās var pārsūtīt personālajā datorā, kā arī caurskatīt ar speciālu attēlošanas programmu.

„Line tester” iekārtas praktiskas pielietošanas rezultāti

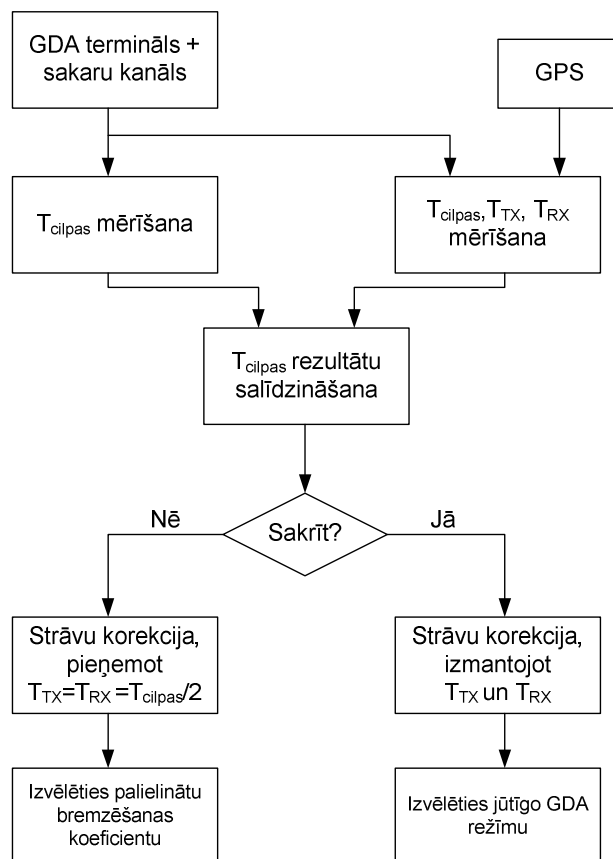
„Line Tester” iekārta tiek izmantota AS „Augstsprieguma tīkls” 330kV un 110kV augstsprieguma elektropārvades līniju GDA terminālu sakaru kanāla pārbaudei. GDA aizsardzības pareiza darbība prasa vienādas laika aiztures signālu pārraidei un pieņemšanai. Zemāk aprakstīti gadījumi, kad „Line Tester” iekārta palīdzēja noskaidrot GDA neskaidru darbību un norādīja uz trūkumiem vai traucējumiem RAA sakaru kanāla darbībā.

Uz 110kV elektropārvades līnijas LNr.266 apakšstacijās Nr.60 „Grobiņa” un apakšstacijā Nr.166 „Venta” uzstādītās GDA iekārtas vairākkārtīgi mēneša laikā signalizēja par traucētu darbību, kura ilgā ne vairāk kā 2-3 minūtes. Izsauktā operatīvā brigāde nekādus traucējumu un bojājumus nekonstatēja. GDA tika izvesta no darba un sakaru kanālam pieslēdza „Line Tester” iekārta. „Line Tester” iekārtas notikumu saraksts parādīts 4.6.attēlā. Ar iekārtas palīdzību tika konstatēts, ka laikā, kad tika fiksēti GDA sakaru traucējumi, mainījās sakaru kanāla kopējais kavējuma laiks no 2.37ms uz 4.03ms. Lai novērstu GDA nestabilu darbību, tika nolemts uzstādīt GPS iekārtas, kuras nodrošinātu GDA terminālos mērījumu sinhronizāciju.

Ārēja īsslēguma gadījumā lieki nostrādāja GDA uz LNr.247 „Mārupe” – „Zunda”. Veicot ārpuskārtas pārbaudi mērmaiņiem un aizsardzības termināliem, tika konstatēta palielināta nebalansa strāva, kuras iemeslu sākotnēji nebija iespējams konstatēt. Tika nolemts uzstādīt „Line tester” iekārta, kura uzrādīja 1.3ms lielu sakaru kanāla asimetriju. Veicot iespējamās diferenciālās strāvas pārrēķinu ārēja īsslēguma gadījumā pēc (4.3.), noskaidrojās, ka tā pārsniedza diferenciālās aizsardzības iestatījumu un sakrita ar faktiski konstatēto. GDA tika izvesta no darba līdz sakaru kanāla sakārtošanai.

GDA bloķēšanas algoritma pilnveidošana sakaru kanāla traucējumu gadījumos

Visdrošāko un visefektīvāko garendiferenciālās aizsardzības risinājumu var sintezēt, vienlaicīgi izmantojot optiskos sakaru kanālus un GPS. Zemāk tiks aprakstīts jauns GDA darbības algoritms, kurš izmanto GPS dotās jaunās iespējas, vienlaicīgi ņem vērā šīs sistēmas atteices vai traucējuma iespējas. Tiek piedāvāts, šajā gadījumā, nevis veikt GDA pilnu bloķēšanu, bet tikai veikt jūtīguma korekciju nepieciešamības gadījumā. Atbilstoša algoritma struktūrshēma dota attēlā 4.2.



4.2. att. GDA darbības režīma izvēles struktūrshēma.

Dotā algoritma pamatā ir hipotēze: divu pilnīgi dažādu sistēmu laika intervālā T_{cilpas} mērījumi sakrīt, tad abas sistēmas tiek uzskatītas par pilnīgi darbotiespējīgām. Pieņemot šo hipotēzi tiek ignorēts abu sistēmu bojājums, kurš dod kļūdainu, bet vienādu mērīšanas rezultātu. Tāda iespēja teorētiski eksistē, bet atbilstoša notikuma varbūtība, acīmredzami tuvojas nullei. Piedāvātā algoritma izmantošana atļauj saglabāt GDA darbotiespēju ne tikai pie GPS atteikumiem, bet arī pie optiskā kanāla salīdzinoši nestabilas darbības, teiksim, pie pārraides laika izmaiņām 1÷2ms robežās (precīzākiem secinājumiem ir nepieciešami papildus pētījumi).

5. KOPĒJIE SECINĀJUMI

1. Izpildošo svarīgo lomu energosistēmu vadības RA un A iekārtu bojājumi un darbības atteices var izsaukt milzīgus ekonomiskos un sociālos zaudējumus, par ko liecina pasaules un Latvijas energosistēmu prakse un statistikas dati. Atteikumu varbūtības samazināšanu var sasniegt veicot RA un A iekārtu un sistēmu pārbaudes. Pārbaudu veikšana var būt izmantota virtuālā pārbaudu un Monte-Karlo metode kopā ar energosistēmu normālo un avārijas režīmu programmatūrām, papildinātām ar nepieciešamiem datu formāta izmaiņas blokiem. Virtuālo pārbaudu iespējas nodrošināšanai nepieciešama speciāla testēšanas iekārtu struktūra, kas aprīkota ar viegli realizējamām programmām.
2. Izveidotā RA un A virtuālās pārbaudes laboratorija ar izstrādātām iekārtām un programmatūrām nodrošina ekonomiski pamatotu visplašāko pārbaudu veikšanu, un ir spējīga sekmēt jaunu RA un A iekārtu, sistēmu izveidi un pētījumus.
3. Izgatavoto un uzstādīto RA un A augstsprieguma līniju terminālu ekspluatācija pierāda pamatoto un pieņemto dotā darbā risinājumu efektivitāti un pareizību.

4. Sakaru kanālu traucējumi un atteices var izsaukt visas aizsardzības sistēmas atteikumus. Latvijas energosistēmā veiktie pētījumi pierādīja atteikumu iespēju. Sakaru kanālu darbaspējas pārbaudei sintezēta speciāla aparatūra un pierādīta tās efektivitāte, noskaidrojot reālo iekārtu atteikumus.

5. GPS un optisko kanālu kopēja izmantošana dod iespēju tālākai aizsardzību drošuma un efektivitātes līmeņa paaugstināšanai. Piedāvāta struktūra, kura ir spējīga vienlaicīgi kontrolēt GPS un optisko sakaru kanālu darbību, abu sistēmu pareizas darbības gadījumā nodrošina palielinātu aizsardzības jūtību, bet GPS atteikuma gadījumā saglabā darboties spēju.

Literatūras saraksts

1. J. Putniņš. Elektroapgādes sistēmas relejaizsardzības un automātika. Valsts izdevniecība "Zvaigzne", LV 1013, Rīgā. 1993. Trešais pārstrādātais un papildinātais izdevums.
2. CRIS International Workshop on POWER SYSTEM BLACKOUTS ~ Causes, Analyses and Countermeasures. Lund, Sweden.
3. James S. Thorp, Harles N. Mellows, Professor in Engineering. The Protection System in Bulk Power Networks. School of Electrical and Computer Engineering. Cornell University. September 8, 2003.
4. Aabø, Y; Goin, R. & Lundqvist, B.: "Risk Analysis: A New Aspect on Protection and Local Control Design", DPSP, Amsterdam, April 2001.
5. M. Igel, P. Schenger. Test Procedures for Protection Devices. AEG ATLAS GmbH and Technische Universität, Dresden, Germany.
6. IEE Standard Surge Withstand Capability (SWC) Tests for Protective Relays and Relay Systems. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 345 East 47th Street, New York, NY 10017, U.S.A.
7. Sauhatas A., Loman T., Utan A., Dolgicer A., Leite L. System for Electrical Power Processes Recording. Aktualne Problemy w Electroenergetyce, Gdansk, Jurata, 1997.
8. A. C. Webb. Relay Engineering Services Limited, UK. Computer Generation of Test Quantities for Testing Protection Relays.
9. M. Agrasar, J. R. Hernandez, F. Uriondo, J. Amantegui, J. M. Gallastegui, J.L. Martinez. Optimized Relay Testing Systems.
10. Alexander Dierks. OMICRON electronics GmbH, Austria. New Simulation Models to Dynamically Test Impedance Relays.
11. A Digitally-Controlled, Real-Time, Analog Power-System Simulator for Closed-Loop Protective Relaying Testing. G. Nimmersjo, O. Werner-Erichsen, B. Hillstrom, G. D. Rockefeller. ASEA AB, Vasteras. **Journal Article: IEEE Transactions on Power Delivery** (impact factor: 1.16). 02/1988; DOI:10.1109/61.4239.
12. GPS Synchronized Measurements in Power Systems State Estimation: An Overview R. F. M. Brandao, J. A. Beleza Carvalho, F. M. Barbosa. Inst. Super. de Eng. do Porto, Porto; **Conference Proceeding: 10/2006; DOI:10.1109/UPEC.2006.367518** ISBN: 978-186135-342-9 In proceeding of: Universities Power Engineering Conference, 2006. UPEC '06. Proceedings of the 41st International Conference, Volume: 2.
13. Advanced Synchrophasor Applications. A. P. S. Meliopoulos, G. J. Cokkinides. Sch. of Electr. & Comput. Eng., Georgia Inst. of Technol., Atlanta, GA, USA; **Conference Proceeding: 08/2010; DOI:10.1109/PES.2010.5590037** In proceeding of: Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE.
14. Harmonic Monitoring System via Synchronized Measurements. B. Fardanesh, S. Zelingher, A. P. Sakis Meliopoulos, G. J. Cokkinides. New York Power Authority, New York, NY; **Conference Proceeding: 11/1998; DOI:10.1109/ICHQP.1998.759956** ISBN: 0-

- 7803-5105-3 In proceeding of: Harmonics And Quality of Power, 1998. Proceedings of the 8th International Conference on, Volume: 1.
15. Test and Evaluation System for Multi-Protocol Sampled Value Protection Schemes. D. M. E. Ingram, D. A. Campbell, P. Schaub, G. Ledwich. **Conference Proceeding:** 07/2011; DOI:10.1109/PTC.2011.6019243 In proceeding of: PowerTech, 2011 IEEE, Trondheim.
 16. Performance of IEC 61850-9-2 Process Bus and Corrective Measure for Digital Relaying. M. G. Kanabar, T. S. Sidhu, Dept. of Electr. & Comput. Eng., Univ. of Western Ontario, London, ON, Canada. **Journal Article:** IEEE Transactions on Power Delivery (impact factor: 1.16). 05/2011; DOI:10.1109/TPWRD.2009.2038702.
 17. Comparison of Analog-to-Digital Filter Conversion Methods in a Digital Flickermeter. Soo-Hwan Cho, Gilsoo Jang, Sae-Hyuk Kwon, Jung-Wook Park. **Journal Article:** Electrical Engineering (impact factor: 0.33). 04/2012; 91(3):125-131. DOI:10.1007/s00202-009-0122-1.
 18. Z. Wyocki. Silesian. MTZ2 – A Computer Based Relay Test System. Technical University of Gliwice, 44-100 Gliwice, Poland.
 19. Marlene Lillian, Stanley I. Thompson. GPS Satellite Synchronized Test System Recreate Fault Conditions to Troubleshoot Protective Relay Schemes.
 20. M. E. Agudo WAPA, USA, B. Kasperek, WAPA, USA, S. I. Thompson, AVO International, USA. END-TO-END Relay Testing Using GPS-Synchronized Secondary Injection.
 21. Ljubomir A. Kojovic, Timothy R. Day. Cooper Power Systems, Franksville, Wisconsin. Application of Real-Time Power System Simulators for Testing Protective Relay System Operational Characteristics.
 22. L. R. Dann, H. J. Vermeulen. Department of Electrical Engineering, University of Stellenbosch. A Transputer Based Waveform Synthesizer for Protection Relay Test and Parameter Estimation Applications.
 23. Andrew C. Wevv and Michael Webb. Automated Testing of Power System Protection Relays.
 24. Identification and Validation of Dynamic Global Load Model Parameters for Use in Power System Frequency Simulations. J. W. O'Sullivan, M. J. O'Malley, Dept. of Electron. & Electr. Eng., Univ. Coll. Dublin. **Journal Article:** IEEE Transactions on Power Systems (impact factor: 1.94). 06/1996; DOI:10.1109/59.496165.
 25. J. Rumbaugh and e. al., *Object-Oriented Modeling and Design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991.
 26. PSS/E-27 Online Documentation, Power Technologies, a division of S&W Consultants Inc., December 2000.
 27. Wilson, R. E., Kusters, J. A., International Timekeeping for Power System Users, Developments in Power System Protection. Conference Publication No.434, March 1997, pp. 351-354.
 28. Wilson, R. E., Methods and Users of Precise Time in Power Systems, Transaction on Power Delivery, Vol. 7, No 1, January 1992, pp. 126-131.
 29. TMS32054x DSP Reference Set. Volume 1: CPU and Peripherals. Literature Number: SPRU131C, Manufacturing Part Number: D425004-9761, Revision A, October 1996.
 30. Line Differential Protection with Distance Protection 7SD5. Manual.
 31. 110/220 kV Line Protection Terminal LIDA. Manual.
 32. Nabae, T. Tanaka, "A New Definition of Instantaneous Active-Reactive Current and Power Based on Instantaneous Space Vectors on Polar Coordinates in Three-Phase Circuits," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 11, no. 3, pp. 1238–1243, 1996.
 33. E. Emmanuel, "Summary of IEEE Standard 1459: Definitions for Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol.40, no. 3, pp. 869–876, 2004.

34. G. Benmouyal, "The Trajectories of Line Current Differential Faults in the Alpha Plane", Proceedings of the 32nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2005.
35. M. G. Adamiak, G. E. Alexander, and W. Premerlani, "Advancements in Adaptive Algorithms for Secure High Speed Distance Protection", *Twenty Third Annual Western Protective Relaying Conference*, October 1996.
36. T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamuaura, R. Kondow, T. Matsushima, "Development of a New Type of Fault Locator Using One Terminal Voltage and Current Data", *IEEE Trans.*, vol. PAS-101, No. 8, August 1982, pp. 2892-2898.
37. L. Eriksson, M. Saha, S. D. Rockfeller, "An Accurate Fault Location with Compensation for Apparent Reactance in the Fault Resistance Resulting from Remote-End Infeed", *IEEE Trans. on PAS*, PAS-104, No. 2, 1985.
38. A. Sauhats, M. Danilova, "Fault Location Algorithms for Super High Voltage Power Transmission Lines", in *Proc. 2003 IEEE Bologna Power Tech Conf.*