

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

M. Silarājs

**RELEJAISARDZĪBAS UN AUTOMĀTIKAS
KOMPLEKSU PĀRBAUDES METODES UN
LĪDZEKĻI**

PROMOCIJAS DARBS

2012

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte

Enerģētikas institūts

Mārtiņš Silarājs

Doktora studiju programmas „Enerģētika” doktorants

**RELEJAISARDZĪBAS UN AUTOMĀTIKAS
KOMPLEKSU PĀRBAUDES METODES UN
LĪDZEKĻI**

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs

Dr. habil. sc. ing., profesors

A.Sauhats

Rīga 2012

ANOTĀCIJA

Darbs veltīts relejaizsardzības un automātikas iekārtu pārbaudes metožu un līdzekļu attīstībai. Veikto pētījumu aktualitāte saistīta ar Latvijas energosistēmas efektīvu un stabilu darbību, plānu un attīstības stratēģiju svarīgumu tautsaimniecībā.

Apkopota Latvijas energosistēmas pārvades daļas relejaizsardzību funkcionēšanas rezultātu statistika, kā arī esošo pārbaudes metožu un līdzekļu analīze pierādīja pārbaudžu metodes, kuras pamatā ir statistiskā pieeja un Monte-Karlo metode, lietderīgumu un priekšrocības.

Sintezēta piemērota pārbaudēm relejaizsardzības un automātikas termināla struktūra, kas paredzēta pielietošanai Baltijas valstu energosistēmās, kā arī izstrādāta un realizēta relejaizsardzību nolūkos izmantoto elektrisko sakaru kanālu pārbaudžu iekārta.

Izstrādāto algoritmu un iekārtu aprobācija tika veikta konkrētās Latvijas energosistēmas apakšstacijās un augstsprieguma elektropārvades līnijās. Iegūtie rezultāti liecina par izstrādāto algoritmu darbību un pielietoto metožu pamatotību.

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā. Tas satur ievadu, 4 nodaļas, noslēgumu un rekomendācijas nākotnes darbam un literatūras sarakstu. Darbā ir 58 attēli, 2 tabulas, kopā 130 lappuses. Literatūras sarakstā norādīti 88 izmantotās literatūras avoti.

ANNOTATION

The given theses are dedicated to the development of relay protection and automation equipment test methods and means. Study actuality is associated with the Latvian energy efficient and sustainable operations, plans and development strategies, diversity in the field of energy.

Analysis of Latvian energy transmission network relay protection and automation functioning statistic, as well as the existing test methods and equipment proved the efficiency and advantages of testing method, which is based on statistical approach and Monte-Karlo method.

The structure of relay protection and automation terminal for using in Baltic countries is synthesized, as well testing equipment for electrical telecommunication channels is designed.

The developed algorithms and equipment was used and installed on energy transmission grid for substations and power lines in Latvia. The results showed that used algorithms and methods were successful.

Theses are written in Latvian language. It contains an introduction, Chapter 4, conclusions and recommendations and literature list. The work contains 58 images, 2 tables, for a total of 130 pages. Specify the list of 88 used literature sources.

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена методам и средствам проверки устройств релейной защиты и автоматики. Необходимость проведённых исследований продиктована актуальностью задачи по обеспечению эффективной и стабильной работы Латвийской энергосистемы, а также важностью для народного хозяйства, планов и стратегий развития энергетической отрасли.

В работе проведён статистический анализ функционирования релейной защиты передающей части Латвийской энергосистемы, а также анализ существующих методов и средств проверки релейной защиты, которые выявили целесообразность и преимущества применения методов проверки, основанных на статистическом подходе и методе Монте-Карло.

Синтезирована приспособленная к проверкам структура терминала релейной защиты и автоматики, нашедшая практическую реализацию в устройствах, эксплуатируемых в странах Балтии, а также разработано и реализовано проверочное устройство каналов связи, используемых для нужд релейной защиты.

Апробация разработанных алгоритмов и устройств проведена на конкретных подстанциях и линиях электропередач Латвийской энергосистемы. Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности разработанных алгоритмов и обоснованности методов их реализации.

Работа на получение докторской степени выполнена на латышском языке. Работа содержит 4 главы, выводы и рекомендации и список литературы. Работа содержит 58 рисунков, 2 таблицы. Общий объём работы 130 листов. В списке литературы указано 88 источников.

Saturs.

Pateicības	8.lpp.
Saīsinājumu saraksts	9.lpp.
Tabulu saraksts	10.lpp.
Attēlu saraksts	11.lpp.
Ievads	13.lpp.
Tēmas aktualitāte	13.lpp.
Darba mērķis un atrisinātie uzdevumi.....	16.lpp.
Izvirzītā mērķa un uzdevumu atrisināšanai, izmantotas šādas pētījuma metodes.....	17.lpp.
Promocijas darba zinātniskā novitāte	17.lpp.
Promocijas darba praktiskā nozīme.....	17.lpp.
Aizstāvēšanai izvirzītas pamatnostādnes.....	18.lpp.
Promocijas darba aprobācija.....	18.lpp.
Publikācijas.....	19.lpp.
Promocijas darba struktūra un apjoms.....	19.lpp.
1. RELEJAISARDZĪBAS PĀRBAUDES METODES UN LĪDZEKĻI.....	27.lpp.
1.1. Relejaizsardzības un automātikas attīstības etapi un struktūras.....	27.lpp.
1.2. Digitālas RA un A darbības princips.....	33.lpp.
1.3. Relejaizsardzības un automātikas iekārtu atteikumi, to iemesli un sekas.....	38.lpp.
1.3.1. Relejaizsardzības un automātikas atteikumu piemēri un analīze.....	38.lpp.
1.3.2. Relejaizsardzības un automātikas atteikumu intensitāte Latvijas elektropārvades tīklā.....	40.lpp.
1.4. Relejaizsardzības un automātikas galvenie atteikumu veidi.....	46.lpp.
1.5. Relejaizsardzības un automātikas darbības atteikumu iemesli.....	47.lpp.
1.6. Pārbaudes metožu veidi un klasifikācija.....	48.lpp.

1.7. Relejaizsardzības un automātikas pārbaudes iekārtas	57.lpp.
1.7.1. Reālā laika digitālie simulatori.....	57lpp.
1.7.2. Vienkāršotie reālā laika simulatori.....	58.lpp.
1.8. Secinājumi.....	63.lpp.
2. Virtuālo pārbažu metodes pamatojums un realizācija.....	64.lpp.
2.1. Ievads	64.lpp.
2.2. Virtuālo pārbažu metodes būtība.....	65.lpp.
2.3. Virtuālās testēšanas organizācija	66.lpp.
2.4. Energosistēmu un to elementu modeļi	68.lpp.
2.5. Energosistēmas darbību simulējošas programmatūras	71.lpp.
2.6. Pārbaude un pārbažu skaita noteikšana.....	72.lpp.
2.7. Virtuālās testēšanas metodes realizācija.....	76.lpp.
2.7.1. Testēšana signālu parametru un iestatījumu telpā.....	78.lpp.
2.7.2. Testēšana energosistēmas parametru telpā.....	79.lpp.
2.7.3. Pārbaudes ekspluatācijas gaitā.....	80.lpp.
2.8. Virtuālās laboratorijas programmu pakete.....	81.lpp.
2.9. Secinājumi	84.lpp.
3. Daudzfunkcionālā elektropārvades līniju releju aizsardzības termināla sintēze....	86.lpp.
3.1. Ievads	86.lpp.
3.2. Augstsprieguma līniju releju aizsardzības un automātikas principi.....	86.lpp.
3.3. Termināla aparātizpildījums.....	89.lpp.
3.4. Releju aizsardzības un automātikas termināla funkcijas un programmatūras struktūra.....	91.lpp.
3.4.1. Nevienāda pārraides laika kavējuma efekts	95.lpp.
3.5. Ārējā programmatūra darbam ar iekārtu	100.lpp.
3.6. Mikroprocesoru aizsardzības darbības rezultāti un to analīze	101.lpp.

3.6.1. Aizsargājamā elektropārvades tīkla posma apraksts.....	101.lpp.
3.6.2. Īsslēguma analīze un bojājuma vietas noteicēja rezultāti.....	101.lpp.
3.7. Secinājumi.....	104.lpp.
4. Līnijas diferenciālās aizsardzības sakaru kanāla ietekme un pārbaudes	105.lpp.
4.1. Ievads	105.lpp.
4.2. Datu pārraides tīkla pielietojums relejaizsardzības vajadzībām	106.lpp.
4.3. Laika kavējumu asimetrijas ietekme uz diferenciālās strāvas aprēķinu ..	108.lpp.
4.4. Diferenciālās aizsardzības sakaru kanāla darbības statistika	110.lpp.
4.5. Datu pārraides kanāla pārbaudes iekārta	112.lpp.
4.6. „Line tester” iekārtas praktiskas pielietošanas rezultāti	115.lpp.
4.7. GDA pārbaude laboratorijas apstākļos	116.lpp.
4.8. GDA bloķēšanas algoritma pilnveidošana sakaru kanāla traucējumu gadījumos	119.lpp.
4.9. Secinājumi	120.lpp.
5. Noslēgums.....	121.lpp.
6. Nākotnes darbs.....	122.lpp.
Literatūras saraksts.....	123.lpp.

Pateicības.

Darbs ir uzrakstīts laikā no 2002. līdz 2012. gadam Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas institūtā. Pateicos visiem saviem RTU Enerģētikas un Elektrotehnikas fakultātes pasniedzējiem un skolotājiem par zināšanām un pieredzi, ko viņi man deva.

Izsaku savu īpašu pateicību manam skolotājam, darba vadītājam un Enerģētikas institūta direktoram prof. Antanam Sauhatam par nenovērtējamu palīdzību darbā, bez kura šī disertācija nebūtu iespējama.

Paldies par palīdzību, konsultācijām un atbalstu Dr. Sc. Ing. Andrejam Utānam.

Īpaša pateicība M.Sc. Lilijai Leitei, par palīdzību statistiskās informācijas savākšanā un apstrādē.

Manas pateicības visiem līdzautoriem: Dr. Habil. Sc. Ing. Prof. Antanam Sauhatam, Dr. Sc. Ing. Andrejam Utānam, M.Sc. Lilijai Leitei, Dr.Sc.Ing. Marijai Zimai, Dr.Sc.Ing. Aleksandram Dolgiceram.

Pateicos visiem saviem draugiem par atbalstu un sapratni.

Un visbeidzot milzīgs paldies un pateicības manai ģimenei par pastāvīgu atbalstu un gādību, par iedvesmu un interesi, par pacietību un izpratni, kurus es jutu visu šo laiku. Paldies!

Mārtiņš Silarājs

Rīga, 2012. g. 28.augusts

Saīsinājumu saraksts.

AAI – automātiskā atpakaļ ieslēgšana;
AC – Analog-Ciparu;
ACP – Analog-Ciparu pārveidotājs;
BVN – bojājuma vietas noteikšana;
EPL – elektropārvades līnija;
DA – distanta aizsardzība;
GDA – garendiferenciālā aizsardzība
SBA – slēdža bojājuma aizsardzība;
MSA – maksimālstrāvas aizsardzība
RA un A – releja aizsardzība un automātika;
ZSA – zemesslēguma aizsardzība;
VZSA – virzītā zemesslēguma aizsardzība;

Tabulu saraksts.

1. 1.1.tabula. RA un A iekārtu klasifikācija.
2. 4.1. tabula. Aizsardzības iekārtu diferenciālās funkcijas bloķēšanās statistika.

Attēlu saraksts.

1. 1.1.att. Analogo RA un A struktūrshēma.
2. 1.2.att. RA un A mikroprocesorierīču struktūra.
3. 1.3. att. Plašas vides aizsardzības struktūra.
4. 1.4. att. Digitālas RA un A pieslēguma struktūra.
5. 1.5. att. Digitālas apakšstacijas RA un A struktūra.
6. 1.6.att. Analogo signālu diskretizācija.
7. 1.7.att. Struktūra signālu attēlošanai vektoru formā.
8. 1.8.att. Vienkāršotas energosistēmas ekvivalentā shēma.
9. 1.9.att. Elektroapgādes shēma.
10. 1.10.att. RA un A darbības analīze.
11. 1.11.att. Atteikumu intensitāte.
12. 1.12.att. Pārbaude metožu realizācijas algoritms.
13. 1.13.att. Tehniskā uzdevuma izstrāde un saskaņošana.
14. 1.14.att. Atbilstības pārbaude.
15. 1.15.att. Iekārtas ieviešana darbā.
16. 1.16. att. RLDS pārbaudes iekārtas struktūra.
17. 1.17. att. VRLS pārbaudes iekārtas struktūra.
18. 1.18.att. Strāvas aizsardzības pārbaudes protokola fragments.
19. 1.19. att. Distantaizsardzības pārbaudes protokola fragments.
20. 2.1. att. Analogciparu pārveidošanas procesa pareizības pārbaude.
21. 2.2. att. Metodes, algoritma programmatūras un ciparu aparatūras pārbaude
22. 2.3.att. Elektromehānisko energosistēmas procesu aprēķina algoritms.
23. 2.4.attēls. Piemērs divdimensionālai reakcijas funkcijai.
24. 2.5.attēls. Mēģinājumu skaits atkarībā no izmantojamās metodes un vēlamās precizitātes.
25. 2.6.att. Augstsprieguma elektropārvades līnijas aizsardzības shēma.
26. 2.7. att. Termināla pārbaude padodot signālu parametru telpā.
27. 2.8.attēls. Aizsargājamā objekta modelis.
28. 2.9.attēls. Pārbaudes sistēmas struktūra.
29. 2.10. Pārbaudes struktūra ekspluatācijas apstākļos.

30. 2.11.attēls. Dažādos laika intervālos fiksētu oscilogrammu sintēzes piemērs
31. 2.12. att. Sarežģīta testa procesa piemērs
32. 2.13..att. Vektoru diagramma vienfāzes īsslēguma gadījumā
33. 2.14. att. Vienfāzes īsslēguma strāvas un spriegumi
34. 3.1.att. Līnijas aizsardzības princips, izmantojot viena līnijas gala mērījumus.
35. 3.2.attēls. Līnijas aizsardzības princips, izmantojot līnijas mērījumus no abiem līnijas galiem.
36. 3.3.att. RA termināla struktūra.
37. 3.4.attēls. Programmas struktūra.
38. 3.5.att. Pārraidē laika aiztures paskaidrojums.
39. 3.6.att.GDA izmantojot GPS sinhronizāciju
40. 3.7.att.GDA puskomplektu blokshēmas algoritms
41. 3.8.att. Iekšēja pulksteņa korekcija.
42. 3.9.att.Gredzenveida datu buferis
43. 3.10.att.GDA termināla programmas blokshēma
44. 3.11. att. Elektropārvades līniju izveidojums.
45. 3.12. att. Īsslēgums 110kV elektropārvades tīklā 2.aprīlī.
46. 3.13. att. Īsslēgums 110kV elektropārvades tīklā 7.aprīlī.
47. 3.14. att. Īsslēguma pieraksts apakšstacijā Imanta.
48. 3.15. att. Īsslēguma pieraksts apakšstacijā Imanta.
49. 4.1. att. Sakaru kanālu veidi.
50. 4.2. att. $\Delta\phi$ ietekme uz strāvas mērījuma precizitāti.
51. 4.3. att. GDA komplektu traucējumu statistika.
52. 4.4.att. Iekārtas "Line tester" pievienošanas shēma.
53. 4.5.att. „Line tester” oscilogramma.
54. 4.6.att. „Line tester” fiksēto notikumu, kad lēcienveidīgi mainījās datu pārraidē laiks, izdruka.
55. 4.7.att. GDA terminālu pārbaudes struktūra laboratorijas apstākļos.
56. 4.8. att. Virknes nobīdes reģistra realizācija.
57. 4.9. att. Nobīdes reģistra darbības princips.
58. 4.10. att. GDA darbības režīma izvēles struktūrshēma.

Ievads.

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 [1] 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 veltītas 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 aparāturu ražo plaši pazīstamas visas pasaulē slavenas kompānijas: ABB, Siemens, Alstom, General Electric, Snieder 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.

Korekta lēmuma pieņemšanai, relejaizsardzības un automātikas kompleksi jānodrošina sekojošas pamatprasības [2, 3]:

1. **Selektīva darbība.** Par selektīvu sauc tādu relejaizsardzības darbību, kura dod iespēju pareizi noteikt bojāto sistēmas elementu un to atslēgt ar attiecīgā jaudas slēdža starpniecību. Šim nolūkam relejaizsardzībai jānodrošina sekojoši noteikumi:

- 1.1. Tā drīkst darboties tikai tad, ja bojājums ir aizsargājamā elementā;
- 1.2. RA un A nedrīkst darboties apstākļos, kad bojājums nav aizsargājamā elementā;
- 1.3. Tā nedrīkst darboties, ja bojājums ir blakuselementos un dotai aizsardzībai nav rezerves aizsardzības darbības funkciju.
2. **Ātrdarbība.** Ātri atslēdzot īsslēgumu paaugstinās sistēmas ģeneratoru paralēlās darbības stabilitāte, saīsinās patērētāju nenormāla darba režīms ar pazeminātu spriegumu, samazinās bojātā elementa bojājuma apmēri, paaugstinās ierīces automātiskās atpakaļieslēgšanas (AAI) darbības efektivitāte. Bojājuma atslēgšanas laiks sastāv no aizsardzības un jaudas slēdža atslēgšanas laiku summas;
3. **Jutība.** Tā raksturo relejaizsardzības nostrādes stabilitāti, notiekot īsslēgumam aizsargājamā zonā. Jutībai jābūt pietiekamai, lai aizsardzība aizsargājamā zonā stabili nostrādātu arī pie minimālajām īsslēguma strāvu vērtībām.
4. **Traucējumnoturība.** Relejaizsardzībai jāstrādā bez traucējumiem, notiekot jebkura veida īsslēgumiem vai elektriskiem bojājumiem aizsargājamā zonā vai elementā. Aizsardzība nedrīkst darboties ārēja īsslēguma gadījumā (izņemot gadījumu, kad aizsardzībai ir rezerves darbības funkcija), kā arī normālā darba režīmā;

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, ģeneratori, 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 [7]. 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% gadījumu. 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 attīstītajās 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. Energosistēmās izmantojamās RA un A var dalīt 3 grupās (sk. tab. 1.1.). Pie

tam, 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.

1.1.tabula.

RA un A iekārtu klasifikācija.

Nr.	Pielietojums	Pieprasījums (gab./gadā)	Cenu mērogs (Ls/gab.)
1.	Vidēja sprieguma tīkli un objekti	Simti	Simti
2.	Augstsprieguma tīkli un objekti	Desmiti	Tūkstoši
3.	Superaugstsprieguma tīkli un objekti	Daži	Desmiti tūkstoši

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 pārbaužu metode;
6. Izstrādāta un realizēta izmantojamo relejaizsardzību nolūkos optisko sakaru kanālu pārbaužu iekārta;

7. Sintezēta un realizēta augstsprieguma līniju kompleksā relejaizsardzības un automātikas iekārta.

Izvirzītā mērķa un uzdevumu atrisināšanai, izmantotas 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. Izstrādātā 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. Eight IEE International Conference on DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION– no 5. līdz 8.aprīlim 2004.gadā, Amsterdamā, Nīderlande.
3. The 11th International Power Electronics and motion Control Conference, EPE/PEMC 2004, no 2. līdz 4.septembris, 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, rekomendācijas nākotnes darbam, kā arī literatūras sarakstu. Darba kopējais apjoms ir 131 datorsalikuma lappuses. Darbā iekļautas 2 tabulas un 58 attēli. Literatūras sarakstā iekļauti 88 izmantotas literatūras avoti.

Pirmā nodaļa veltīta relejaizsardzības atteikumu analīzei, pārbaudes metodēm un līdzekļiem, šo atteikumu novēršanai. Nodaļā apskatīti RA un A attīstības etapi. Dots relejaizsardzības uz elektromehānisko elementu bāzes salīdzinājums ar mikroprocesoru tehniku. Pievērsta uzmanība arī zināmam „starpetapam” RA un A attīstībā, kas saistīts ar operacionālo pastiprinātāju pielietojumu, kas nenodrošināja RA un A elektromehānisko releju masveida nomaiņu. Uz radioelektronikas lampu un pusvadītāju diožu bāzes radītās sistēmas neguva plašu praktisku pielietojumu. Galvenais iemesls tam bija nepietiekamas darbības drošums, salīdzinājumā ar elektromehāniskajām sistēmām. 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. Mikroprocesorelementu sākotnējās iespējas bija stipri ierobežotas. Tādēļ parādījās darbi, kas bija virzīti uz šiem elementiem izvirzīto 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 mērmaiņiem;
- 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) [17,18,19], ar kuras palīdzību kļuva iespējams sinhronizēt ģeogrāfiski attālinātus mērījumus.

Neskatoties uz to, ka RA un A uz elektromehānisko un mikroprocesoru elementu bāzes tiek izvirzītas augstas prasības to drošumam, tomēr nav izdevies panākt šo kompleksu pilnīgu bezatteikuma darbību. Relejaizsardzības darbības atteikumi ar smagām sekām notiek daudzās pasaules energosistēmās. Darbā savākta statistikas dati par RA un A iekārtu atteikumiem no 1998.līdz 2010.gadam. Var redzēt, ka lielākā daļa nepareizas darbības izraisa sekundārās aparātūras defekti (25%), personāla kļūdas (12%), primārās iekārtas defekti (11%) un nepilnības RA un A iekārtās (11%), neselektīva darbība, ārēji traucējumi un problēmas ar operatīvo spriegumu (kopā 22%).

Darbā veiktie pētījumi un praktiskie risinājumi ir veltīti aparātūras defektu, RA un A algoritmu nepilnību un telekomunikācijas iekārtu traucētas darbības atteikumu samazināšanai. RA un A pārbaudes uzdevums parādījās kopā ar pirmajiem relejiem, tas ir, sākot ar 1830-tiem gadiem. Uzdevuma atrisināšanai ilgu laiku 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 iespējamās 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.
Elektroniskās skaitļošanas mašīnas (ESM) atklāja iespēju energosistēmu un to objektu ciparu modeļu izmantošanai. Energosistēmas RA un A iekārtu darbības procesu ciparu modelēšanai, atļāva risināt arī RA un A pārbaudes uzdevumus.
4. Vienlaicīgi ar ESM, parādījās arī ceturtais RA un A pārbaudīšanas organizācijas veids, kurš balstās tikai uz digitālo modeļu izmantošanas bāzes. Šajā gadījumā, pārbaudāmās iekārtas vietā notiek tās programmatūras testēšana. Dotā pieeja atļauj vienlaicīgi pārbaudīt izmantojamo metodi, algoritmus un realizējošo programmu.

Pārbaūžu veikšanai, nepieciešamas rūpnieciski izgatavojamas relejaizsardzības pārbaudes iekārtas, kuras var iedalīt divās lielās grupās. Pirmo grupu veido reālā laika digitālie simulatori (RLDS), kuri dod iespēju ģenerēt notiekošus sarežģītās energosistēmās procesus, tomēr to plašai pielietošanai ir būtisks trūkums – to cena un salīdzinoši lielie gabarīti un svars, kas neļauj veikt pārbaudes RA un A iekārtu uzstādīšanas vietā. 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). Šīs sistēmas pielietojamas vienīgi tipveida ekspluatācijas pārbaūžu veikšanai.

Otrā nodaļa vēltūta virtuālo pārbaūžu metodes pamatojumam un realizācijai. Vispārinot, sarežģītu sistēmu pārbaudei nepieciešams radīt speciālu, dārgu laboratoriju un veikt ilgstošas, darbietilpīgas, augstu kvalificēta personāla izpildītas pārbaudes. Daļēji problēmu risina pašpārbaudes bloki. Izstrādāti arī specializēti ar datoru vadāmi stendi, kas nodrošina uzdoto strāvu un spriegumu izmaiņas procesu ģenerāciju un RA un A ierīču testēšanu. Taču šādu stendu izmaksas ir augstas, bet iegūto strāvu, spriegumu un loģisko signālu daudzums visai ierobežots. Sarežģītu aizsardzību pārbaudē, pat izmantojot datorvadāmus stendus, rodas ievērojamas problēmas. Šīs problēmas vēl daudzkārt pieaug ierīču tehniskās izstrādes etapā. Pieredze rāda, ka sintezēto ierīču darbaspēju pārbaudes stadijā bieži nepieciešams izdarīt korekcijas. Pie tam, pat nelielu programmatūras korekciju gadījumā, iespējamas kļūdas, kas parādās visneiedomājamākajās vietās. Mikroprocesoru ierīces atsevišķus programmas blokus realizē pēc kārtas ar nobīdi laikā. Pie tam atsevišķu bloku pārbaude ir iespējama tikai apejot (izlaižot) nepārbaudāmos blokus. Šāda pārbaude ir nepilnīga. Ierīču izstrādes stadijā, lai atvieglotu visai darbietilpīgo programmu ievadīšanu mikroprocesorā, šīs programmas parasti modelē un skenē ar personālā datora palīdzību. Taču šis paņēmiens nespēj pilnīgi aizvietot reālās iekārtas pārbaudi. Nodaļā parādīts, ka mūsdienu datortehnika atļauj ar visai maziem papildus izdevumiem atrisināt aizsardzību testēšanas problēmu mikroprocesoru ierīču projektēšanas stadijā, gandrīz pilnīgi automatizējot atkārtotās pārbaudes.

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. Virtuālās testēšanas būtību raksturo pārbaudāmās ierīces funkcionēšanas algoritma papildinājums ar programmu bloku, kas aizvieto iepriekšminētā analogciparu pārveidošanas rezultātus ar mikroprocesora atmiņā ierakstītiem pārbaudes procesu imitējošiem elektriskiem lielumiem. Acīm redzams, ka šāda testēšana piemērota programmatūras pārbaudei un ļauj noteikt gan tieši programmas kļūdas, gan aparātu atteices, kas izraisa nepareizu programmu izpildi.

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 iestatījumu skaits var būt lielāks par tūkstoti. Līdz ar to klasiskā metode šādu iekārt pārbaudei izrādās maz efektīva.

Trešā nodaļa veltīta daudzfunkcionāla elektropārvades līniju relejaizsardzības termināla sintēzei.

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. Mikroprocesoru tehnika atļauj realizēt daudzus jaunus risinājumus releju aizsardzībā un automātikās. Dotā nodaļā veltīta RA un A terminālam, kurš ir spējīgs realizēt vairākus augstsprieguma elektropārvades līniju RA un A algoritmus. Nodaļas beigās dota 110kV elektropārvades tīklā notikušo īsslēgumu un terminālu darbības analīze. GDA, DA un AAI parasti tiek realizēti divos vai vairāk terminālos. Visplašāk pielietojamos terminālos tiek atdalītas distantaizsardzības un diferenciālās aizsardzības (tiek realizētas dažādos terminālos). Tāds atdalījums var būt skaidrots divējādi:

1. Saglabājot tradicionālo dalījumu, kurš tika pielietots elektromehāniskām sistēmām.
2. Rezervējot katra no aizsardzības veida darbību.

Izmantojot mūsdienīgas mikroprocesoru tehnikas iespējas, tika izstrādāts uzdevums izveidot aizsardzības terminālu, kurš spējīgs ietvert sevī visus augstākminētos aizsardzības un automātikas principus. Papildus augstākminētajām funkcijām, aizsardzības terminālā var būt

realizēts bojājuma vietas notikšanas algoritms, kurš izmanto mērījumus no abiem līnijas galiem.

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, kuri nosaka ar aizsardzības nostrādes raksturlīkni. Ja pārraides laiks abos virzienos, 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.

Aprakstītais mikroprocesoru termināls tika realizēts un uzstādīts 110kV elektropārvades līnijām. Pēc to uzstādīšanas uz vienas no līnijām notika divi īsslēgumi, kas ļauj apgalvot, ka piedāvātais risinājums ir darboties spējīgs.

Ceturrtā nodaļa veltīta līnijas diferenciālās aizsardzības sakaru kanāla ietekmei uz aizsardzības funkciju un iespējām pārbaudīt sakaru kanālu. Datu pārraidei starp termināliem tiek izmantots sakaru kanāls un tāpēc digitāla sakaru kanāla parametri tieši ietekmē uz aizsardzības drošu un selektīvu darbību. Mūsdienīga līnijas diferenciālā aizsardzība spējīga strādāt ar dažādu veidu sakaru kanāliem :

- Tiešu savienojumu
 - o Optiskais kabelis;
 - o Elektriskais kabelis;
- Komunikāciju tīklu;
- ISDN (*integrated services communication network*) komunikāciju tīklu.

Tikai tiešais terminālu savienojums, ar iepriekš zināmiem datu pārraides parametriem – sakaru kanāla laika kavējumiem, var garantēt drošu un nepārtrauktu aizsardzības darbību. Pārējos gadījumos, kad sakaru kanālu raksturlielumi nav precīzi zināmi vai nevar būt garantēta to stabilitāte, aizsardzības pareiza darbība un pat aizsardzības darbība var būt

ierobežota. Statistisko datu vākšanai tika izmantotas 29 330kV un 110kV elektropārvades līnijas, kurās tika fiksētas datu pārraides pārtraukums un traucējums. 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). 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.

GDA bloķēšana sakaru kanāla traucējumu parādīšanas 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, kā 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:
 - o Kopējā kanāla kavējuma noteikšana;
 - o Sakaru kanāla raidīšanas/uztveršanas laika nebalansa noteikšana;
- Laika kavējuma nobīdes reģistrēšana;
- Komunikācijas kanāla datu pārraides frekvences un frekvences nobīdes mērījums un reģistrācija.

Nodaļā aprakstīti minētās iekārtas darbības rezultātu piemēri, kad tika konstatēti iemesli kā GDA traucētai darbībai, tā arī neselektīvai atslēgšanai.

Piedāvāts uzlabot GDA algoritmu traucēta sakaru kanāla gadījumā. 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.

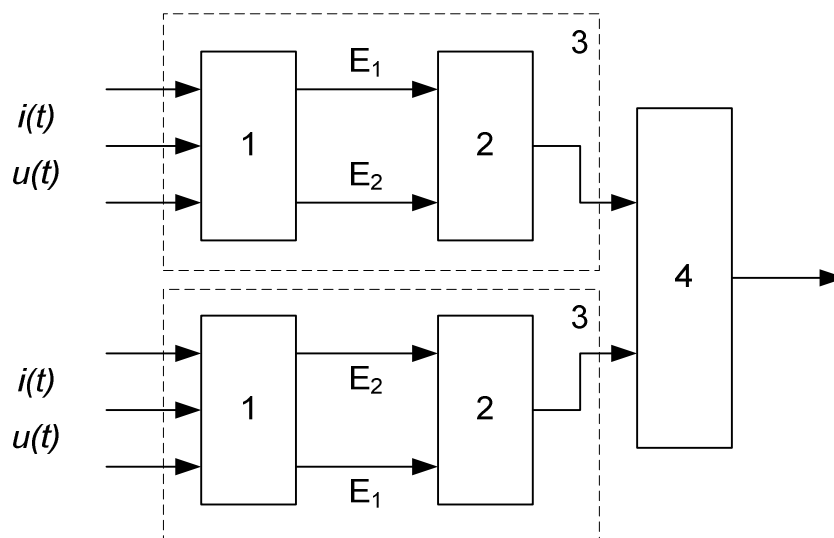
1. Relejaizsardzības struktūras atteikumi, pārbaudes metodes un līdzekļi.

RA un A attīstības etapi un struktūras. Nenormālie energosistēmas darbības režīmi, prasības relejaizsardzībai, relejaizsardzības pielietojums, relejaizsardzības pārbaudes iedalījums, relejaizsardzības darbības analīze, relejaizsardzības darbības atteikumi, reālā laika digitālie simulatori, pārvietojamās pārbaudes iekārtas.

1.1. 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 [10,11,12,13,14]. Tomēr var apgalvot sekojošo:

1. Nenotika RA un A elektromehānisko releju masveida nomaiņa;
2. Uz radioelektronikas lampu un pusvadītāju 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 paņēmieni 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) varēja attēlot ar struktūrshēmu [15], kas parādīta 1.1.attēlā.



1.1.att. Analogo RA un A struktūrshēma.

- 1 – Mērelements;
- 2 – Salīdzināšanas elements;
- 3 – Mērorģāns;
- 4 – Loģiskais bloks.

Mērelements (mērīšanas shēma) veic nepārtraukto (analogo) ieejas signālu pārveidošanu ar mērķi izdalīt tālākajai izmantošanai nepieciešamos parametrus (rūpnieciskās frekvences harmoniskās komponentes, noteiktu secību strāvas vai spriegumus u.c.).

Salīdzināšanas elements ģenerē diskrēto (loģisko) signālu pie ieejas signālu parametru noteiktas attiecības. Analogās tehnikas ierobežotās iespējas izpaudās tieši šo elementu realizācijā. Tika izmantoti divi salīdzināšanas pamatelementu tipi: pēc fāzes un pēc amplitūdas [15,16,17]. Salīdzināšanas elementu nostrādes nosacījumus var aprakstīt ar vienkāršiem vienādojumiem:

$$\varphi_1 < \arg \underline{E}_1 / \underline{E}_2 < \varphi_2, \quad (1.1.)$$

$$|\underline{E}_1| > |\underline{E}_2|, \quad (1.2.)$$

kur $\underline{E}_1$ un $\underline{E}_2$ - sinusoīdas veida signāli, formēti no kontrolējamām strāvām $i(t)$ un spriegumiem $u(t)$.

Realizējot sarežģītus mērorģānus bija nepieciešama liela izveicība kombinējot mērīšanas elementu un salīdzināšanas elementu struktūras. Kombinējot salīdzināšanas elementus, izmantojot vairākus E_1 un E_2 signālus varēja izveidot sarežģītas automātu raksturlīknes [16]. 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 [18]. Tajā laikā bija radītas lielas, jaudīgas ciparu elektroniskās mašīnas, kuru ražību raksturoja miljoni operāciju sekundē [19,20]. 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 [20], kuras praktiski neizmanto RA un A ierīču realizācijā).

Mikroprocesorelementu sākotnējās iespējas bija stipri ierobežotas. Tādēļ parādījās darbi, kas bija virzīti uz šiem elementiem izvirzīto prasību minimizāciju. Tika piedāvāti algoritmi, kas minimizēja mikroprocesorelementu resursu patēriņu.

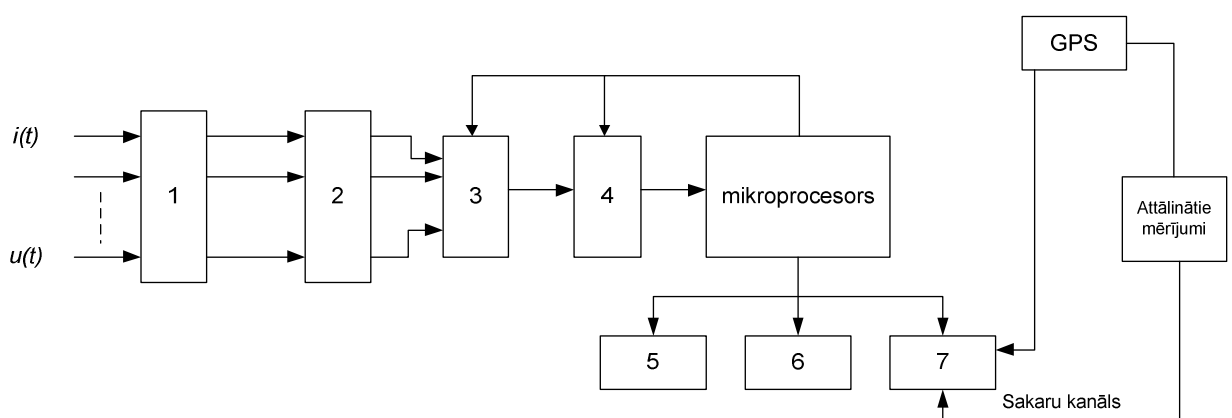
Tomēr visai drīz kļuva acīmredzami, ka mikroprocesoru tehnikas iespējas un attīstības tendences nodrošina ne tikai tradicionāli izmantoto funkciju brīvu realizāciju, bet ļauj arī

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 mērmaiņiem;
- 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 izšķirošas 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) [17,18,19], ar kuras palīdzību kļuva iespējams sinhronizēt ģeogrāfiski attālinātus mērījumus.

RA un A mikroprocesorierīču visbiežāk izmantotā struktūra parādīta 1.2. attēlā.



1.2.att. RA un A mikroprocesorierīču struktūra.

1. Ieejas pārveidotāju bloks;
2. Apakšējo frekvenču filtrs;

3. Multipleksors;
4. ACP;
5. Vadības un indikācijas bloks;
6. Izejas releju bloks;
7. Interfeiss.

Ieejas pārveidotāju bloku pieslēdz kontrolējamo strāvu un spriegumu avotiem un šis bloks pilda divas svarīgas funkcijas:

1. Galvaniski atdala dažādas elektriskās ķēdes;
2. Pārveido ieejas signālus līdz līmenim, kas ērts turpmākajā izmantošanā.

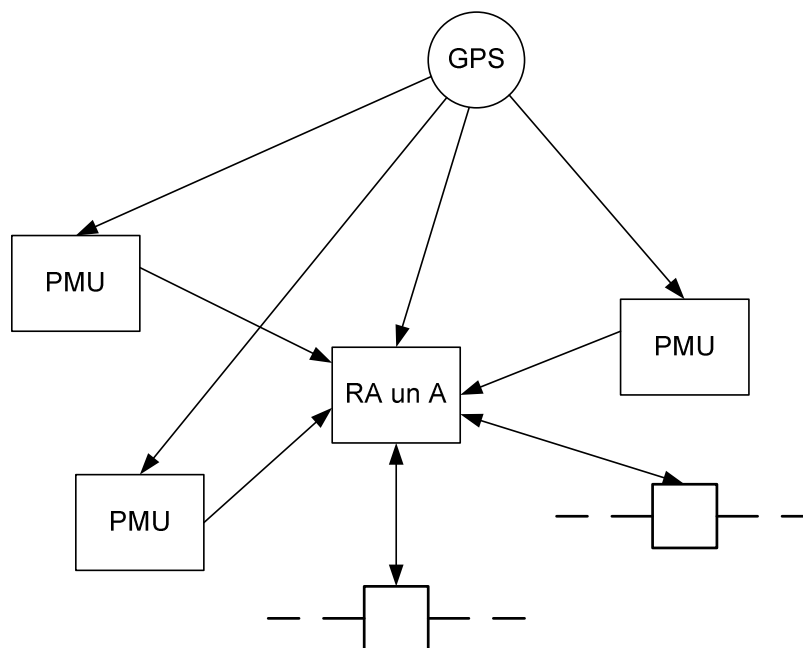
Apakšējo frekvenču filtriem ir svarīga un principiāla loma ierīcēs, kurās izmanto informācijas apstrādes ciparu paņēmienus un šī bloka nepieciešamību diktē Naikvista teorēma [24, 25, 26, 27], kas paredz pietiekami augstu frekvenču klātbūtni, ko nevar izslēgt ar signālu ciparu apstrādes metodēm.

Multipleksors 3 ir pirmais aplūkojamās struktūras bloks, ko vada mikroprocesors. Tas veic signālu pieslēgšanu ACP 4 ieejai. Vadības un indikācijas bloks 5 un interfeiss 7 nodrošina iespēju sazināties ar RA un A mikroprocesoriem, bet izejas releju bloks 6 nodod ieslēgšanas/atslēgšanas komandas uz energoobjekta izpildelementiem.

Attēlā 1.2. parādītā struktūra nav vienīgi iespējamā. RA un A mikroprocesoriņu sastāvā var būt:

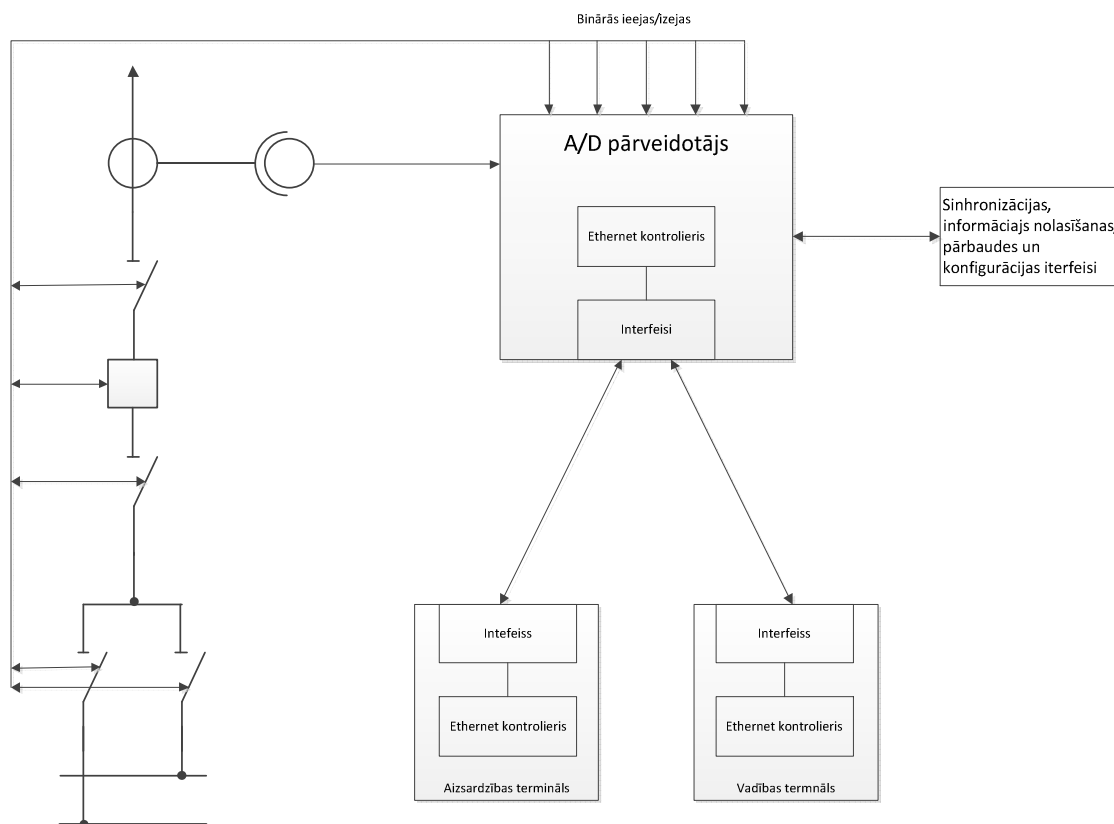
- Vairāki mikroprocesori un tad informācijas apstrādes programmas uzdevumi tiek sadalīti. Piemēram, samērā izplatītā variantā [26, 27, 28, 29] katra kontrolējamā signāla apstrādei tiek izdalīts atsevišķs mikroprocesors;
- Vairāki ACP. Šajā gadījumā var nebūt multipleksors un signālu pārveidošana notiek paralēli;
- Izejas releju vietā var izmantot pusvadītāju elementus, piemēram tiristorus.

Sasniegtie informācijas pārraides ātrumi un drošums, kopā ar GPS, atļāva sākt pilnīgi jaunu RA un A sistēmu izpēti. Aktīvi tiek diskutēta „plašas vides aizsardzības” (wide area protection) koncepcija, kas parādīta 1.3.attēlā. Koncepcijas pamatā ir aizsardzības funkciju centralizācija un, sinhronizēto ar globālās pozicionēšanas sistēmas palīdzību, mērījumu izmantošana. Mērījumu nodrošināšanai, tiek izmantotas speciālas iekārtas – *phasor measurement unit* (PMU).

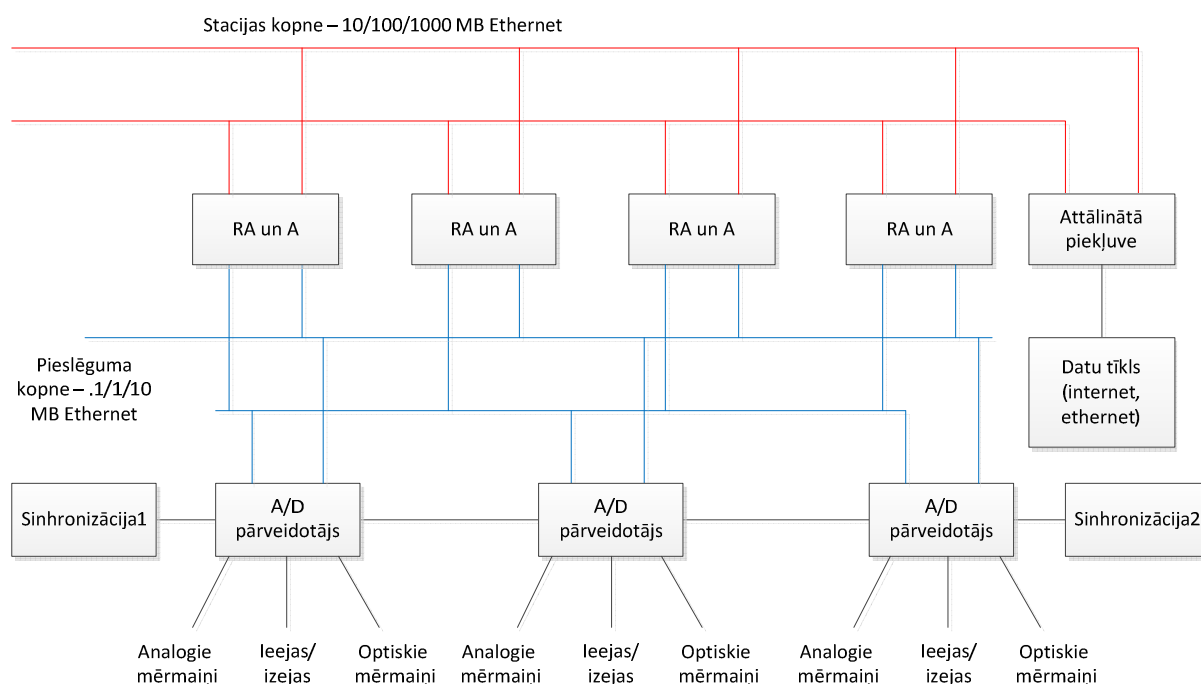


1.3. att. Plašas vides aizsardzības struktūra.

Izstrādāta RA un A aparātūra ciparu apakšstacijām, kas parādītas 1.4. un 1.5. attēlos [20,21,22].



1.4. att. Digitālas RA un A pieslēguma struktūra.



1.5. att. Digitālas apakšstacijas RA un A struktūra.

Attēlos 1.3., 1.4., 1.5. parādītās struktūras satur pilnīgi digitālas RA un A. Tādu sistēmu pārbaude var stipri atšķirties no 1.2. attēla struktūras. Tomēr esošā pieredze rāda, ka izmantojot jebkāda veida struktūras un aparātu bāzi būs nepieciešams veikt atteikumu un kļūdu meklēšanu, līdz ar to arī veikt pārbaudes. Neskatoties uz iespējamām variācijām un gaidāmām izmaiņām nākotnē, struktūra, kas parādīta 1.2.attēlā patlaban ir visizplatītākā un šajā darbā tiks izmantota kā galvenā.

1.2. Digitālas RA un A darbības princips.

Analogais signāls ir laikā nepārtraukti mainīgs un var pieņemt jebkuru vērtību noteiktā diapazonā. Diskrētais (ciparu) signāls, atšķirībā no analogā, var pieņemt tikai galīgo vērtību skaitu un ir nosakāms tikai konkrētiem laika momentiem [23].

Procedūru, kas realizē pārejas no analogā signāla uz diskrēto, sauc par diskretizāciju vai signāla kvantēšanu, bet iekārtu, kas veic šo operāciju, sauc par analogciparu pārveidotāju (ACP) [30,31,32,33].

Pāreja no nepārtraukta signāla uz diskrēto vienmēr notiek zaudējot kaut kādu informācijas daudzumu. Galīgā diskrētā signāla gradāciju skaits nosaka kvantēšanas kļūdu, bet viens no iemesliem kvantēšanai pēc laika ir tas, ka pašam analogā signāla pārveides procesam ciparu

signālā un aprēķinu ciklam mikroprocesorā ir nepieciešams zināms laiks. Paejot šim laikam, var no jauna pārveidot ieejas signālu (skat. attēlu 1.5.). Raksturojot ACP, ņem vērā kārtu skaitu un analogā signāla diskretizācijas laika intervālu Δt vai nolasījuma frekvenci f_u ;

$$f_u = 1/\Delta t, \quad (1.3.)$$

vai, periodisku signāla periodu T gadījumā – ar nolasījumu skaitu periodu N ;

$$N = f_u \times T. \quad (1.4.)$$

Periodiskajiem signāliem eksistē sakarība starp pārveidojamā signāla augšējo frekvenci un nolasījuma biežumu. Naikvista teorēma [26], [27] apgalvo, ka precīzai sākotnējā signāla attēlošanai ar diskrēto, nolasījuma frekvencei ir vismaz divas reizes jāpārsniedz ieejas signāla pati augstākā frekvence f_{max} , t.i.:

$$f_u > 2 \times f_{max}, \quad (1.5.)$$

Veicot analogciparu pārveidošanu no ieejas signāla ir jāizslēdz visas harmoniskās sastāvdaļas ar frekvencēm, kuras pārsniedz kvantēšanas frekvenci. Pretējā gadījumā, atjaunojot signālu, parādās zemas frekvences komponente. Tāpēc ACP ieejā vienmēr uzstāda apakšējo frekvenču analogo filtru ar nociršanas frekvenci, ne lielāku par f_u . RA un A iekārtās pielieto ACP ar nolasījumu frekvenci no 600Hz līdz 4000Hz.

RA un A darbības pamatalgoritmus, kas sastāda programmatūras sintēzes pamatus, pirmkārt nosaka atbilstošas ierīces konkrētais uzdevums. Vadāmo un aizsargājamo objektu ir daudz, to funkcionālā daudzveidība pieprasa lielu skaitu sarežģītības, kontrolējamo signālu skaita un to apstrādes paņēmieni ziņā atšķirīgus algoritmus. Tajā pat laikā var izdalīti tikai dažas algoritmu sintēzē izmantotas pamatpieejas. Tāda dalījuma būtība ir sintēzē izmantoto algoritmu vienādojumu veids un tos var dalīt trīs grupās:

1. Algebriskie vienādojumi;
2. Diferenciālvienādojumi;
3. Diferenciālvienādojumi ar parciālajiem atvasinājumiem.

Praksē visplašāk tiek pielietoti algebriskie vienādojumi ar kompleksajiem mainīgajiem. Šādus vienādojumus var izmantot pie sinusoidālām strāvām un spriegumiem, kas vairumā

gadījumu nav raksturīgi RA un A funkcionēšanas nosacījumiem. Šīm ierīcēm jādarbojas pārejas procesu sākuma etapā. Atzīmēto pretrunu likvidē, izmantojot ciparu filtrus, kas izdala rūpniecības frekvences pamatharmonisko sastāvdaļu un pavājina citas harmoniskās komponentes. Visplašāko pielietojumu ieguvuši nerekursīvie ciparu filtri, kuru funkcionēšanu apraksta izteiksme [38,39,40,41,42,43]:

$$y(nT) = \sum_{i=1}^N K_i \times X(nT - iT) \quad (1.6),$$

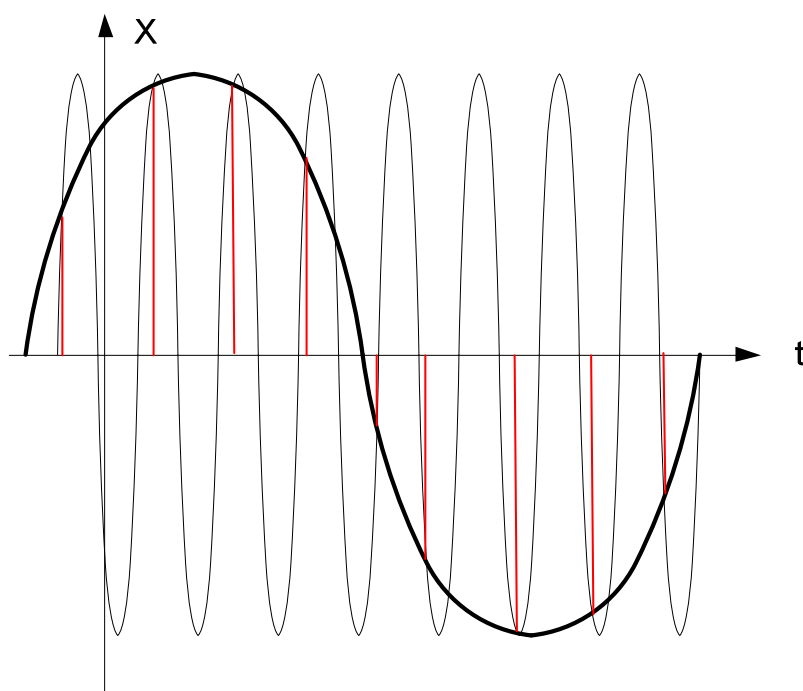
kur $y(nT)$ un $X(nT)$ - atbilstoši filtra izejas un ieejas signāls un diskretizācijas signāls pēc laika;

K_i - ciparu filtra koeficienti. Ciparu filtra (CF) koeficienti nosaka amplitūdas-frekvenču raksturlīkni (AFR) un fāzes-frekvenču raksturlīkni (FFR).

Ciparu filtrācijas teorija [26,27] sniedz koeficientu izvēles metodes, kas nodrošina sintezējamā filtra AFR tuvinājumu uzdotajai raksturlīknei. Pie kam var iegūt dažādas FFR, iekaitot izteikti lineāras [26,27]. Tieši šo īpašību plaši izmanto, lai kontrolējamo signālu S harmoniskās sastāvdaļas izteiktu vektoru formā:

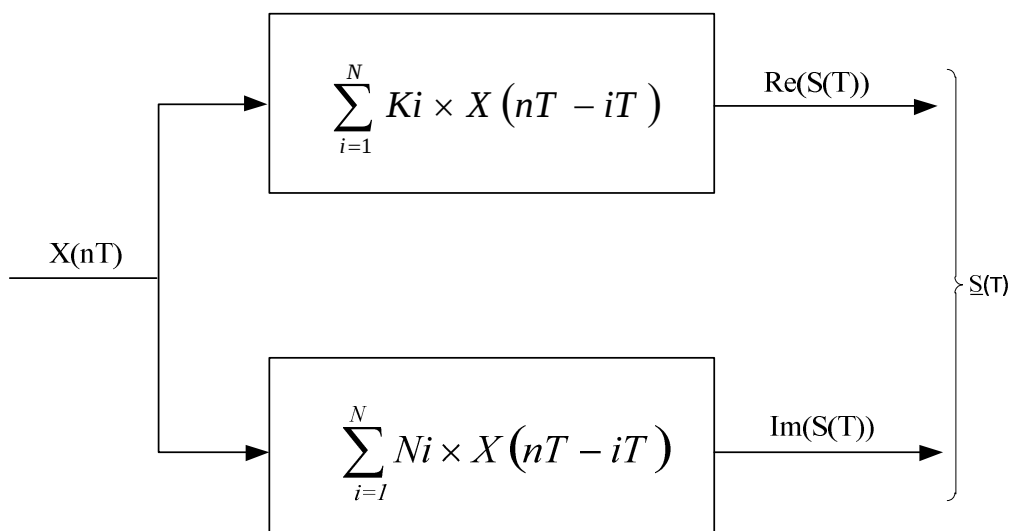
$$S = \text{Re}(S) + j \text{Im}(S) \quad (1.7.).$$

Lai iegūtu S vektora komponentes (ortogonālās sastāvdaļas), izmanto divus CF ar tuvām AFR un par 90 elektriskiem grādiem nobīdītām FFR [43] (skat. 1.6.attēlu)



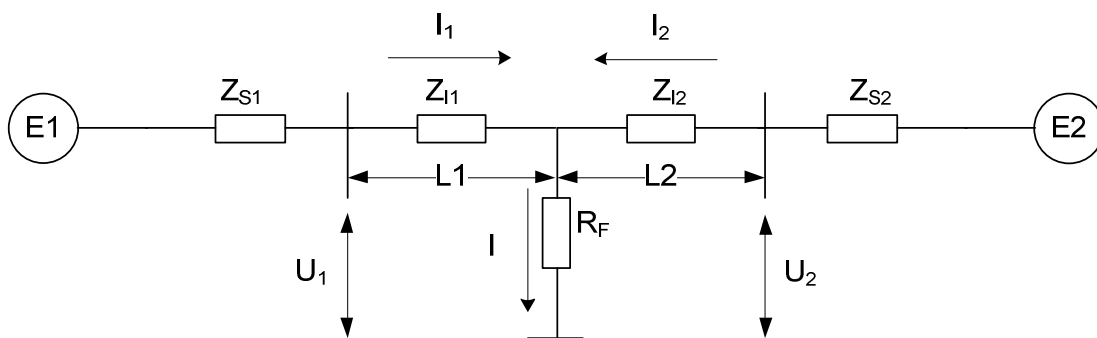
1.6.att. Analoģo signālu diskretizācija.

Signālu izteikšana (1.7.) formā veidā ir ļoti ērta un nodrošina iespēju AR un A darbības algoritmu aprakstā izmantot elektrotehnikas klasiskos vienādojumus un paņēmienus.



1.7.att. Struktūra signālu attēlošanai vektoru formā.

Kā piemēru izskatīsim vienu no augstsprieguma līniju bojājuma vietas noteikšanas algoritmiem. Trīsfāzu simetriskā elektropārvades līnija, kas savieno divas energosistēmas, ekvivalento shēmu, kas parādīta 1.8. attēlā.



1.8.att. Vienkāršotas energosistēmas ekvivalentā shēma.

Kontrolējamo (mērāmo) strāvu un spriegumu gadījumā, augstsprieguma līnijai kreisā gala pusē, noteiksim spriegumu U_i tiešās, pretējās un nulles secībā īsslēguma vietā:

$$U_i = U_1 - I_1 \times Z_1 \times I_1 - R_F \times I, \quad (1.8.)$$

$$U_{RF} = U_1 - I_1 \times Z_{i1},$$

Analoģiski, līnijas labējam galam:

$$U_{RF} = U_2 - I_2 \times Z_{i2}, \quad (1.9.)$$

No vienādojumiem (1.8.) un (1.9.) izriet „klasiskā” BVN divpusējās metode, kas pamatojas ar vienu no šādām izteiksmēm:

$$l = \frac{U_{01} - U_{02} - I_{02} Z_0 L}{(I_{01} + I_{02}) Z_0}, \quad (1.10)$$

$$l = \frac{U_{21} - U_{22} - I_{22} Z_2 L}{(I_{21} + I_{22}) Z_2}, \quad (1.11)$$

Pie mērījumu sinhronizācijas neesamības tika izmantota izteiksmju (1.10.) un (1.11.) tuvināta realizācija. Par pamatu tuvinājumiem kalpoja argumentu vienādība:

$$\arg U_{01} \approx \arg U_{02} \approx \arg I_{02} Z_0, \quad (1.12.)$$

vai

$$\arg U_{21} \approx \arg U_{22} \approx \arg I_{22} Z_2. \quad (1.13.)$$

Ņemot vērā (1.12.) vai (1.13.) vienādojumu (1.10.) vai (1.11.) vietā tika izmantoti:

$$l = \frac{|U_{01}| - |U_{02}| - |I_{02} Z_0 L|}{(|I_{01}| + |I_{02}|) |Z_0|}, \quad (1.14)$$

vai

$$l = \frac{|U_{21}| - |U_{22}| - |I_{22} Z_2 L|}{(|I_{21}| + |I_{22}|) |Z_2|}, \quad (1.15)$$

Īstenībā, vektoru leņķu atšķirība var sasniegt $15 \div 25$ el. grādu un kā sekas, aprēķinot attālumu līdz bojājuma vietai, rodas kļūdas ar lielumu līdz dažiem procentiem [35,36].

Vienādojumu (1.10.), (1.11.) vai (1.14.), (1.15.) rezultātā izrēķina attālumu līdz bojājuma vietai. Svarīgi atzīmēt, ka apskatāmie vienādojumi operē ar nullsecības vai pretējās secības lielumiem. Acīmredzams, ka šie lielumi var būt izteikti caur fāžu strāvu un spriegumu lielumiem, bet ņemot vērā ciparu filtrācijas vienādojumiem (1.6.) un struktūru attēlā 1.6., varam apgalvot, ka rezultāts var būt aprēķināts izmantojot strāvu un spriegumu analogās-ciparu pārveidošanas rezultātus.

1.3. Relejaizsardzības un automātikas iekārtu atteikumi, to iemesli un sekas

1.3.1. Relejaizsardzības un automātikas atteikumu piemēri un analīze.

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.

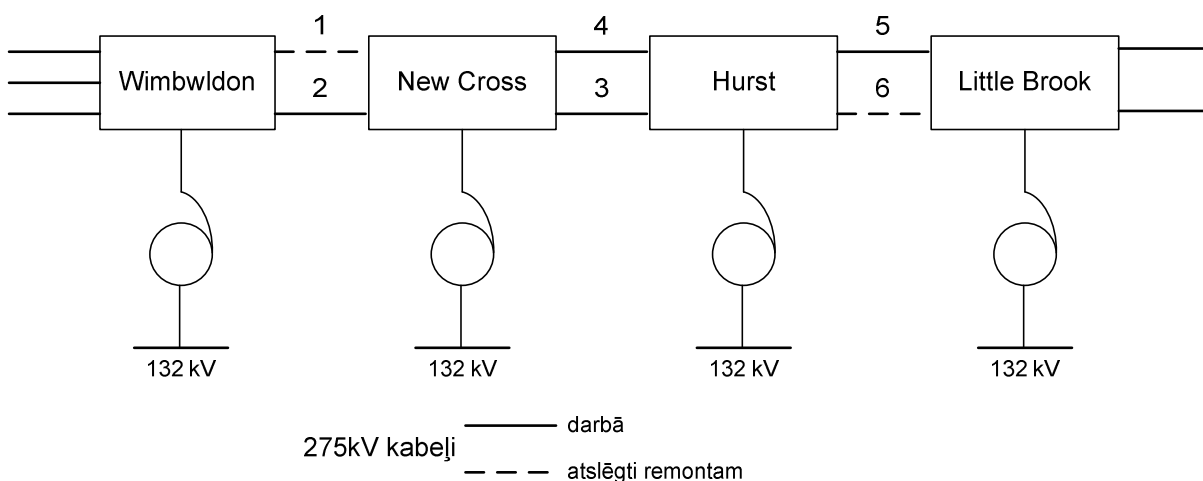
Avārija Lielbritānijā 28. augustā 2003.g., kad vairāku notikumu sakritības rezultātā notika liela mēroga enerģētiskā avārija, kas izsauca ievērojamas Londonas daļas energoapgādes pārtraukumu, tai skaitā metro un dzelzceļa tīklā. Avārijas rezultātā bija atslēgti 410 000 patērētāju ar kopējo jaudu virs 700 MW.

Elektroapgādes shēma un notikumu secība

1.07.03. Remonta darbu veikšanai bija atslēgta līnija 1. Wimbledon – New Cross (skat. 1.8. attēlu).

Remonta darbus bija paredzēts pabeigt 28.09.03.

26.08.03. Remontu darbu veikšanai un profilaksei tika atslēgta līnija 6. Little – Brook – Hurst. Remontu laikā vajadzības gadījumā bija nodrošināta iespēja īsā laikā ieslēgt darbā vienu no atslēgtajām līnijām. 28.08.03. plkst. 18.11 apakšstacijā Hurst nostrādāja autotransformatora gāzes aizsardzība uz signālu. Šāds notikums nacionālajos Anglijas tīklos nav pārāk rets (pēc statistikas uz 1000 nacionālo tīklu transformatoriem gadā gāzes aizsardzība nostrādā 13 reizes). Tā kā gāzes aizsardzība nostrādāja nevis uz atslēgšanos, bet uz signālu, galīgo lēmumu par transformatora atslēgšanu pieņem dispečers. Konkrētā gadījumā transformatora izvešanai no darba bija nepieciešams atslēgt (uz 5 – 10 minūtēm 5. līniju). Līnijas atslēgšana neizraisīja patērētāju ierobežošanu vai atslēgšanu un dispečers pieņēma noteikumiem atbilstošu un situācijai adekvātu lēmumu – atslēgšanu atļaut.



1.9.att. Elektroapgādes shēma.

Dažas sekundes pēc 6. līnijas atslēgšanas sekoja otrais izšķirošais notikums. Atslēdzās 2. līnija no Wimbledon. 2. līnijas atslēgšanās iemesls – nostrādāja rezerves strāvas aizsardzība ar atkarīgu atslēgšanas laika raksturlielni. Aizsardzības nostrādāšana notika kļūdas dēļ. Izvēloties

aizsardzības iestatījumus uzskatīja, ka strāvmaiņu transformācijas koeficients ir 1200/1, lai gan īstenībā tas bija 1200/5. Būtiski ir zināt, ka nacionālo tīklu ekspluatācijā ir 43000 šādas aizsardzības. **Pēc aprakstītās avārijas likvidācijas tika veikti līdzīga rakstura kļūdu meklējumi 9000 aizsardzībām. Vairāk šādu kļūdu nekonstatēja.** Tādējādi var secināt, ka Lielbritānijas energosistēmā RA un A pārbaužu gaitā kļūdas atklāšanas varbūtība bija mazāka par 1/9000.

Liela mēroga energosistēmu avārijas, pēdējos gados, notika daudzās pasaules reģionos: ASV, Itālijā, Azerbaidžānā, Krievijā, Brazīlijā un citās valstīs. Meklējot avāriju sekas var secināt, ka vairākumā gadījumos RA un A pareiza darbība varētu būtiski samazināt ekonomiskos un sociālos zudumus.

Brazīlijas avārijas gadījumā nebija paredzēt slēdžu bojājuma aizsardzība, ASV avāriju sekas varēja būt samazinātas, ja būtu pielietota attiecīga frekvences atslodzes automātika. Krievijas avārijas seku būtiskai samazināšanai pietrūka tikai jaudas virziena releja. Azerbaidžānas avārijas attīstības gaitā kļūdaini nostrādāja asinhronās gaitas novēršanas automātika [39,40,41]. Visos nosauktajos avāriju gadījumos, notika milzīgi ekonomiskie zaudējumi. Dažu stundu garumā bija paralizēta Londona, apstājās metro, cilvēki iestrēga liftos, nestrādāja luksofori. Līdzīga situācija izveidojās arī citu avāriju gaitā.

Apkopjot avāriju seku analīzi var apgalvot, ka vairākumā gadījumos zudumi varētu būt samazināti RA un A pareizas darbības gadījumā.

1.3.2. Relejaizsardzības un automātikas atteikumu intensitāte Latvijas elektropārvades tīklā.

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.

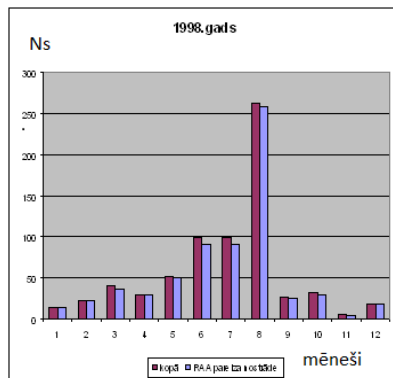
Analīze veikta Latvijas energopārvades uzņēmuma AS “Augstsprieguma tīkls” ietvaros. AS “Augstsprieguma tīkli” apkalpo 330kV energopārvades tīklu ar līniju kopējo garumu 1247.9km un 110kV energopārvades tīklu ar līniju kopējo garumu 3953.8km, kā arī 14 330kV apakšstacijas un 115 110kV apakšstacijas. Kopējā uzstādīto transformatoru jauda ir 6904.8MVA. 330kV un 110kV energopārvades tīkls strādā ar cieši zemētu neitrāli. Pētījums

veikt laika posmam no 1998.gada līdz 2003.gadam (skat.1.10.attēlu), nosakot RA un A iekārtu atteikumu intensitāti gadā δ :

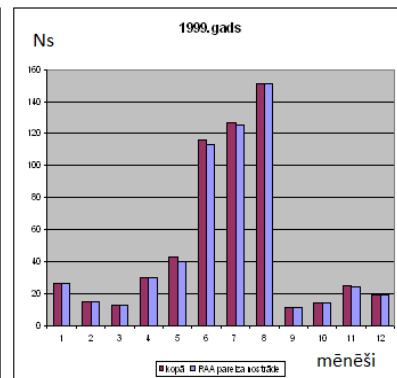
$$\delta = \left(1 - \frac{N}{N_s}\right) \cdot 100, \quad (1.14.)$$

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

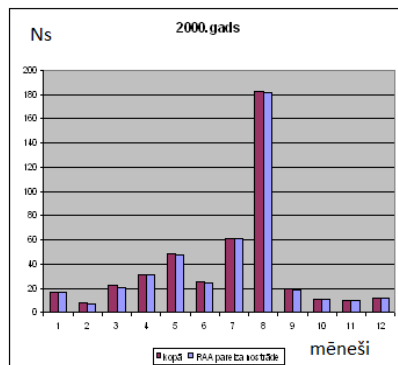
N_s – kopējais RA un A nostrāžu skaits gadā.



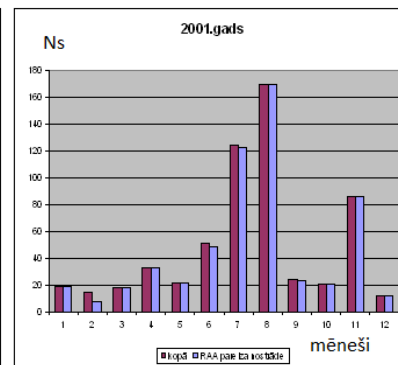
a) RA un A darbība 1998.gadā.



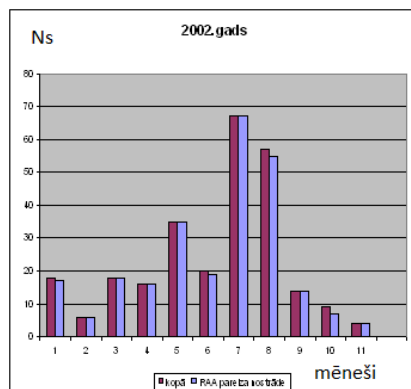
b) RA un A darbība 1999.gadā.



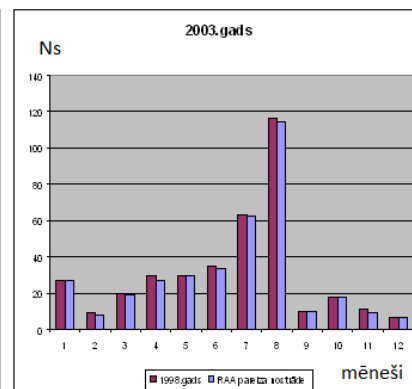
c) RA un A darbība 2000.gadā.



d) RA un A darbība 2001.gadā.



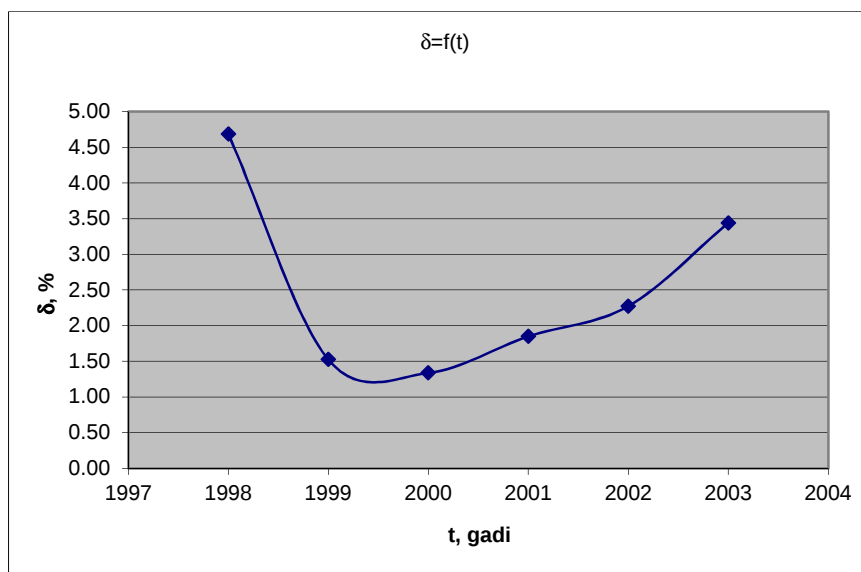
e) RA un A darbība 2002.gadā.



f) RA un A darbība 2003.gadā.

1.10.att. RA un A darbības analīze.

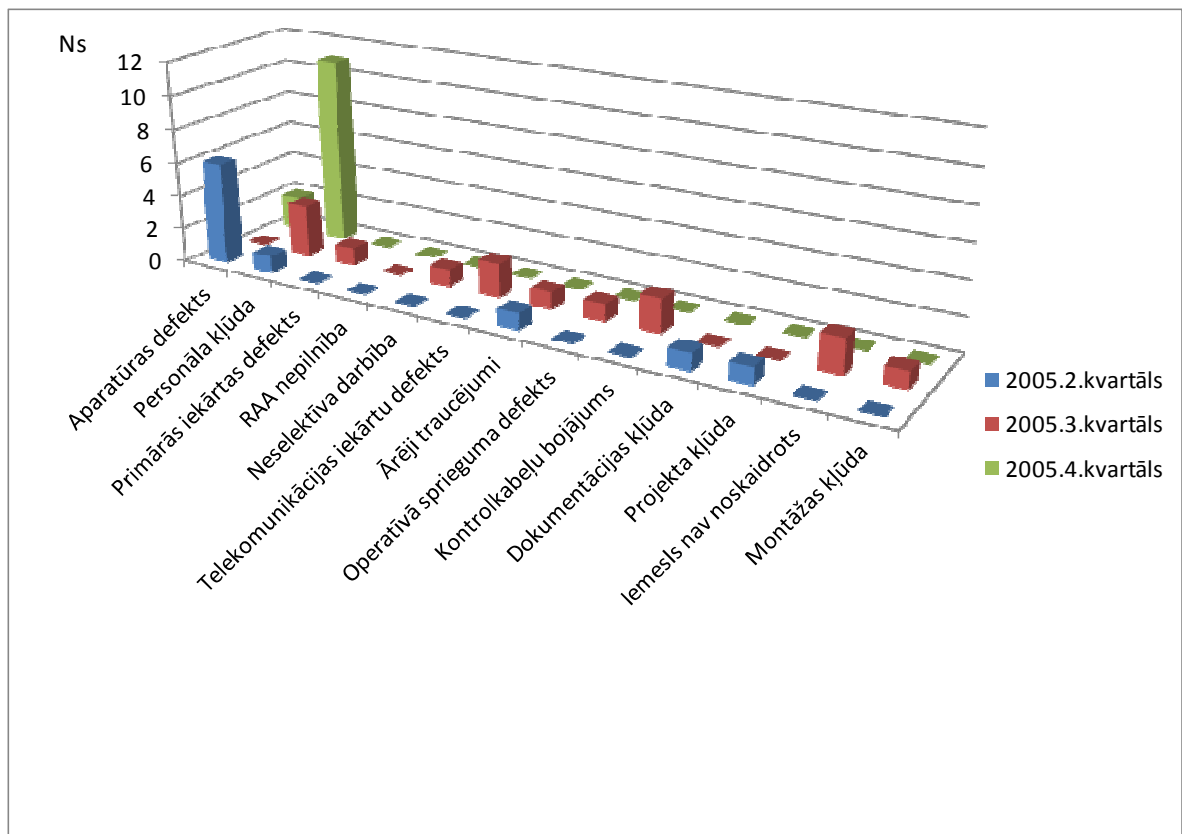
N_S noteikšanas pamatā ir visu īsslēguma iesaistīto RA un A iekārtu darbības analīze. Piemēram, ja pārejošs īsslēgums bijis uz līnijas, tad par sekmīgu RA un A darbību tiek uzskatīts bojājuma atslēgšana no visiem līnijas galiem ar sekojošu sekmīgu vai pamatotu nesekmīgu AAI. Laika posmā, kurā tika veikts pētījums kopumā notika 2951 RA un A iekārtu nostrādes, no kurām pamatotas bija 2874. Atteikumu intensitāte šajā laika posmā parādīta 1.11. attēlā.



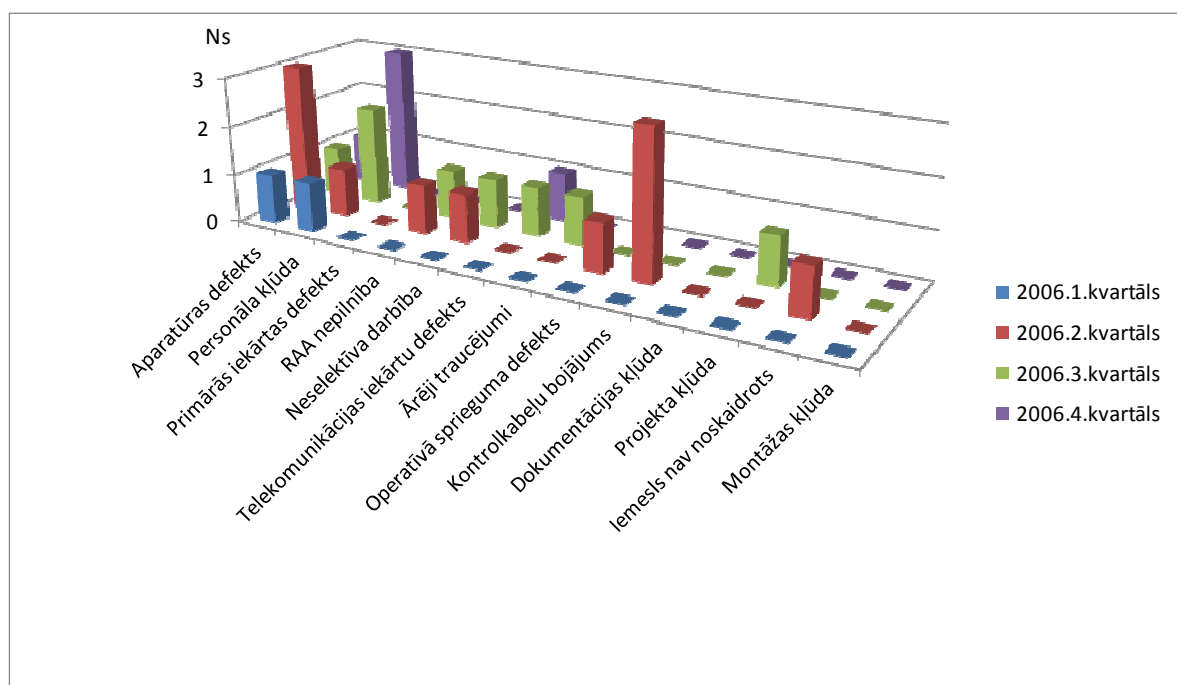
1.11.att. Atteikumu intensitāte.

Lielākā aizsardzību atteikumu intensitāte bijusi 1998.gadā, kas lielākā mērā saistīts ar “paaudžu maiņu” relejaizsardzības ekspluatācijas struktūrvienībā. No 2001.līdz 2003.gadam vērojams atteikumu skaita pieaugums, ko noteica straujie rekonstrukcijas darbu tempi un laika samazināšana ieregulēšanas un pieņemšanas pārbaudes vajadzībām. Lai novērstu turpmāku atteikumu skaitu palielināšanos organizatorisku iemeslu dēļ, turpmākos projektos tiek pievērsta lielāka vērība ar sekundāro komutāciju saistītajām problēmām.

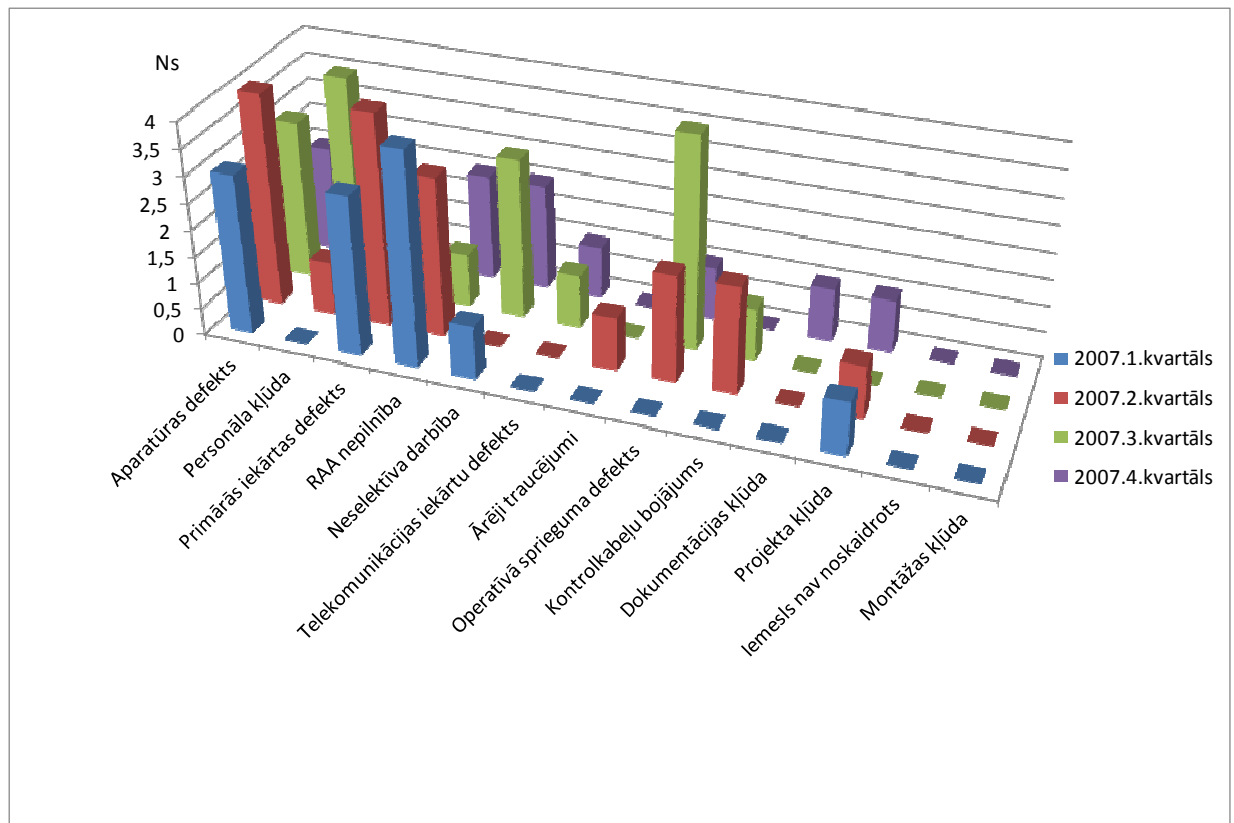
Kopš 2005.gada tika mainīta traucējumu uzskaites sistēma un uzmanība tika pievērsta nevis pareizo un nepareizo notikumu salīdzinājumam, kurš parādīts 1.11.attēlā, bet tieši nepareizo nostrāžu uzskaitē. Līdz ar to tieši salīdzināt šos rezultātus nevar. Attēlos redzama nepareizas darbības atskaites kvartāla ietvaros.



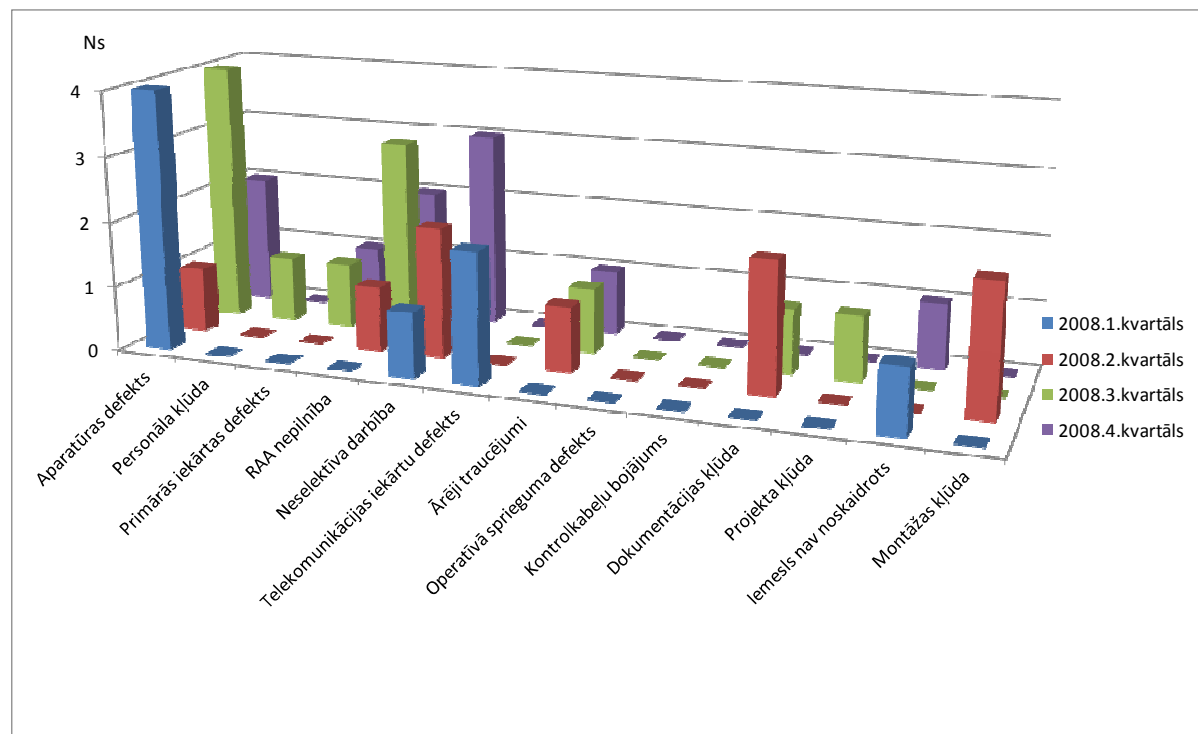
1.11.a. att. RA un A nepareizas darbības atskaite par 2005.gadu.



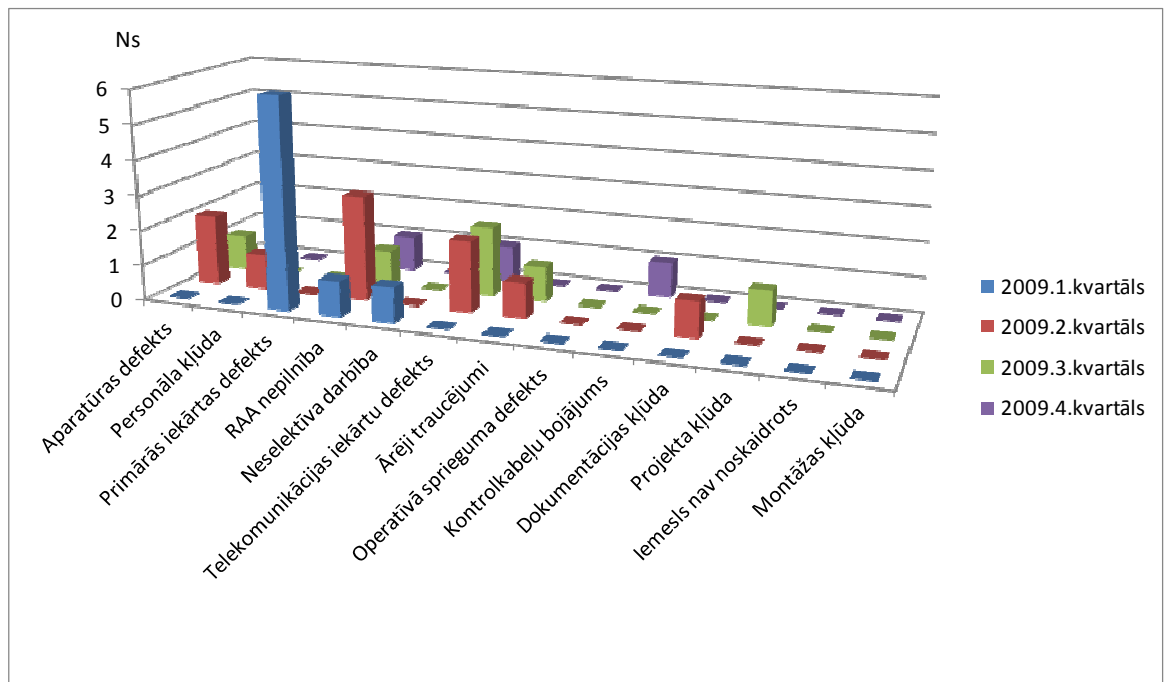
1.11.b. att. RA un A nepareizas darbības atskaite par 2006.gadu.



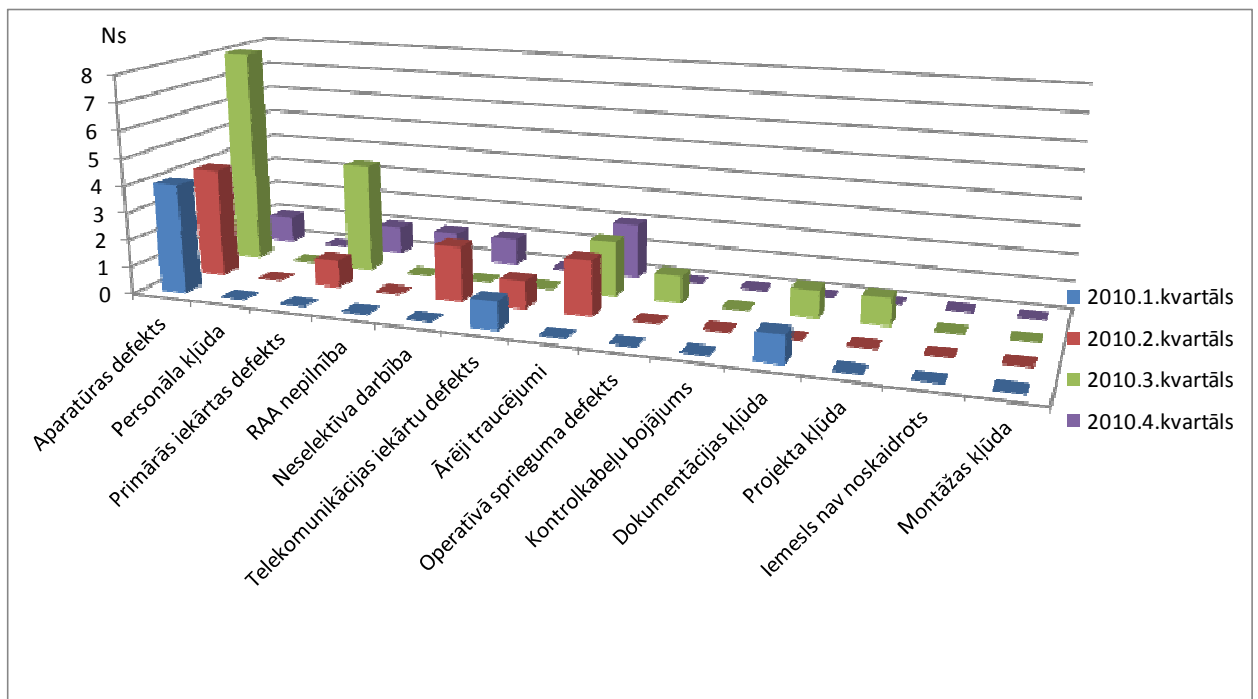
1.11.c. att. RA un A nepareizas darbības atskaite par 2007.gadu.



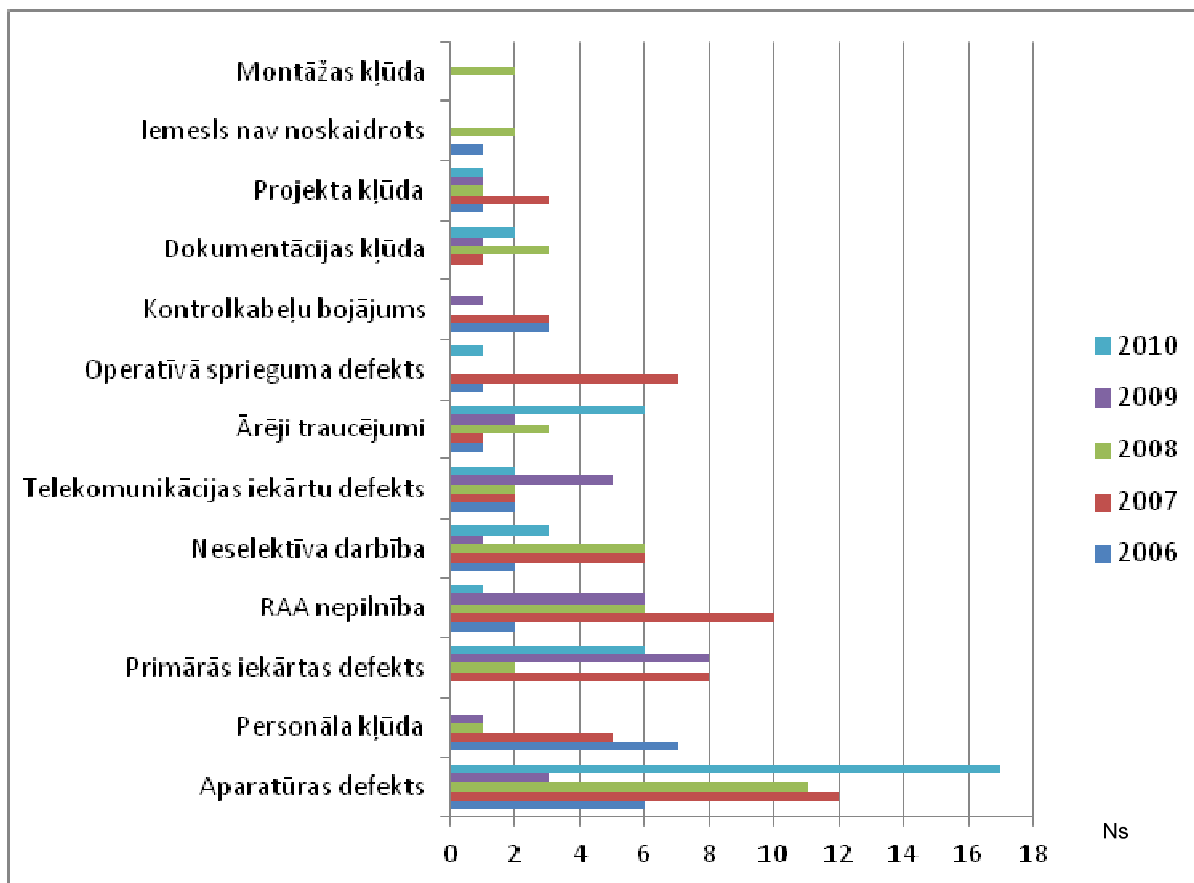
1.11.d. att. RA un A nepareizas darbības atskaite par 2008.gadu.



1.11.e. att. RA un A nepareizas darbības atskaite par 2009.gadu.



1.11.f. att. RA un A nepareizas darbības atskaite par 2010.gadu.



1.11.g. att. RA un A nepareizas darbība laika posmā no 2005.gada līdz 2010.gadam.

Kā var redzēt no attēliem, tad lielākā daļa nepareizas darbības izraisa sekundārās aparatūras defekti (25%), personāla kļūdas (12%), primārās iekārtas defekti (11%) un nepilnības RA un A iekārtās (11%), neselektīva darbība, ārēji traucējumi un problēmas ar operatīvo spriegumu (kopā 22%). Darbā veiktie pētījumi un praktiskie risinājumi ir veltīti aparatūras defektu, RA un A iekārtu nepilnību, traucējumnoturības un telekomunikācijas iekārtu traucētas darbības atteikumu samazināšanai.

1.4. 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 iekārtas 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.

Gadījumā, ja relejaizsardzības komplektā iekļauta automātiskā atkārtotā ieslēgšana, var notikt šīs automātikas nekorekta nostrāde. Ja automātiskā atkārtotā ieslēgšana nenotiek, tad tādu automātikas rīcību var saukt par **AAI atteikumu**. Pastāv arī iespēja, ka automātiskā atkārtotā ieslēgšana notiek nevēlami. Šādu automātikas rīcību sauc par **AAI nekorektu darbību**. Izstrādājot komplicētas līniju aizsardzības shēmas tiek izmantots aizsardzību paātrināšanas princips, kad ieslēdzas jaudas slēdzis, tā arī saņemot un noraidot paātrinājuma vai tālatslēgšanas komandas. Līdz ar to iespējama aizsardzības paātrinājuma lieka nostrāde vai aizsardzības paātrinājuma atteikums. Veicot notikuma analīzi, atbildīgais inženiertehniskais personāls izmanto RA iekārtu oscilogrammu, notikumu ierakstus, kā arī releja indikācijas notikuma brīdī. Dažreiz var notikt šo **RA indikācijas iekārtu atteikums**. Šādos gadījumos notikuma analīze kļūst apgrūtināta.

1.5. Relejaizsardzības un automātikas darbības atteikumu iemesli.

RA un A atteikums vai liekas nostrādes var notikt dažādu iemeslu dēļ. Šos iemeslus var iedalīt sekojoši [7]:

- **RA un A iekārtu izveidojums.** RA un A iekārtas ietver sevī daudzus un dažādus elementus, mehāniskus starpreļus, pusvadītājus, mikroprocesorus u.t.t. Laika gaitā kāds no elementiem var iziet no ierindas un tādēļ iespējams visas iekārtas atteikums.
- **RA un A izveidojuma principi.** Relejaizsardzība var nostrādāt nepareizi, ja tiek izmantoti nekorekti algoritmi vai iekārtas. Šādu atteikums pārsvarā atklāj jau pēc notikuma. Kā piemēru varētu minēt nevirzītas aizsardzības uzstādīšanu paralēlu līniju aizsardzībai.
- **RA un A iekārtu projekts.** RA un A nenostādās korekti, ja RA un A projektā tiks pieļautas kļūdas. Tās var rasties kā principālajos rasējumos, kā arī montāžas shēmās.

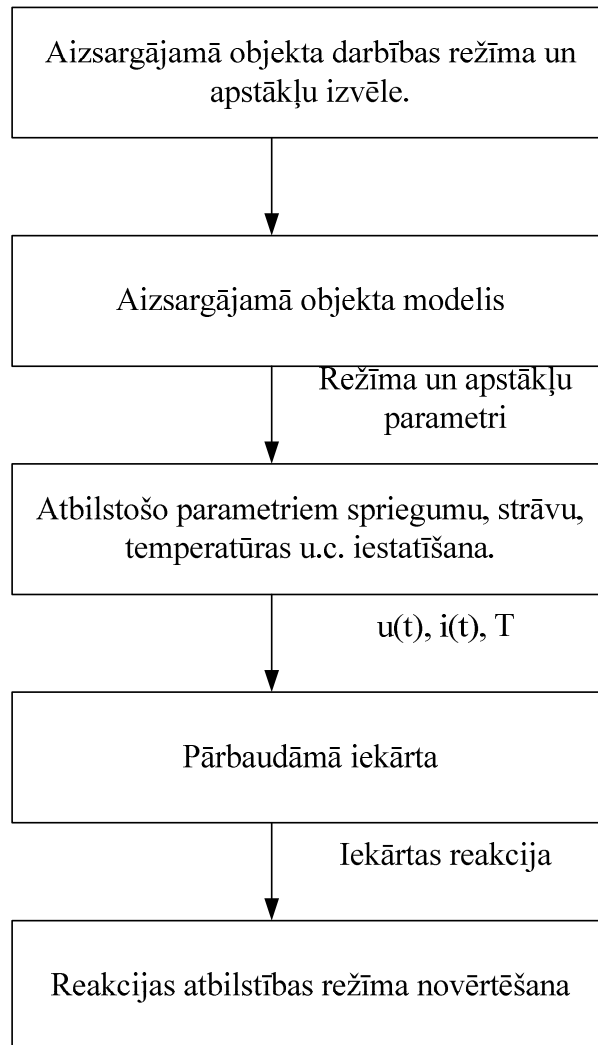
- **RA un A montāžā.** Ja savienojošie vadi nav pievienoti atbilstoši prasītajam vai tieši otrādi, izveidots nepareizs savienojums, sekundārajā komutācijā, notiks RA un A iekārtas atteikums vai lieka nostrāde.
- **Iestatījumi.** RA un A iekārta var nenostādīt vai nostādīt neselektīvi, ja iestatījumi nav izvēlēti atbilstoši pastāvošajam energosistēmas režīmam. Šādas kļūdas var rasties iestatījumu aprēķinos vai iestatījuma izvēles dēļ. Jāatzīmē, ka sarežģītiem RA un A termināliem kopā ar iestatījumiem veic arī veselu Relejaizsardzības algoritmu un loģisko funkciju aktivizēšanu.
- **Ieregulēšana.** Relejaizsardzība nostrādā nekorekti, ja nav pareizi veikta tās ieregulēšana, atbilstoši uzdotajai iestatījumu kartei un principiālajam risinājumam.
- **Pārslēgumi.** Neselektīva nostrāde var notikt pārslēguma laikā. Kā piemēru var minēt distantaizsardzības nostrādi, veicot pāreju no vienas kopņu sistēmas uz otru, nepareizi komutējot sekundāro spriegummaiņu daļu.
- **Strāvmaiņi vai spriegummaiņi.** Mērmaiņa primārs bojājums, īsslēgums vai pārrāvums mērmaiņa ķēdēs rada relejaizsardzībai nenormālus darba apstākļus un izsauc vai nu atteikumu vai neselektīvu nostrādi.
- **Nolietojums.** Elektromehānisku releju atteikumi, kurus izraisa to mehāniskais nolietojums.
- **Traucējumi.** Nepietiekama elementu elektromagnētiskā saderība var izsaukt iekārtu atteikumus. Piemēram, šādus atteikumus var izraisīt neekranētu kontrolkabeļu lietošana vai neatbilstošs (bojāts) zemēšanas kontūrs.
- **Operatīvais spriegums.** Relejaizsardzība atteiks, ja nebūs operatīvā sprieguma vai tā līmenis atrodas nepieļaujamās robežās.
- **Telekomunikācijas un sakaru kanāli.** Ja RA un A iekārtas ir pievienotas telekomunikācijas aparatūrai, tad šo iekārtu ģenerēti pārsprieguma impulsi vai sakaru traucējumi var izraisīt nepamatotu nostrādi.
- **Personāls.** Operatīvais, montāžas vai apkalpojošais inženiertehniskais personāla darbības rezultātā var notikt nepamatota nostrāde vai atteikums.
- **Nenoskaidrots iemesls.** Retos gadījumos šādu atteikuma iemeslu neizdodas identificēt. Šādu secinājumu var pieņemt vienīgi pēc detalizētas un daudzpusīgas izmeklēšanas, kā arī ārpuskārtas pārbaūžu veikšanas.

1.6. Pārbaudes metožu veidi un klasifikācija

RA un A pārbaudes uzdevums parādījās kopā ar pirmajiem relejiem, tas ir, sākot ar 1830-tiem gadiem. Uzdevuma atrisināšanai ilgus 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 iespējamos 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.
Elektroniskās skaitļošanas mašīnas (ESM) atklāja iespēju energosistēmu un to objektu ciparu modeļu izmantošanai. Energosistēmas RA un A iekārtu darbības procesu ciparu modelēšanai, atļāva risināt arī RA un A pārbaudes uzdevumus.
4. Vienlaicīgi ar ESM, parādījās arī ceturtais RA un A pārbaudžu organizācijas veids, kurš balstās tikai uz digitālo modeļu izmantošanas bāzes. Šajā gadījumā, pārbaudāmās iekārtas vietā notiek tās programmatūras testēšana. Dotā pieeja atļauj vienlaicīgi pārbaudīt izmantojamo metodi, algoritmus un realizējošo programmu.

Pamatotas uz kontrolējamo procesu un darbības apstākļu simulācijas bāzes pārbaudes metodes realizācijas algoritms var būt atspoguļots struktūrshēmā, kas parādīta 1.12. attēlā.



1.12.att. Pārbaude metožu realizācijas algoritms.

Apskatāmās struktūrshēmas bloki var būt realizēti būtiski dažādi:

- Izmantojot operatoru vai automātiski;
- Izmantojot analogos vai ciparu modeļus.

Kopā ar mikroprocesoriem tika izstrādātas metodes, pamatotas uz nesaistīto ar kontrolējamo objektu procesu realizācijas bāzes. Šīs metodes parādījās kopā ar mikroprocesoriem un balstās uz programmējamo sistēmu īpašību un iespēju izmantošanas pamata:

1. Iekārtas ar mikroprocesoriem ir spējīgas pašpārbaudei. Šim nolūkam tiek sastādītas speciālas programmas, kuru izpildes rezultātā ir jāsasniedz „a priori” zināms rezultāts. Ja šis rezultāts tiek sasniegts, tad tiek pieņemts secinājums: iekārta ir spējīga realizēt uzdotās programmas.

2. Pašpārbaūžu realizācija neprasa papildus kapitālieguldījumu un neizsauc iekārtu sarežģīšanos.

3. Pašpārbaude var būt realizēta iekārtu pamatfunkciju izpildes gaitā.

Nosauktās iespējas tiek izmantotas vairākumam programmējamo iekārtu. Šādu iespēju izmantošana tiek ņemta vērā arī dotā darbā, bet vienlaicīgi, netiek attīstītas dotā virziena metodes un algoritmi – vienkārši tiek izmantoti zināmie un pārbaudītie algoritmi un paņēmieni.

Visi nosauktie pārbaūžu veidi nepārtraukti attīstījās un, rezultātā, būtiski atviegloja RA un A aparātūras un programmatūras testēšanu dažādās procedūras stadijās. Vienlaicīgi, saglabājas arī būtiski trūkumi:

- Pirmajos divos gadījumos, nepieciešams izmantot salīdzinoši dārgus pastiprinātājus;
- Trešā gadījumā netiek pārbaudīta aparatūra un iespējamās elementu atteices.

RA un A pārbaūžu nolūkos energosistēmu ciparu modeļi tika izmantoti, lai atvieglotu operatora darbību, realizējot pirmo no nosauktiem pārbaūžu veidiem. Ar modeļa palīdzību tika rēķinātas strāvas un spriegumi, kuri ar operatora starpniecību, tika izmantoti iekārtu pārbaudēm. Dabīgi, tika uzstādīts uzdevums, maksimāli automatizēt operatora darbību. Uzdevuma atrisināšanai 20.-ā gadsimta beigās, tika izstrādātas analogi-digitālās RA un A pārbaudes sistēmas. Šīs sistēmas izmanto trīs mūsdienu tehnikas sasniegumus:

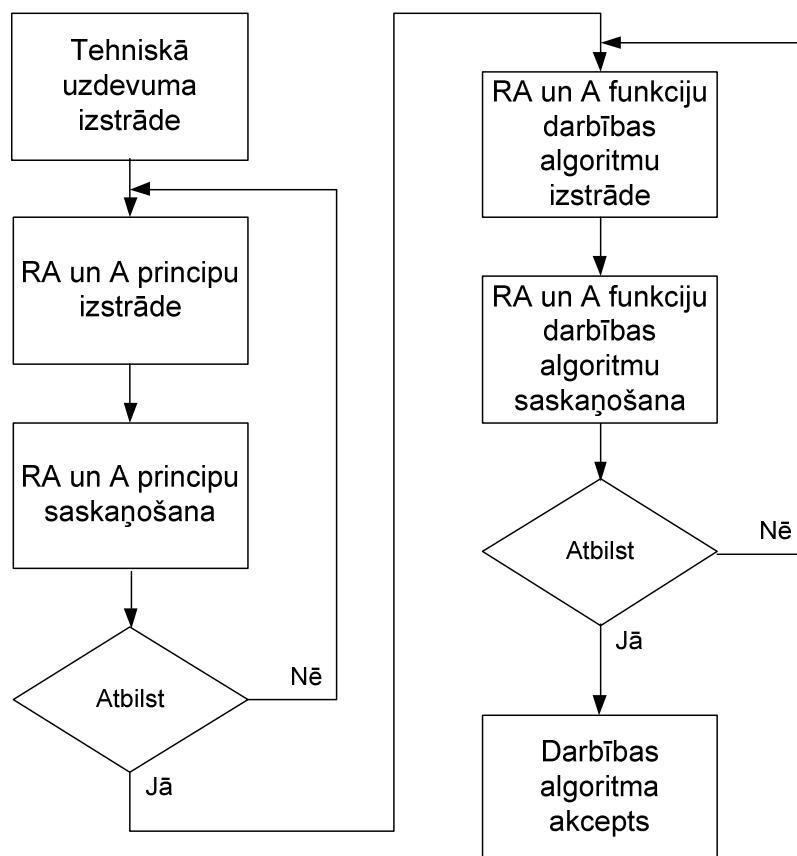
1. Ciparu – analogos pārveidotājus. Pagājušā gadsimta beigās tika izstrādātas mikroshēmas, kuras atļauj ar lielu precizitāti pārveidot ciparu kodu uz analogo lielumu. Svarīgi atzīmēt, ka vienlaicīgi, sasniegta mikroshēmu lēta cena un augsts drošums;
2. Elektroniskos signālu pastiprinātājus. Spēka elektronikas sasniegumi atļauj realizēt salīdzinoši lētus un precīzus pastiprinātājus.
3. Personālie datori, kuri atļauj realizēt sarežģīto energosistēmu modeļus, aprēķināt bojājumos izsauktos procesus, ģenerēt uzdotos lielumus un to izmaiņas procesus.

Nosauktie sasniegumi tika pielietoti visu augstāk nosaukto pārbaūžu metožu realizācijā.

RA un A „dzīves gaitā” tiek veikti daudz pārbaūžu veidi, kuri norādīti attēlos 1.13. līdz 1.15.

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 pārbaūžu veidi.



1.13.att. Tehniskā uzdevuma izstrāde un saskaņošana.

1. **Pārbaudes metodikas izstrāde.** Šajā etapā nosaka, kādā apjomā jāveic pārbaude, lai iekārta varētu tikt uzskatīta par ievadamu darbā. Pārsvarā 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 [42,43].

3. Vairākums algoritmu var būt aprakstīti ar vienādojumiem, kuri operē ar kompleksiem un loģiskiem lielumiem:

$$If: \begin{cases} \varphi_1(\underline{X}_1, \dots, \underline{X}_K) > 0, then L_1 = 1 else L_1 = 0 \\ \vdots \\ \varphi_n(\underline{X}_1, \dots, \underline{X}_K) > 0, then L_n = 1 else L_n = 0 \end{cases} \quad (1.15.)$$

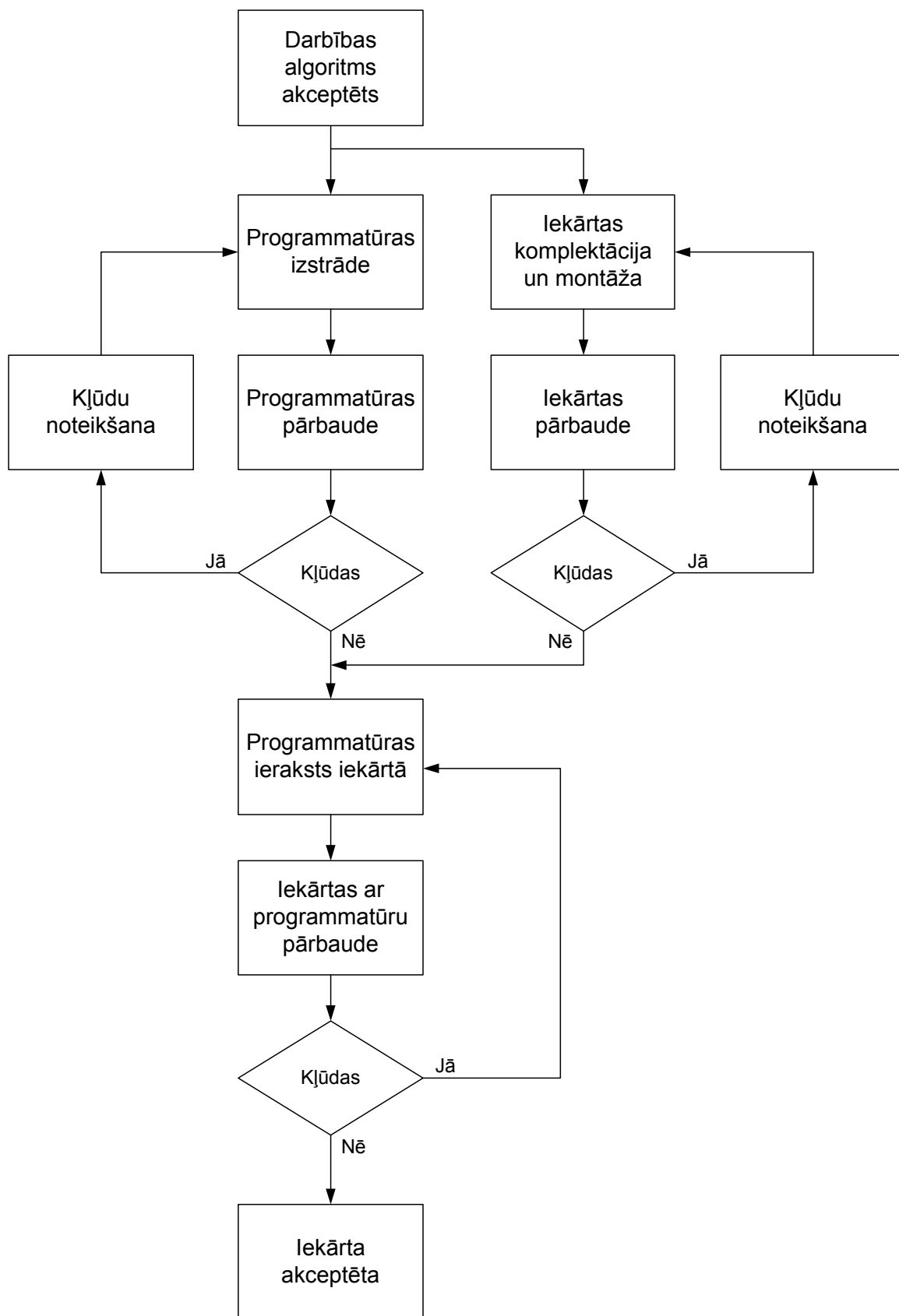
kur $\underline{X}_1, \dots, \underline{X}_K$ – strāvu un spriegumu rūpnieciskās harmonikas vektoru parametri (aktīvā un reaktīvā komponente, vai modulis un fāze).

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. (1.15.) 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.

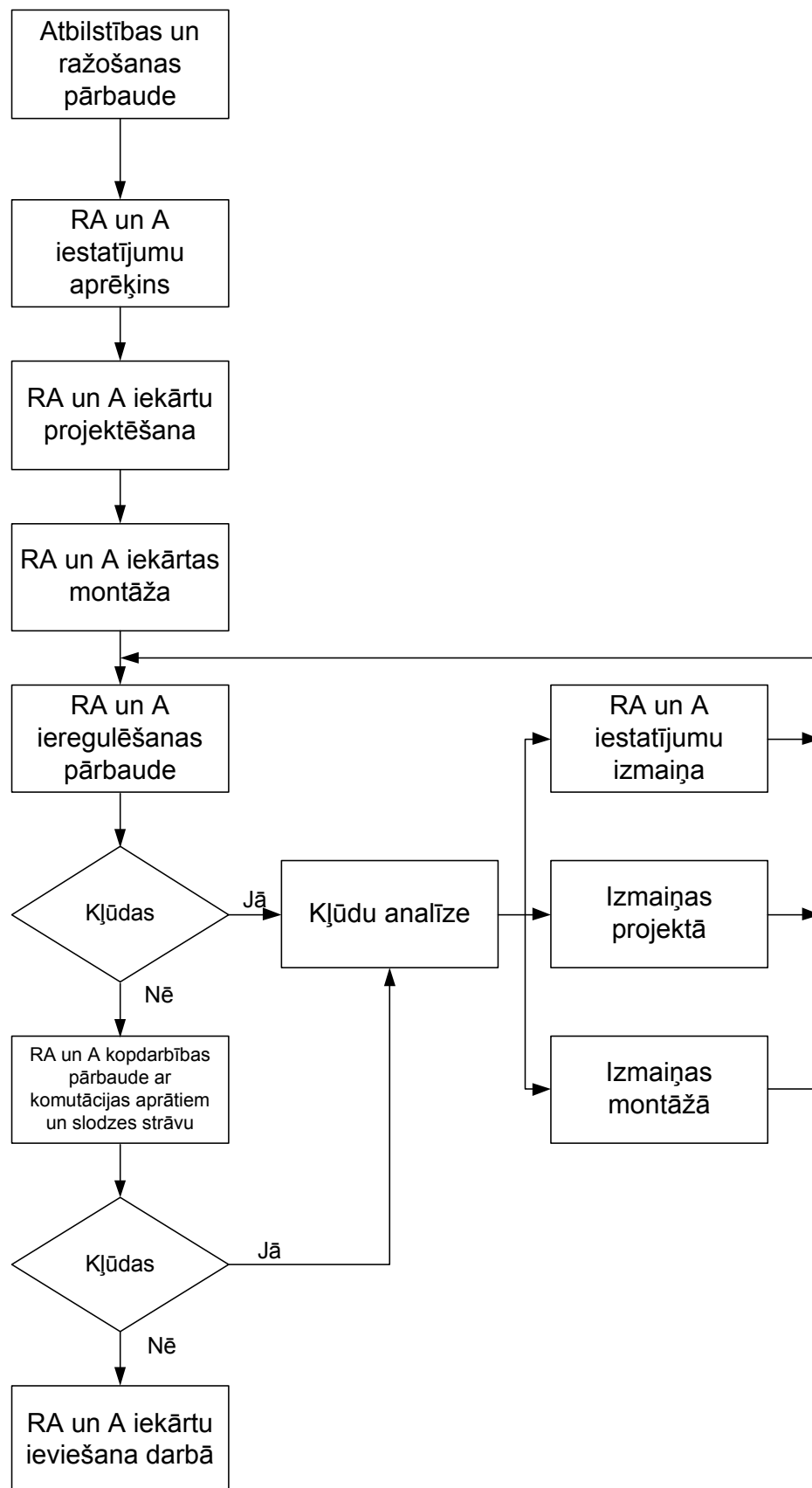
4. **Atbilstības pārbaude** tiek veikta pēc izvēlētā algoritma realizācijas konkrētas iekārtas veidā. Vispirms tiek pārbaudīta iekārtas spēja darboties ekspluatācijas apstākļos (temperatūra, mitrums, vibrāciju līmenis, spiediens, izolācijas līmeņi, spēja izturēt pārspriegumus). Ekspluatācijas apstākļi tiek reglamentēti ar Eiropas un citu pasaules valstu saskaņotiem standartiem. Jāpārlicinās, ka iekārtas izgatavošanas tehnoloģiskais process ir atbilstošs (skat.1.14.attēlu).



1.14.att. Atbilstības pārbaude.

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 (skat.1.15.attēlu).
7. **Periodiskās pārbaudes**. Šo pārbaūžu 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 pārbaūžu 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**.



1.15.att. Iekārtas ieviešana darbā.

1.7. 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).

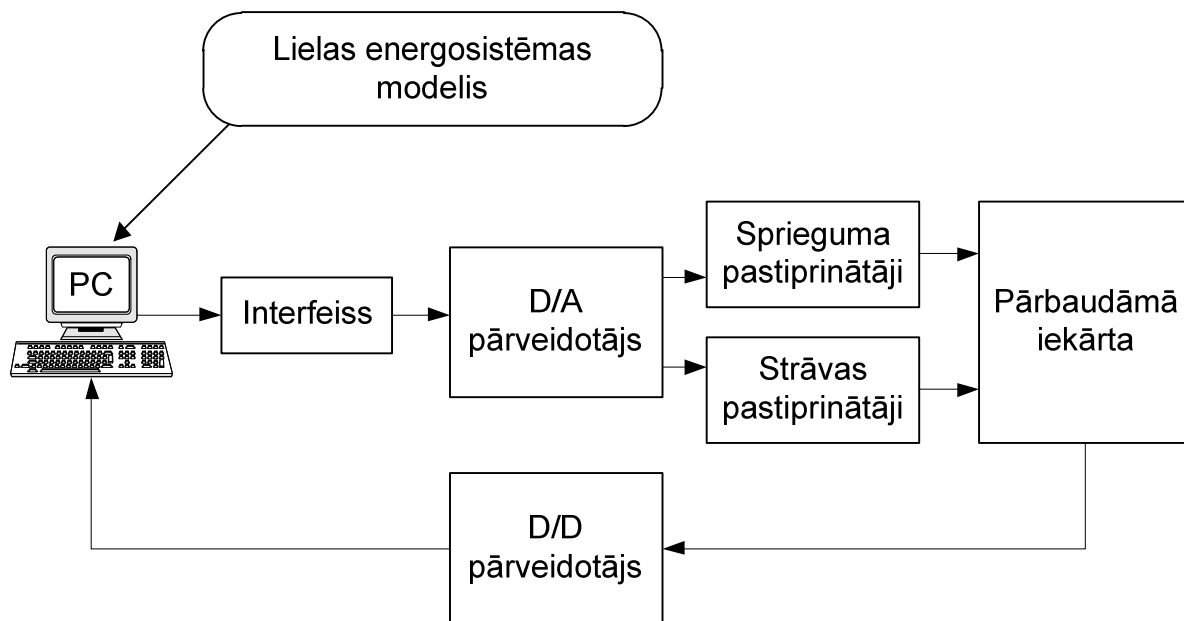
1.7.1. Reālā laika digitālie simulatori

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 iekārtas struktūra parādīta 1.16. attēlā.



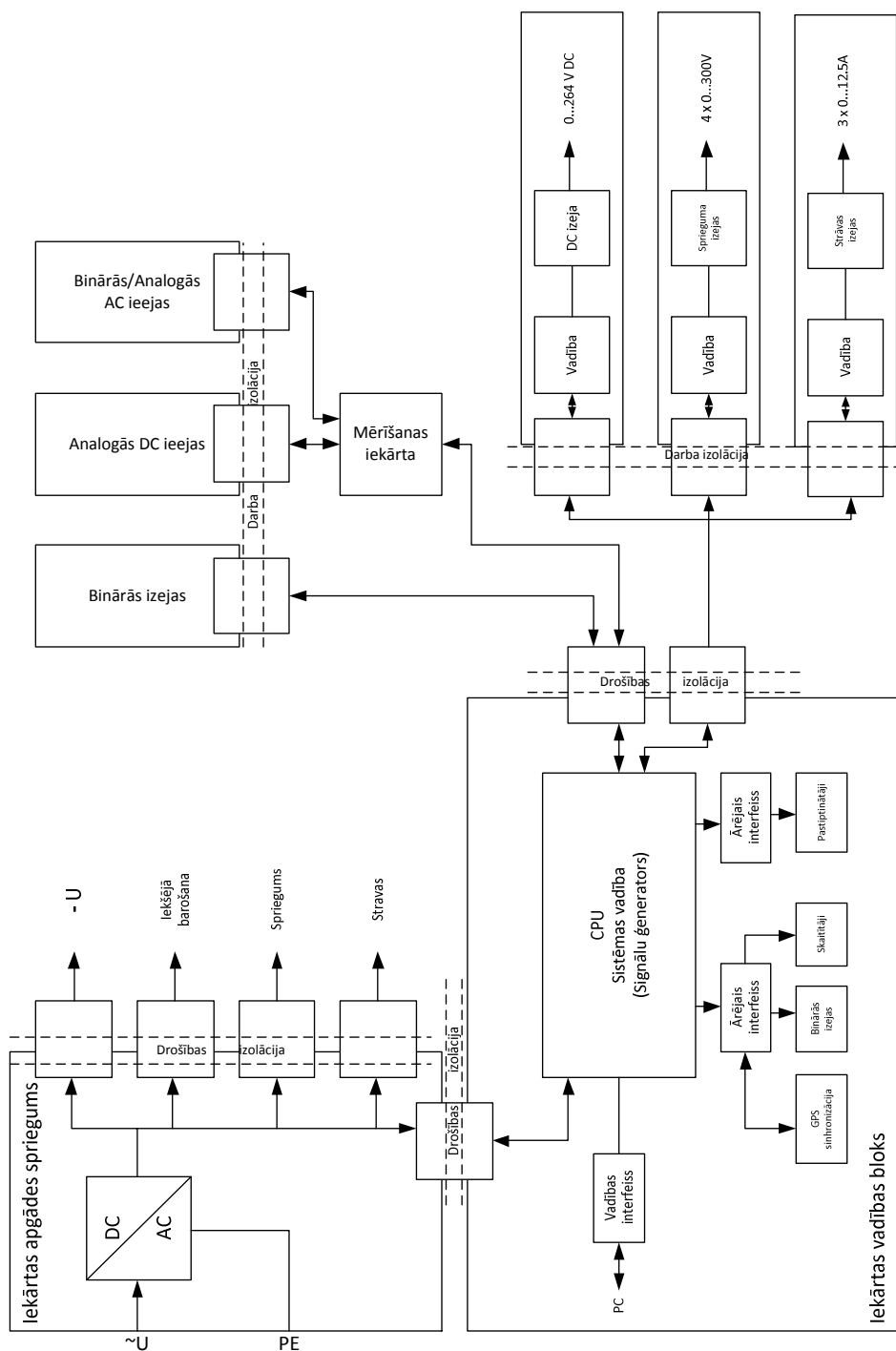
1.16. att. RLDS pārbaudes iekārtas struktūra.

RLDS pārbaudes sistēmas pielieto energosistēmām ar augsta vai supraugsta sprieguma elektrotīklu[22].

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.

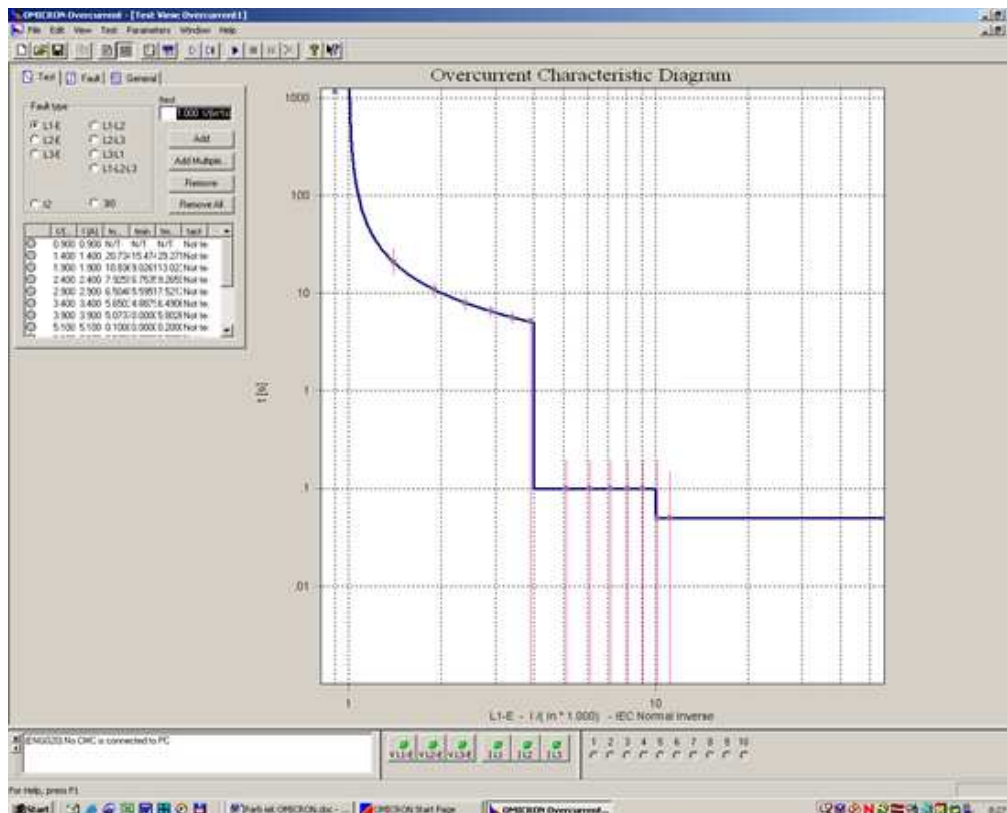
1.7.2. Vienkāršotie reālā laika simulatori.

Augsta RLDS cena dara par neiespējamu to plašu pielietojšanu. Energosistēmu ekspluatācijas praksē tiek pielietotas stipri vienkāršotas sistēmas. Šādas iekārtas struktūra parādīta 1.17.attēlā [28].



1.17. att. VRLS pārbaudes iekārtas struktūra.

VRLS faktiski attīstīja pārbaudes virzienu, kura pamatā ir strāvu un spriegumu ģenerācija ar operatora palīdzību. Pie tam, operatora darbība lielā mērā tiek automatizēta. VRLS darbība tiek ilustrēta attēlos 1.19., 1.20. Ļoti būtiska loma iekārtas struktūrā piemīt ķēžu izolācija esamībai, kas ir ļoti svarīgi veicot pārbaudes reālos apstākļos.



1.18.att. Strāvas aizsardzības pārbaudes protokola fragments.

Attēlā 1.18. dots strāvas aizsardzības ar atkarīgu laika raksturlīkni laika-strāvas raksturlīkni pārbaudes protokola fragments, attēlos 1.19. a) un b) distantaizsardzības ar četrām zonām pārbaudes fragmenti. Atzīmēsim, ka pārbaudes ir stipri vienkāršotas:

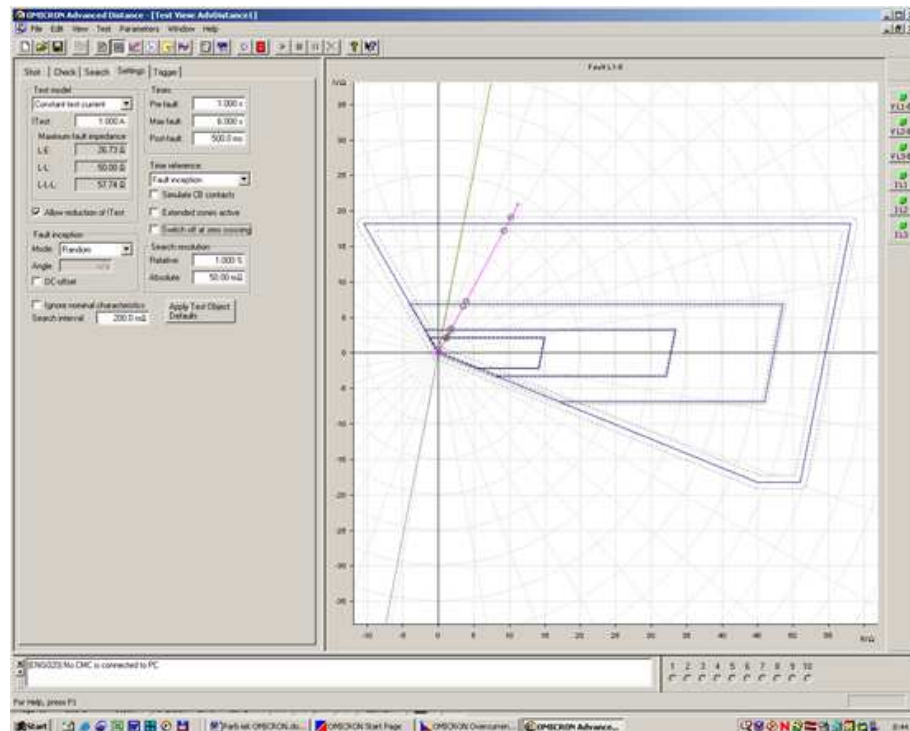
- Pārbažu skaits ir ierobežots;
- Tiek pārbaudītas raksturlīknes, bet netiek noskaidrots cik uzdotās raksturlīknes atbilst konkrēta objekta vai objektu klāsta vajadzībām. Acīmredzams, ka relejaizsardzības uzvedība ir daudz sarežģītāka salīdzinot ar to, ko var realizēt attēlā 1.18.;
- Netiek pārbaudīti dažādu veidu bloķēšanas nosacījumi;
- Rodas jautājums: ja iekārta pareizi strādā tuvos zonu raksturlīknēm režīmos, vai tas nozīmē, ka iekārta pariezi strādās arī visos pārējos režīmos?

Attēlā 1.19. parādīta vairāku distantaizsardzības algoritmu darbības pārbaude ‘ārēju’ un ‘iekšēju’ bojājumu gadījumā [44,45].

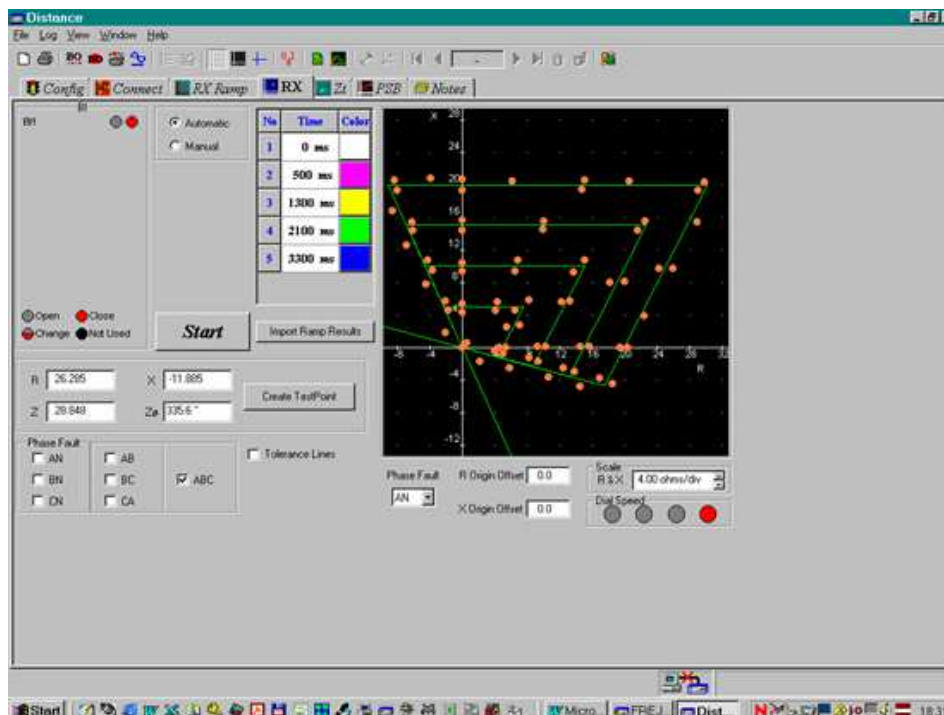
Pārbaudes rezultātu atspoguļošanai tiek izmantotas daudzas ietekmējošo parametru kombinācijas un „trešā dimensija” – krāsas, lai atvieglotu rezultātu analīzi. Var redzēt, ka

pilnvērtīgai divu DA zonu pārbaudei var būt nepieciešams veikt desmitiem tūkstošu mēģinājumu.

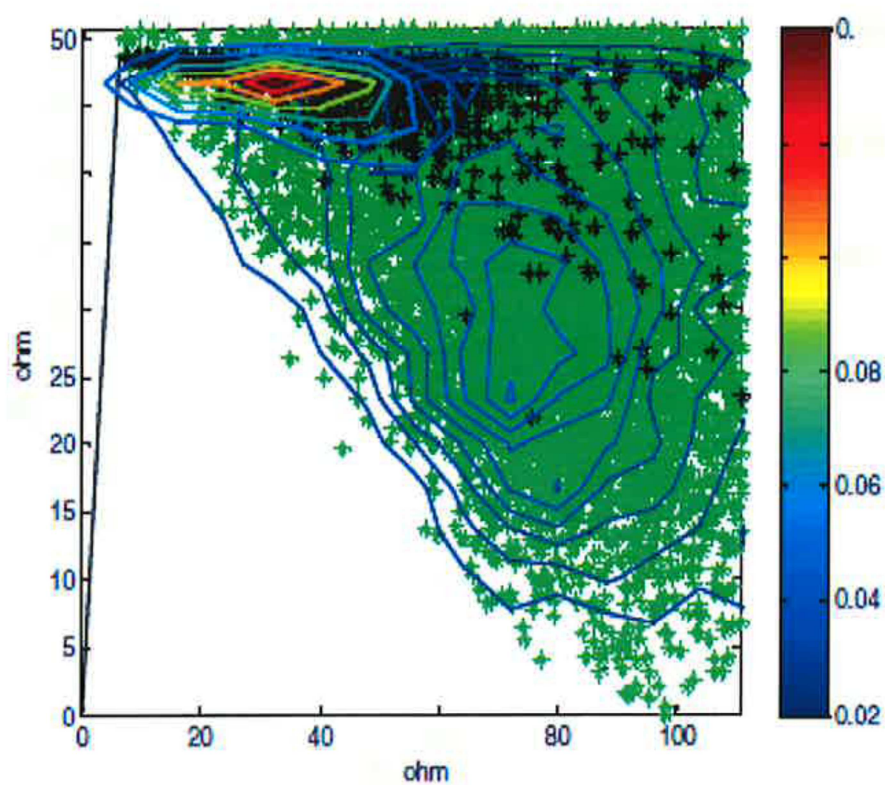
Kopumā var apgalvot, ka VRLS ir piemēroti vienkāršotiem, pirmkārt apakšstaciju apstākļiem, bet nepietiekami, lai veiktu ražošanas, funkcionālās un speciālās pārbaudes.



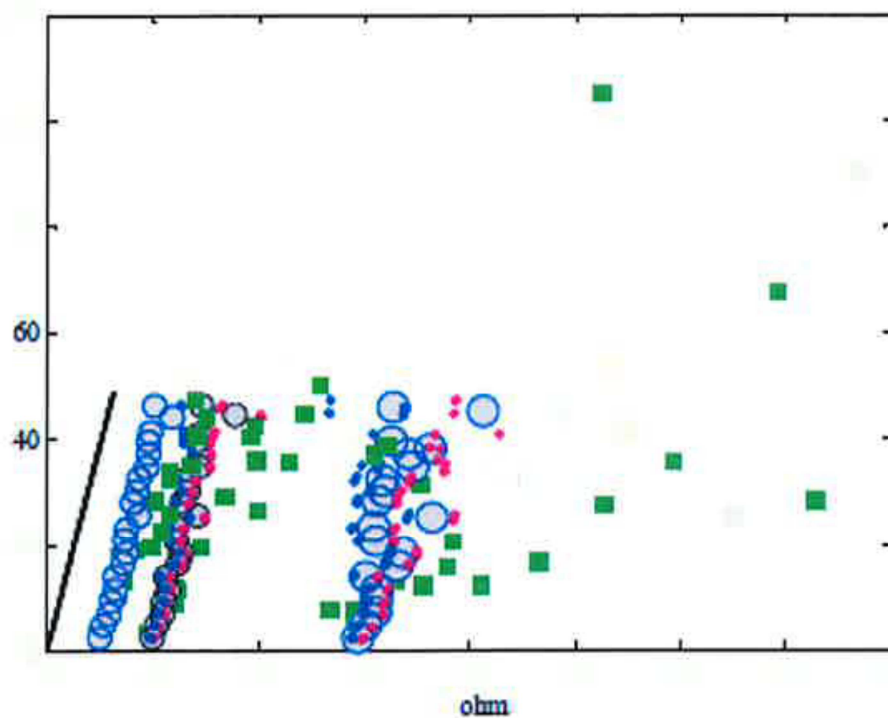
1.19. a). att. Distantaizsardzības pārbaudes protokola fragments.



1.19. b). att. Distantaizsardzības pārbaudes protokola fragments.



1.19. a). att. Distantaizsardzības algoritmu pārbaudes algoritma izstrādes stadijā.



1.19. a). att. Vairāku distantaizsardzības algoritmu salīdzināšana.

1.8. Secinājumi

1. RA un A nekorekta darbība izsauc milzīgus ekonomiskos un sociālos zaudējumus;
2. Mikroprocesoru elementu izmantošana sekmēja RA un A drošuma līmeņa paaugstināšanu;
3. RA un A atteikumi parādās daudzu iemeslu dēļ un to skaita samazināšana joprojām ir aktuāla visā pasaulē un Latvijā;
4. Relejaizsardzība uz mikroprocesoru bāzes nav pakļauta intensīviem novecošanās procesiem, kas raksturīga relejiem uz elektromehāniskās bāzes;
5. Relejaizsardzības un automātikas kompleksu izstrādes, un ekspluatācijas gaitā jāveic pārbaudes, lai nodrošinātu releju korektu darbu;
6. Releji uz mikroprocesoru bāzes ir daudzfunkcionāli un to pārbaudei nepieciešamas iekārtas ar plašām iespējām nenormālu režīmu ģenerācijā;
7. Pieaugot relejaizsardzības un automātikas iekārtu funkcionalitātei, kā arī pielietojot vienu un to pašu releju dažādās energosistēmas, nepieciešama šo iekārtu daudzpusīgāka pārbaude;
8. Reālā laika digitālie simulatori ir spējīgi ģenerēt daudzveidīgus režīmus, kuri raksturīgi konkrētām energosistēmām. Galvenais tādu simulatoru trūkums – to augstā cena;
9. Vienkāršotie reālā laika digitālie simulatori ir piemēroti, pirmkārt, periodisko pārbaužu veikšanai apakšstaciju apstākļos.

2. Virtuālo pārbažu metodes pamatojums un realizācija.

Programmējamo ciparu tehnoloģiju pielietošana pārbažu iekārtu izveidē, Monte-Karlo metodes pielietojums mikroprocesoru releju aizsardzības pārbaudē, releju aizsardzības pārbažu apjomu noteikšana, releju aizsardzības atteikumu varbūtība, virtuālās releju aizsardzības pārbaudes, virtuālās laboratorijas izveide.

2.1. Ievads.

Vispārīgā gadījumā, sarežģītu mikroprocesoru kontroles un vadības sistēmu pārbaudei nepieciešams radīt speciālu, dārgu laboratoriju un veikt ilgstošas, darbietilpīgas, augstu kvalificēta personāla izpildītas pārbaudes.

Problēmu daļēji risina iebūvētie pašpārbaudes bloki, kas ļauj konstatēt bojājumu rašanos vairumā no aparātdaļas blokiem. Izstrādāti arī specializēti ar datoru vadāmi stendi, kas nodrošina uzdoto strāvu un spriegumu izmaiņas procesu ģenerāciju un RA un A ierīču testēšanu. Taču šādu stendu izmaksas ir augstas, bet iegūto strāvu, spriegumu un loģisko signālu daudzums visai ierobežots. Sarežģītu aizsardzību pārbaudē, pat izmantojot datorvadāmus stendus, rodas ievērojamas problēmas. Šīs problēmas vēl daudzkārt pieaug ierīču tehniskās izstrādes etapā. Pieredze rāda, ka sintezēto ierīču darbaspēju pārbaudes stadijā bieži nepieciešams izdarīt korekcijas. Pie tam, pat nelielu programmatūras korekciju gadījumā, iespējamās kļūdas, kas parādās visneiedomājamākajās vietās. Jebkura izmaiņa, kas izdarīta programmatūrā, rada nepieciešamību pilnā apjomā atkārtot darbietilpīgo testēšanu. Dabiskā tieksme samazināt izdevumus uz testēšanas apjoma samazināšanas rēķina rada ievērojamas kļūdas. Var minēt piemērus, kad kļūdas parādās tikai pēc vairākiem gadiem, ekspluatējot desmitiem ierīču, un rezultātā rada ievērojamus zaudējumus, ko izsauc visu procesoru programmējamo atmiņu nomaiņas nepieciešamība. RA un A elektromehānisko un uz analogo pusvadītājelementu bāzes radīto ierīču struktūru veido paralēli strādājoši bloki, kas ļauj tos pārbaudīt atsevišķi, piemēram, atsevišķi pārbaudīt palaides un bloķējošos blokus, atsevišķi pārbaudīt dažādu fāžu mērierīces, kā arī dažādu aizsardzības pakāpju mērierīces. Mikroprocesoru ierīces atsevišķus programmas blokus realizē pēc kārtas ar nobīdi laikā. Pie tam atsevišķu bloku pārbaude ir iespējama tikai apejot (izlaižot) nepārbaudāmos blokus. Šāda pārbaude ir nepilnīga. Ierīču izstrādes stadijā, lai atvieglotu visai darbietilpīgo programmu ievadišanu mikroprocesorā, šīs programmas parasti modelē un skenē ar personālā datora palīdzību. Taču šis paņēmiens nespēj pilnīgi aizvietot reālās iekārtas pārbaudi.

Tālāk parādīts, ka mūsdienu datortehnika atļauj ar visai maziem papildus izdevumiem atrisināt aizsardzību testēšanas problēmu mikroprocesoru ierīču projektēšanas stadijā, gandrīz pilnīgi automatizējot atkārtotās pārbaudes.

2.2. Virtuālo pārbažu metodes būtība.

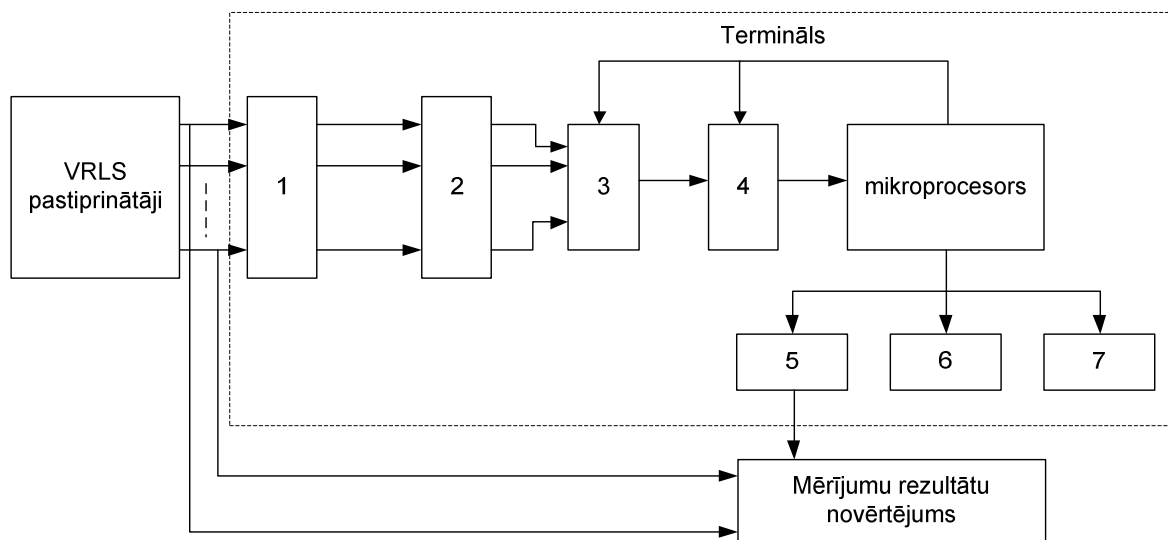
Apvienojot augstāk teikto, varam apgalvot, ka RA un A iekārtu testēšana joprojām paliek aktuāla un vienlaicīgi, visām zināmām metodēm un to realizācijas instrumentiem piemīt būtiski trūkumi. Atzīmēto trūkumu novēršanai tiek piedāvāta jauna testēšanas metode, kura nosaukta ar virtuālo pārbažu metodi.,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

Pārbaudes procedūra tiek sadalīta divās daļās:

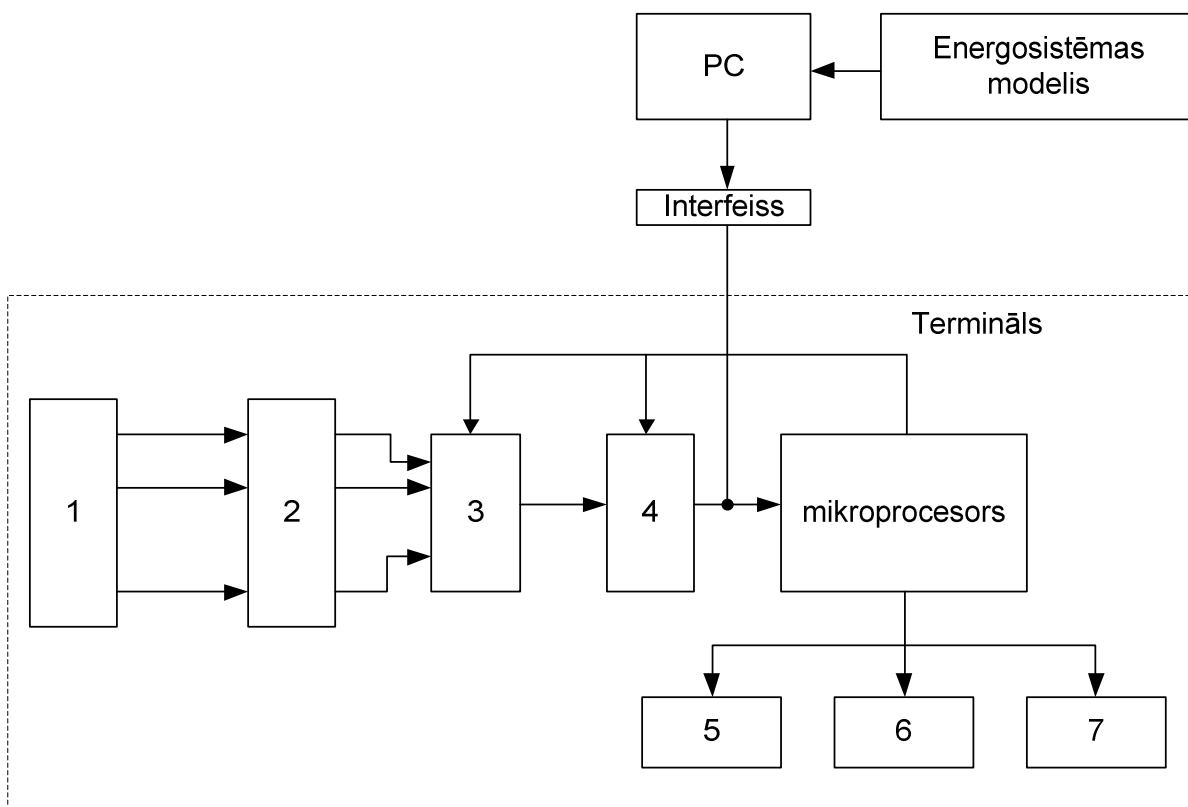
3. Tiek pārbaudītas RA un A binārās ieejas un izejas, analogās ķēdes un analogais-ciparu pārveidotājs;
4. Tiek pārbaudīta RA un A realizācijas metode, izvēlētais algoritms un algoritma realizācijas programmatūra, un aparātūra.

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; Pārbažu 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. Bloku nosaukumus skat. attēlā 1.2.



2.2. att. Metodes, algoritma programmatūras un ciparu aparatūras pārbaude. Bloku nosaukumus skat. attēlā 1.2.

2.3. Virtuālās testēšanas organizācija.

Virtuālās testēšanas būtību raksturo pārbaudāmās ierīces funkcionēšanas algoritma papildinājums ar programmu bloku, kas aizvieto iepriekšminētā analogciparu pārveidošanas rezultātus ar mikroprocesora atmiņā ierakstītiem pārbaudes procesu imitējošiem elektriskiem lielumiem. Acīm redzams, ka šāda testēšana piemērota programmatūras pārbaudei un ļauj noteikt gan tieši programmas kļūdas, gan aparātu atteices, kas izraisa nepareizu programmu izpildi.

Virtuālās testēšanas realizācijai nepieciešams:

1. Papildināt mikroprocesoru ierīces ar atmiņas bloku, kura apjoms atļautu uzglabāt pietiekoša ilguma procesu raksturojošos elektriskos lielumus;
2. Nodrošināt procesu (to raksturojošo signālu) saņemšanu no ārējā avota un ierakstīšanu atmiņā;
3. Organizēt pārbaudi imitējošo procesu ģenerāciju un pārvadi.

Jāatzīmē, ka pirmo divu procedūru realizācija nerada grūtības. Tā mūsdienu ierīces, kā likums, nodrošinātas ar atmiņu, kas paredzēta avārijas procesu signālu uzglabāšanai (ciparu oscilografēšana). Šo atmiņu vai tās daļu pārbaūžu laikā var izmantot testa signālu virtenņu uzglabāšanai. Tai pat laikā mikroprocesoru ierīces apgādā arī ar interfeisiem, kas realizē datu apmaiņas funkciju ar ārējiem datoriem [3]. Tādējādi, lai realizētu virtuālās pārbaudes, nepieciešams izstrādāt divu līmeņu atbalsta (papildus) programmas:

1. Programmu ieejas signālu analogciparu pārveidojumu aizvietošanai ar personālā datora iepriekš izskaitļotām vērtībām (pārbaudes laikā signāli var līdzināties nullei). Šo programmu realizē mikroprocesoru ierīce un to var sintezēt tikai izstrādes stadijā.
2. Programmu pārbaudi imitējošo procesu ģenerācijai. Šādu programmu izstrāde praktiski nav saistīta ar testējamo iekārtu īpatnībām un tā veicama ievērojot konkrētā aizsargājamā objekta specifiku.

Attēlos 2.1. un 2.2. dotās struktūras satur, tā pat, kā RLDS, pastiprinātājus, kas var izsaukt taisnīgu jautājumu: Vai piedāvātā metode samazina prasības pārbaudes aparatūrai un, attiecīgi, tās cenu? Atbilde ir apstiprinoša, jo analogciparu pārveidošanas pārbaude, veicot to atsevišķi, stipri vienkāršojas. Praktiski pietiek tikai viena strāvas un sprieguma avota. Vienkāršojas arī lēmuma par iekārtas atbilstību pieņemšanas procedūra. Pietiek salīdzināt ieejas signālu lielumus ar indikācijas rezultātiem.

Metodes, algoritma, programmatūras pārbaude notiek izmantojot tikai digitālo tehnoloģiju (skat.2.2.attēlu). jāatzīmē, ka tāda procesa realizācija prasa:

- Iespēju atspoguļot energosistēmā notiekošos procesus RA un A termināla mikroprocesoram saprotamā veidā (formātā, kurš sakrīt ar analogciparu rezultātu formātu);
- Iespēju aizvietot analogciparu pārveidošanas rezultātus ar datiem, saņemtiem no PC.

Abu nosaukto iespēju realizācijai nav gatavu risinājumu. Ir jāizvēlas piemērota pārstrādei energosistēmu simulējoša programmatūra un jāveido piemērotu piedāvātām pārbaudēm RA un A terminālu (skat.3.nodaļu)

Procesus simulējošas programmatūras izvēles pamatojumam apskatīsim energosistēmu un to elementu modeļus un attiecīgās programmas.

2.4. Energosistēmu un to elementu modeļi.

Energosistēmu attīstības plānošanā, ekspluatācijā un operatīvajā vadībā, tiek izmantoti daudzi energosistēmu un to elementu modeļu veidi [46,47].

Atkarībā no galvenā pielietojuma veida tos var sadalīt trijās lielās grupās:

1. Normālā režīma modelēšana;
2. Īsslēgumu un citu energosistēmas elementu bojājumu veidu modelēšana (elektromagnētiskie pārejas procesi);
3. Elektromehānisko procesu modelēšana.

RA un A pārbaudes nolūkos ir jāizmanto otrās un trešās grupas modeļus. Var apgalvot, ka vispilnīgākie trešās grupas modeļi ietver sevī otrās un daļēji pirmās grupas modeļus, jo elektromehāniskie procesi, daudzos gadījumos sākas īsslēgumu vai citu bojājumu dēļ. Zināms, ka pašlaik ir izstrādāti un pārbaudīti visu pielietojamo energosistēmas elementu (turbīnu, ģeneratoru, līniju, transformatoru, vadības sistēmu elementu, rūpnieciski izgatavojamo relejaizsardzību, spēka elektronikas iekārtu, enerģiju patērējošo iekārtu) modeļi. Savienojot elementu modeļus izmantojamā struktūrā (uzdodot energosistēmas topoloģiju) var izveidot lielas energosistēmas modeli. Pie tam, matemātiskais modeļa apraksts satur parasto diferenciālo un algebrisko vienādojumu sistēmu:

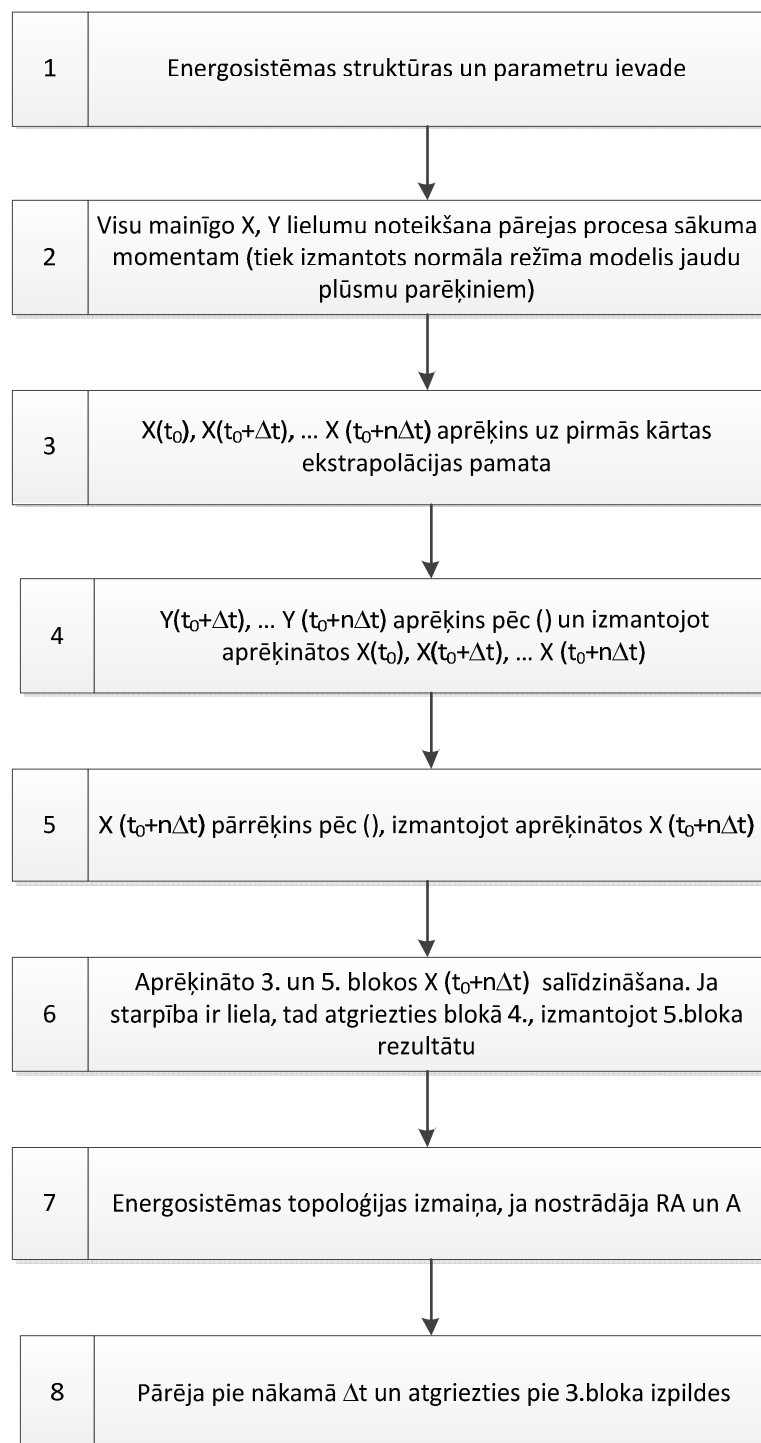
$$\frac{dY}{dt} = f(X, Y, t), \quad (2.1.)$$

$$g(X, Y) = 0, \quad (2.2.)$$

Vektoru Y sastādošos mainīgos (dotā darbā tiek izmantotas energosistēmu turbīnu un ģeneratoru jaudas) sauc par inerciāliem. Vektoru X sastāda ģeneratoru elektriskās jaudas, to iekšējie EDS, ģeneratoru strāvas un spriegumi. Zināms, ka sistēma (2.1.), (2.2.) aizvietojot mainīgos, var pieņemt normālo Koši veidu:

$$\frac{dY}{dt} = f(Y, t). \quad (2.3.)$$

Vienādojuma (2.3.) atrisināšanas sarežģītība lielo energosistēmu gadījumā ir noteikta ar milzīgo mainīgo skaitu (simti tūkstošu). Problēmas sākas uzdodot elementu parametrus un sistēmas topoloģiju. Sistēmas (2.3.) izmēri nosaka arī augstas prasības izmantojamiem diferenciālvienādojumu atrisināšanas algoritmiem. Nosaukto problēmu asuma samazināšanai veltīti daudzi pētījumi un izstrādāti vairāki programmatūru veida instrumenti. Šo instrumentu izmantošana atļauj veikt elektromehānisko procesu aprēķinus ar algoritmu, kura struktūra parādīta 2.3. attēlā.



2.3.att. Elektromehānisko energosistēmas procesu aprēķina algoritms.

Dotā attēlā 2.3. algoritma izmantošanas rezultātā var dabūt strāvu un spriegumu lielumus laika momentos: t_0 , $t_0+\Delta t$, $t_0+n\Delta t$, strāvas un spriegumi tiek aprēķināti komplekso lielumu veidā:

$$U(i\Delta t) = U_A(i\Delta t)\exp(j\theta_U), \quad (2.4.)$$

$$I(i\Delta t) = I_A(i\Delta t)\exp(j\theta_I), \quad (2.5.)$$

kur U_A un I_A – attiecīgie sprieguma un strāvas moduļi,

θ_U un θ_I – attiecīgie sprieguma un strāvas leņķi.

Būtiski atzīmēt, ka parēķinu precizitāte un apjoms tieši atkarīgi no izvēlētiem laika intervāliem Δt un $n\Delta t$. kopējā gadījumā šie laika intervāli var būt mainīti aprēķinu gaitā, atkarībā no aprēķināmo procesu ātruma.

2.5. Energosistēmas darbību simulējošas programmatūras.

Pēdējos 20-it gados bija izstrādātas, pārbaudītas, joprojām tiek attīstītas un ir pieejamas programmatūru tirgū daudzas energosistēmu un to RA un A darbību simulējošas programmas: SIMULINK, EMTP, PSSC, MUSTANG, CAPE, EUROSTAG, u.c.[48,49,50,52].

Visas nosauktās programmas atļauj izveidot sarežģītas energosistēmas modeļus. Piemēram, EUROSTAG dod iespēju izveidot energosistēmu saturoši līdz 10 000 mezglu, tiek aprēķināts apmēram 10 000 parametru izmaiņas process.

Daļa no programmatūras ir piemērota tikai elektromagnētisko procesu aprēķiniem (CAPE, EMTP), otra daļa veic elektromehānisko procesu aprēķinus (MUSTANG). Visjaudīgākās programmatūras piemērotas kā elektromagnētisko, tā arī elektromehānisko procesu aprēķiniem. Daļu no nosauktajām programmatūrām ir piemērotas RA un A iekārtu darbības modelēšanai. Programmatūra CAPE satur visu pasaules vadošo kompāniju ražojamo RA un A iekārtu modeļus. Vienlaicīgi šī programma neatļauj ievest pilnīgi jaunu RA iekārtu modeļus.

No RA un A iekārtu modelēšanas viedokļa, izstrādes stadijā ar īpaši plašām iespējām, atšķiras EUROSTAG programmatūra, kurā ir paredzētas papildus specializēto programmēšanas valodu (Python, Matlab) izmantošana tieši RA un A modeļu izveidošanai pēc lietotāja vēlmēm. Var apgalvot, ka EUROSTAG ir tuva ideālai RA un A metožu un algoritmu pārbaudei. Vienlaicīgi, jāatzīmē, ka ar šo programmu izrēķinātie procesi tiek pasniegti formā, kura neatļauj veikt tiešo ciparu-analogo pārveidošanu, lai nodrošinātu aparāta pārbaudes iespējas. Minētais attiecas uz visām augstāk nosauktām programmatūrām.

Eksistē arī programmatūras, kuras izdod aprēķinātos energosistēmu procesu formā, piemērotā ciparu-analogam pārveidojumam (SIMULINK). Šajā gadījumā, izmantojot pastiprinātājus var nodrošināt aparātu pārbaudi. Diemžēl tāda veida programmatūras nedod iespēju veidot sintezējam RA un A ciparu modeļus, to pārbaudes nolūkos.

2.6. Pārbaude un pārbaudžu skaita noteikšana.

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

$$R=R(x_1, \dots, x_n, l_1, \dots, l_k, s_1, \dots, s_e), \quad (2.6)$$

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

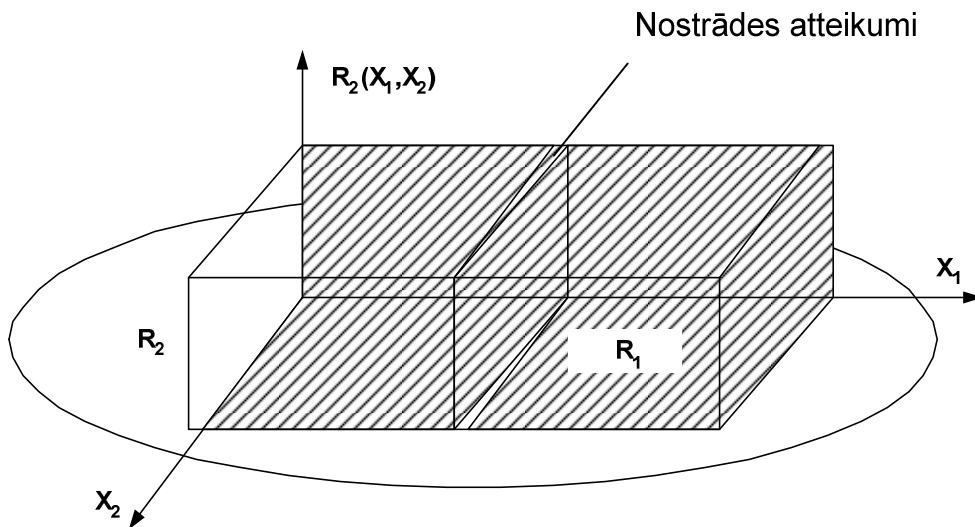
n – kontrolējamo analogo signālu skaits $\underline{X}$ (vienkāršākajā gadījumā vienāds ar summāro strāvas un spriegumu vektoru moduli, un leņķu skaitu);

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 2.4.attēlā:

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



2.4.att. Piemērs divdimensionālai reakcijas funkcijai.

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

Ievedīsim arī ideālā termināla definīciju, pieņemot, ka tādā terminālam atbilst funkcija R , kuru var aprakstīt:

$$R=1, \text{ ja un vienīgi, ja } [\underline{x}, \underline{l}, \underline{s}] \in R_1, \quad (2.7)$$

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

Kontrolējamo analoģo 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.). Tādejādi 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 (2.6.) un (2.7.) izteiksmes un zinot sadales funkcijas F_1 un F_2 , varam definēt ideāla termināla nostrādes un nenostādes varbūtības:

$$P_1 = \iint_{R_1} dF_1(\underline{x}, \underline{l}, \underline{s}) = 1, \quad (2.8)$$

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

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

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

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

$$\begin{aligned} P_1 &\leq 1, \\ P_2 &\geq 0. \end{aligned} \tag{2.9}$$

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 (2.8) izteiksmei, varbūtības P_1 un P_2 var noteikt izmantojot Stieljes-Lebesga (*Stieljes-Lebesgue*) [39] integrāli. Izteiksmes (2.8) integrāli var būt aprēķināti, izmantojot divas pieejas:

1. Klasiskā jeb regulārā metode[38], 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 pārbažu 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:

$$\Delta_1 \approx N^{-2/\gamma}, \tag{2.10.}$$

Monte-Karlo metodes kļūdu var noteikt pēc izteiksmes:

$$\Delta_2 \approx \frac{1}{\sqrt{N}}, \tag{2.11.}$$

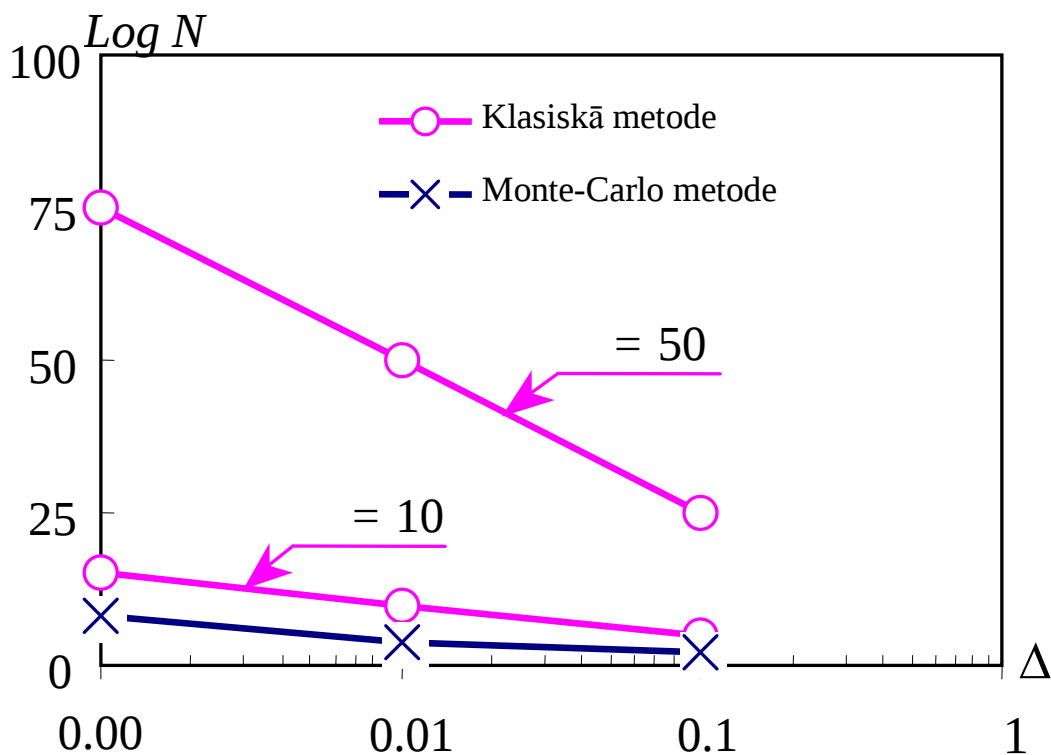
kur N – integrējamo intervālu skaits klasiskajā metodē vai mēģinājumu skaits, izmantojot Monte-Karlo metodi, $\gamma = n + e$, pieņemot, ka loģisko signālu ietekmi k neņemam vērā.

Gadījumā, ja $\underline{x}$ un $\underline{s}$ parametri pārbažu 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 pārbaudi veiktu ar pietiekamu precizitāti nepieciešams risināt augstāk minētos integrālvienādojumus ar pieņemami augstu precizitāti, iegūstot:

$$\Delta_1 \leq \Theta, \quad (2.12.)$$

$$\Delta_2 \leq \Theta,$$

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



2.5.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:

$$P_A = 1 - \exp(-t / T_{\text{aver}}), \quad (2.13.)$$

iegūstam

$$P_A = 1 - \exp(-t / 25) = 0.04, \quad (2.14.)$$

Tā kā nepieciešamā precizitāte nosakāma kā $\Theta \leq P_A$, tad iespējams vienkārši noteikt nepieciešamo pārbažu skaitu pēc 2.5.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.

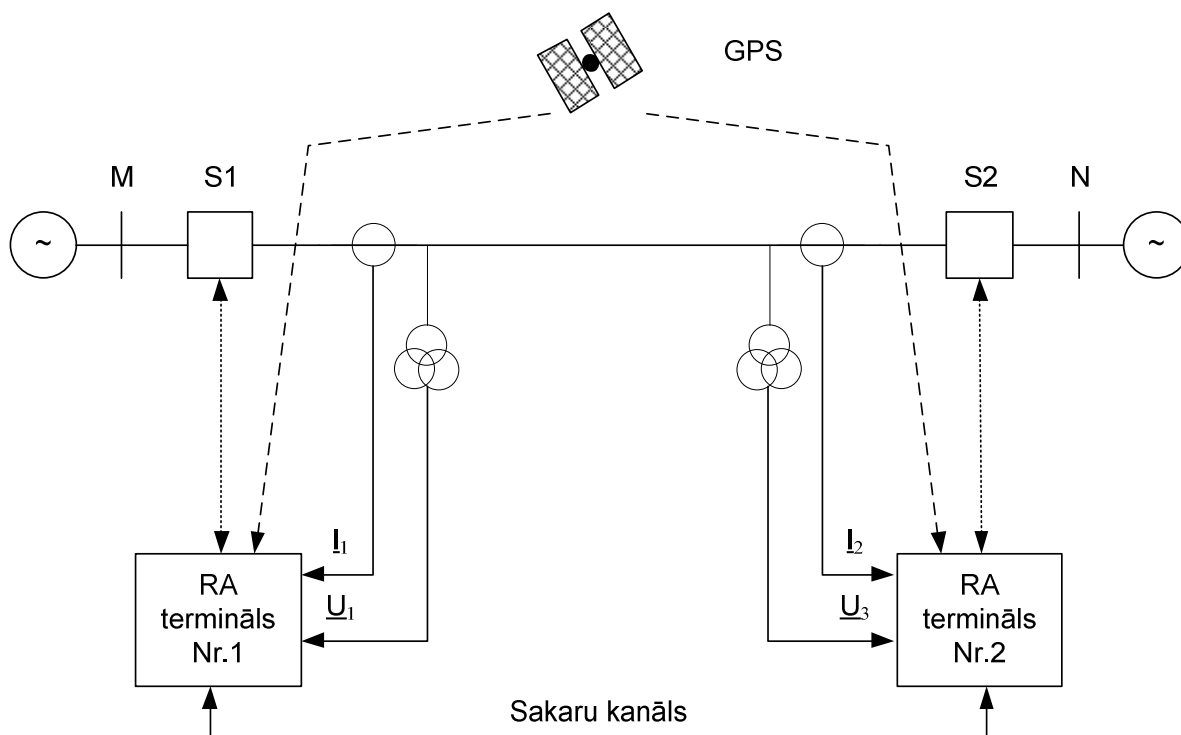
Ņemot vērā reāli pielietojamo sprieguma un strāvas ieeju, izmantojamo loģisko signālu un iestatījumu skaitu Monte-Karlo metodes pieeja ir vienīgā reāli izmantojamā, jo modernai releju aizsardzības un automātikas iekārtai γ var būt lielāks par tūkstoši. Līdz ar to klasiskā metode šādu iekārt pārbaudei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

2.7. 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 2.6. attēlā un realizē līnijas diferenciālo un distantaizsardzību kopā.



2.6.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[41]. LIDA 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 automātikas darbību katrai no četrām iestatījumu grupām, skaitāms simtos. Tādējādi koeficients γ (2.6.) sasniedz dažu simtu vērtību, un šādā gadījuma mēģinājumu (pārbaužu) skaits pēc izteiksmes (2.9.) kļūst lielāks par decimālu ciparu, ar simtu nullēm. Šādu pārbaužu skaitu ar tradicionālām metodēm praktiski

(laika ziņā un ekonomiski) veikt nav iespējams un virtuālo pārbažu metode pēc Monte-Karlo principa ir vienīgais pamatotais risinājums.

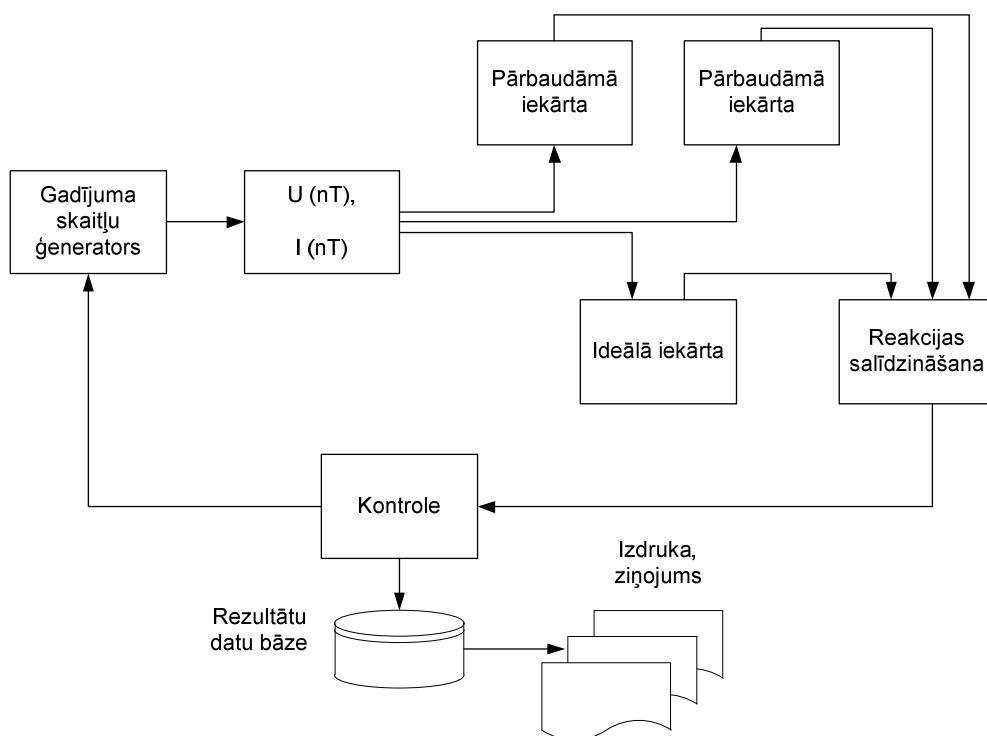
Ir iespējamas divas pieejas pārbažu veikšanai:

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

2.7.1. Testēšana signālu parametru un iestatījumu telpā.

Pārbaudes procedūra parādīta 2.7.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:

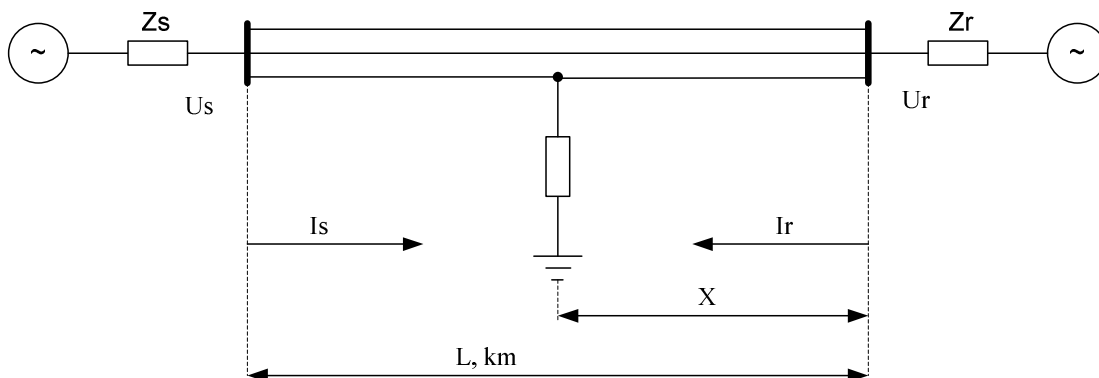
- iespējama lieku parametru kombināciju padošana, kuras neradīsies reālā energosistēmā, kā piemēru var minēt lielu īsslēgumu strāvu ģenerāciju vienlaicīgi ar spriegumu, kurš vienāds ar nominālo vai lielāku.
- sarežģīta ideālas iekārtas atbildes reakciju definēšana;
- sarežģītas neregulāras formas signālu padošana (signāli, kuri papildus pamatharmonikai ietver citas harmonikas vai eksponenciālas komponentes).



2.7. att. Termināla pārbaude padodot signālu parametru telpā.

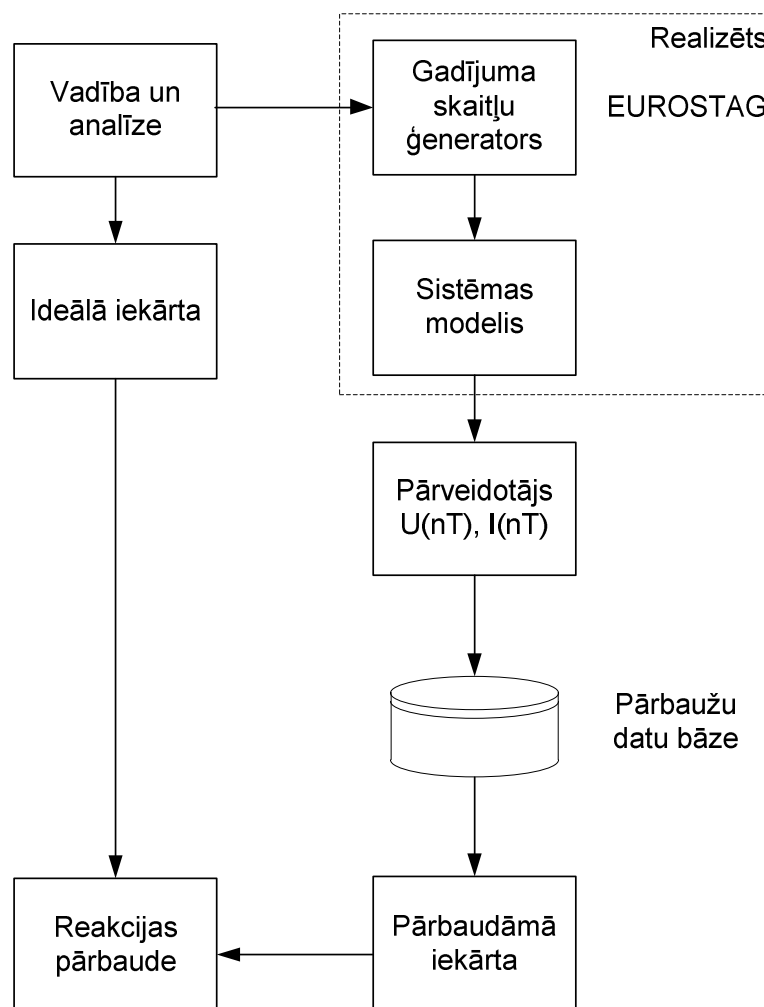
2.7.2. Testēšana energosistēmas parametru telpā.

Izskatīsim stipri vienkāršotu elektriskā tīkla shēmu, kas parādīta 2.8.attēlā.



2.8.att. Aizsargājamā objekta modelis.

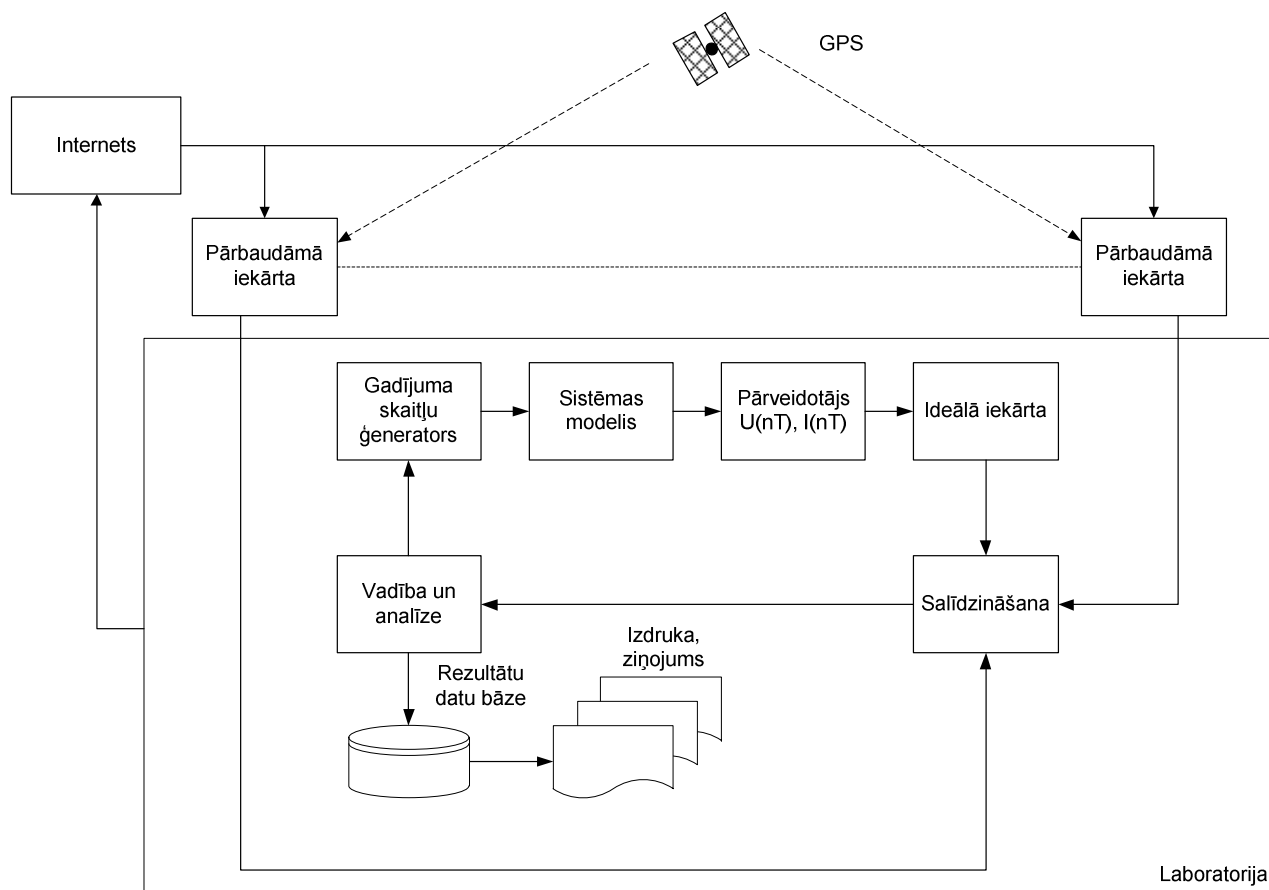
Pieņemsim, ka elektropārvades līnijā, kuru aizsargā pārbaudāmā iekārta, attālumā l_F caur bojājuma pārejas pretestību R_F ir īsslēgums. Sistēmu Z_s , Z_r un līnijas parametri ir mainīgi. Tā pat kā reālā dzīvē, attālums līdz bojājuma vietai, īsslēguma veids, pārejas pretestība bojājuma vietā ir gadījuma lielumi. Šādus energosistēmas apstākļus ir viegli modelēt. Veidojot gadījuma skaitļu ģeneratoru, var izmantot energosistēmas darbības statistikas datus par pirmsavārijas režīmu parametriem, īsslēgumu attālumiem un veidiem. Pārbaudes procesūra parādīta 2.9.attēlā.



2.9.att. Pārbaudes sistēmas struktūra.

2.7.3. Pārbaudes ekspluatācijas gaitā.

Ekspluatācijas gaitā parādās nepieciešamība veikt pārbaudes ar sarežģītu pārejas procesu ģenerāciju. Sarežģītu pārbažu veikšanai būtu nepieciešams iekārtu demontēt un pēc tam uzstādīt atpakaļ, jo pārvietojamo pārbaudes iekārtu iespējas ir ierobežotas. Tas nav pieļaujams, jo tādā gadījumā jāatslēdz arī aizsargājamais objekts, augstsprieguma transformators vai elektropārvades līnija. Tādejādi ir pamatoti izstrādāt sistēmu, kas ļautu veikt šādas pārbaudes iekārtas uzstādīšanas vietā. Izstrādājot šādu sistēmu elektropārvades līnijai, jāņem vērā, ka aizsardzības atrodas ģeogrāfiski attālinātās vietās.



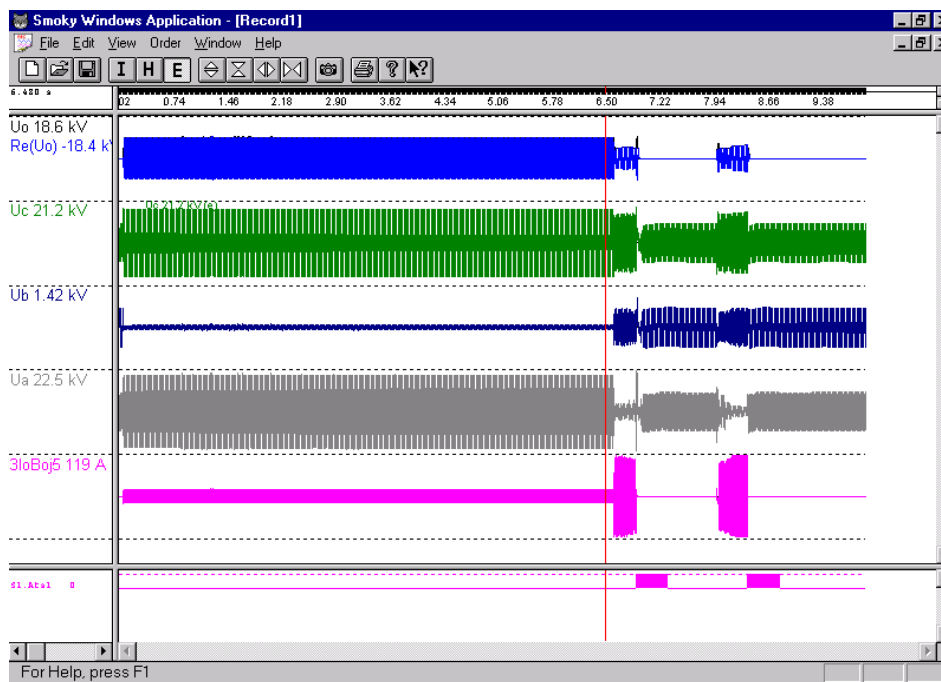
2.10.att. Pārbaudes struktūra ekspluatācijas apstākļos.

sekmīgai pārbaudes veikšanai, nepieciešama iekārtu sinhronizācija un centralizēta uzraudzība, kā komunikācijas kanālu var izmantot aizsardzības vajadzībām pielietoto. Šāda pārbaudes struktūra parādīta 2.10.attēlā. Apskatāmā struktūrā iekļauts GPS un Internets, kas dod iespēju izmantot attālinātu no apakšstacijām laboratoriju ar jaudīgu un labi aprīkotu datoru.

2.8. Virtuālās laboratorijas programmu pakete.

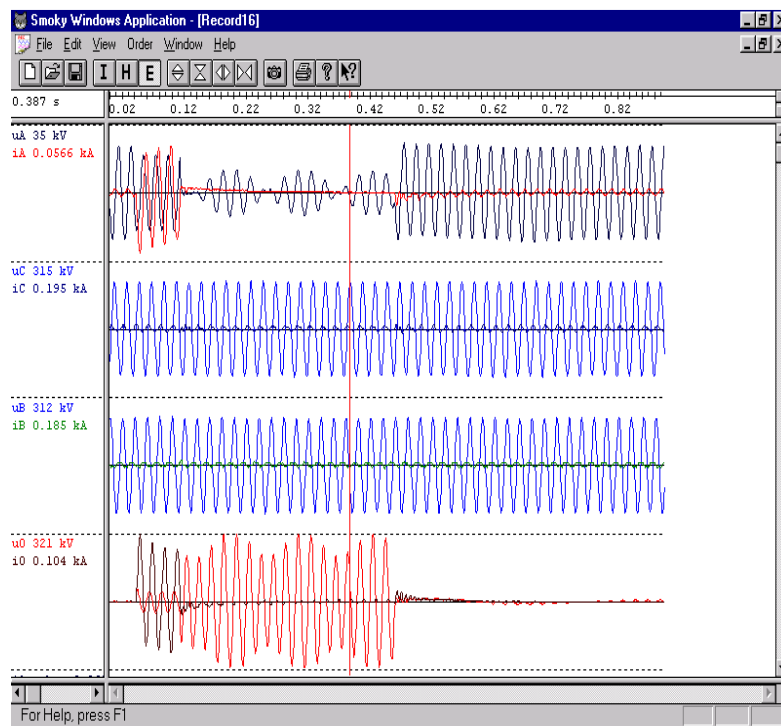
Virtuālās laboratorijas programmu pakete bāzējas uz Rīgas Tehniskajā universitātē izstrādāto ciparu oscilogrammu attēlošanas un apstrādes programmu kompleksu, kas veidots ar dotā darba autoru līdzdalību. Šī kompleksa izvēli galvenokārt nosaka tas, ka Baltijas valstu energoobjektu lielākajā daļā uzstādīti REMI tipa reģistratori, kuru oscilogrammas apstrādā programmas. Tā rezultātā uzkrājusies visai plaša dažādu procesu bibliotēka, ko var izmantot testa signālu sintēzē. Lai nodrošinātu iespēju izmantot citu tipu ierīču COMTRADE standartā reģistrētās oscilogrammas, papildus uzstādīts translators no COMTRADE formāta, kā arī

nodrošināta jau iepriekš minēto izgriešanas un salīmēšanas funkciju izpilde. Vairāku dažādos laika intervālos fiksētu oscilogrammu sintēzes piemērs parādīts 2.11. attēlā. Testa process atbilst vienfāzīga īsslēguma pārejai divfāžu īsslēgumā uz zemi un neseismīgās automātiskās atkārtotās ieslēgšanās pārejai divkāršā īsslēgumā uz zemi.



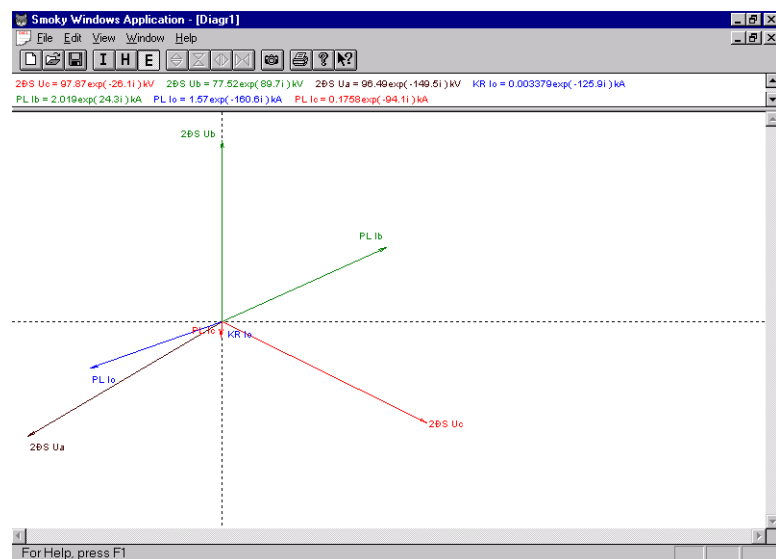
2.11.att. Dažādos laika intervālos fiksētu oscilogrammu sintēzes piemērs

Signālu izmaiņai reālā laikā, radīts speciāls interfeiss. Tas ļauj uzdot signālus (harmonikas) sarežģītu laika funkciju veidā. Pie tam nav nepieciešama programmēšanas valodu izmantošana. Rodas plašas iespējas uzdot procesus vienu otram sekojošajos laika intervālos. Tā 2.12. attēlā dots testa procesa ieraksts, kurš ilustrē sarežģītu testa procesu radīšanas iespēju.

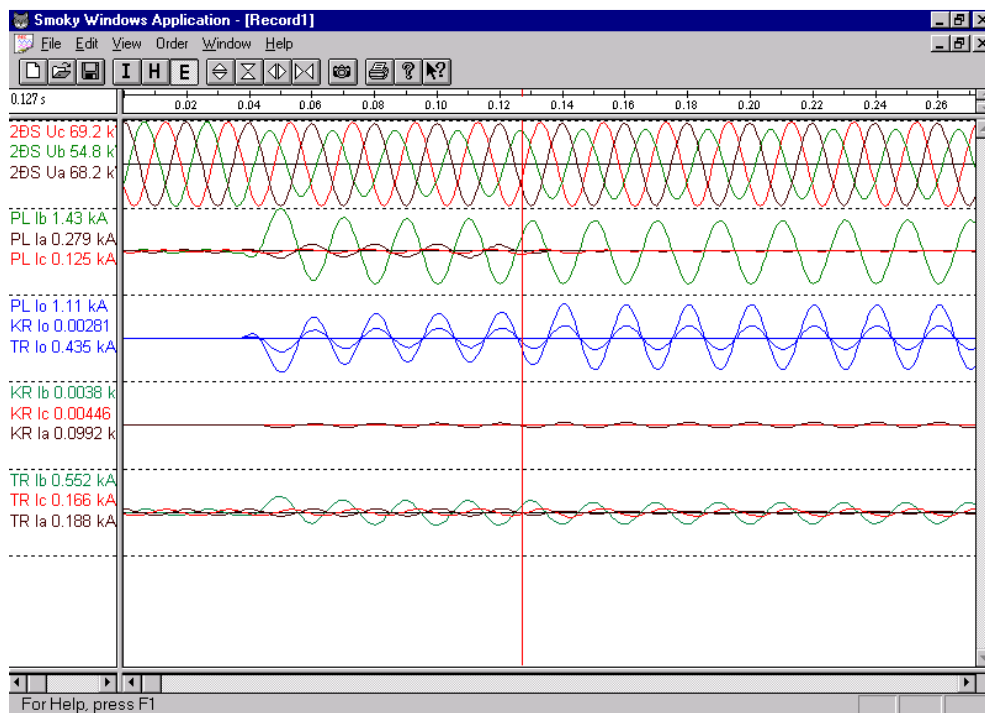


2.12. att. Sarežģīta testa procesa piemērs

Dažādu energosistēmu modeļu izmantošanai (šos modeļus aprakstošās programmas), radīts interfeiss, kas atļauj modeļos iegūstamos kompleksos elektriskos lielumus pārveidot oscilogrammu formātā. Attiecīgi 2.13. attēlā parādīta ar energosistēmas modeļa palīdzību iegūtā strāvu un spriegumu vektoru diagramma vienfāzes īsslēguma gadījumā, bet 2.14. attēlā tās pašas strāvas un spriegumi pēc translācijas oscilogrammas formā.



2.13.att. Vektoru diagramma vienfāzes īsslēguma gadījumā



2.14. att. Vienfāzes īsslēguma strāvas un spriegumi

Periodisku atkārtotu pārbaužu (testu) veikšanai nepieciešams radīt datu bāzi, kas noteiktu testu secību un pārbaudāmās ierīces paraugreakciju uz šiem testiem.

2.9. Secinājumi.

1. Releju aizsardzības un automātikas iekārtu pārbaudi var iedalīt sekojošās daļās:
 - ✓ ieejas ķēžu (ieejas transformatoru, filtru un analogi/diskrēto pārveidotāju) pārbaude. Šādas ierīces var pārbaudīt ar samērā vienkāršiem pārbaudes rīkiem;
 - ✓ metodes algoritmu, programmatūras un aparatūras pārbaude, izmantojot tikai digitālos signālus.
2. Jaunais RA un A pārbaudes princips nodrošina izmaksu ietaupījumu un paaugstina pārbaudes ticamības līmeni.
3. Virtuālā pārbaudes metode dod iespēju ģenerēt testēšanas procesus tieši releju aizsardzības iekārtas procesoram. Šāds pārbaudes komplekss ir lētāks par klasisko, kuru sadārdzina jaudīgie un precīzie pastiprinātāji.
4. Virtuālās pārbaudes metodes realizēšanai nepieciešams pārbaudes iekārtās uzstādīt papildus atmiņas iekārtas, kuras saņemtu un saglabātu atmiņā pārbaudes ciklus, nepieciešama arī papildus programmatūra, kura ir viegli un lēti realizējama.

5. Virtuālās testēšanas realizācijā var izmantot tirgū piedāvāto programmatūru energosistēmu procesu simulācijai. Šo programmu izmantošanai, ir nepieciešami papildus rīki, kas nodrošina procesu ierakstu, izmantojamam mikroprocesoram saprotamā veidā.
6. Monte-Karlo metode ir piemērota sarežģītu pārbažu veikšanai.
7. Testēšanas veikšanai var izmantot avārijas procesu ierakstus, kas ir uzkrāti iekārtu bibliotēkā.

3. Daudzfunkcionālā elektropārvades līniju relejaizsardzības termināla sintēze.

Daudzfunkcionāls releju aizsardzības termināls. Elektropārvades līnijas garendiferenciālā un Distantaizsardzība. Bojājuma vietas noteikšana, izmantojot mērījumus no vairākiem EPL galiem. Garendiferenciālā aizsardzības datu sinhronizācija ar GPS palīdzību. Datu pārraide, izmantojot optisko šķiedru vai publiskos sakaru kanālus. Reālu īsslēgumu analīze.

3.1. Ievads.

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.

Mikroprocesoru tehnika atļauj realizēt daudzus jaunus risinājumus releju aizsardzībā un automātikās. Aizsardzību kompleksi uz mikroprocesoru bāzes atšķiras no to priekšgājējiem ar šādām svarīgām no iekārtu pārbaudes viedokļa iespējām un funkcijām:

- iespēju pierakstīt un atspoguļot kontrolējamos procesus;
- paškontroles funkcijām, iespēju fiksēt elementu atteikumus un paziņot par atteici personālam;
- iespēju vienā terminālā apvienot vairākas aizsardzības un automātikas funkcijas;
- plašām iespējām pielietot mūsdienīgus sakaru līdzekļus.

Dotā nodaļā veltīta RA un A terminālam, kurš ir spējīgs realizēt vairākus augstsprieguma elektropārvades līniju RA un A algoritmus. Izgatavoti, pārbaudīti laboratorijā un uzstādīti AS „Latvenergo” objektos vairāki termināli. Nodaļas beigās dota 110kV elektropārvades tīklā notikušo īsslēgumu un terminālu darbības analīze.

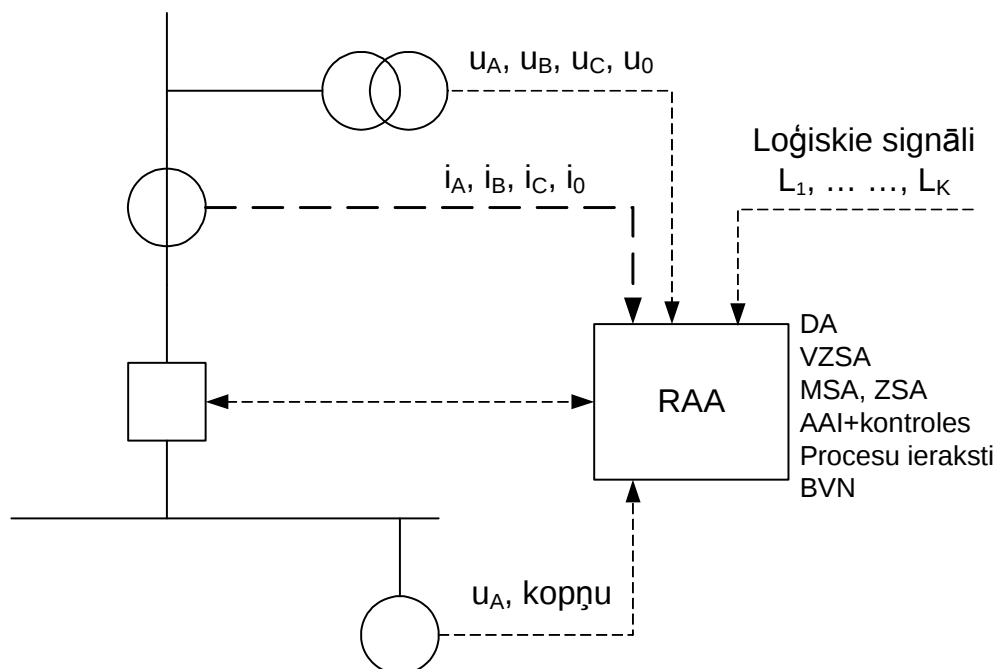
3.2. Augstsprieguma līniju releju aizsardzības un automātikas principi.

Augstsprieguma maiņstrāvas līniju (110kV ÷ 800kV) aizsardzībās pielieto šādus aizsardzības un automātikas veidus:

1. Diferenciālā aizsardzība;

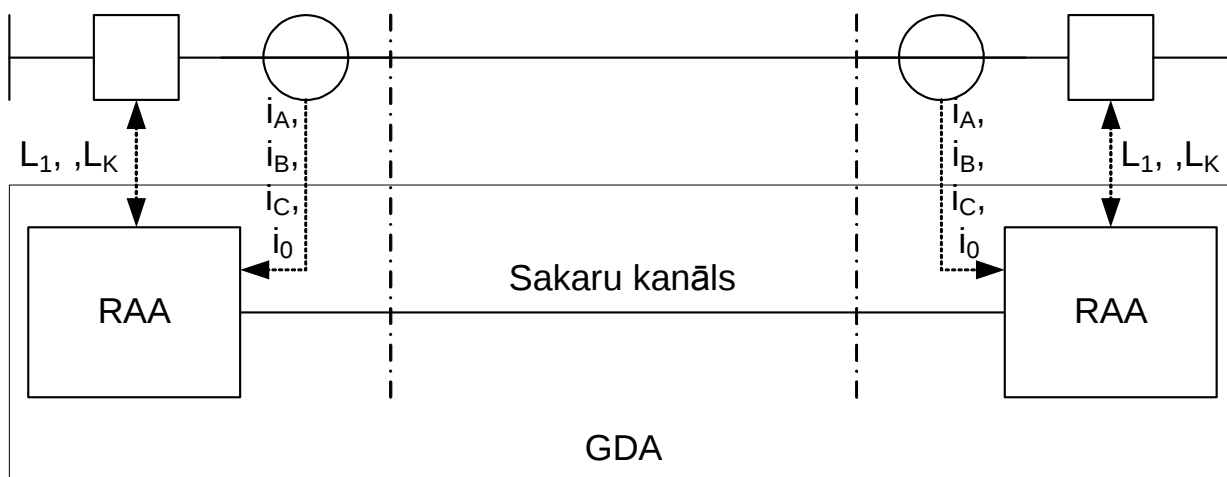
2. Distantaizsardzību (DA) pret visu veidu bojājumiem (A-0; B-0; C-0; AB0, BC0, CA0, AB; BC; CA; ABC) vienkāršota shēma parādīta 3.1.attēlā. Aizsardzību izpilda ar rezervēšanas funkciju;
3. Virzīto zemesslēguma aizsardzību (VZSA);
4. Maksimālstrāvas aizsardzību (MSA)
5. Automātiskā atkārtotā ieslēgšana ar sinhronisma kontroli;
6. Kontrolējamo procesu oscilografēšanu;
7. Bojājuma vietas un veida noteikšanu.

Aizsardzībām pielieto paātrināšanas principus, lai atslēgtu bojāto elementu jaudas slēdža ieslēgšanas uz īsslēgumu brīdī. Aizsardzību realizācijas struktūrshēma parādīta attēlā 3.1.



3.1.att. Līnijas aizsardzības princips, izmantojot viena līnijas gala mērījumus.

Līnijas diferenciālās aizsardzība, kuras vienkāršota shēma parādīts 3.2.attēlā ir ātrdarbīga un selektīva visa aizsargājamā objekta garumā. Aizsardzība sastāv no diviem puskomplektiem, kas savienoti ar sakaru kanālu.



3.2.att. Līnijas aizsardzības princips, izmantojot līnijas mērījumus no abiem līnijas galiem.

Nosauktie RA un A veidi parasti tiek realizēti divos vai vairāk terminālos. Visplašāk pielietojamos terminālos tiek atdalītas distantaizsardzības un diferenciālās aizsardzības (tiek realizētas dažādos terminālos). Tāds atdalījums var būt skaidrots divējādi:

3. Saglabājot tradicionālo dalījumu, kurš tika pielietots elektromehāniskām sistēmām.
4. Rezervējot katra no aizsardzības veida darbību.

Izmantojot mūsdienīgas mikroprocesoru tehnikas iespējas, tika izstrādāts uzdevums izveidot aizsardzības terminālu, kurš spējīgs ietvert sevī visus augstākminētos aizsardzības un automātikas principus. Papildus augstākminētajām funkcijām, aizsardzības terminālā var būt realizēts bojājuma vietas notikšanas algoritms, kurš izmanto mērījumus no abiem līnijas galiem.

Dotai uzdevuma nostādnei piemīt neapšaubāma priekšrocība – izmantojot divus šādus terminālus var vienā līnijas galā nodrošināt to pilnu, visu izpildāmo funkciju rezervēšanu. Jāatzīmē, ka izvēlētajā nostādne izsauc:

1. Sadārdzinājumu. Taču, kā rāda mikroprocesoru elementu parametru (operāciju izpildes ātrumi, atmiņas apjoms) un cenu analīze, realizējot visu aizsardzību funkcijas vienā terminālā sadārdzinājums var sasniegt tikai dažus procentus;
2. Iestatījumu un ieeju skaita palielināšanu, kas izsauc papildus prasības pārbaudēm. Lai noņemtu papildus prasību negatīvo ietekmi tiek veidota speciāla termināla aparatūras un programmatūras struktūra, pielāgojot to virtuālām un pašpārbaudēm.

Diferenciālās aizsardzības realizācija terminālā nosaka nepieciešamību izmantot vienādas iekārtas abos aizsardzības līnijas galos. Šajā gadījumā katru no termināliem sauc par puskomplektu.

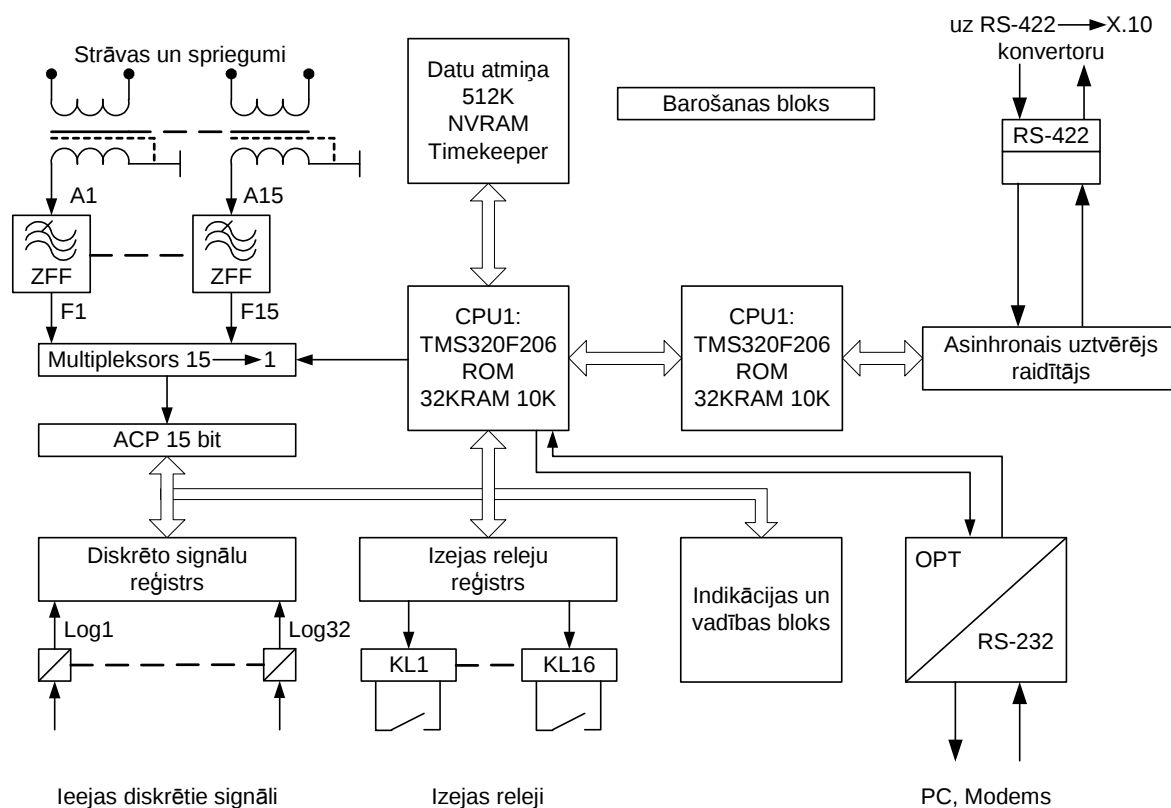
3.3. Termināla aparātizpildījums.

Pamatojot terminālu struktūru un izvēloties mikroprocesoru elementus jāņem vērā sekojoši galvenie faktori:

1. Kontrolējamo analogo (strāvas un spriegumi) un loģisko signālu skaits;
2. Izejas releju skaits;
3. Nepieciešamais atmiņas apjoms (programmu un datu glabāšanai);
4. Interfeisu veidi;
5. Analogu-ciparu pārveidošanas precizitāte un frekvence;
6. Datu apstrādes apjomi un nepieciešamais ātrums.

Pie tam, paredzot maksimālus, sastopamus izskatāmos uzdevumos ieeju- izeju skaitus, atmiņas apjomus un procesora jaudu var izvestot vienotu, derīgu visos gadījumos struktūru. Tādas struktūras vienkāršota shēma dota attēlā 3.3. Struktūras pamatā divi 16 bitu signālprocesori TMS 320F206 [41]. Procesori aprīkoti ar iebūvētiem virknes interfeisiem, kas nodrošina vieglu informācijas apmaiņu un , attiecīgi, uzdevumu izpildes sadali starp viņiem. Svarīgi, ka procesori aprīkoti ar 64 K baits apjoma iekšēju programmu atmiņu, kas nodrošina sarežģīto RA un A kompleksu programmu ierakstu. Paredzētas 15 analogās ieejas (tāds ieeju skaits raksturīgs trīs tinumu transformatoru aizsardzību kompleksiem). Ieeju analogu- ciparu pārveidošanai izmantots 15 kārtu AC-pārveidotājs AD 7863, kas nodrošina nepieciešamu precizitāti visā strāvu un spriegumu dinamiskā diapazonā. AC pārveidotājs ir spējīgs pārveidot spriegumus līdz 10 V, bet pat pārveidojot 1 V spriegumu tiek sasniegta 0,5 % precizitāte. Izejot no līniju aizsardzību un slēdžu vadības uzdevumu analīzes rezultātiem paredzēti 16 izejas releji un 32 ieejas loģiskie signāli. Sakariem ar ārējām iekārtām paredzēti divi interfeisi: RS 232 nodrošina sakarus ar ārējo personālo datoru vai modemu, bet RS 422 paredzēts datu apmaiņai caur optiskiem šķiedru kanāliem, kas var būt izmantots realizējot, pirmkārt, līniju garendiferenciālās aizsardzības. Operatīvu datu glabāšana notiek 1024 K baits apjoma atmiņā ar iebūvēto akumulatoru, kurš nodrošina informācijas saglabāšanu pat ilgstošu operatīvas barošanas avota bojājumu gadījumos. Izmantojamas atmiņas apjoms nodrošina dažu minušu garuma avārijas procesu ierakstu glabāšanu. Informācijas atspoguļošanai izmantots šķidrkrystalīgais 4 rindu indikators, kurš atļauj ģenerēt īsus paziņojumus un

paskaidrojumus, vadības pults sastāv tikai no četrām pogām un atļauj iestatījumu ierakstu un caurskati gadījumos, kad netiek izmantots ārējais dators.



3.3.att. RA termināla struktūra.

Indikācijas un vadības bloks nodrošina informācijas apmaiņu ar ārējo datoru. Izmantojot šo iespēju, var realizēt termināla virtuālās pārbaudes. Divu procesoru esamība un paredzētās iespējas informācijas apmaiņai viegli izmantojamas pašpārbaudes realizācijai. Tiešam, lai izveidotu pašpārbaudes procedūru pietiek katram procesoram uzdot uzdevumu pastāvīgas atmiņas reģistru kontrolsummas aprēķināšanai, tās salīdzināšanu ar „a priori” zināmu un rezultātu paziņošanu otram procesoram. Acīmredzams, ka, ja viens no procesoriem tiek bojāts, kļūdas aprēķinos vai nav spējīgs sazināties ar otru procesoru, tad veselais procesors spēs dot signālu par bojājumu. Lai ģenerētu trauksmi abu procesoru bojājuma gadījumā termināla struktūrā paredzēta izpildoša „sarga suns” (watch dog) funkciju mikroshēma.

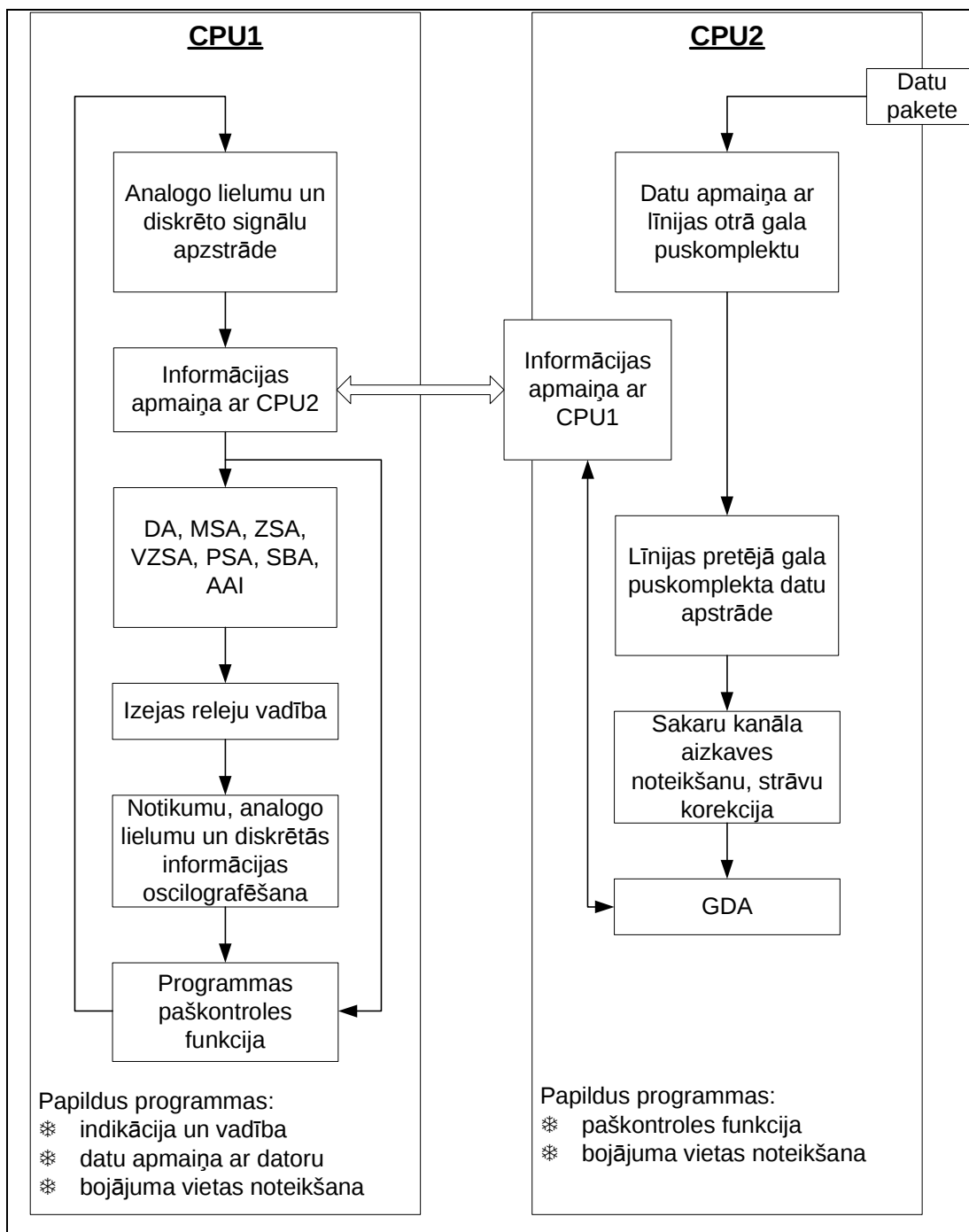
3.4. Releju aizsardzības un automātikas termināla funkcijas un programmatūras struktūra.

Tā kā elektropārvades līniju (EPL) RA un A termināla realizācijā izmantots divprocesoru risinājums. Parādās uzdevums programmu sadalei starp procesoriem. Izvēlēta programmu nodrošinājuma struktūra dota 3.4. 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 [40];
- notikumu reģistrācija;
- attāluma līdz bojājuma vietai noteikšana;
- indikāciju displeja vadība;
- iestatījumu ievades bloka vadība;
- oscilogrammu un iestatījumu nolasīšanas/ievades RS-232 interfeisa vadība.



3.4.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[76,77]. 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 [78,79] 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) apmaiņu 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:

- fāzu 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:

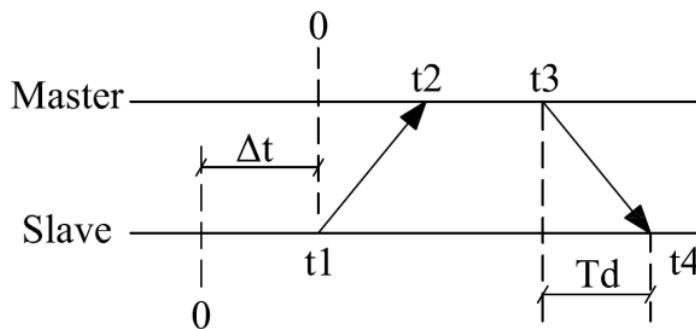
1. Sakaru kanāla iespēju izmantošana sūtot signālu uz pretējo līnijas galu un saņemot atbildi, acīmredzami var aprēķināt laiku (aizturi), nepieciešamu signāla pārraidei „turp un atpakaļ”;

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.

Sintezētam terminālam paredzētas abas mērījumu sinhronizācijas iespējas. GPS izmantošanu saucim par ārējo sinhronizāciju. Ņemot vērā GPS sistēmu sarežģītību nepieciešams ņemt vērā to atteicies 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.

Pārraides laika mērīšana notiek salīdzinot vietējo raidīto un saņemto ziņojumu laikus starp diviem termināliem (starp *master* un *slave*). Šo metodi sauc par ping-ponga [80,81,82]metodi. Ziņojumi tiek sūtīti pēc katrām 5ms. Ziņojumu marķēšanai pielietotie pulksteņi nav saistīti ar reālā laika pulksteņiem, kurus izmanto notikumu reģistrēšanai. Šo pulksteņu pamatā ir no 0 līdz 39999 mikrosekundes iekšējie pulksteņi, kam ir 1μs sadalīšana, un tos kontrolē ar takts ģeneratoru no CPU. Maksimālais pārraides laiks, pie kura var strādāt diferenciāla aizsardzība ir 10ms. Ja pārraides laiks būs lielāks, tad diferenciālās aizsardzības funkcija būs bloķēta un parādīsies signāls “Sakaru pārtraukšana”. 3.5.attēlā parādīts, kā ziņojums tiek sūtīts no *slave* uz *master* terminālu un otrādi. Ziņojums no *slave* termināla tiek atsūtīts laikā t_1 . Šis laiks tiek saglabāts *slave* termināla atmiņā. *Master* termināls šo ziņojumu saņems laikā t_2 . *Master* termināls saglāba šo laiku t_2 un laikā momentā t_3 to atsūta *slave* terminālam. *Slave* termināls to saņems laikā t_4 un pierakstīs savā atmiņā. Tad ievērojot laika starpību Δt starp abu terminālu pulksteņiem, un pieņemot, ka ziņojuma pārraidei uz otru terminālu ir nepieciešams laiks T_d , iegūsim:



$$t_2 = t_1 + T_d - \Delta t$$

$$t_4 = t_3 + T_d + \Delta t$$

3.5.att. Pārtraides laika aiztures paskaidrojums.

Kad *slave* termināls saņem informāciju laikā t_3 , tas aprēķina signāla pārtraides laiku T_d , pieņemot, ka pārtraides ātrums abos virzienos ir vienāds ar:

$$T_d = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2}. \quad (3.1)$$

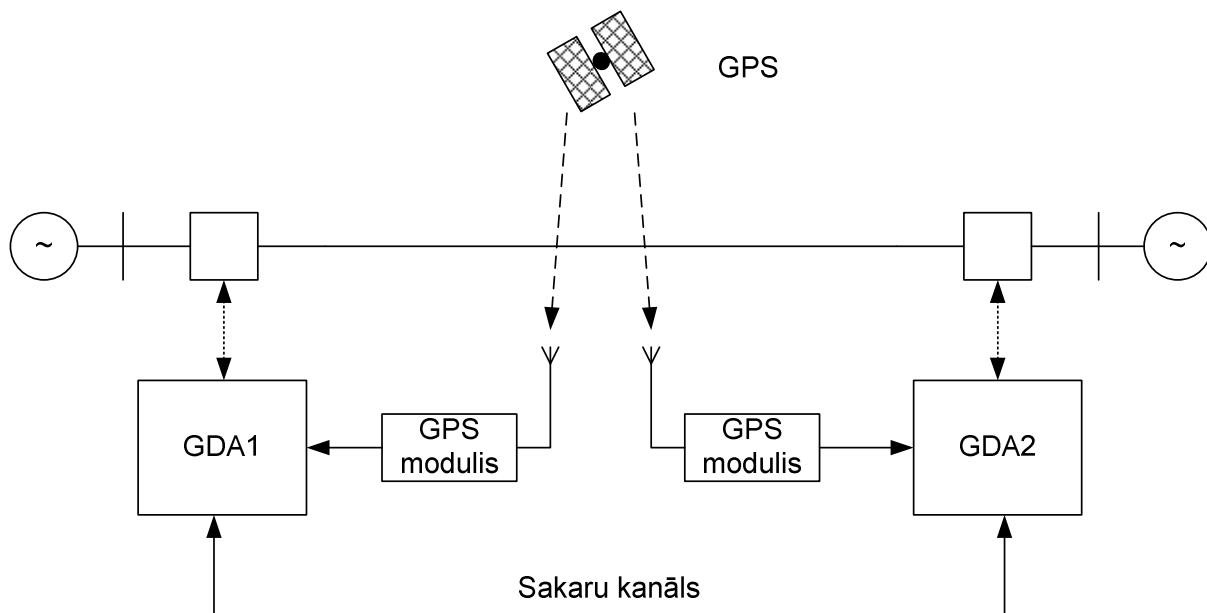
Dati par četrām informācijas paketēm, ļauj noteikt divus nezināmos - pilno pārtraides laiku un Δt starp abu terminālu pulksteņiem. Ja starpība būtu zināma, tad būtu iespējams aprēķināt pārtraides laiku katrā virzienā. Redzams, ka jebkura starpība starp pulksteņiem *slave* un *master* terminālos, neietekmēs laika T_d aprēķinu, jo laiki abās iekārtās ir tikai lokālie laiki.

3.4.1. Nevienāda pārtraides 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 pārtraidāmās 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, kuri nosaka ar aizsardzības nostrādes raksturlīkni. Ja pārtraides laiks 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. Garendiferenciālās aizsardzības, izmantojot GPS sinhronizāciju, principiālā shēma parādīta 3.6.attēlā.

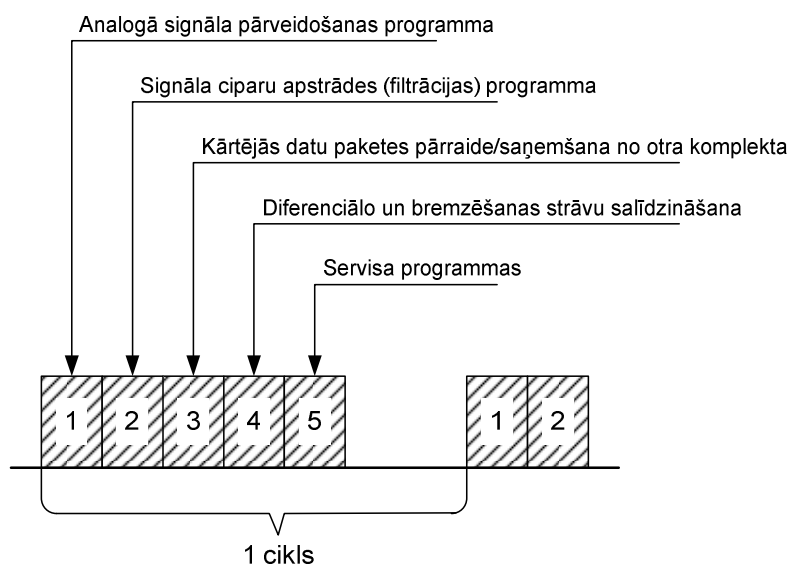


3.6.att.GDA izmantojot GPS sinhronizāciju

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.

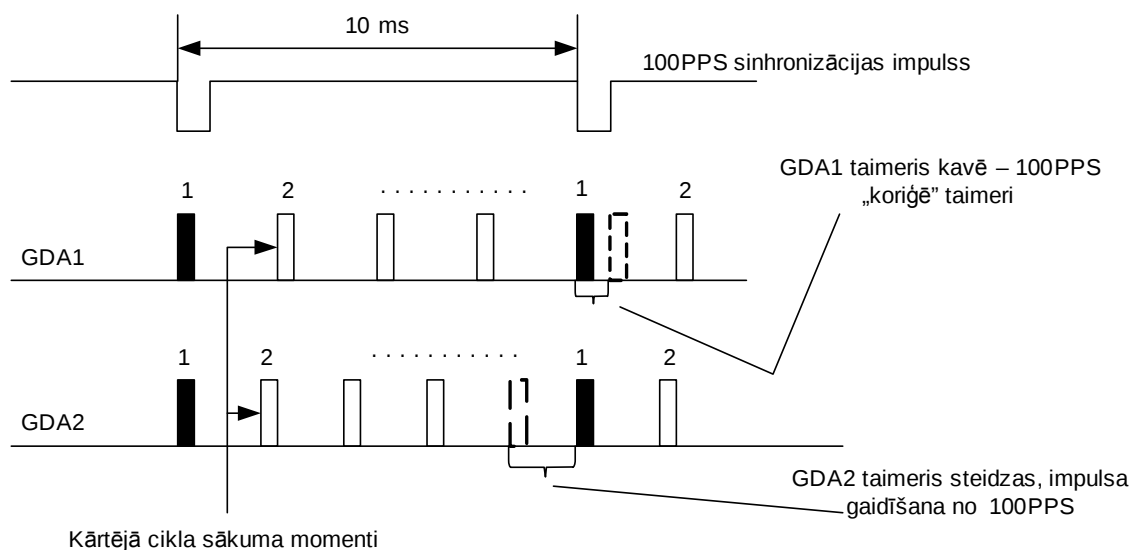
3.4.2. GDA terminālu darbība ar GPS-sinhronizāciju

Izstrādājot programmnodrošinājumu jāparedz abu puskomplektu sinhronizāciju gan GPS režīmā, gan sinhronizācijas signāla neesamības režīmā. Tipiskā analoga signāla apstrādes programma ir cikliski atkārtojamo programmu bloku virkne, kāda parādīta 3.7.attēlā.



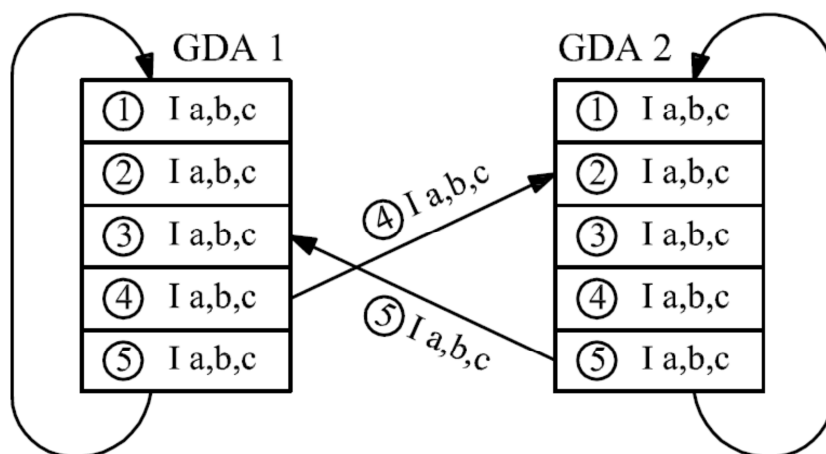
3.7.att.GDA puskomplektu blokshēmas algoritms

Programmu bloku izpildīšanas cikliskums parasti tiek uzdots un noteikts ar centrālo procesoru. Tādā veidā abu komplektu sinhronizācijas uzdevums tiek reducēts uz kārtēja cikla sākuma momentu sinhronizāciju abām iekārtām. Sinhronizācijas impulss (100PPS) tiek padots uz procesora pārrāvuma ("interrupt") ieeju ar vislielāko prioritāti. Pienākot pārrāvuma signālam procesors koriģē (skat.3.8.attēlu) savu iekšējo pulksteni uz laiku $+\Delta t$ vai $-\Delta t$, atkarībā no pulksteņa radījumiem vai tie apstādz, vai kavē.



3.8.att. Iekšēja pulksteņa korekcija.

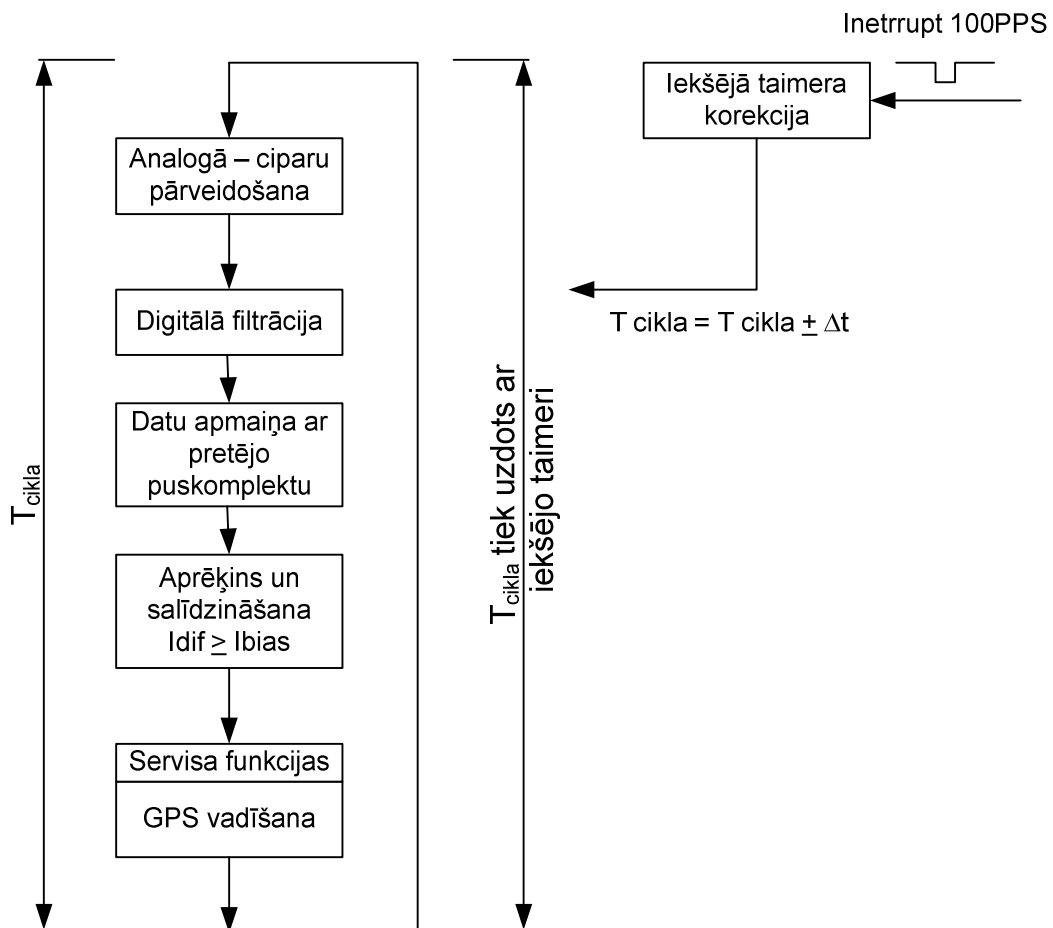
Iekšēja pulksteņa koreģēšana notiek katras 10msek no 100PPS signāla. Pieņemot tipisko procesora taktu ģenerators nestabilitāti vienādu ar ± 50 PPM (part per million), resinhronizācijas kļūda par 10ms laiku nepārsniegs $\pm 50\mu s$, kas sastāda $\pm 0,9$ el. grādi. Katra no iekārtām (puskomplektiem) piešķir kārtējus numurus (1,2,3,...) kārtējai datu izvērnei, turklāt, datiem, kas tika uzņemtas sinhronizācijas impulsa saņemšanas momentā, vienmēr tiek piešķirts Nr.”1”. Dati tiek saglabāti iekārtas gredzenveida datu buferī un tiek pārraidīti uz otro puskomplektu pa sakaru kanālu.



3.9.att.Gredzenveida datu buferis

Katrs no puskomplektiem salīdzina no pretējā līnijas gala saņemtos “n” datus ar savējiem “n” numura datiem, no gredzenveida bufera (skat.3.9.attēlu). Ievērojot, ka datu izvērnes ar

vienādiem numuriem ir sinhronizētas laikā, iespējams izvairīties no sakaru līnijas kavējuma laika nesimetrijas ietekmes. Sinhronizēto datu izvēlnes apmaiņas procesā, katra no iekārtām kopā ar datu paketi pārraida arī papildus GPS sinhronizācijas esamību. GPS sinhronizācijas neesamības gadījumā vismaz vienai no iekārta, abas iekārtas pariet kavējuma laika mērījumu režīmā.



3.10.att.GDA termināla programmas blokhēma

Informācijas apmaiņas iespēja un mērījumu sinhronizācija starp abiem līnijas galiem ļauj realizēt bojājuma vietas noteikšanu, izmantojot apgrieztās secības strāvas un spriegumus.

Attāluma līdz bojājuma vietai aprēķins tiek veikts pēc plaši zināmas formulas [83,84,85]:

$$L_{\text{fault}} = \frac{U_2' - U_2'' + Z_1 L_{\text{lin}} I_2''}{Z_1 (I_2' + I_2'')} \quad (3.2)$$

kur U_2', I_2' - apgrieztās secības spriegums un strāva vienā līnijas galā;
 U_2'', I_2'' - apgrieztās secības spriegums un strāva otrajā līnijas galā;
 Z_1 - tiešās secības līnijas īpatnēja pretestība;
 L_{lin} - līnijas garums.

Vienādojums (3.2) vairākus desmitus gadus bija par pamatu bojājuma vietas noteikšanai augstsprieguma līnijās (apgrieztās secības lielumu vietā tika izmantoti nullsecības lielumi), bet, jāatzīmē, ka mērījumu sinhronizācijas neiespējamība atļāva tikai tuvināto (3.2) realizāciju. Vienādojuma (3.2) vietā tika realizēts:

$$L_{fault} = \frac{|U_2'| - |U_2''| + |Z_1|L_{lin}|I_2''|}{|Z_1|(|I_2'| + |I_2''|)}. \quad (3.3)$$

Attālumu līdz bojājuma vietai aprēķinu, termināls veic brīdī, kad notiek nostrāde uz atslēgšanu.

3.5. Ārēja datora programmatūra darbam ar iekārtu.

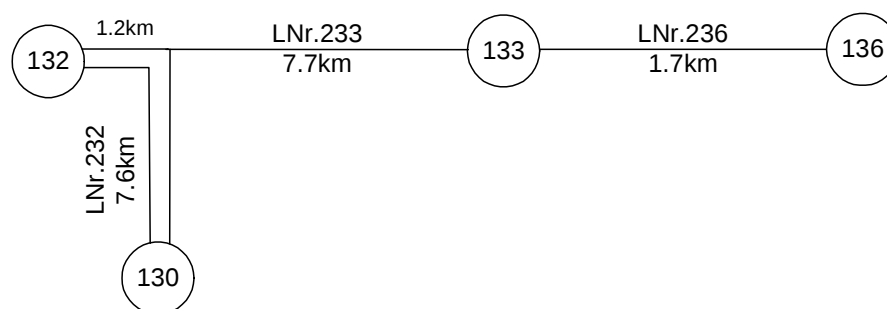
Releju aizsardzībā uz mikroprocesoru bāzes parasti tiek iekļauts avārijas procesu oscilogrāfs, kura pierakstus nepieciešams nolasīt un apstrādāt, lai pēc iespējas veiksmīgāk analizētu notikumu un iekārtas darbu. Līnijas diferenciālās aizsardzības LIDA komplekti izmanto tradicionālo programmatūru “RemiLink” iestatījumu ievadei un ierakstu nolasīšanai, un programmu “Smoky” oscilogrammu apstrādei. [42]. Jāatzīmē, ka programmatūra spējīga stādāt ar vairumu operacionālo sistēmu (Windows 95, Windows NT, Windows XP u.t.t.). Izstrādājot jauna produkta programmatūru, netiek aizmirsts par iespēju stādāt ar iepriekšējās paaudzes un cita tipa iekārtām. Kā piemēru var minēt, ka pēdējās versijas programmatūra “RemiLink” versija 1.1.93 un “Smoky” versija 1.2 spēj strādāt ar pagājušā gadsimta 90-os gados piegādātajiem pirmajiem oscilogrāfiem uz mikroprocesoru bāzes.

3.6. 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 darboties spēju.

3.6.1. 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. 3.11. 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.

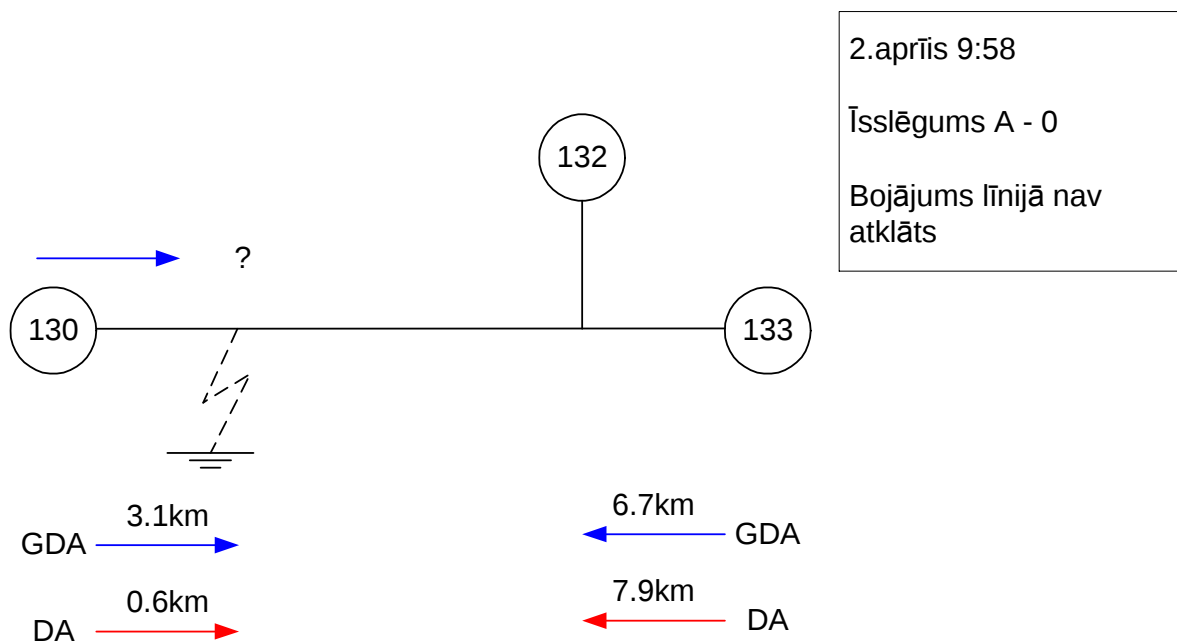


3.11. att. Elektropārvades līniju izveidojums.

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

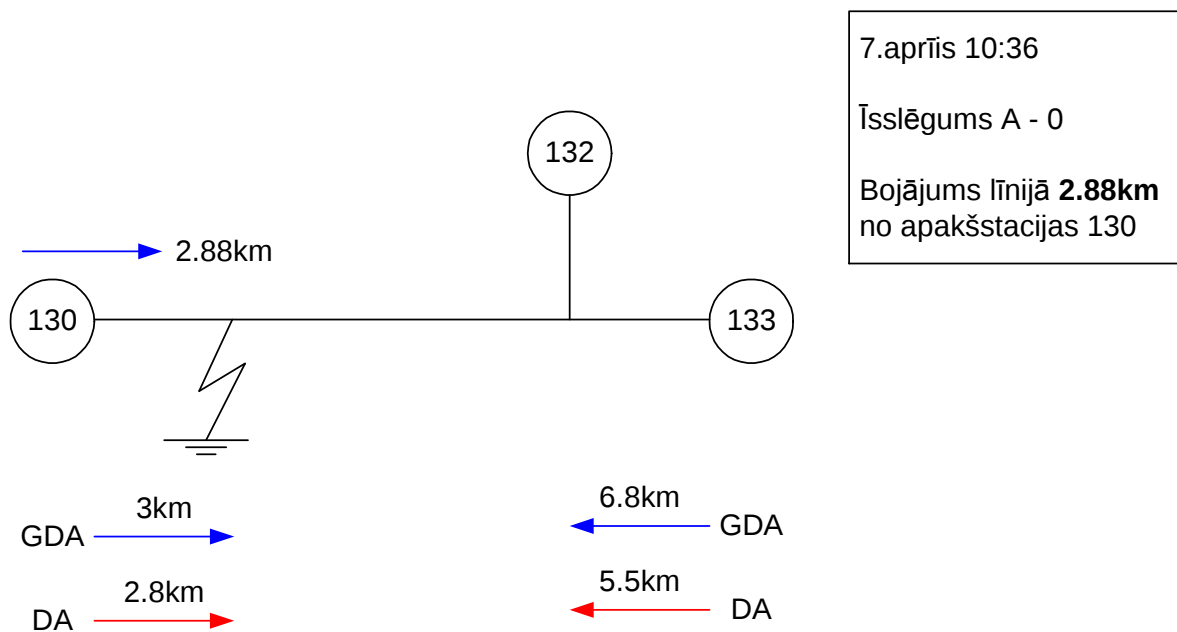
3.6.2. Īsslēgumu analīze un bojājuma vietas noteicēju rezultāti.

18.martā 2005.gadā apakšstacijās Bolderāja 1, Bolderāja 2 un Imanta uz jaudas slēdžu atslēgšanu tika ieviestas darbā līniju garendiferenciālās aizsardzības LIDA. Nepilna mēneša laikā uz līnijas Bolderāja 1 – Bolderāja 2 L Nr.233 2. un 7 aprīlī radās zemesslēgumi. 2.aprīlī bojājums līnijā netika atrasts (skat. 3.12. attēlu). 7. aprīlī tika konstatēts, ka 2.88km attālumā no apakšstacijas Imanta putni mēģināja uzbūvēt ligzdu (skat.3.13.attēlu).



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

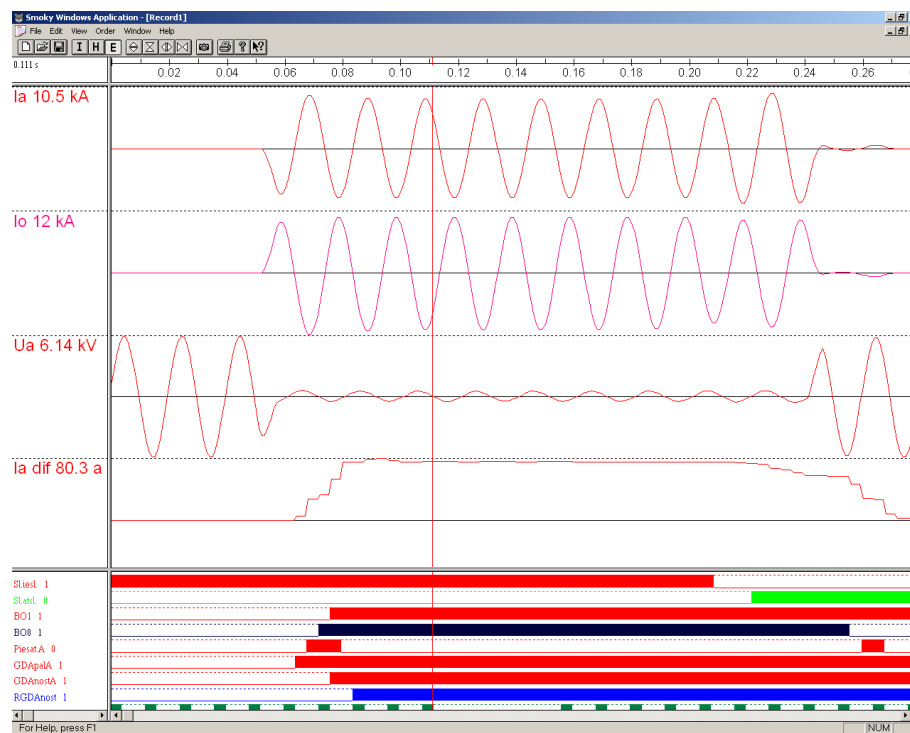
Piezīme: GDA – bojājuma vieta noteikta, izmantojot informāciju no abiem līnijas galiem;
DA – bojājuma vieta noteikta, izmantojot informāciju no viena līnija gala.



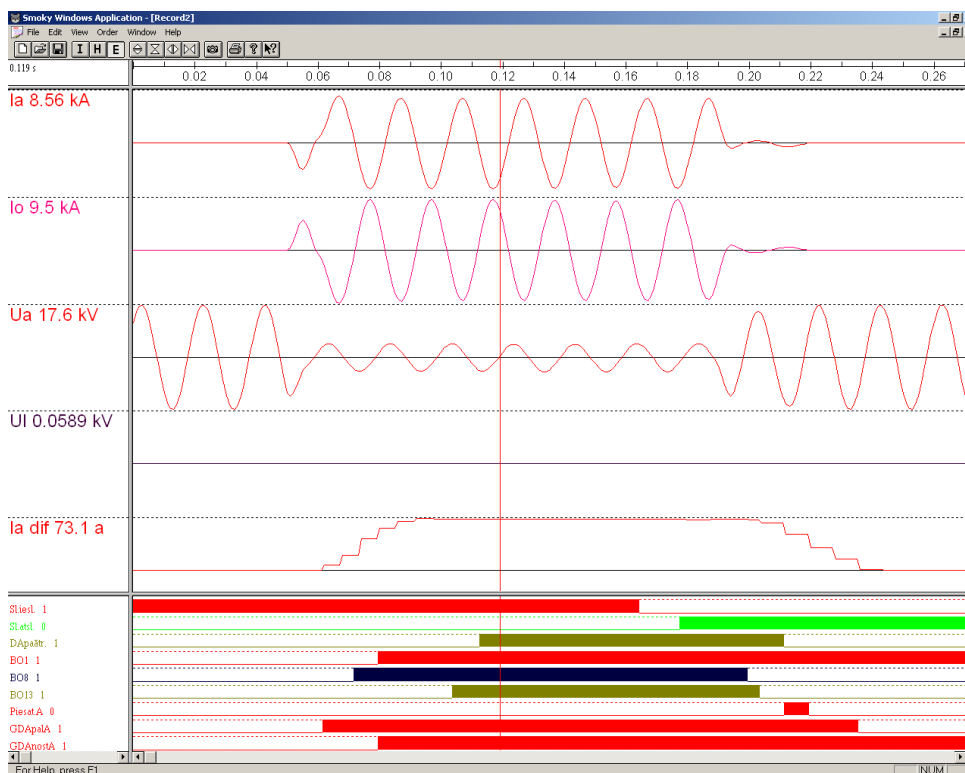
3.13. att. Īsslēgums 110kV elektropārvades tīklā 7.aprīlī.

Kā var redzēt oscilogrammu pierakstā, tad īsslēguma strāvas bija samērā lielas 10.6kA (skat.3.14. attēlu) no un 8.56kA (skat.3.15. attēlu) apakšstacijas Imanta. Tā kā bojājumam bija

pārejošs, tad līnija abos gadījumos tika ieslēgta atpakaļ ar automātiskās atkārtotās ieslēgšanas palīdzību.



3.14. att. Īsslēguma pieraksts apakšstacijā Imanta.



3.15. att. Īsslēguma pieraksts apakšstacijā Imanta.

Īsslēgumu laikā tika noteiktas divas bojājuma vietas, jo RA komplektos iekļauti divi bojājuma vietas notikšanas 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 gadā, 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.

3.7. Secinājumi.

1. Latvijas un kaimiņvalstu vajadzībām, tika uzstādīts un atrisināts uzdevums realizēt universālu un pietiekami sarežģītu aizsardzības un automātikas kompleksu.
2. Universālā termināla testēšanai izvēlēta virtuālām pārbaudēm piemērota struktūra, izstrādāta un realizēta speciāla programmatūra.
3. Izgatavoto un ekspluatācijā ievesto paraugu darbība apstiprināja izvēlēto principu, un struktūru darboties spēju un pieņemto lēmumu pareizību.
4. Garendiferenciālās aizsardzības darbība ir stipri atkarīga no sakaru kanāliem. Kanālu pārraides ātruma nesimetrija var izsaukt aizsardzību atteikumus.

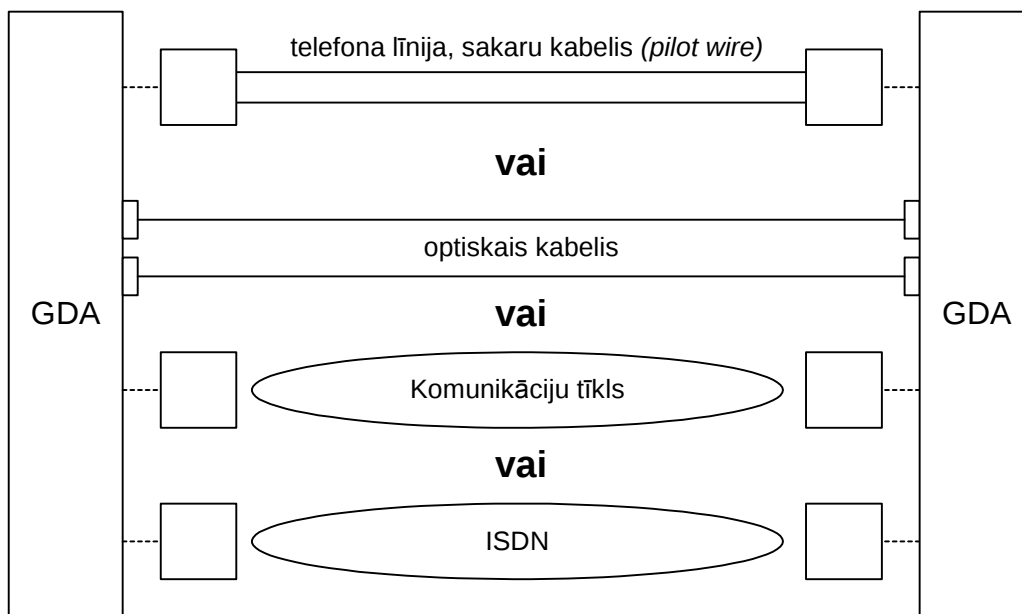
4. Līnijas diferenciālās aizsardzības sakaru kanāla ietekme un pārbaudes.

Elektropārvades līniju garendiferenciālā aizsardzība, datu pārraides sakaru kanāli, sakaru kanāla kavējums un nesimetrija. Nesimetrijas ietekme. Sakaru kanāla pārbaudes, rezultāti. Aizsardzības bloķēšana traucējumu gadījumos.

4.1. Ievads.

Datu pārraidei starp termināliem tiek izmantots sakaru kanāls un tāpēc digitāla sakaru kanāla parametri tieši ietekmē uz aizsardzības drošu un selektīvu darbību. Mūsdienīga līnijas diferenciālā aizsardzība spējīga strādāt ar dažādu veidu sakaru kanāliem (skat. attēlu 4.1.) :

- Tiešu savienojumu
 - o Optiskais kabelis;
 - o Elektriskais kabelis;
- Komunikāciju tīklu;
- ISDN (*integrated services communication network*) komunikāciju tīklu.



4.1. att. Sakaru kanālu veidi.

Tikai tiešais terminālu savienojums, ar iepriekš zināmiem datu pārraides parametriem – sakaru kanāla laika kavējumiem, var garantēt drošu un nepārtrauktu aizsardzības darbību. Pārejos gadījumos, kad sakaru kanālu raksturlielumi nav precīzi zināmi vai nevar būt garantēta to stabilitāte, aizsardzības pareiza darbība un pat aizsardzības darbaspēja var būt ierobežota. Sakaru kanāla laika kavējumu ietekme aizsardzības darbībā var būt novērsta, pielietojot aizsardzības puskomplektu mērījumu sinhronizāciju, ko var nodrošināt izmantojot GPS iekārtas kā vienotu sinhronizācijas signāla avotu. Diemžēl ne visas apakšstacijas ir aprīkotas ar GPS uztvērējiem un pašas GPS sistēmas nepārtraukta darbība arī nevar būt garantēta. Tāpēc, lai būtu pārliecība par aizsardzību darbaspēju un efektivitāti ir nepieciešams iepriekš zināt datu komunikācijas vides raksturojumus, kuri var tieši ietekmēt aizsardzības darbību. Sakaru kanāla laika kavējumi nav iepriekš zināmi, tādēļ aizsardzību jāpārbauda ne tikai laboratorijas apstākļos, kad tiek izmantots tiešs savienojums vai simulēts datu pārraides tīkls ar zināmiem parametriem, bet arī uzstādīšanas vietā, pieslēdzot terminālus pie reāla sakaru kanāla. Aizsardzības ieviešana darbā var vēl kļūst par sarežģītu procesu ņemot vērā, ka nepieciešams ne tikai precīzi noteikt sakaru kanāla laika kavējumus, bet arī to stabilitāti un iespējamās izmaiņas robežas. No visas iepriekš minētā var secināt, ka pirms GDA ieviešanas darbā jāveic sekojoši pasākumi:

1. Eksperimentāli noteikt sakaru kanāla, pie kura tiek plānots pieslēgt GDA aizsardzības terminālus, parametrus (laika kavējumus datu pārraidei/saņemšanai, laika kavējumu izmaiņas robežas, sakaru kanāla stabilitāti);
2. Pārbaudīt GDA aizsardzības darbību laboratorijas apstākļos imitējot reālo sakaru kanālu ar jau noteiktiem iepriekšminētiem parametriem.

4.2. Datu pārraides tīkla pielietojums relejaizsardzības vajadzībām.

Latvijas elektropārvades uzņēmums AS „Augstsprieguma tīkls” plaši pielieto digitālus datu pārraides kanālus informācijas apmaiņai starp dispečeru centriem un relejaizsardzības termināliem. PDH/SDH (plesiosynchronous digital hierarchy / synchronous digital hierarchy) digitālā datu pārraides tīkla struktūra izmanto datu pārraides laika multipleksēšanas tehnoloģiju, kas ļauj klientam pieslēgties sakaru tīklam, izmantojot multipleksorus. AS „Augstsprieguma tīkls” 110-330kV elektropārvades līniju GDA sakaru kanāla vajadzībām galvenokārt tiek pielietots tieši PDH/SDH datu pārraides tīkls. Šādi veidota komunikācija ir izdevīga, ja attālumi starp termināliem ir gari [1]. SDH/PDH datu pārraides tīkla trūkums ir

nespēja nodrošināt nemainīgu datu pārraides laika aizkavi multipleksētā datu pārraides kanālā, kas var novest pie aizsardzības atteikuma vai liekas nostrādes. Zemāk aprakstītais pētījums veltīts datu pārraides tīkla darbības analīzei, kā arī iespējām pielietot esošos datu pārraides principus GDA vajadzībām.

Elektropārvades līniju GDA terminālu datu pārraides ātrums parasti ir 64kbit/s, vai arī reizinājums ar 64kbit/s. Informācijas apmaiņa starp termināliem notiek ar datu pakešu palīdzību. Katra datu pakete ietver sevī termināliem pieslēgto strāvu vektorus un papildus datus, kas nepieciešami laika kavējuma kompensēšanai un terminālu mērījumu sinhronizēšanai. Aizsardzības nostrādes laiks ir atkarīgs no informācijas raidīšanas/saņemšanas kavējuma un datu kanāla ātruma. Normālā situācijā šim laikam nevajadzētu būt lielākam par 1,5ms, bet praksē novēroti gadījumi, kad šis laiks tuvojas 10ms vai pat pārsniedz šo laiku. Katrā terminālā var automātiski kompensēt sakaru kanāla radīto laika kavējumu, pieņemot, ka laika kavējums ir simetrisks. Laika kavējumu katrā virzienā nosaka:

$$T_{TX} = T_{RX} = T_{cilpas}/2, \quad (4.1.)$$

kur: T_{TX} - laikā kavējums informāciju nosūtot;
 T_{RX} - laika kavējums, informāciju saņemot;
 T_{cilpas} - kopējais laika kavējums.

No sastādīto vienādojumu (4.1.) lielumiem, tikai T_{cilpas} var būt izmērīts bez GPS palīdzības. Mērījumu veikšanai pietiek sakaru organizācijas procedūrā paredzēt speciālā signāla aizsūtīšanas un atbildes saņemšanas momentu fiksāciju. Lielumi T_{TX} un T_{RX} šajā gadījumā tiek aprēķināti pieņemot hipotēzi par sakaru kanāla simetriju abos virzienos.

Nosakot laika kavējumus, iespējams veikt strāvu vektoru leņķisko differences kompensēšanu un pareizu diferenciālās strāvas noteikšanu.

Tiešām, ja ir zināms laika kavējums, teiksim T_{RX} , tad pieņemot, ka strāvas modulis nav mainījies, varam „pagriezt” izmantojamo strāvas vektoru uz atbilstošo laika kavējumam leņķi. Ņemot vērā (2.5.), varam apgalvot, ka:

$$\underline{I}(n\Delta t) = \underline{I}(n\Delta t - T_{RX}) \times \exp(j 2 \pi f T_{RX}), \quad (4.2.)$$

kur $\underline{I}(n\Delta t)$ – aprēķinātais laika momentam $n\Delta t$ strāvas lielums;
 $\underline{I}(n\Delta t - T_{RX})$ – saņemtais ar kavējumu T_{RX} strāvas mērījuma rezultāts.

Atzīmēsim, ka „pagriezienu” realizācijai labāk izmantot datus aktīvās un reaktīvās sastāvdaļas vektorus. Tiešām, ja

$$\underline{I}(n\Delta t - T_{RX}) = A(n\Delta t - T_{RX}) + jR(n\Delta t - T_{RX}), \quad (4.3.)$$

tad

$$\left. \begin{aligned} A(n\Delta t) &= A(n\Delta t - T_{RX}) \times a - R(n\Delta t - T_{RX}) \times r \\ R(n\Delta t) &= A(n\Delta t - T_{RX}) \times r - R(n\Delta t - T_{RX}) \times a \end{aligned} \right\}, \quad (4.4.)$$

kur a un r , attiecīgi:

$$\left. \begin{aligned} a &= \cos(2\pi f T_{RX}) \\ r &= \sin(2\pi f T_{RX}) \end{aligned} \right\}. \quad (4.5.)$$

„Pagriezienu” komponentes a un r var būt aprēķinātas „a priori” un ierakstītas procesora atmiņā. Šajā gadījumā strāvas korekcija prasa tikai aritmētisko operāciju izpildi (skat. (4.4.)), kas ļoti būtiski mikroprocesoru gadījumā.

4.3. 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 $\Delta\phi$ starp strāvu vektoriem. 50Hz sistēmā $\Delta\phi$ var noteikt šādi (radiānos):

$$\Delta\phi = 2 \pi f \Delta T_a, \quad (4.6.)$$

kur ΔT_a - laika kavējuma asimetrija, kuru nosaka sekojoši:

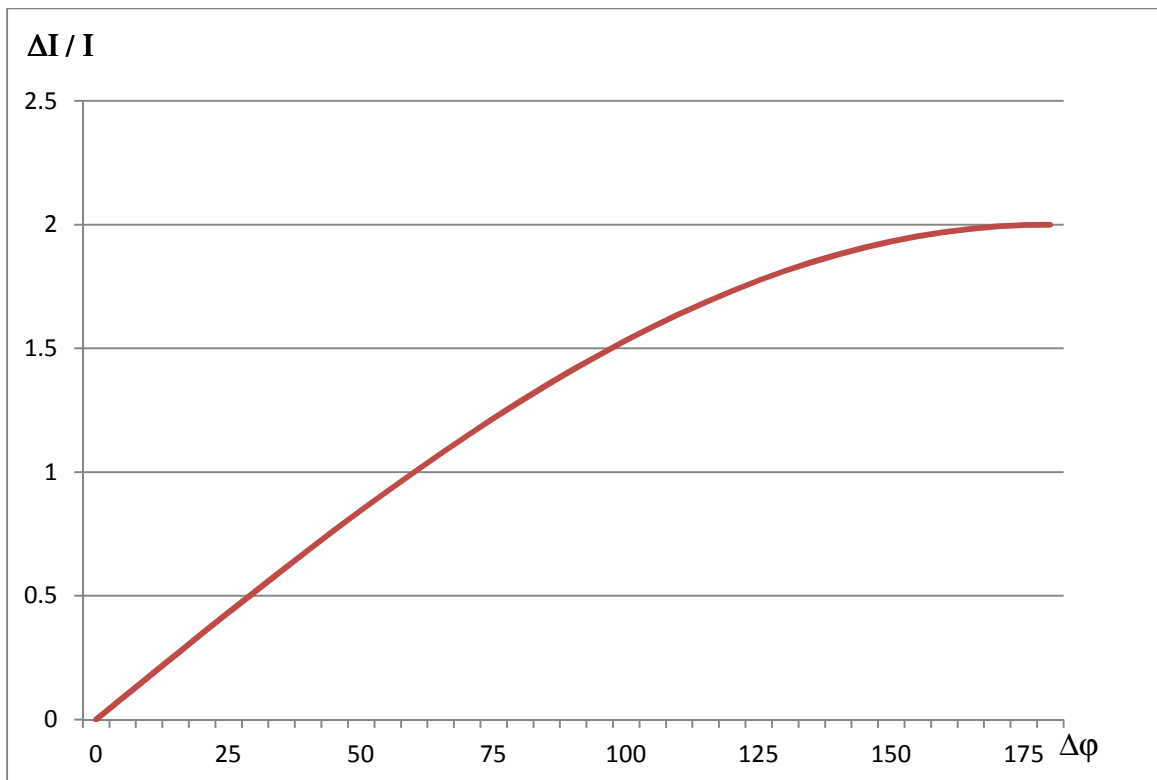
$$\Delta T_a = |T_{TX} - T_{RX}| / 2. \quad (4.7.)$$

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

$$\Delta I = I(\sqrt{(1 - \cos\Delta\varphi)^2 + (\sin\Delta\varphi)^2}) \quad (4.8.)$$

kur I - fāzes strāva.

$\Delta\varphi$ ietekme uz strāvas mērījumu parādīta 4.2. attēlā.



4.2. att. $\Delta\varphi$ ietekme uz strāvas mērījuma precizitāti.

Veicot šādu pārrēķinu var noteikt, piemēram, ka 1ms laika kavējuma asimetrijas gadījumā, radīsies 18° leņķa kļūda starp attālināto terminālu strāvu vektoriem [3]. 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 nejūtīgāku. Šādi tiek zaudēta viena no galvenajām garendiferenciālās aizsardzības priekšrocībām – ļoti augstais jūtīgums, 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 [4,5]:

- 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.

4.4. Diferenciālās aizsardzības sakaru kanāla darbības statistika.

Statistisko datu vākšanai tika izmantotas 29 330kV un 110kV elektropārvades līnijas, kurās tika fiksētas datu pārraides pārtraukums un traucējumus. 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).

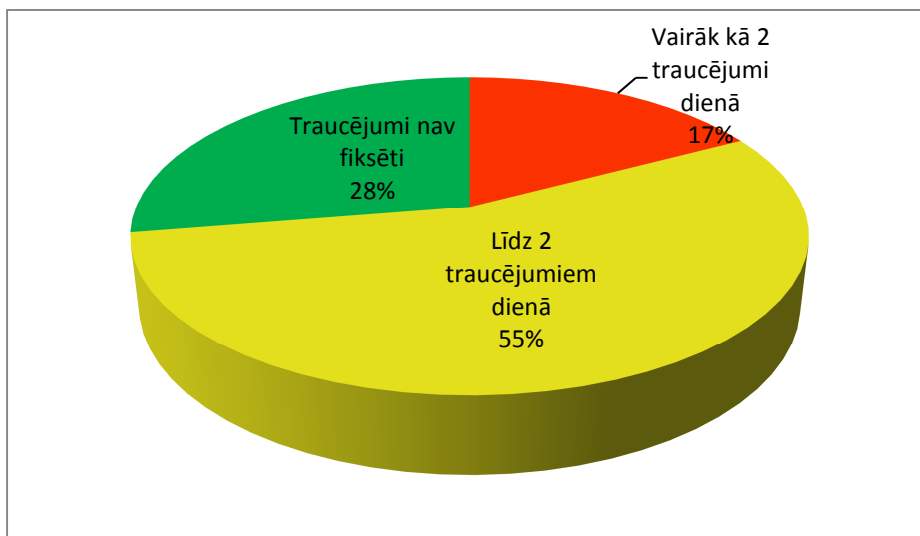
4.1. tabula. Aizsardzības iekārtu diferenciālās funkcijas bloķēšanās statistika.

	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 komunikācija kanāla asimetrija;
- Sakaru pārtraukumi.



4.3. att. GDA kompleksu traucējumu statistika.

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 kompleksu bloķēšanas gadījumu biežums ir pietiekami liels, lai to darbību uzskatītu par nedrošu.

4.5. Datu pārraides kanāla pārbaudes iekārta.

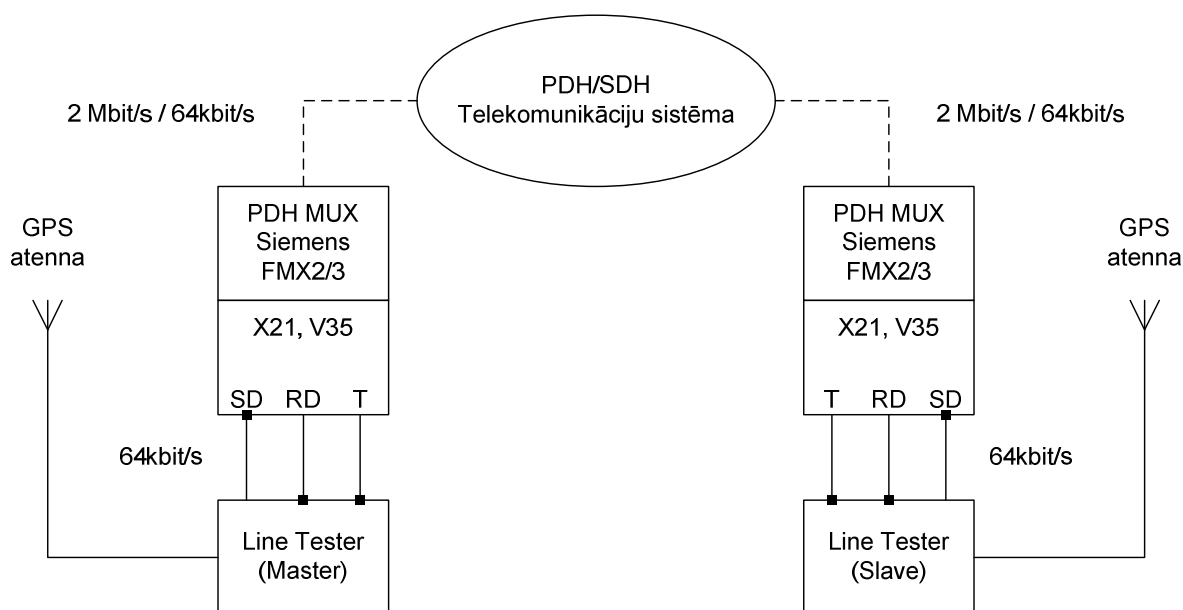
GDA bloķēšana sakaru kanāla traucējumu parādīšanas vai laika kavējuma izmaiņas dēļ samazina kopēju aizsardzības efektivitāti, bet tomēr līnija nepaliek bez aizsardzības tāpēc, ka GDA tiek rezervēta ar distantaizsardzību vai maksimālstrāvas un virzīto zemesslēguma aizsardzību. Laika posmā no 2000.gada 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, kā lieka aizsardzības nostrāde varētu būt izsaukta ar sakaru kanāla laikā kavējumu īslaicīgu asimetriju.

Lai noskaidrotu GDA kompleksu 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:
 - o Kopējā kanāla kavējuma noteikšana;
 - o 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.4.4.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.



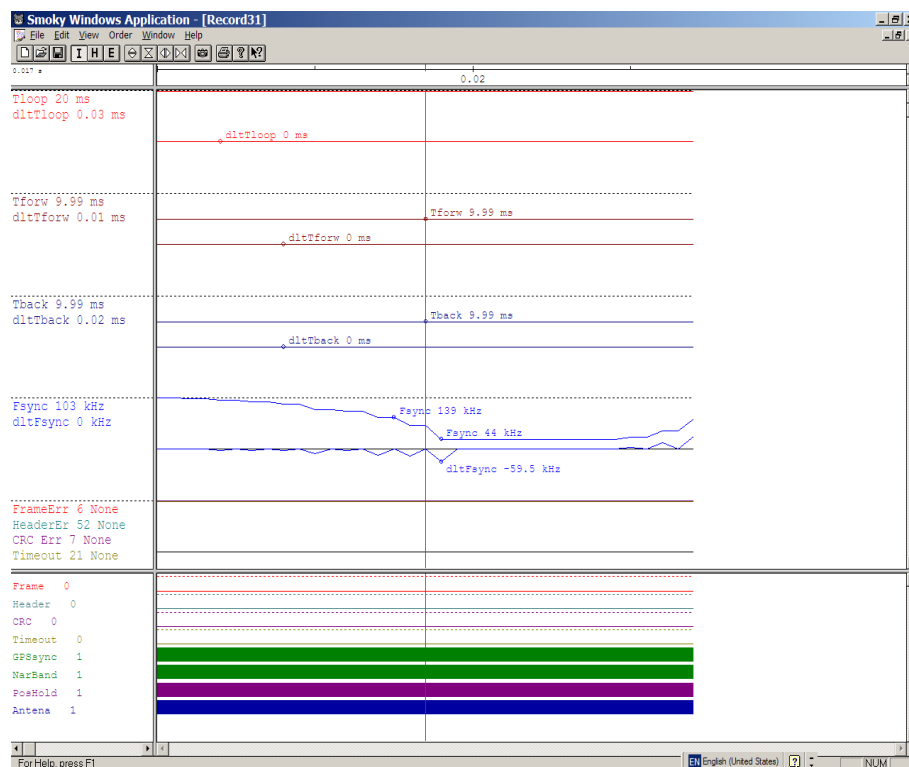
PDH – plesiosynchronous digital hierarchy
 SDH – synchronous digital hierarchy
 MUX – multipleksors

4.4.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 četros neatkarīgos 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 (skat. 4.5 attēlu).

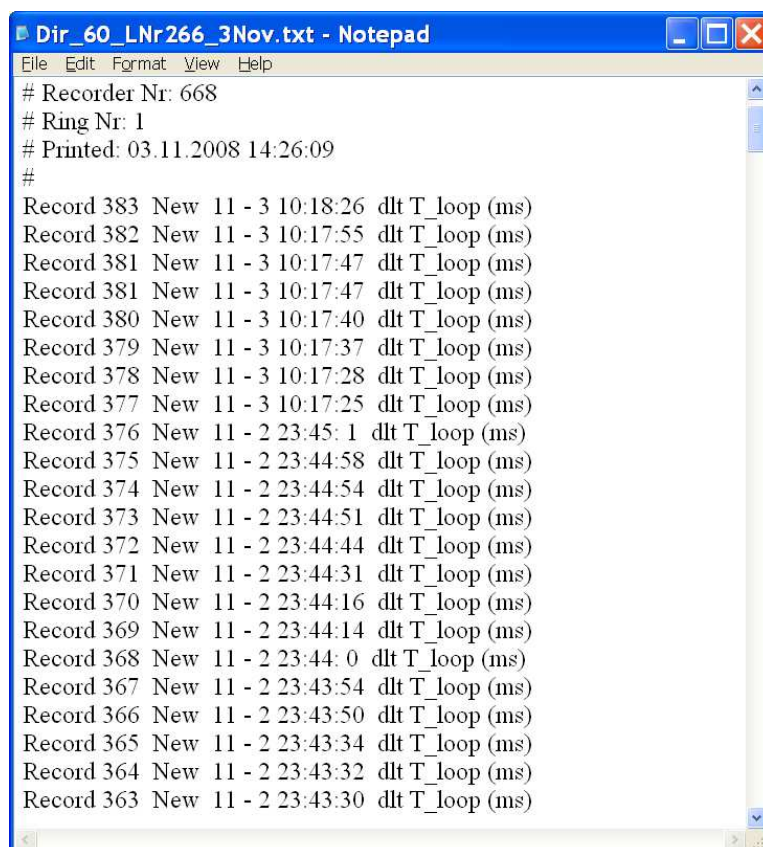


4.5.att. „Line tester” oscilogramma.

4.6. „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 ilga 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” iekārtu. „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 terminālus mērījumu sinhronizāciju.



```
Dir_60_LNr266_3Nov.txt - Notepad
File Edit Format View Help
# Recorder Nr: 668
# Ring Nr: 1
# Printed: 03.11.2008 14:26:09
#
Record 383 New 11 - 3 10:18:26 dlt T_loop (ms)
Record 382 New 11 - 3 10:17:55 dlt T_loop (ms)
Record 381 New 11 - 3 10:17:47 dlt T_loop (ms)
Record 381 New 11 - 3 10:17:47 dlt T_loop (ms)
Record 380 New 11 - 3 10:17:40 dlt T_loop (ms)
Record 379 New 11 - 3 10:17:37 dlt T_loop (ms)
Record 378 New 11 - 3 10:17:28 dlt T_loop (ms)
Record 377 New 11 - 3 10:17:25 dlt T_loop (ms)
Record 376 New 11 - 2 23:45: 1 dlt T_loop (ms)
Record 375 New 11 - 2 23:44:58 dlt T_loop (ms)
Record 374 New 11 - 2 23:44:54 dlt T_loop (ms)
Record 373 New 11 - 2 23:44:51 dlt T_loop (ms)
Record 372 New 11 - 2 23:44:44 dlt T_loop (ms)
Record 371 New 11 - 2 23:44:31 dlt T_loop (ms)
Record 370 New 11 - 2 23:44:16 dlt T_loop (ms)
Record 369 New 11 - 2 23:44:14 dlt T_loop (ms)
Record 368 New 11 - 2 23:44: 0 dlt T_loop (ms)
Record 367 New 11 - 2 23:43:54 dlt T_loop (ms)
Record 366 New 11 - 2 23:43:50 dlt T_loop (ms)
Record 365 New 11 - 2 23:43:34 dlt T_loop (ms)
Record 364 New 11 - 2 23:43:32 dlt T_loop (ms)
Record 363 New 11 - 2 23:43:30 dlt T_loop (ms)
```

4.6.att. „Line tester” fiksēto notikumu, kad lēcienveidīgi mainījās datu pārraides laiks, izdruka.

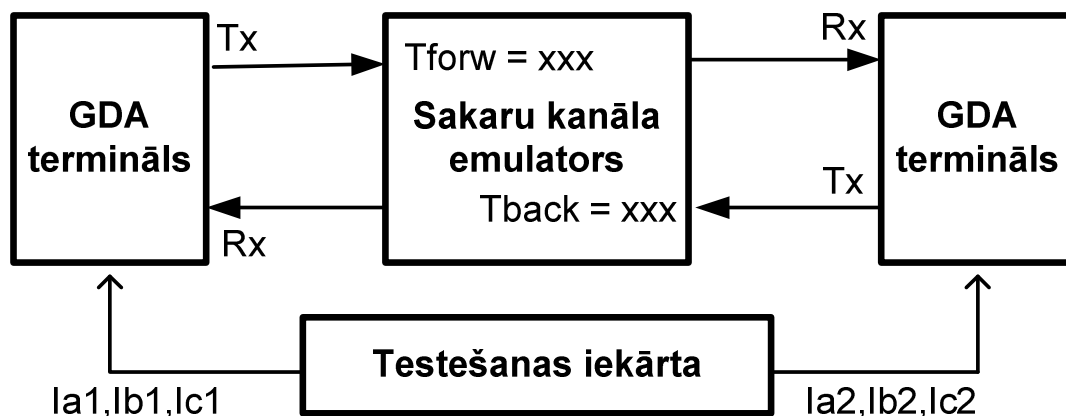
Ārēja īsslēguma gadījumā lieki nostrādāja GDA uz LNr.247 „Mārupe” – „Zunda”. Veicot ārpuskārtas pārbaudi mērmaiņiem un aizsardzības termināliem, tika konstatēta palielināta nebalansa strāva, kuras iemeslu sākotnēji nebija iespējams konstatēt. Tika nolemts uzstādīt „Line tester” iekārtu, kura uzrādīja 1.3ms lielu sakaru kanāla asimetriju. Veicot iespējamās diferenciālās strāvas pārrēķinu ārēja īsslēguma gadījumā pēc (4.4), noskaidrojās, ka tā pārsniedza diferenciālās aizsardzības iestatījumu un sakrita ar faktiski konstatēto. GDA tika izvesta no darba līdz sakaru kanāla sakārtošanai.

4.7. GDA pārbaude laboratorijas apstākļos.

Kā jau bija minēts, GDA terminālu pārbaude laboratorijas apstākļos notiek izmantojot tiešu savienojumu starp termināliem. Tas ir tāpēc, ka reāla sakaru kanāla aparatūra tipiskajā gadījumā nav pieejama laboratorijas apstākļos. Principiāli ir iespējama GDA pārbaude laboratorijā pie nosacījumiem, kas ir tuvi reāliem. Lai nodrošinātu tādu pārbaudi nepieciešams:

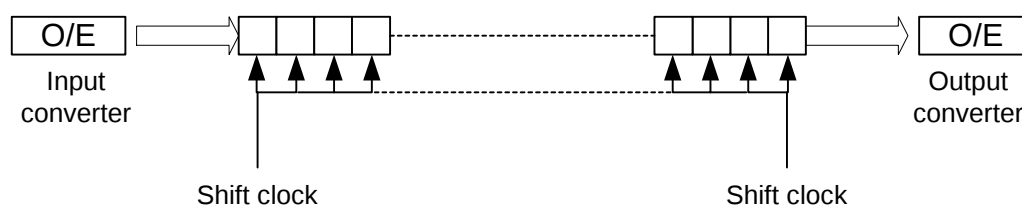
1. Noteikt esošā sakaru kanāla raksturlielumus (laika kavējumus datu pārraidei abos virzienos, laika kavējumus stabilitāti un sakaru kanāla pārtraukšanas biežumu) – to var noteikt pieslēdzot „Line Tester” iekārtas pie reāla kanāla;
2. Savienot GDA terminālus caur speciālu ierīci, kura ir spējīga imitēt visus augstāk minētos sakaru kanāla raksturlielumus un, tāda veidā, imitēt sakaru kanālu ar iepriekš uzdotiem parametriem laboratorijas apstākļos.

GDA terminālu pārbaudes metodika parādīta 4.7. attēlā



4.7.att. GDA terminālu pārbaudes struktūra laboratorijas apstākļos.

Datu apmaiņa starp termināliem notiek caur sakaru kanāla emulatora ierīci – tas ir iekārta uz mikroprocesoru bāzes, kura reālajā laikā emulē sakaru kanāla darbību. Emulators ļauj operatīvi un neatkarīgi mainīt datu pārraides laikā kavējumus abos virzienos, emulēt īslaicīgus pārraides laika nobīdes un emulēt datu pārraides pārtraukšanu. Ierīces realizācijas princips parādīts 4.9. attēlā.

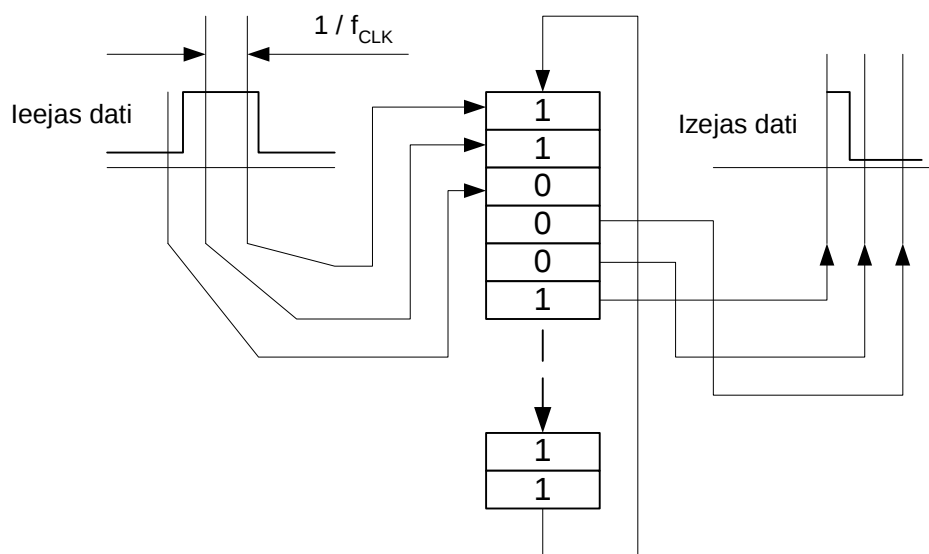


4.8. attēls. Virknes nobīdes reģistra realizācija.

Datu pārraides aizkavei tiek izmantots virknes nobīdes reģistra princips. Ieejās dati nonāk virknes reģistrā caur ieejas signāla pārveidotāju *Input Converter*. Datu nobīde reģistrā notiek pēc vadības signāla *Shift Clock* ar frekvenci f_{CLK} . Virknes reģistra izejā signāls parādās ar laika kavējumu ΔT :

$$\Delta T = \left(\frac{1}{f_{CLK}} \right) \cdot N; \quad (4.9.)$$

kur N - nobīdes reģistra garums (kārtu skaits).



4.9. attēls. Nobīdes reģistra darbības princips.

Nobīdes reģistrs realizēts programmas veida kā riņķveida iekšējās procesora atmiņas buferis (skat.4.9.attēlu). Mainot datu bufera garumu var operatīvi mainīt ģenerēto laika aizkavi. Lai iekārta spētu strādāt bez ieejas datu sinhronizācijas nepieciešams realizēt sekojošu nosacījumu:

$$f_{CLK} \gg F_{DATA}; \quad (4.10.)$$

kur F_{DATA} - sakaru kanāla datu apmaiņas ātrums.

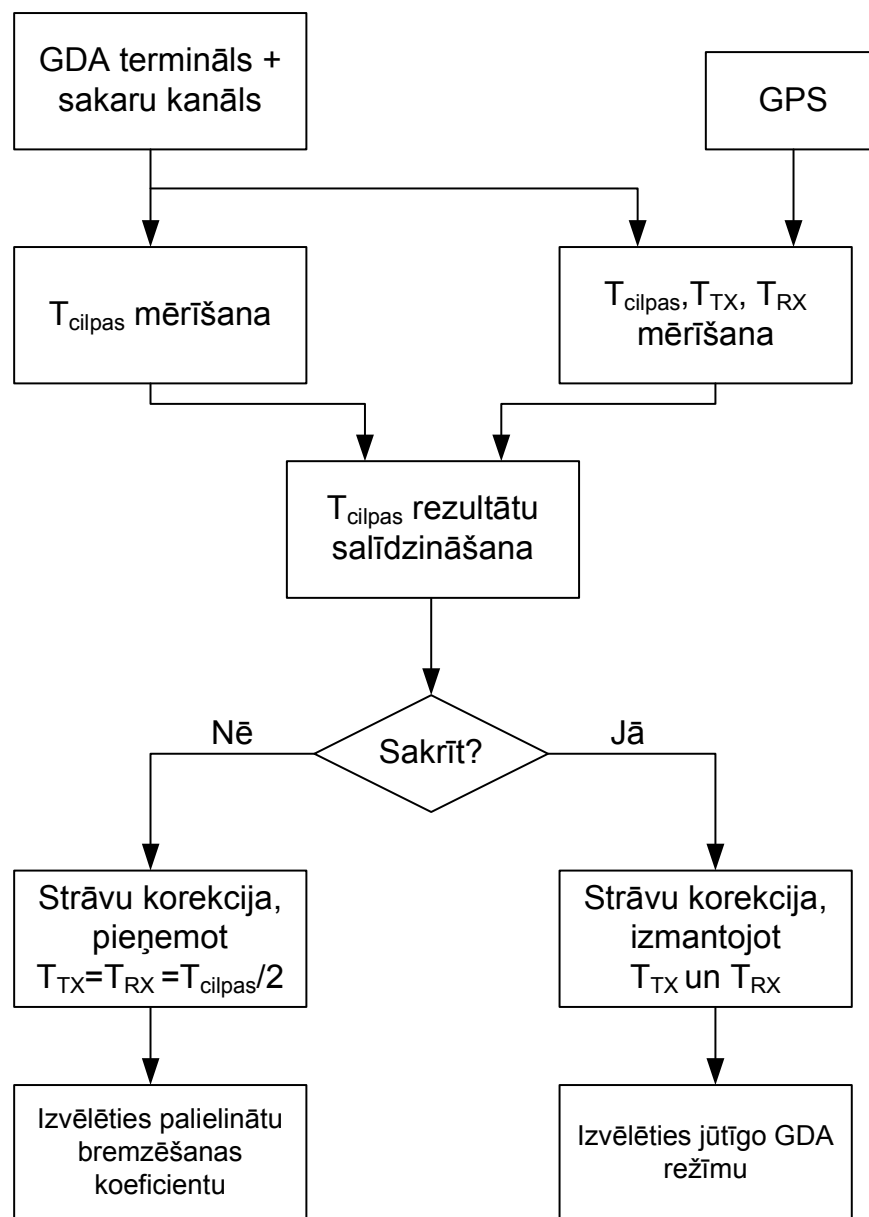
Ņemot vērā sakaru kanāla veidu un datu apmaiņas protokolu, datu apmaiņas ātrums var būt sekojošs:

1. Tiešs savienojums ar datu apmaiņas ātrumu 521kbit/s ;
2. ISDN, X.21, G.703 ar datu apmaiņas ātrumu 64 vai 128 kbit/s.

Tātad vajag nodrošināt $f_{CLK}=10 \cdot 512=5.120\text{MHz}$. Laika kavējuma 10ms realizēšanai nepieciešams atmiņas buferis 50kbit. Ierīce satur iekša divus tādus datu atmiņas buferus, kuru garumu var neatkarīgi programmēt un tāda veidā imitēt laika kavējumu asimetriju. Ir iespēja ieprogrammēt īslaicīgus sakaru kanāla pārtraukumus un imitēt datu pārraides kļūdas.

4.8. 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 4.10.



4.10. 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 darboties spējīgām. Pieņemot šo hipotēzi tiek ignorēts abu sistēmu bojājums, kurš dod kļūdainu, bet vienādu mērīšanas rezultātu. Tāda iespēja teorētiski eksistē, bet atbilstoša notikuma varbūtība, acīmredzami tuvojās nullei. Piedāvātā algoritma izmantošana atļauj saglabāt GDA darboties spēju ne tikai pie GPS atteikumiem, bet arī pie optiskā kanāla salīdzinoši nestabilas darbības, teiksim pie pārraides laika izmaiņām $1 \div 2$ ms robežās (precīzākiem secinājumiem ir nepieciešami papildus pētījumi).

4.9. Secinājumi.

1. Līnijas diferenciālās aizsardzības uz mikroprocesoru bāzes darboties spēja ir atkarīga no sakaru kanāla kvalitātes un datu pārraides ātruma;
2. Drošai GDA darbībai nepieciešamas papildus pārbaudes metodes un iekārtas, kas spētu novērtēt reāla sakaru kanāla raksturlielumus un emulēt sakaru kanāla darbību laboratorijas apstākļos;
3. Aprakstītā līnijas GDA sakaru kanālu pārbaudes iekārta „Line tester” ir spējīga noteikt sakaru kanāla raksturlielumus;
4. Savāktā reālu sakaru kanālu darbības statistika pierāda traucējumu ietekmes aizsardzības darbībai bīstamību;
5. Datu pārraides ātruma fiksācija dod iespēju izveidot uzlaboto GDA darbības algoritmu ar atkarīgo no laika kavējuma bremzēšanas strāvu;
6. Ir lietderīgi modelēt sakaru kanāla darba režīmus, kas ļauj paredzēt diferenciālās aizsardzības darbību, nenormālos datu pārraides kanāla darbības apstākļos;
7. Sakaru kanāla emulators ļauj pārbaudīt GDA laboratorijas apstākļos, imitējot reālu sakaru kanālu darbību.

5. Noslēgums.

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. Pārbažu veikšana var būt izmantota virtuālā pārbažu un Monte-Karlo metode kopā ar energosistēmu normālo un avārijas režīmu programmatūrām, papildinātām ar nepieciešamiem datu formāta izmaiņas blokiem. Virtuālo pārbažu iespējas nodrošināšanai nepieciešama speciāla testēšanas iekārtu struktūra, kas aprīkota ar viegli realizējamām programmām. Piedāvātā termināla realizācija ir iespējama uz signālprocesoru, piemēram firmas Texas Instruments bāzes, un ir piemērota vienlaicīgai sarežģīto aizsardzības funkciju izpildei:

- visu veidu strāvas aizsardzībām;
- distantaizsardzībām no visu veidu bojājumiem ar daudzonu raksturlīknēm;
- diferenciālām aizsardzībām ar optisko sakaru kanālu un GPS sistēmas izmantošanu;
- bojājuma vietas noteikšanai;
- avārijas procesu oscilografēšanai.

Izveidotā RA un A virtuālās pārbaudes laboratorija ar izstrādātām iekārtām un programmatūrām nodrošina ekonomiski pamatotu visplašāko pārbažu veikšanu, un ir spējīga sekmēt jaunu RA un A iekārtu, sistēmu izveidi un pētījumus.

Izgatavoto un uzstādīto RA un A augstsprieguma līniju terminālu ekspluatācija pierāda pamatoto un pieņemto dotā darbā risinājumu efektivitāti un pareizību.

Sakaru kanāli kļuva par vienu no svarīgiem RA un A sistēmas elementiem. 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.

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.

6. Nākotnes darbs.

RA un A pārbaūžu metodēm un ierīcēm ir jāattīstās kopā ar energosistēmu aizsardzību un vadības sistēmu attīstību. Var apgalvot, ka „wide area protection”, digitālo apakšstaciju „FACT” iekārtu, kļiedēto enerģijas avotu ieviešana energosistēmu praksē izsauks daudzu jaunu pārbaūžu nepieciešamību. Tiks izstrādātas jaunas simulējošas programmas, jauni RA un A termināli, un ļoti iespējams, ka šajā procesā tiks izmantotas promocijas darbā piedāvātās metodes, pieejas un struktūras, pirmkārt, virtuālo pārbaūžu metode. Atzīmēsim, ka digitālo apakšstaciju RA un A termināliem piemīt pilnīgi piemērota virtuālām pārbaudēm aparatūras struktūra.

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. B.A.Carreras and V.E.Lynch. I.Dobson. D.E.Newman. Critical points and transitions in an electric power transmission model for cascading failure blackouts. 9.September 2002.
5. Causes, analyses and coutermeasures with respect to blackout in Croatia on January 12, 2003.
6. T.Johannesson, Sydkraft, Sweden. F.Ross, Lund University, Sweden. S.Lindahl, Lund University, Sweden. Reliability of protection systems – operational experience 1976-2002.
7. Aabø, Y; Goin, R. & Lundqvist, B.: "Risk Analysis: A New Aspect on Protection and Local Control Design", DPSP, Amsterdam, April 2001.
8. A. Tunncliffe. State Energy Commission of Western Australia, Australia. Computer controlled protection testing – a Western Australian experience.
9. Stefan Ovcarov, Stanimir Vichev, Peter Yakimov. Faculty of Electronics. Investigation on Protective Relays Testing methods. Technical University of Sofia.
10. M. Igel, P. Schenger. Test Procedures for protection devices. AEG ATLAS GmbH and technische Universität, Dresden, Germany.
11. 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.
12. Sauhatas A., Loman T., Utan A., Dolgicer A., Leite L. System for electrical power processes recording. Aktualne Problemy w Electroenergetyce, Gdansk, Jurata, 1997.

13. A.C.Webb.Relay engineering Services Limites, UK. Computer generation of test quantities for testing protection relays.
14. M.Agrasar, J.R. Hernandez, F.Uriondo, J.Amantegui, J.M. Gallastegui, J.L. Martinez. Optimized Relay Testing Systems.
15. Alexander Dierks. OMICRON electronics GmbH, Austria. New Simulation Models To dynamically test impedance relays.
16. 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
17. 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.2006.367518ISBN: 978-186135-342-9In proceeding of: Universities Power Engineering Conference, 2006. UPEC '06. Proceedings of the 41st International, Volume: 2
18. 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.2010.5590037In proceeding of: Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE
19. 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.1998.759956ISBN: 0-7803-5105-3In proceeding of: Harmonics And Quality of Power, 1998. Proceedings. 8th International Conference on, Volume: 1
20. 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.2011.6019243In proceeding of: PowerTech, 2011 IEEE Trondheim
21. 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

22. 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
23. 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
24. Z. Wyocki. Silesian. MTZ2 – A computer Based Relay Test System. Technical
 University of Gliwice. 44-100 Gliwice, Poland
25. Marlene Lillian, Stanley I.Thompson. GPS Satellite Synchronized Test System
 Recreate Fault Conditions to Troubleshoot Protective Relay Schemes.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. Anrew C.Wevv and Michael Webb Automated testing of power system protection
 relays..
30. R.Bishop, Z.Q.Bo, X.F.Shen, L.Denning, M.O’Keeffe. ALSTOM T&D
 Protection&Control Ltd, Stafford UK, Electric Power Research Institute, Beijing,
 China. IMPLEMENTATION OF DYNAMIC RELAY SCHEME EVALUATION
 TESTING GUIDELINES USING ANALOGUE AND REAL TIME DIGITAL
 SIMULATORS.P.
31. M.Igel, P.Schenger, AEG ATLA GmbH and Technische Universitat, Dresden,
 Germany.TEST Procedures for protection devices.
32. M.Agrasar, J.R.Hernandez, F.Uriondo, J.Amantegui, J.M.Gallastegui, J.L.Martinez
 Optimized Relay Testing. Systems.

33. P.A.Crossley, H.Y.Li, Manchester Centre of Electrical Energy UMIST, Manchester, UK. A.D.Parker, GEC ALSTOM T&D, Stafford, UK. Design and Evaluation of Circulating Current Differential Relay Test System.
34. M.Monseu (Convenor), 1986. Cigre working group 04 of Study Committee 34 (protection). "Evaluation of Characteristics and Performance of Power System Protection Relays and Protective Systems", CIGRE, Paris.
35. GPS-synchronized harmonic measurements performed on a 400kV transmission network [W. Wiechowski](#), [J. Lykkegaard](#), [B. Bak-Jensen](#), [C.L. Bak](#), [J. Wasilewski](#) Energinet.dk, Fredericia Conference Proceeding: 11/2007; DOI:10.1109/EPQU.2007.4424111 ISBN: 978-84-690-9441-9 In proceeding of: Electrical Power Quality and Utilisation, 2007. EPQU 2007. 9th International Conference on
36. Typical expected values of the fault resistance in power systems
37. [V.D. Andrade](#), [E. Sorrentino](#) Univ. Simon Bolivar, Caracas, Venezuela Conference Proceeding: 12/2010; DOI:10.1109/TDC-LA.2010.5762944 In proceeding of: Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), 2010 IEEE/PES
38. A.Dieriks, Alectrix, South Africa. D.Kehrberg, ESKOM, South Africa. New Algorithms to Test Distance Relays.
39. CMC 256 User Manual. Hardware. 1999 by OMICRON electronics. Manual version: C256.AE.1.
40. Adaptive Under Frequency Load Shedding using PMU [R.M. El Azab](#), [E.H.S. Eldin](#), [M.M. Sallam](#) Conference Proceeding: 07/2009; DOI:10.1109/INDIN.2009.5195789 In proceeding of: Industrial Informatics, 2009. INDIN 2009. 7th IEEE International Conference on
41. Experience in connecting the power generating units of thermal power plants to automatic secondary frequency regulation within the united power system of Russia [A. V. Zhukov](#), [A. N. Komarov](#), [A. N. Safronov](#), [I. V. Barsukov](#) Journal Article: [Power Technology and Engineering](#) 04/2012; 43(3):185-193. DOI:10.1007/s10749-009-0089-0
42. 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
43. J. Rumbaugh and e. al., *Object-Oriented Modeling and Design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991.
 44. P. Coad and E. Yourdon, *Object-Oriented Design*: Yourdon Press, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1990.
 45. “Power System Relaying”, Stanley H. Horowitz and Arun G. Phadke, (book), Second edition, Research Studies Press Ltd., England, 1995, pg. 116,132.
 46. “Limits to Fault Location Accuracy”, Arun G. Phadke, and M. A. Xavier.
 47. Power Systems Analysis, second edition, by Artur R. Bergen and Vijay Vittal. (Prentice Hall Inc., 2000, ISBN 0-13-691990-1, 619 pages)
 48. Computational Methods for Large Sparse Power Systems, An object oriented approach, by S.A. Soma, S.A. Khaparde, Shubba Pandit (Kluwer Academic Publishers, 2002, ISBN 0-7923-7591-2, 333 pages)
 49. A platform for dynamic simulation and control of movement based on OpenSim and MATLAB. Misagh Mansouri, Jeffrey A Reinbolt Department of Mechanical, Aerospace, and Biomedical Engineering, The University of Tennessee, Knoxville, TN, USA. Journal Article: Journal of biomechanics (impact factor: 2.66). 03/2012; DOI:10.1016/j.jbiomech.2012.03.016
 50. Magnetically-Saturable Voltage-Behind-Reactance Synchronous Machine Model for EMTP-Type Solution Liwei Wang, J. Jatskevich ABB Sweden Corp. Res., Vasteras, Sweden Journal Article: IEEE Transactions on Power Systems (impact factor: 1.94). 12/2011; DOI:10.1109/TPWRS.2011.2107755
 51. GRONDIN, R.—KEMWA, I.—SOULIERES, L.—POTRIN, J.—CHAMPEHNE, R. : An Approach to PSS Design for Transient stability Improvement through Supplementary damping of the Common Low Frequency, IEEE Trans. Power System 8 No. 3 (1993), 954–963.
 52. S.W.Harpham & J.A.Jodice. Vector Instruments Ltd., UK. Double Engineering Company, US. TIME SYNCHRONOUS END-TO-END RELAY TESTING. A.
 53. Alexander Dierks, Omicron electronics GmbH, Austria. NEW SIMULATION MODELS TO DYNAMICALLY TEST IMPEDANCE RELAYS.
 54. A.Apostolov, Senior Member, IEEE ALSTOM T&D, Los Angeles, CA. R.Taylor, Senior Member, IEEE ALSTOM T&D, Fletcher, NC. B.Vandiver, IEEE OMICRON

- Electronics, Houston, TX. M. Dupuis, Celco Corp. New Iberia, LA. Automatic Testing of Advances Transformer Differential Relays with Multiple Restrained Inputs.
57. Lundqvist B., Kronander H., Mackrell A.J., 1997, 25-27th March, The Integration of Protection, Monitoring. Control and Communication functions in modern Electrical HV Installations, Developments in Power System Protection, No 434, IEE.
 58. Odmansson E. and Ohlen C., 1995, Integrated information systems, protection, substation control, network management. Available solutions on the market , IEEE Stockholm Powertech.
 59. Santoso, N.I., Avins, J.Y., July 1994, Real-time software testing for microprocessor-based Protective Relays , IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, pp. 1359-1367.
 4. Redfern, M.A., Walker, E.P., 1977, Power system simulation for the testing of protective equipment, Automatic Testing Conference, Brighton.
 60. Redfern, M.A., Walker, E.P., Power system simulation for the testing of protective equipment, Automatic Testing Conference, Brighton, 1977.
 61. Bernard, P., Erhard, P., Fauquemberque, P., Oct. 1988, Morgat a Data processing program for testing transmission line protective relays, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 3, 1419-1426.
 62. Kezunovic, M., 1994, Advances in digital simulator developments for protective relay testing , ICPST , Beijing, China.
 63. Henville, C.F., Mooney, J.B., 1996, Low level testing for protective relays , IEEE CCECE 96, 724-728.
 64. Edited by E.F. Beckenbach, 1956, Modern Mathematics for the Engineer , McGraw-Hill Book Company.
 65. Korn, G., Korn, T., 1968 , Mathematical handbook, McGraw-Hill Book Company.
 66. PSS/E-27 Online Documentation , Power Technologies, a division of S&W Consultants Inc., December 2000.
 67. 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.
 68. 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.
 69. Sauhata A., Loman T., Utan A., Dolgicer A., Leite L. System for electrical power processes recording. Aktualne Problemy w Electroenergetyce, Gdansk, Jurata, 1997.

70. TMS32054x DSP Reference Set. Volume 1: CPU and Peripherals. Literature Number: SPRU131C Manufacturing Part Number: D425004-9761, revision A., October 1996.
71. A.Sauhata, T.Loman, A.Utan, A.Dolgic, A disturbance recording system, International Symposium on Modern electric power system, Wroclaw, Poland, september 1996.
72. A.Johnson. Introduction to complete fault protection software testing. Proceedings of the American Control Conference. Philadelphia, 1998.
73. Redfem, M.A.,Agagarval,R.K., Husseini,A.H.: A personal computer based system for laboratory evaluation of high performance power system protection relays. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No.4, pp. 1402-1408, October 1991.
74. Roland Kiefer. Test Solutions for Digital Networks: Basic Principles & Measurement Techniques for Pdh, Sdh, Isdn & ATM, 1999.
75. Application Manual. Line differential and distance protection terminal REL561, 2006.
76. Gerhard Ziegler. Numerical differential protection: principles and applications, 2005.
77. Line Differential Protection with Distance Protection 7SD5. Manual.
78. 110/220 kV Line Protection Terminal Lida Manual.
79. 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.
80. 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.
81. J. Roberts, D. Tziouvaras, G. Benmouyal, and H. Altuve, "The Effect of Multiprinciple Line Protection on Dependability and Security," proceedings of the 55th Annual Georgia Tech protective Relaying Conference, Atlanta, GA, May 2001.
82. 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.
83. M. G. Adamiak, G. E. Alexander, and W. Premierlani, "Advancements in Adaptive Algorithms for Secure High Speed Distance Protection, ", *Twenty Third Annual Western Protective Relaying Conference*, October 1996.
84. C. R. Mason, *The Art and Science of Protective Relaying*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 605 Third Ave. NY, NY 10158 1956.

85. D. L. Mills, "Internet Time Synchronization: The Network Time Protocol", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 39, No. 10, October 1991.
86. 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, Aug. 1982, pp. 2892-2898.
87. L.Eriksson, M.Saha, S.D.Rockfeller, "An Accurate Fault Location with Compensation for Apparent Reactance in the Fault Resistance Resulting from Remote-end in feed", *IEEE Trans. on PAS*, PAS-104, No 2, 1985
88. A.Sauhats, M.Danilova, "Fault Location Algorithms for Super High Voltage Power Transmission Lines", in *Proc. 2003 IEEE Bologna Power Tech Conf.*