Augstsprieguma līniju bojājuma vietas noteikšanas algoritmu sintēze

A. Sauhats, A. Joņins, M. Bočkarjova

RTU EEF ENERĢĒTIKAS INSTITŪTS

Saturs

SATURS **1**

ATTĒLU SARAKSTS **5**

TABULU SARAKSTS **6**

1. IEVADS **7**

1.1. DARBA AKTUALITĀTE 7

2. AUGSTSPRIEGUMA ELEKTROPĀRVADES LĪNIJU BOJĀJUMU VIETU NOTEIKŠANAS METODES UN TO REALIZĀCIJAS LĪDZEKĻI **9**

2.1. IEVADS 9
2.2. BVN KLASIFIKĀCIJAS METODES 10
2.3. PAMĀTVIENĀDOJUMI, KAS APRAKSTA PROCESUS BOJĀTĀS LĪNIJĀS 15
2.3.1. Mikroprocesoraizsardzību struktūra *15*
2.3.2. Līnijas ar koncentrētiem parametriem. Nostabilizējošais režīms *16*
2.4. KĻŪDU AVOTI 18
2.5. ALGORITMU ĪPAŠĪBU ANALĪZES METODES 19
2.6. BOJĀJUMA NOTEIKŠANAS VIETU ALGORITMU UN METOŽU REALIZĀCIJA 20
2.6.1. BNV līdzekļu attīstības etapi *20*
2.6.2. BNV mikroprocesoru līdzekļi *22*
2.7. MŪSDIENU BNV LĪDZEKĻU ELEMENTU TEHNISKIE RAKSTUROJUMI. 24
2.8. STRĀVU UN SPRIEGUMU PIRMĒJIE PĀRVEIDOTĀJI 25
2.9. STRĀVAS UN SPRIEGUMU VEKTORU PARAMETRU NOVĒRTĒJUMS. 27
2.10. SECINĀJUMI 27

3. BOJĀJUMU NOTEIKŠANAS VIETAS BĀZES ALGORITMI. **29**

3.1. IEVADS 29
3.2. AUGSTSPRIEGUMA LĪNIJAS BOJĀJUMU MEKLĒJUMI. 30
3.3. HOMOGĒNU, ATSEVIŠĶI STĀVOŠU AL VIENPUSĒJIE ALGORITMI. 31
3.4. BNV ALGORITMU SINTĒZES STATISTISKĀ PIEEJA. 33
3.4.1. Ar Monte–Karlo metodi pamatotie BNV algoritmi *34*
3.4.2. Statistiski adaptīvais BNV algoritms *37*
3.4.3. Ievērojama garuma līniju BNV algoritmi *38*
3.4.4. BNV divpusējās metodes *39*
3.4.5. Ar jaudu kontroli pamatotais divpusējais BNV algoritms *40*
3.4.6. Divpusējas BNV iterācijas algoritms *41*
3.4.7. BNV kvadrātiskais divpusējais algoritms *42*
3.4.8. BNV divpusējs algoritms, kas pamatots ar pirmsavārijas režīma kontroli *43*
3.4.9. Algoritms, kas pamatos ar pārejas pretestības izmaiņu kontroli *44*
3.5. ELEKTROPĀRVADES LĪNIJAS SLĒDŽU VIENMĒRĪGS ATSLĒGUMS UN IESLĒGŠANĀS 46
3.5.1. No kontrolējamā gala puses barojama bojātā AL *47*
3.5.2. No AL nekontrolējamā gala barota bojātā AL *47*
3.6. DIVĶĒŽU LĪNIJAS 48
3.7. SECINĀJUMI 50

4. BOJĀJUMU VIETU NOTEIKŠANAS ALGORITMU EFEKTIVITĀTE **51**

4.1. EFEKTIVITĀTES KRITĒRIJI UN TO APRĒĶINU PROCEDŪRA 51
4.2. BOJĀJUMA VIETAS PĀREJAS PRETESTĪBU REĀLIE UZDEVUMI 53
4.3. BAROJOŠO ENERGOSISTĒMU EKVIVALENTO PRETESTĪBU SADALĪJUMA LIKUMI 56
4.4. EMPĪRISKĀ SADALĪJUMA LIKUMA UZBŪVE AR STATISTISKI ADAPTĪVO ALGORITMU 57
4.5. BOJĀJUMA VIETAS NOTEIKŠANAS STATISTISKI ADAPTĪVAIS ALGORITMS. 59
4.6. SECINĀJUMI 60

5. REALIZĀCIJA, IEVIEŠANA, EKSPLUATĀCIJAS PIEREDZE **61**

5.1. IEVADS 61
5.2. APARĀTREALIZĀCIJA. 61
5.3. PROGRAMMNODROŠINĀJUMS 62
5.4. APAKŠĒJĀ LĪMEŅA IEKĀRTAS 63
5.5 ENERGOSISTĒMAS DISPEČERA DATORU PROGRAMMNODROŠINĀJUMS 65
5.6 NOVĒROŠANAS LOGA IEDARBE, APTURE UN IZVĒLE 66
5.7. ELEKTROPĀRVADES LĪNIJAS APSKATES IECIRKŅA GARUMA IZVĒLE. 69
5.8. GADĪJUMA SKAITĻU ĢENERATORA REALIZĀCIJA. 71
5.9. BOJĀJUMA VEIDA UN BOJĀTO FĀŽU IDENTIFIKĀCIJA 72
5.10. SECINĀJUMI 74

6. NOSLĒGUMS 75

6.1. SECINĀJUMI 75
6.2. NĀKOTNES DARBS 76

7. LITERATŪRAS SARAKSTS 77

Attēlu saraksts

ATT.2.1 110 UN 330 KV LĪNIJU ATSLĒGŠANAS STATISTIKA 9
ATT. 2.2 BVN METODES KLASIFIKĀCIJA 11
ATT 2.3 MĒRĪJUMU SINHRONIZĀCIJA 13
ATT.2.4 ELEKTROPĀRVADES LĪNIJAS TRASES MĒRĪJUMU ORGANIZĀCIJA 13
ATT. 2.5 ELEKTROPĀRVADES LĪNIJU SHĒMA 15
ATT. 2.6 ELEKTROPĀRVADES LĪNIJU AIZVIETOŠANAS SHĒMA 16
TABULA 2.1. BNV LĪDZEKĻU ATTĪSTĪBAS ETAPI. 20
ATT.2.7 BNV SISTĒMAS STRUKTŪRA 22
ATT. 2.8 SIGNĀLU ANALOGU-CIPARU PĀRVEIDOŠANA 23
ATT. 2.9 PĀRVEIDOŠANAS KANĀLU APARĀTREALIZĀCIJA 23
ATT. 2.10 STRĀVAS OSCILOGRAMMA TIALŠIAI APAKŠSTACIJAI 26
ATT. 3.1. BOJĀJUMA NOTEIKŠANA AL TRASĒ. 30
ATT. 3.2 EPL EKVIVALENTĀ SHĒMA 31
ATT.3.3 STATISTISKĀ ALGORITMA STRUKTŪRSHĒMA 35
ATT.3.4 SAREŽĢĪTAS KONFIGURĀCIJAS PĀRVADES LĪNIJAS PIEMĒRS 35
ATT.3.5 STATISTISKĀ ALGORITMA STRUKTŪRA 36
ATT.3.6 TIPISKA APAKŠSTACIJAS STRUKTŪRA 37
ATT.3.7 EMPĪRISKĀ SADALĪJUMA LIKUMA APRĒĶINU ALGORITMA STRUKTŪRA PRETĒJĀ GALA EKVIVALENTAI PRETESTĪBAI 37
ATT.3.8 SADALĪJUMA LIKUMA IZVĒLES PROCEDŪRA 38
ATT.3.9 BNV ITERĀCIJAS ALGORITMA STRUKTŪRA 42
ATT. 3.10 ISSLEGUMA OSCILOGRAMMA 45
ATT.3.11 SPRIEGUMA TRANSFORMATORI, KAS PIESLĒGTI NO AL PUSES. 48
ATT.3.12. TĪKLA GREDZENSHĒMA 50
ATT.4.1 BNV ALGORITMA OPTIMIZĀCIJAS PROCEDŪRAS STRUKTŪRA 52
ATT.4.2 PĀREJAS PRETESTĪBAS R_F SADALĪJUMA EMPĪRISKĀ LIKUMA VEIDOŠANAS ALGORITMA STRUKTŪRSHĒMA 54
ATT.4.3 PĀREJAS PRETESTĪBAS R_F SADALĪJUMA HISTOGRAMMA 55
ATT.4.4. PĀREJAS PRETESTĪBAS LIELUMA IZMAIŅA LAIKĀ 55
ATT.4.5 EKVIVALENTĀS PRETESTĪBAS SADALĪJUMS 56
ATT.4.6 STATISTISKI ADAPTĪVĀ ALGORITMA STRUKTŪRSHĒMAS FRAGMENTS 57
ATT.4.7. APRĒĶINĀMĀS BOJĀJUMA VIETAS HISTOGRAMMA 59
ATT.5.1. REĢISTRATORU APARĀTREALIZĀCIJA 62
ATT.5.2. APAKŠĒJĀ LĪMEŅA IEKĀRTU FUNKCIONĒŠANAS ALGORITMA STRUKTŪRA 63
TABULA 5.1. APAKŠĒJĀ LĪMEŅA IEKĀRTU PROGRAMMNODROŠINĀJUMA FUNKCIONĀLĀS GRUPAS 64
ATT.5.3 DATU SAŅEMŠĀNA REMILINK PROGRAMMĀ 66
ATT.5.4 PROCESA OSCILOGRAMMAS PIEMĒRS. 67
ATT.5.5 PROGRAMMAS VEKTROID II DARBĪBAS REZULTĀTS 68
ATT5.6 . NOVĒROŠANAS LOGA IZVĒLES ALGORITMAM 69
ATT.5.7 FUNKCIJAS (5.8.) GRAFIKS 70
ATT.5.8 FON NEIMAŅA ALGORITMA STRUKTŪRA 71
ATT.5.9 GADĪJUMA LIELUMA SADALĪJUMA PAKĀPIENVEIDA FUNKCIJA 72

Tabulu saraksts

TABULA 2.1. BNV LĪDZEKĻU ATTĪSTĪBAS ETAPI. 20
TABULA 5.1. APAKŠĒJĀ LĪMEŅA IEKĀRTU PROGRAMMNODROŠINĀJUMA FUNKCIONĀLĀS GRUPAS 64

1. Ievads

1.1.Darba aktualitāte

Elektroenerģētisko sistēmu efektivitāte un drošība lielā mērā nosaka rūpnieciski attīstīto valstu attīstības iespējas. Ekspluatējot elektroenerģētiskās sistēmas jāņem vērā bojājumi to elementos: ģeneratoros, transformatoros, elektropārvades līnijās u.c. Energosistēmas elementu bojājumu samazinājumu sekmē daudzu zinātnes un tehnikas nozaru sasniegumu izmantošana – tiek izmantoti arvien jaunāki materiāli, attīstās diagnostikas metodes. Daudzu svarīgāko elementu darbības atteikuma gaidīšanas vidējais laiks sasniedz desmitiem gadu. Vienlaicīgi, bojājumiem notiekot salīdzinoši reti, rodas procesi, kas var traucēt darbaspēju visai sistēmai kopumā vai sabojāt daudzus tās elementus. Konkrēti teiktais zīmējas uz elektropārvades līnijām – sistēmas objektu, kas tiek bojāts visbiežāk. Elektropārvades gaisa līnijas ietekmē daudzi faktori, kas spēj izraisīt bojājumus. Augstvoltāžas elektropārvades gaisa līniju biežākais bojājumu veids ir īsslēgumi. Notiekot īsslēgumiem (vētras, zibens spērieni, zemestrīces, vadu pārrāvumi, koku lūzumi utml.) rodas procesi, kas bīstami visai sistēmai. To ātrai pārtraukšanai tiek izmantotas releju aizsardzības un pretavārijas automātikas iekārtas. Tās kontrolē procesus, kas noris elektroenerģētiskās sistēmas elementos, nosakot bīstamos, un, iedarbojoties uz slēdžiem, atslēdz bojātos elementus. Bojātas elektropārvades līnijas bloķēšanas gadījumā rodas jautājums par bojājuma vietu un tiek noteikts uzdevums par darbaspējas atjaunošanu. Ja nav pieejami speciāli bojājuma vietas lokalizācijas līdzekļi, tās meklējumi var prasīt desmitiem stundu. Šajā gadījumā nepieciešama visas elektropārvades līnijas desmitiem, vai pat simtiem kilometru garās trases apskate. Trase var iet caur grūti pieejamiem apgabaliem, un bojājumi rodas naktīs, sniegputeņu un vētru laikā. Visi šie faktori papildus paildzina elektropārvades līnijas bojājuma vietas meklējuma laiku, padarot neiespējamu normālu sistēmas funkcionēšanu kopumā. Ar atslēgtu līniju no ekonomiskā un drošības viedokļa enerģētiskā sistēma strādā pavājinātā režīmā. Daļa elektroenerģijas lietotāju var tikt atslēgta, var pieaugt jaudas zudumi tīklā, kādas no līnijām piespiedu atslēgšanās noved pie energosistēmas drošības un tās dinamiskās stabilitātes samazināšanās.

Lai atvieglotu un paātrinātu bojājumu vietu meklējumus, sākot ar pagājušā gadsimta 30. gadiem tiek pielietoti speciāli līdzekļi, kas nodrošina automātisku pieslēgumu rodoties avārijas režīmam, kā arī nosaka bojājumu mērījumu un tā parametra fiksāciju. Tomēr, vēl arvien nav atrasti universāli, pietiekami lēti, droši un precīzi līdzekļi un metodes, kas nosaka attālumu līdz bojājumu vietai. Tāpēc aktuāli ir dotās problēmas novēršanas efektivitātes palielināšanas pētījumi.

Elektropārvades līniju bojājumu lokalizācijas aktualitāte kļūst jo vairāk svarīgāka pārveidojot energosistēmas darbam jaunos apstākļos no sistēmas un patērētāja viedokļa. Energosistēmai vai tās daļai ir jāgarantē nepārtraukta enerģijas padeve. Pārkāpjot saistības ir jāmaksā sodi. Bojājuma vietu noteikšanas efektīvu līdzekļu izmantošana lielā mērā samazina izdevumus, kas rodas no šiem sodiem.

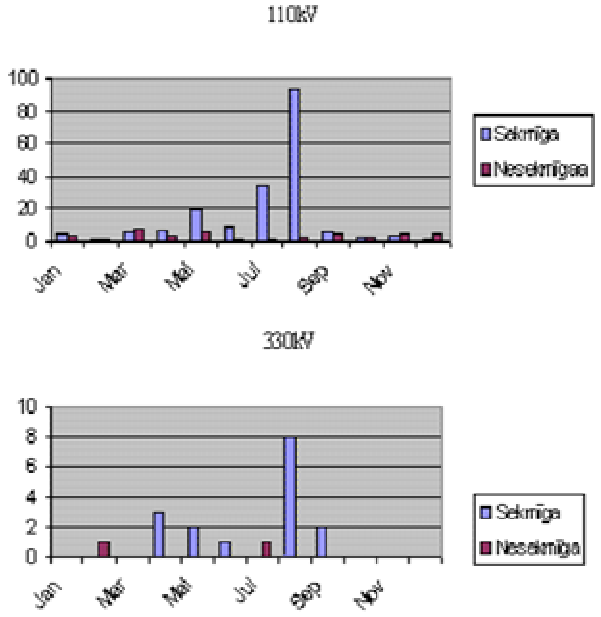
Ir netieši, bet pietiekami ievērojami pamatojumi šī uzdevuma aktualitātei. Daudzi desmiti zinātnisko publikāciju norāda uz pētījumiem, kas tiek veikti dažādās pasaules valstīs. Pētnieku interesi pret šo uzdevumu, neskatoties uz tā aktualitāti, nosaka arī jauni līdzekļi tās risinājumam. Pirmkārt, mikroprocesoru tehnika, jaunas metodes un sakaru līnijas. Energosistēmas masveidā tiek aprīkotas ar relejaizsardzības un automātikas mikroprocesoriekārtām. Plašu pielietojumu ir guvušas avārijas procesu reģistrācijas ciparu sistēmas. No bojājumu vietas noteikšanas uzdevuma viedokļa šiem līdzekļiem piemīt jaunas, noderīgas funkcijas – avārijas procesa ieraksta, tā uzglabāšanas un informācijas pārraides iespējas energosistēmas dispečeru datoriem. Pie tam daudzos gadījumos jaunu elektropārvades līniju bojājuma lokalizācijas metožu un algoritmu īstenošana nozīmē programmatiskā nodrošinājuma nomaiņu, neaiztiekot doto sistēmu aparātu daļu. Augstāk minētais nodrošina jaunu metožu un algoritmu praktiskās ieviešanas dinamismu energosistēmu ekspluatācijā.

2. Augstsprieguma elektropārvades līniju bojājumu vietu noteikšanas metodes un to realizācijas līdzekļi

Elektropārvades līnijas bojājamība. BNV metožu klasifikācija. Vienpusīgas un divpusīgie metodi, sakāru kanāli, BNV ka identifikācijas uzdevums. Mērījumu sinhronizācija. Izmantotie vienādojumi: atsevišķos atvasinājumos, parastie diferenciālie, algebriskie. Nenoteiktās vai varbūtībās faktoru ietekme. BNV līdzekļu sistēmas struktūra un mikroprocesoru BNV līdzekļu struktūra. Izmantojamie elementi un tās raksturojumi. Kļūdu avoti. BNV algoritmu īpašību analīzes metodes.

2.1.Ievads

Elektropārvades augstsprieguma līnijas nodrošina ražotāju – elektrostaciju elektroenerģijas plūsmas nodošanu ģeogrāfiski sadalītiem lietotājiem. Dažādu faktoru ietekmē elektropārvades līnijas ir pakļautas bojājumiem (atmosfēras un klimatiskās parādības, cilvēka darbība, floras un faunas iedarbība, izolatoru un balstu novecošanās u.c.). Bojātās līnijas tiek atslēgtas ar slēdziem, kurus vada relejaizsardzības iekārtas [10,20]. Ievērojams skaits bojājumu ir nestabili [20]. Šis fakts tiek plaši izmantots, lai ātri atjaunotu elektropārvades līniju darbaspējas. Tiek realizēta automātiska atpakaļ ieslēgšana (AAI), kas vairumā (60–70%) gadījumu ir sekmīga (Att.2.1.). Ja gadījumā AAI rezultāts ir nesekmīgs, rodas nepieciešamība novērst bojājumu, ko veic speciālas remontbrigādes. Pirmā operācija šajā procesā ir bojājuma vietas lokalizācija , kas ir darbietilpīga un ilga.



Att.2.1 110 un 330 kV līniju atslēgšanas statistika

Elektropārvades līniju garums ir desmitiem un simtiem kilometru. To trase var iet caur apvidu ar sarežģītiem šķērsošanas apstākļiem: mežiem, purviem, šķērsot upes, kalnus. Lai atvieglotu bojājuma vietas noteikšanas uzdevumu tiek izmantoti speciāli līdzekļi, kas nodrošina bojājuma vietas lokalizāciju. Pietiekami precīza bojājuma vietas noteikšana sekmē ātru bojātās elektropārvades līnijas darbaspēju atjaunošanu, kas nodrošina energoapgādes drošības pieaugumu, elektroenerģijas patēriņa samazināšanos un zaudējumus, kas rodas no elektrobarošanas pārtraukumiem.

Arī sekmīga AAI gadījumā tāpat ir vēlama nestabilā bojājuma vietas atrašana. Šādi bojājumi var atkārtoties, ja to cēlonis nebūs novērsts (piemērām, uz trases augošs koks). Tātad, nestabila bojājuma vietas atrašana ir svarīgs uzdevums no profilaktisko, līnijas darba drošības uzlabošanas viedokļa. Tomēr, nestabila bojājuma lokalizācija bieži vien ir sarežģīta, jo tie var neatstāt redzamas pēdas elektropārvades līnijas trasē.

Elektropārvades līnijas bojājuma vietas noteikšanas (BVN) uzdevums ir formulēts jau 20.gs 30–jos gados. Ir izstrādātas daudzas noteikšanas metodes un līdzekļi to realizācijai [16,17,25,26]. Mikroprocesoru tehnikas radīšana atļāva izskatāmā jautājuma risinājuma tālākas precizitātes un efektivitātes paaugstināšanas iespēju paplašināšanu.

Dotā darba, tāpat kā arī daudzu desmitu citu tālāk aplūkotu darbu, mērķis ir augstsprieguma energopārvades līniju ar zemētu neitrāli bojājumu vietu noteikšanas metodes uzlabošana. Galvenais līdzeklis pie tam paliek mikroprocesoru tehnika, kas ir spējīga uzticami, ar nelieliem izdevumiem realizēt sarežģītus, ar lielu skaitļošanas apjomu saistītus algoritmus.

2.2.BVN klasifikācijas metodes

BVN metodes var tikt sadalītas divās nevienmērīgās grupās (2.2. Att.):

1. Metodes, kas tiek realizētas uz bojātas un no energosistēmas atslēgtas līnijas. Šajā gadījumā tiek izmantots lokācijas princips [67]. Vienā no elektropārvades līnijas galiem tiek veidoti sprieguma impulsi un tiek mērīts laiks to ceļam līdz bojājuma vietai un atpakaļ. Metode nodrošina augstu precizitāti, bet tai ir divi būtiski trūkumi: 1) to nevar izmantot nestabilu bojājumu gadījumā un 2) stabilu bojājumu gadījumā šī metode lielākoties ir darboties nespējīga. Pēdējo apgalvojumu izsauc tas, ka vairumā gadījumu bojājumu vietā rodas nelineāra pretestība, kurai ir ievērojams omu daudzums pie zemiem spriegumiem (atslēgta līnija) un dažu vai desmitu omu lielumi pie ievērojamām strāvām un spriegumiem. Izskatāmā metode guvusi plašu pielietojumu kabeļu BVN un ļoti ierobežotu pielietojumu gaisa elektropārvades līnijās.
2. Metodes, kas tiek realizētas procesu parametru mērījumu veidā, kas noris laikā no īssavienojuma rašanās brīža līdz bojātās elektropārvades līnijas atslēgšanās brīdim. Parastu tiek realizēta strāvas un spriegumu mērījumu kontrole[1]. Mērāmie spriegums $\underline{u}$ un strāva $\underline{i}$ ir atkarīgi no laika t, attāluma l līdz īssavienojuma vietai, īssavienojuma veida V, energosistēmas un līnijas zināmajiem

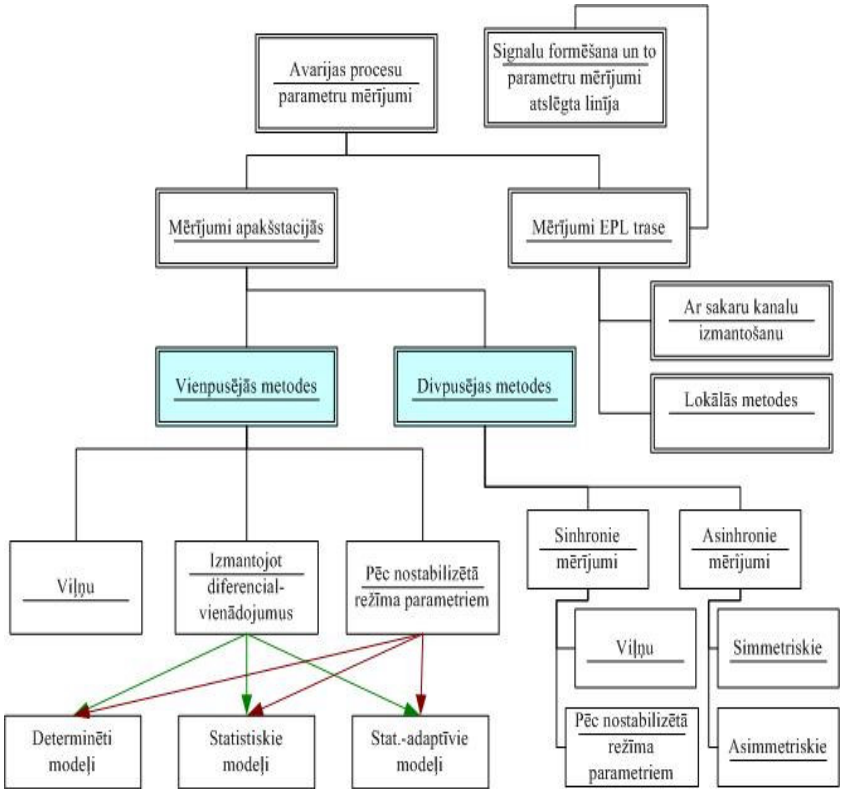
[1] Ir zināmi 2 izņēmumi:
1. Reizēm tiek izmantota īsslēguma procesa video novērošana. Šī metode, diemžēl, prasa lai videokameras tiek uzstādītas visā elektropārvades līnijas trases garumā, ka arī barošanas blokus (rekomendēta saules bateriju izmantošana) un sakāru kanālus attēla saņemšanai no visas videokameras. Realizācijas un ekspluatācijas augsto izmaksu dēļ, tuvajos laikos šī metode netiek uzskatīta par iespējamo.
2. Tiek izmantota radioviļņu izstarojuma parādība īsslēguma procesā [1]. Diezgan vienkārša, pirmā skatījumā metode (bojājuma vietas radiolokācija), praktiski ir ļoti grūti realizējams. Piemēram, radiostarojumu pērkonu negaisa laikā rašanas dēļ. Pētījumi šī metodes izmantošanas iespējāmībai atrodas sakuma stadijā.

parametriem $\underline{P}$ un, iespējams, no nezināmiem parametriem $\underline{S}$, tātad tiek kontrolēti procesi $\underline{K}(t)$:

$$\underline{K}(t) = \left[\underline{u}(t,l,V,\underline{P},\underline{S}),\underline{i}(t,l,V,\underline{P},\underline{S})\right]. \qquad (2.1)$$

Kontrolējamie procesi, pie zināmā bojājuma V ir saistīti savā starpā attiecībā $\underline{\varphi}_V$ (algebrisko vai diferenciālo vienādojumu sistēma):

$$\underline{\varphi}_V\left[\underline{u}(t,l,V,\underline{P},\underline{S}),\underline{i}(t,l,V,\underline{P},\underline{S})\right] = 0. \qquad (2.2)$$



Att. 2.2 BVN metodes klasifikācija

Rezultātā BNV uzdevums var tikt formulēts šādā veidā: kontrolējot (mērot, iegaumējot) strāvas $\underline{i}$ un spriegumus $\underline{u}$, zinot parametrus $\underline{P}$ un informāciju par gadījuma un nenoteikto parametru $\underline{S}$ īpašībām, un attiecību $\underline{\varphi}$, atrisināt vienādojumu sistēmu (2.2) un noteikt nezināmo attālumu līdz bojājumu vietai l. Tādā veidā, izskatāmais BNV uzdevums pieder zināmo un risināmo vadības objektu identifikācijas automātiskās vadības uzdevumu teorijas klasei [138,145]. Pie tam izskatot vienādojumus (2.2), vispārīgi varam apgalvot:

- $\underline{\varphi}_V$ – var saturēt nelineārus, stohastiskus diferenciālvienādojumus atsevišķos atvasinātos lielumos, rezultātā, BVN uzdevums no automātiskās vadības teorijas viedokļa var tikt uzskatīts par piederošu pie īpaši sarežģīto klases [145].

BNV metožu un līdzekļu attīstības vēsture, jaunu algoritmu un līdzekļu izstrādi var uzskatīt kā vienkāršošanas meklējumu procesu (2.2), kas vienlaicīgi nodrošina pieņemamu precizitāti un realizācijas izmaksas. Kā parādīts 2.2. zīmējumā metodes, kas pamatotas ar mērījumiem, kas veikti kontrolējamās līnijas barošanas apakšstacijās, dalās divās grupās:

1. Divpusīgie (retajos trīsgalu līnijās – trīspusējās)
2. Vienpusīgās

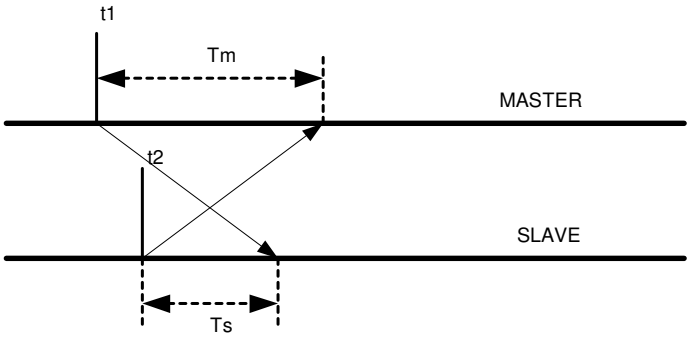
Realizējot pirmās grupas metodes, nepieciešama informācijas apmaiņa starp apakšstacijām. Priekš tam daudzus gadus izmantoja telefonsakarus un dežūrējošo personālu, kas nodrošināja informācijas nolasīšanu un apmaiņu ar to. Organizatoriski šī metode ir neērta, tomēr tā piedāvā BNV realizācijas iespēju, kas pamatojas uz vienkāršu strāvas un spriegumu mērīšanu par pamatu izmantojot nesarežģītas attiecības $\underline{\varphi}_V$ [16,17] (attiecības tiek izskatītas tālāk).

Divpusīgās metodes var sadalīt divās pamātgrupās:

1. Bez mērījumu sinhronizācijas nepieciešamības, kas tiek veikti ģeogrāfiski attālinātos viens no otra energosistēmas punktos. Tieši šis princips daudzus gadus tika izmantots kā galvenais, lai noteiktu elektropārvades līnijas bojājuma vietu. Nesinhrono mērījumu izmantošana iespējama pateicoties $\underline{\varphi}_V$ vienkāršojumam (2.2), bez tam, tas var novest pie mazticamiem, ar lielas BNV rezultātu kļūdas iespējamību.
2. Pamatotas ar sinhroniem mērījumiem. Sinhronizācija var tik veikta ar kādu no trijiem veidiem:
   - Par pamatu izmantojot globālā vienotā laika atskaites sistēmu [4,146]. Šajā gadījumā tiek nodrošināta sinhronizācijas precizitāte ar mikrosekundes daļas kārtu, kas, ievērojot elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrumu apmēram 300 m/μs, principā nodrošina BVN precizitāti ar kārtu daži desmiti metru. Tomēr, mērījumu globālās sinhronizācijas praktiskā realizācija energosistēmā prasa diezgan ievērojamus kapitālieguldījumus un pašreiz tai nav plaša pielietojuma (laika vienotas uzskaites sistēma eksistē ietverot satelītradiokanālus, kas nodrošina sinhronizācijas impulsu pārraidi. Šī sistēma tiek izmantota navigācijā, kosmosā, aviācijā, jūras transportā). Apakšstacijās pietiekami bieži tiek izmantoti radiopulksteņi, kas saņem sinhroimpulsus ar frekvenci reizi minūtē. Šādu pulksteņu izmantošana var nodrošināt sinhronizācijas precizitāti līdz dažu desmitu mikrosekundēm, kas ir nepietiekami lai izmantotu virkni metožu [146], kas ir īpaši jūtīgas pret sinhronizācijas precizitāti.
   - Izmantojot sakaru kanālus. Pie tam tiek pieņemts, ka nav iespējama signāla pārraide ar garantētu un zināmu aizturi (tāda pārraide ir tehniski iespējama, bet ir nesamērīgi dārga. Parasti tiek izmantoti daudzmerķu sakari, pie tam tiek noteikta maksimāli iespējamā pārraidāmā signāla iespējamā

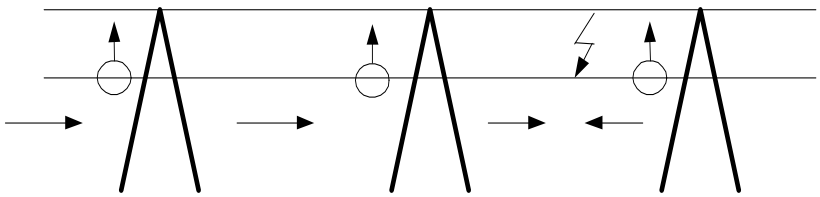
aizture). Tālāk tiek paskaidrots mērījumu sinhronizācijas algoritms, kas balstīts uz tādu kanālu izmantošanu, kas nodrošina maksimālu pārraidāmā signāla aizturi. Divos punktos novietotas ierīces veido "master–slave" pāri [2]. Ierīču darbības diagramma dota 2.3. Att. No sākuma mērījumi tiek veikti nesinhroni t_1 un t_2 laika momentos. Tiek veikta laika mērījumi signāla ienākšanai no otrā mērījumu punkta T_M un T_S, lielums T_M tiek nodots uz otro punktu, kur zinot T_M un T_S ar vienādu signāla nodošanas aizturi viegli ir atrast laika korekciju t_2, kas noved pie vienādojuma $T_M = T_S$.

- Izmantojot spriegumu un elektropārvades līniju galu jaudas saistības vienādojumus pirmsavārijas režīmā. Šī metode var tikt realizēta ar vismazākajiem izdevumiem.



Att 2.3 Mērījumu sinhronizācija

Atsevišķos gadījumos (salīdzinoši īsās līnijās) BNV uzdevums var tik veiksmīgi atrisināts veicot mērījumus elektropārvades līnijas trasē. Šādas metodes tiek pielietotas jau gadu desmitiem un to galvenais trūkums ir, ka fiksējošās ierīces atradās uz līnijas balstiem, bet lai veiktu nolasījumus bija jāpārvietojas trasē. Mūsdienu sakaru kanāli un strāvas elektroniskie pārveidotāji nodrošina šī procesa automatizācijas iespēju [3]. 2.4. zīmējumā parādīta shēma, kas paskaidro šo metodi.



Att.2.4 Elektropārvades līnijas trases mērījumu organizācija

Katrs no rādītājiem pārveidotājiem, kas novietots uz balstiem, veido impulsu pozitīvas strāvas pusviļņa gadījumā. Šis impulss tiek nodots caur optisko kabeli uz vienu no apakšstacijām, kur ir viegli identificēt bojāto iecirkni. Lai to realizētu pietiek izmantot sen zināmu un plaši pielietojamu relejaizsardzībā diferenciālo fāžu principu (rādītāji,

kas aptver bojāto iecirkni, ģenerē impulsus, kas nesakrīt laikā). Diemžēl, izskatītās metodes realizācija prasa ievērojamas izmaksas.

Vienpusīgo metožu priekšrocība ir prasības par informācijas apmaiņas starp diviem attālinātiem viens no otra punktiem neesamība. Tomēr priekš tā izmantotās attiecības $\underline{\varphi}_V$ un to realizācija ir būtiski sarežģītākas.

Lai izveidotu abas izskatāmās metodes var tik izmantoti dažādi vienādojumu veidi:

1. atbilstoši līnijām ar sadalītiem parametriem (diferenciālie vienādojumi atsevišķos atvasinājumos)
2. vienkāršie diferenciālie vienādojumi līnijai ar koncentrētiem parametriem
3. algebriskie vienādojumi, kas atbilst noteiktajiem režīmiem.

Visi nosauktie vienādojumi var saturēt gadījuma vai nenoteiktos parametrus (nekontrolējamos, vai mērāmus ar kļūdu). Stingri runājot, gadījuma vai nenoteiktās parādības avoti BNV uzdevumā pastāv vienmēr(mērījumu kļūdas, trokšņi, virknes parametru izmaiņas, kas rodas no nekontrolējamiem faktoriem). Tomēr, virknē gadījumu, ir iespēja izmantot vienkāršākus un determinētākus vienādojumus, zaudējot precizitāti pieļaujamības robežās. Citos gadījumos gadījuma faktoru uzskaite noved pie realizācijai pieņemamiem sarežģījumiem.

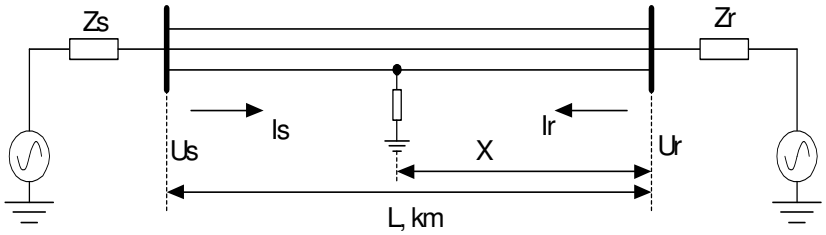
Ar parciālo diferenciālvienādojumu izmantošanu pamatotās metodes sauc par viļņveida. Pirmie šīs metodes izmantošanas mēģinājumi notika 20. gs. 50–jos gados. Mēģinājumi bija neveiksmīgi [147], tomēr interese par tām pieauga pēc globālā vienotā laika sistēmas ieviešanas [146]. Mērījumu starp divām apakšstacijām, kas aptver kontrolējamo līniju, precīzās sinhronizācijas iespējas gadījumā pietiekami fiksēt laika starpību starp strāvas impulsu pienākšanu. Pēc tam attālumu līdz bojājuma vietai var noteikt ar elementāriem aprēķiniem [67,139].

Pēdējā laikā arvien lielāku popularitāti iegūst bojājuma noteikšanas metodes, kas pamatojas uz mākslīgo neirona tīklu (MNT) izmantošanu [62, 91, 92, 110]. To darbības un uzbūves princips tika ņemts no pētījumiem par cilvēka smadzeņu funkcionēšanu. Diemžēl, šī joma vēl nav pietiekami izpētīta, un kā rezultāts MNT ir virkne trūkumu. Neironu tīklu pamatīpašība ir pašapmācības iespēja, un kā rezultāts arī iespēja atpazīt arī atsevišķus notikumus, objektus un noteikumus attiecībā uz kuriem dotais tīkls ir bijis trenēts. Tieši šī MNT īpašība ir radusi pielietojumu BNV uzdevumu realizācijā [36, 109]. Mūsdienu datortehnikas skaitļošanas jaudas ļauj veikt pietiekami lielu datu apjomu apstrādi un analīzi, kas vēl lielākā mērā veicina izmantot algoritmus, kas pamatojas ar MNT, jo tie pieprasa lielas ienākošās informācijas apstrādi, kā arī nemitīgu tās analīzi, izmantojot jau savāktos datus. It sevišķi labus rezultātus dod MNT izmantošana, kad jānosaka bojājuma veida noteikšana [36]. BNV algoritmu precizitāte izmantojot MNT ir atkarīga no liela faktoru skaita, un salīdzinājuma ar „klasiskajiem algoritmiem" tā var atšķirties gan labākā, gan sliktākā virzienā [49]. Atsevišķos gadījumos neironu tīklus ir iespējams izmantot lai fiksētu bojājuma vietu reālā laikā [38].

2.3. Pamātvienādojumi, kas apraksta procesus bojātās līnijās

2.3.1. Mikroprocesoraizsardzību struktūra

Izskatīsim trīsfāzu, vispārējā gadījuma nesimetrisku elektropārvades līniju, kuras shēma ir parādīta 2.5. Att.



Att. 2.5 Elektropārvades līniju shēma

Fāžu strāvas un spriegumu attālumā x tiek noteiktas ar matriču diferenciālajiem vienādojumiem atsevišķos atvasinājumos:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial x} &= RI + L\frac{\partial i}{\partial t} \\ \frac{\partial i}{\partial x} &= GV + C\frac{\partial v}{\partial t} \end{aligned}\right\}, \qquad (2.3)$$

kur R, L, G, C – atbilstoši pretestības, induktivitātes, vadāmības un kapacitātes matricas. V un I – *3x1* fāžu strāvu un spriegumu vektori, bet *3x3* parametru matricām ir struktūra (parādīta uz induktivitātes piemēra):

$$L = \begin{bmatrix} L_S & L_M & L_M \\ L_M & L_S & L_M \\ L_M & L_M & L_S \end{bmatrix}, \qquad (2.4)$$

Vienādojumi (2.3) var tikt izmantoti trijos pamatveidos:

1. Izskatot pārejas procesu dažās pirmajās milisekundēs pēc īssavienojuma [4]. Pie tam rodas relatīvi sarežģīti algoritmi un rodas augstas prasības pret strāvas un spriegumu diskretizācijas frekvenci (ar kārtu 10 kHz un vairāk). Kontrolējamie signāli nevar tikt pakļauti iepriekšējai filtrācijai, tādēļ realizācijā tas noved pie traucējumu stabilitātes samazināšanās.
2. Neņemot vērā šķērsenisko kapacitātes un vadāmības iespaidu. Šajā gadījumā (2.3) vienkāršojas un kļūst par parastu diferenciālvienādojumu.
3. Izskatot nostabilizējošos režīmu ar sinusoidāliem strāvām un spriegumiem. Šajā gadījumā, kā parādīts [5] rodas iespēja uzbūvēt tehniski mūsdienīgu algoritmu, kas pamatojas ar divpusīgo metodi un sinhrono mērījumu izmantošanu. Pie tam par pamatu ņemot Klarka pārveidojuma izmantošanu:

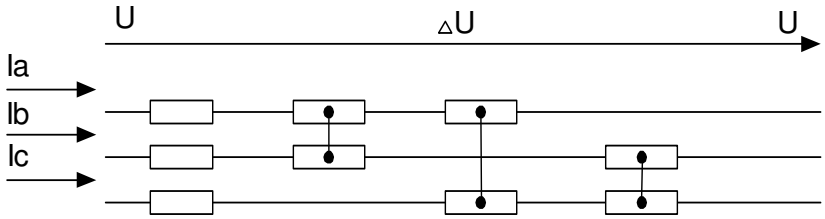
$$\begin{vmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{vmatrix} = T \begin{vmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{vmatrix},$$

$$\text{kur } T = 1/\sqrt{3} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 1 & -1/\sqrt{2} & \sqrt{3}/\sqrt{2} \\ 1 & -1/\sqrt{2} & -\sqrt{3}/\sqrt{2} \end{vmatrix}$$

Šī pārveidojuma izmantošana piedāvā iespēju mērīt līnijas parametrus pirmsavārijas režīmā. Šī pieeja, kas pieprasa vienotā laika sistēmas izmantošanu, tālāk netiek izskatīta. Tās vietā, tiek analizētas līnijas ar koncentrētiem parametriem un kļūdu kompensācijas iespēju, kas rodas no pieņemtā tuvinājuma.

2.3.2. Līnijas ar koncentrētiem parametriem. Nostabilizējošais režīms

Izskatīsim trīsfāzu, asimetrisku, neordināru elektropārvades līniju ar koncentrētiem parametriem, kuras aizvietošanas ekvivalentā shēma parādīta 2.6. Att.



Att. 2.6 Elektropārvades līniju aizvietošanas shēma

Aizvietošanas shēmas pamatā mēs varam atrast spriegumu kritumu ΔU no ierīces (mērijuma) vietas līdz bojājuma vietai:

$$\Delta U = \begin{bmatrix} Z & Z & Z \\ Z & Z & Z \\ Z & Z & Z \end{bmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I \\ I \\ I \end{vmatrix} = \mathbf{ZI} \qquad (2.5.)$$

Simetriskās 3x3 matricas **Z** diagonālie elementi ir fāžu induktīvā pretestība, to starpību nosaka katras fāzes dažādais vads–zeme attālums.

Vienas no fāzes uz zemi un simetriskas trīsfāžu elektropārvades līnijas īsslēguma gadījumā, izmantojot (2.5), simetrisko komponenšu metodi, kā arī ievērojot pārejas pretestības R_F esamību bojājuma vietā, tās divvirziena barošanas gadījumā, iegūstam

$$\left.\begin{aligned} U_1^{'} &= I_1^{'} Z_1 l + R_F I_1^F \\ U_2^{'} &= I_2^{'} Z_2 l + R_F I_2^F \\ U_0^{'} &= I_0^{'} Z_0 l + R_F I_0^F \end{aligned}\right\}, \qquad (2.6.)$$

kur Z_1, Z_2, Z_0 – elektropārvades līnijas īpatnējās pretestības (Om/km), atbilstoši tiešās, apgrieztās un nulles secībās. Elektropārvades līnijām parasti $Z_1 = Z_2$;
U_1, U_2, U_0 – indeksiem atbilstošie sprieguma simetriski komponenti, bet I_1, I_2, I_3 – strāvas;
R_F – pretestība bojājuma vietā;
I_1^F, I_2^F, I_0^F – bojājuma vietas strāvu simetriskie komponenti. Pie tam

$$\left.\begin{aligned} I_1^F &= I_1^{'} + I_1^{''} \\ I_2^F &= I_2^{'} + I_2^{''} \\ I_0^F &= I_0^{'} + I_0^{''} \end{aligned}\right\}, \qquad (2.7.)$$

kur $I_1^{''}, I_2^{''}, I_0^{''}$ - strāvu simetriskie komponenti, kas baro bojājuma vietu no elektropārvades līnijas otra gala (Att.2.5).

2.3.2. nodaļā izskatītie vienādojumi ir par pamatu lielākajai daļai praktiski izmantojamo BNV algoritmu. Pamatā tie tiks izmantoti arī šajā darbā. Izņēmums būs tikai to līniju analīze, kas pakļautas mijinduktivitātes parādībai, un ievērojama garuma līniju analīze, kur nepieciešama škērseniskās vadītspējas un kapacitātes uzskaite [67,139].

Vienādojums (2.6.) ļauj izskaidrot galveno vienvirziena un divvirziena BNV metožu būtību.

Saskaitot 2.6. vienādojumus un pēc elementāriem pārveidojumiem iegūstam:

$$U_F^{'} = (I_F^{'} + kI_0^{'}) Z_1 l + 3R_F I_0^F \quad , \quad (2.8.)$$

kur $k = \dfrac{z_0 - z_1}{z_0}$.

Vienādojums (2.8) satur nekontrolējamo saskaitāmo $3R_F I_0^F$, bet zināmie vienvirziena BNV algoritmi pamatojas ar tuvinātu risinājumu (2.8), kas tiek realizēts par pamatu ņemot papildus hipotēzes, piemēram:

- $R_F = 0$ [ ];
- $\arg I_0 = \arg I_0^F$ [67];
- $\arg I_2 = \arg I_0^F$ [67];
- $\arg(I_0 + I_2) = \arg I_0^F$ [ ];
- Viena no pretestībām $Z_{S0}^{''}, Z_{S1}^{''}, Z_{S2}^{''}$ ir zināma [ ];

BNV divpusējo metožu pamatā var būt ņemti (2.6) vienādojumi (viens no trijiem vai to apvienojums). Pie tam tiek izmantoti vienādojumi, sastādīti ņemot vērā līnijas abus galus, piemēram:

$$U_2^{'} - I_2^{'} Z_1 l = U_2^{''} - I_2^{''} Z_1 (L - l) . \quad (2.9.)$$

Pie zināma līnijas garuma L, lai noteiktu l, tiek izmantotas trīs pamatmetodes:

1. Tiek izmantotas $\arg U_2^{'} = \arg U_2^{''} = \arg(I_2^{'} Z_1) = \arg(I_z^{''} Z_1)$. Tieši šī metode ir galvenā bijušās Padomju Savienības energosistēmās.
2. Tiek veikta mērījumu sinhronizācija, kas nodrošina precīzu risinājumu (2.9) pret nezināmo l bez papildus pieņēmumu pieņemšanas.
3. Sinhronizācija netiek veikta, bet nezināmais leņķis starp atbilstošajiem vektoriem tiek meklēts par pamatu ņemot Ņūtona–Rafsona procedūru [6].

2.4.Kļūdu avoti

Kļūdas, kas rodas nosakot bojājuma vietu var tikt sadalītas divās kategorijās:

1. Algoritmiskās [18,19], vai metodiskās, ko nosaka tuvinājumu izmantošana, kā arī atsevišķu ietekmējošo faktoru un parādību neuzskaitīšana.
2. Instrumentālās, kas rodas no izvēlēto algoritmu neprecīzas aparatrealizācijas.
3.

Algoritmiskās kļūdas dabiski nosaka izvēlētais BNV algoritms. Tātad, ievērojot to, ka BNV uzdevums var tikt skatīts kā procesu identifikācijas uzdevums, kurus apraksta $\underline{\varphi_V}$ attiecības (2.2.), kļūdu avoti ir visi tuvinājumi un pieļāvumi, kas pieņemti šo attiecību sastādīšanā. BNV uzdevums daudzējādā ziņā var tikt izskatīts kā pretējs uzdevums īsslēguma strāvu aprēķinam (strāvu un spriegumu aprēķins zināma veida un vietas īsslēgumiem). Tāpēc abiem uzdevumiem piemīt vieni un tie paši kļūdu avoti:

- tuvināta ģeneratoros un patērētājos notiekošo procesu un iespaidu uzskaite;
- līnijas parametru atkarības no temperatūras, mitruma neuzskaite. Pretestību nelineāritātes neuzskaite, piemēram, nulles secības;
- šķērsenisko vadāmību un kapacitāti neuzskaite;
- trīsfāžu elektropārvades līniju nesimetrijas neuzskaite;
- līniju neviendabīguma neuzskaite (transpozīcija, dažāda augstuma balsti, tādu iecirkņu esamība, kur tiek izmantoti dažādu marku vadi, mainīgs reljefs apvidū, caur kuru iet trase);
- transformatoru magnētisko strāvu lēcienu neuzskaite [19,142];
- mijinduktivitātes ar citām elektropārvades līnijām parādības nepilnīga uzskaite;
- frekvences lieluma iespējamo noviržu no rūpniecisko vai nominālo vērtību neuzskaite;
- sinusoidālo procesu matemātisko aparātu izmantošana, lai aprakstītu nesinusoidālus procesus.
-

Nosauktie algoritmisko kļūdu cēloņi dažos gadījumos var tikt ievēroti. Vēl jo vairāk, BNV metožu un līdzekļu attīstības vēsture, principā var uzskatīt kā pieņemami lētu un realizācijā drošu paņēmienu meklējumu vēsturi, kas samazina šo cēloņu ietekmi.

Instrumentālo kļūdu ietekme pārejot uz mikroprocesoru elementu bāzi ir ļoti samazinājusies, jo daudzas operācijas – signālu analogu–ciparu pārveidošana, to mērogošana, aritmētiskās un citas skaitļošanas darbības tiek veiktas ar elementiem, kuru raksturlielumi ir pietuvināti ideālajiem.

2.5. Algoritmu īpašību analīzes metodes

BNV algoritmu īpašību analīzes pamats ir kontrolējamo procesu un tieši pētāmo BNV algoritmu kopīga modelēšana.

Kontrolējamo procesu modelēšana tiek veikta izmantojot labi izstrādātas, rūpnieciski ekspluatējamas programmas [ ], kas nodrošina strāvu un spriegumu izmaiņu procesu skaitļošanu ar augstu precizitātes pakāpi. Tiek izmantoti detalizēti elektropārvades līniju modeļi, kas ļauj ņemt vērā daudzus, pat atšķirīgus faktorus (līniju nesimetrija, vadu transpozīcija, šķērseniskā vadāmība un kapacitāte u.c.).

Tieša BNV algoritmu modelēšana un programmēšana, īpaši mikroprocesoru, pateicoties to vienkāršībai nerada grūtības.

Pēdējās desmitgades laikā, pateicoties plaši izplatītajiem avārijas procesu ciparu reģistratoriem, paplašinājušās iespējas izmantot eksperimentu datus. Šajā gadījumā tiek izmantotas reālas īssavienojumu oscilogrammas, kas notikušas zināmā attālumā no mērījuma vietas.
Metodes, kas vērstas, lai pētītu BNV algoritmu precizitāti, pamatojas uz divām principiāli atšķirīgām pieejām:

1. *Determinētā*, kad noteicošo faktoru parametri tiek pieņemti kā zināmi un tiek veikti daudzkārtēji kļūdu aprēķini daudzām šo faktoru parametru kombinācijām;
2. *Varbūtības*. Šajā gadījumā nekontrolējamo ietekmējošo faktoru parametri tiek pieņemti kā gadījuma ar zināmiem sadalījuma likumiem, bet pētījumi tiek veikti pamatojoties ar Monte–Karlo metodi [122,124,125]. Par algoritma efektivitātes kritērijiem tiek izmantoti BNV kļūdainības ciparu raksturlielumi (matemātiskā gaidīšana, vidējās kvadtātiskās novirzes, matemātiskās gaidīšanas moduļi [15,71]).

Abas nosauktajām metodēm ir gan priekšrocībās, gan trūkumi. Tādēļ šajā darbā atkarībā no risināmā uzdevuma noteikumiem tiks izmantotas abas nosauktajās pieejās, bet dažos gadījumos tiks izmantoti eksperimentāli dati.

2.6. Bojājuma noteikšanas vietu algoritmu un metožu realizācija

2.6.1. BNV līdzekļu attīstības etapi

BNV metožu realizācijas līdzekļu attīstības galvenie etapi ir atainoti 2.1 tabulā. Sākotnēji, tāpat kā citas energosistēmas relejaizsardzības un automātikas iekārtas, BNV līdzekļi tika realizēti uz elektromehānisko elementu bāzes. Galvenie aparātlīdzekļi bija fiksējošie ampērmetri un voltmetri, galvenokārt nullsecības. Galvenā problēma to izmantošanā bija nepieciešamība nodrošināt pieņemamu inercianitāti un drošu iekārtas bultas novirzes fiksāciju. Iekārtu rādītājus nolasīja cilvēks-operators un tie tika izmantoti lai realizētu divpusējās vai vienpusējās BNV metodes. Aprēķiniem tika izmantoti visi, atkarībā no laikmeta, pieejamie līdzekļi: no logaritmiskajiem lineāliem līdz elektromehāniskajiem kalkulatoriem un specializētām analogajām skaitļošanas mašīnām un pat personālajiem datoriem.

Valsts elektroenerģētiskie objekti tika aprīkoti ar ierakstošajiem elektronu oscilogrāfiem un magnitogrāfiem. Procesu ieraksti vienmēr tika izmantoti lai realizētu BNV metodes. Nepieciešams atzīmēt, ka oscilogrāfu izmantošanai, kas bija būvēti par pamatu ņemot procesu ierakstu uz fotojūtīga papīra vai filmas, bija liela darbietilpība un zema ticamība.

20. gs. 60.–70. gados elektromehāniskos ampērmetrus un voltmetrus sāka nomainīt pusvadītāji. Veidojās nulles vai apgrieztu secību strāvas un spriegumi, un tika veikta analogo lielumu iegaumēšana. Būtisks sasniegums bija pāreja uz izmērīto parametru ciparu atskaiti. Priekš tā tiak izmantotas gāzizlādes elektronlampām [ ].

Nr.	Izmantošanas laiks	Elementu bāze	Matemātiskais nodrošinājums un tā realizācija
1	1930–1970	Elektromehāniskie fiksējošie ampērmetri un voltmetri, ierakstošie oscilogrāfi un magnitogrāfi	Analogās skaitļošanās mašīnas, lielās ciparu skaitļošanās mašīnas (lampu, tranzistoru, …)
2	1970–1985	Pusvadītāju fiksējošie voltmetri un ampērmetri. Fiksējošie ommetri. Zemas caurlaidības sakaru kanāli.	Ciparu skaitļošanās mašīnas no lampu līdz personālajiem datoriem.
3	1985–200…	Mikroprocesoru specializētie attāluma fiksatori, avārijas procesu reģistratori, releju termināli.	Visu paaudžu personālie datori.

Tabula 2.1. BNV līdzekļu attīstības etapi.

Pusvadītāju elementu bāze pirmo reizi nodrošināja BNV vienpusējo metožu praktiskās realizācijas iespēju – tika radīts fiksējošais pretestības indikators FIS. Tā realizācijas galvenā problēma bija nepieciešamība izpildīt analogo lielumu dalījuma operācijas [16].

BNV līdzekļu praktiskā realizācija uz mikroprocesoru elementu bāzes veikta 20. gs. 80. gados. BNV uzdevuma galvenās īpatnības izmantošana (salīdzinājumā ar citiem energosistēmas uzdevumiem), kas ir iespēja veikt skaitļošanu ārpus reālā laikā, ļāva realizēt salīdzinoši sarežģītus un efektīvus algoritmus uz zema ražīguma mikroprocesoru elementu bāzes (četru un astoņu pakāpes procesori, takta frekvence ar desmitu kilohercu kārtu). Ierīču analogi, kas radīti 20 gadus atpakaļ, veiksmīgi un diezgan plaši tiek ekspluatēti Baltijas valstīs arī pašreiz.

Ilgu laiku lielākā daļa no ierīcēm, kas risināja BNV uzdevumus, palika lokālas – nebija spējīgas pieņemt vai nodot informāciju pa sakaru kanāliem. Izņēmumi bija atsevišķi gadījumi, kad parametru fiksācijas rezultāti tika nodoti energosistēmas dispečeram pa telemehānikas kanāliem. Priekš tā mērījumu rezultāti tika pieņemti strāvas formā, tika veikta AC–pārveidošana un koda nodošana energosistēmas dispečeram. Tādas sistēmas diezgan plaši tiek pielietotas NVS valstīs arī tagad. Pie tam, lai nodrošinātu ticamību un precizitāti tiek izmantoti daudzu BNV līdzekļu rādītāji (tie uzstādīti ne tikai uz konkrētās līnijas, bet arī uz citiem, kas tai pieslēdzas) un spēcīgs programmnodrošinājums. Tomēr ticamības un precizitātes jautājumi, ņemot vērā fiksējošo ierīču nepilnības, saglabā savu aktualitāti.

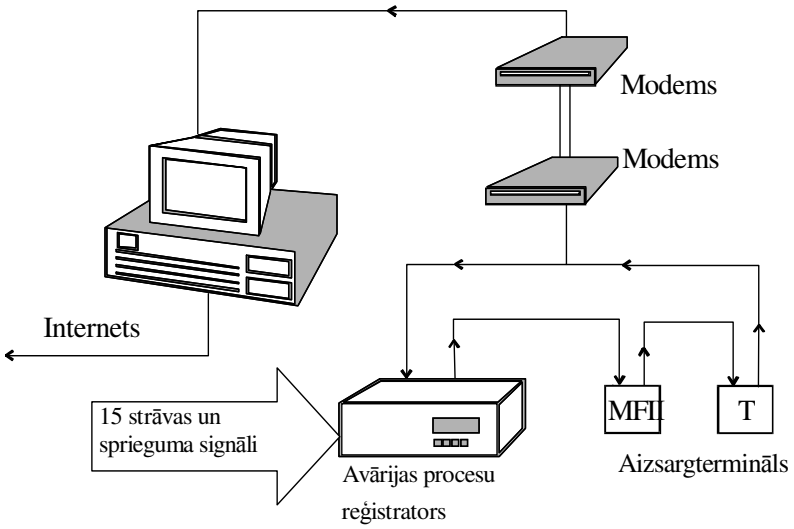
2.6.2. BNV mikroprocesoru līdzekļi

Baltijas valstīs sākot ar 20. gs. 80. gadu vidu tiek izmantoti BNV mikroprocesoru līdzekļi. Uz pašreizējo brīdi praktiski visas augstsprieguma līnijas ir nodrošinātas ar triju tipu ierīcēm:

1. Mikroprocesoru fiksējošie indikatori MFI [16,17];
2. Avārijas procesu reģistratori [26,30,31];
3. Mikroprocesoru releja termināli, kam ir avārijas procesu reģistratora iekšējā funkcija.

Izmantojamās ierīces ir spējīgas nodot informāciju pa telefonu vai citiem sakaru kanāliem. Tātad ir radīta vienota sistēma, kuras struktūra ir parādīta 2.7. Att.

2.7 zīmējumā parādītā shēma kopumā nodrošina efektīvu BNV uzdevumu atrisināšanu, vienlaicīgi radot iespēju izmantot arvien pilnīgāku BNV uzdevuma atrisināšanas programmatūru. Tiešām, sakaru kanālu esamība un iespēja koncentrēt informāciju operatora datorā ļauj noteikt un risināt BNV algoritmu pilnveidošanas uzdevumu un tā realizāciju, izstrādājot atbilstošu programmnodrošinājumu.



Att.2.7 BNV sistēmas struktūra

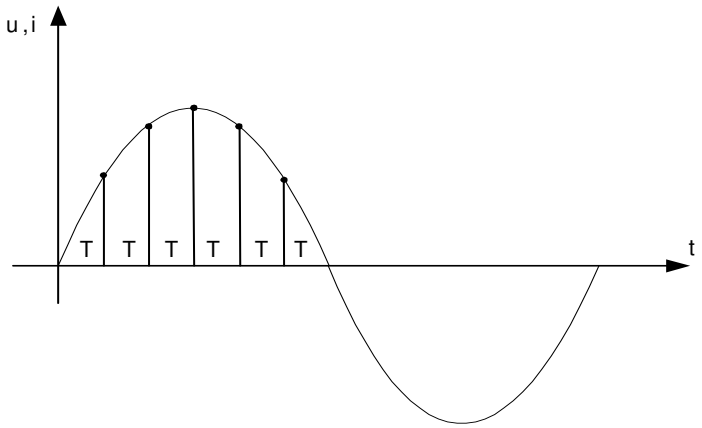
Programmējamie līdzekļi var tikt realizēti:

1. Ar speciālām, tikai izskatāmā uzdevuma atrisināšanai piemērotām ierīcēm;
2. Ar releju termināliem (mikroprocesoru. Releju aizsardzības un automātikas kompleksajām ierīcēm), pie tam BNV uzdevums ir viena no funkcijām, ko izpilda šīs ierīces. Šajā gadījumā, parasti tiek realizētas vienpusējās BNV metodes bez nepieciešamības saņemt informāciju no otra elektropārvades līnijas gala. Izņēmums varētu būt ierīces, kas realizē elektropārvades līnijas

diferenciālo aizsardzību, kuras darbības princips pamatojas uz informācijas apmaiņu starp ierīcēm, kas var tikt izmantots lai realizētu BNV mērķus.

3. Personālie datori. Šajā gadījumā ir iespējama praktiski jebkuras sarežģītības pakāpes algoritmu izmantošana. Iespējama arī vairāku metožu realizācija.

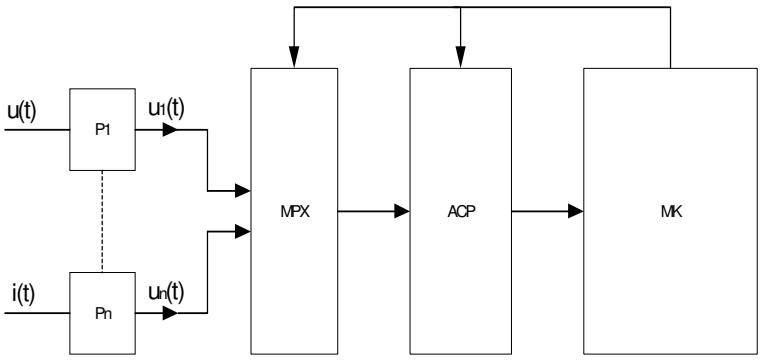
Neatkarīgi no realizācijas vietas visos gadījumos BNV uzdevuma atrisināšanas pamats ir analogu–ciparu strāvu un spriegumu pārveidošanas procesi un to iegaumēšana. Tiek izmantota vienmērīga signālu kvantošana laikā (Att.2.8)



Att. 2.8 Signālu analogu-ciparu pārveidošana

Pārveidošanas kanālu aparātrealizācija parādīta 2.9. Att.

Zināma arī principiāli cita, pamatota uz gadījuma elementu izmantošanu AC–pārveidošanas metode [7], tomēr tā ir ievērojami sarežģītāka realizācijā un BNV uzdevumu veikšanā nav ieguvusi plašu izmantošanu.



Att. 2.9 Pārveidošanas kanālu aparātrealizācija

Ienākošie no pirmējiem strāvas un sprieguma pārveidotājiem, kas kontrolē elektropārvades līnijas strāvu un spriegumu, signāli tiek novadīti uz pārveidotājiem $P_1....P_n$, kas nodrošina signālu līmeņa saskaņošanu ar ķēžu galvanistisko atdalījumu.

Multipleksors MX nodrošina secīgu signālu pieslēgšanos pie analogu–ciparu pārveidotāja ACP izejas. Pārveidotie signāli tiek ierakstīti, apstrādāti un iespējami ar mikrokontrolieri MK tiek pārsūtīti citām ierīcēm.

Pārveidotāji $P_1 ... P_n$, multipleksors MPX un AC–pārveidotājs var kļūt par kļūdu avotiem un, attiecīgi, būtiski ietekmēt BNV uzdevumu efektivitāti.

2.7.Mūsdienu BNV līdzekļu elementu tehniskie raksturojumi.

Pārveidotāji $P_1 ... P_n$, kas ietilpst struktūrā (Att.2.9), var būt būvēti uz šādu elementu bāzes:

1. Strāvas un sprieguma transformatori. Tas ir visbiežāk līdz šim brīdim izmantojamais elements pateicoties savam vienkāršumam, drošumam un ekonomiskumam. Vienlaicīgi, izmantojot mūsdienīgus regulēšanas līdzekļus ir iespēja iegūt apmierinošas precizitātes pārveidojumus (0,5–1% [142]).
2. Holla elementi [10]. Šie elementi ir ievērojami dārgāki, pie tam to precizitāte tikai nedaudz pārsniedz transformatoru pārveidotāju precizitāti.
3. Izolējošo operacionālie pastiprinātāji [143]. Šie elementi atšķirībā no parastajiem operacionāliem pastiprinātājiem nodrošina galvanistisko atdalījumu starp ieejošajām un izejošajām ķēdēm un tiem ir augsts izolācijas caursites sprieguma līmenis (25kV, kas ir salīdzināms ar transformatoru caursites spriegumu). Tomēr, izolējošo operacionālo pastiprinātāju izmantošanas pieredze RAunPA ieejošajās ķēdēs ir nepietiekams, vēl vairāk – ekspluatējot eksperimentālās partijas aparātus, kas aprīkoti ar ieejošajiem pastiprinātājiem, tika novēroti atteikuma gadījumi.

MPX multipleksori tiek izpildīti integrālo shēmu veidā un tiem ir ideālam tuvi raksturlielumi (kanālu pārslēgšanas laiks ar kārtu nanosekundes, atvērta kanāla pretestība ar kārtu daži Om, bet slēgtu – MOm). Reālu multipleksoru raksturlielumi praktiski neietekmē pārveidojumu precizitāti.

Mūsdienu analogu–ciparu ACP pārveidotājiem arī piemīt ideālam tuvi raksturlielumi (pārveides laiks – mikrosekunžu daļas vai mazāk, kārtu skaits – 16). Atzīmēsim, ka vēl dažus gadus atpakaļ AC pārveidotāji izsauca problēmas. Bija pieejami tikai 10–12 kārtu pārveidotāji, kas radīja jūtamas kļūdas [19] pie mazām kontrolējamo signālu vērtībām. Izmantojot 16 kārtu pārveidotājus, pēc līmeņa diskretizācijas efekts praktiski neizsauc kļūdas [19].

Mikrokontrolieris MK veicot AC pārveidojumu rezultātu aritmētiskās darbības tāpat ir spējīgs radīt kļūdas (ierobežotā operandu kārtu skaita dēļ). Tomēr pašreiz, kad tiek izmantoti 16 un vairāk kārtu ātrdarbīgie procesori un aritmētika ar fiksēto dubultas precizitātes punktu, vai pat peldošo punktu, ar šo kļūdu veidu var nerēķināties.

2.8. Strāvu un spriegumu pirmējie pārveidotāji

Ilgus gadus vienīgā, bet mūslaikos galvenā augstsprieguma līniju strāvas un sprieguma pārveidošanas metode ir strāvas un spriegumu mērījum-transformatoru izmantošanu.

Uzdevums, ko veic šie pārveidotāji var tikt aprakstīts ar vienkāršākajiem pastiprinošā posma vienādojumiem:

$u_{out}(t) = k_{TV} u_{in}(t)$, (2.10)

$i_{out}(t) = k_{TT} i_{in}(t)$, (2.11),

kur k_{TV} un k_{TT} – reālie skaitļi.

Diemžēl, (2.10) un (2.11) vienādojumu realizācija ir neiespējama, bet vienādojumi, kas apraksta ienākošo un izejošo strāvu un spriegumu sakarības vispārējā gadījumā izrādas sarežģītie nelineārie diferenciālvienādojumi [142], kas nodrošina tikai idealizētu vienādojumu tuvinātu realizāciju.

Principā, pie zināmiem transformatoru vienādojumiem (modeļiem), pie zināma (mērāma) ieejošā signāla var noteikt primārā signāla atjaunošanas uzdevumu.

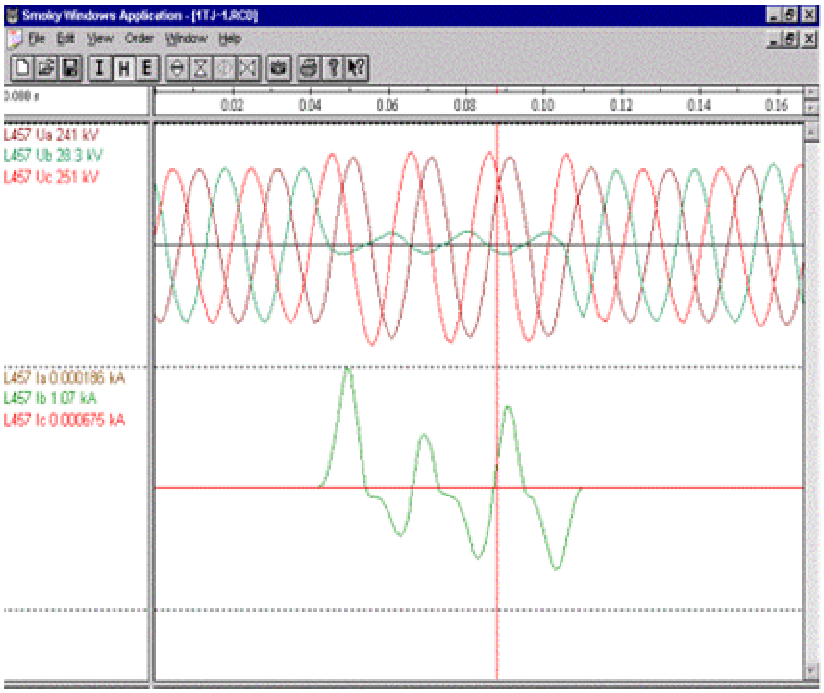
Vispārējā gadījumā, kā parādīts [142], uzdevums izrādas sarežģīts, pat izmantojot linearalizētus modeļus (nepieciešami nekorekti noteiktu uzdevumu risinājums ar Valtera integrāldiferenciālvienādojumiem [142]).

Skatoties no matemātiska formulējuma viedokļa, izskatāmais jautājums tiek ļoti vienkāršots gadījumā, ja tiek pieprasīts atjaunot tikai rūpnieciskās frekvences harmonisko komponenšu parametrus un izmantot transformatoru tērauda magnetizēšanās raksturojuma posmlineāro aproksimāciju [142]. Ir zināms mēģinājums [5] veikt šādu risinājumu ar mērķi atrisināt BNV uzdevumu. Diemžēl, pārvarot matemātiskās grūtības nonākam pie diezgan būtiskām organizatoriskām. Lai ievadītu korekcijas nepieciešama izgatavotājrūpnīcu informācija par transformatoru raksturlielumiem, kas ir grūti realizējams, ievērojot daudzo firmu izgatavotāju skaitu un plašo laika diapazonu, kurā tie izgatavoti. Speciālām korekcijām iztrūkstot nepieciešams rēķināties ar rūpnieciskās frekvences harmonikas parametru pārveides izkropļojumiem ar kārtu 0,5 – 2 % [142]. Citu procesa veidotājfaktoru parametru izkropļojums var būt vēl būtiski lielāks [142].

Att.2.10 parādīta strāvu oscilogramma, kas ierakstīta pie reāla izslēguma Telšai (Lietuva) apakšstacijā , izslēgumam notiekot uz šinām. Atainots process, kas paskaidro transformatoru strāvas piesātinājumu.

Pēdējās desmitgadēs veikti ievērojami ieguldījumi, lai izstrādātu strāvas un spriegumu pārveidotājus uz jaunu principu bāzes. Īpaši perspektīvi, kas arī tiek jau ražoti rūpnieciski ir:

1. Konstruētie par pamatu izmantojot Faradeja efektu – gaismas viļņu polarizācija elektromagnētiskā laukā [31]. Tā realizācijai izmanto optisko kabeli, kas veido vairākus vijumus ap elektropārvades līnijas spēka vadu. Mērāmais lielums – gaismas viļņu polarizācijas leņķis ir proporcionāls strāvai ar augstu precizitāti;
2. Radovska spole. Tiek realizēts transformatora princips, strauji samazinot sekundārās jaudas patēriņu rodas iespēja neizmantot magnētiskos materiālus. Tāpat tiek nodrošināta augsta pārveides precizitāte;
3. Konstruētie par pamatu ņemot Holla efektu – elektrodzinējspēka rašanās pusvadītājos, kas novietoti magnētiskos laukos.
4. Sprieguma aktīvie dalītāji. Tiek izmantots potenciometra princips. Pie augstām primārā sprieguma vērtībām šis princips var tikt izmantots tikai izmantojot sekundārās jaudas dažu milivatu vērtībā, kas var notikt izmantojot izolējošos operacionālo pastiprinātājus [143].



Att. 2.10 Strāvas oscilogramma Tialšiai apakšstacijai

Visu minēto augstsprieguma primāro strāvas un sprieguma pārveidotāju jauno principu izmantošana ir iespējama tikai būvējot jaunas vai pilnīgi rekonstruējot vecās apakšstacijas, jo šo pārveidotāju izejošie signāli nesaskaņojas ar veco RAunPA iekārtu funkcionēšanas prasībām. Tieši šis fakts bremzē jauno pārveidotāju ieviešanas procesu. Tātad, nepieciešams rēķināties, ka vēl ilglaicīgi energosistēmās tiks izmantoti gan transformatori, gan uz jaunajiem principiem balstītie strāvas un spriegumu pārveidotāji.

2.9. Strāvas un spriegumu vektoru parametru novērtējums.

Realizējot BNV algoritmus, kas būvēti izmantojot nostabilizējošas režīma vienādojumus, strāvas un sprieguma vektori tiek izteikti algebriskā formā:

$$\left.\begin{aligned} I &= I_A + jI_R \\ U &= U_A + jU_R \end{aligned}\right\}, \quad (2.12)$$

Vērtējumi I un U, izmantojot ciparu filtrus, iegūst [ ] šādu formu:

$$\left.\begin{aligned} I_A &= \sum_{i=0}^{N} K_i i(nT) \\ I_R &= \sum_{i=0}^{N} N_i i(nT) \end{aligned}\right\}, \quad (2.13),$$

kur $K_{i,} N_i$ – ciparu filtru koeficienti, T – diskretizācijas intervāls.

Plašāka izmantošana ir filtriem, kas realizē atsevišķu Furjē diskrētā pārveidojuma gadījumu (tikai vienas rūpnieciskās harmonikas izdalīšana). Šajā gadījumā koeficienti *K* un *N* tiek noteikti šādi:

$$K_i = \sin(iT)$$
$$N_i = \cos(iT)$$

[19] parādīts, kas Furjē pārveidojuma izmantošana var radīt būtiskas neprecizitātes. Tomēr izmantojot rezultāta papildus filtrāciju novērtējot attālumu l ar gludīnātaj filtru, neprecizitāte kļūst nenozīmīga.

Ir zināmi arī sarežģītāki ciparu filtrācijas algoritmi [144], kas, piemēram, ļauj novērst neprecizitātes frekvencei nobīdoties no nominālās vērtības. Tomēr, ņemot vērā frekvenču avāriju mazās iespējas, un it sevišķi minimālai vienlaicīgai frekvenču avārijas un izslēguma iespējai šajā darbā speciālu filtru izmantošana nav paredzēta, bet pētījumu par frekvenču ietekmi uz BNV neprecizitātēm netiek veikti.

2.10. Secinājumi

1. Precīza un droša augstsprieguma elektropārvades līniju bojājuma vietas noteikšana sekmē ātrāku līnijas darbaspēju atjaunošanu un patērētāju elektronodrošināšanas drošības palielināšanu.
2. Mikroprocesoru tehnikas jaunās iespējas, sasniegumi sakaru kanālu uzbūvē ir radījuši ievērojamu jaunu BNV uzdevuma risināšanas algoritmu skaitu.
3. Daļa piedāvāto BNV metožu, neskatoties uz to tehnisko pilnību, ir konkurētnespējīgi realizācijas un ekspluatācijas dārdzības dēļ.

4. Energosistēmu ekspluatāciju praksē vislielākā izmantošana ir BNV metodēm, kas izmanto strāvu un spriegumu mērījumu rezultātus avārijas režīmā.
5. Diezgan perspektīvā ir tendence izmantot mākslīgas neironu tīklus BNV uzdevuma atrisināšanai.
6. BNV līdzekļu instrumentālās neprecizitātes rada atsevišķi strāvu un spriegumu pārveidojošie bloki, tomēr ievērojot pēdējo desmitgadu mikroprocesoru un atbilstošās elementu bāzes straujo attīstību, galvenais instrumentālo neprecizitāšu cēlonis ir primārie strāvas un sprieguma mērījumu transformatori.
7. Ir radīti un tiek ieviesti augstas precizitātes strāvu un spriegumu mērošie pārveidotāji, tomēr tuvākajās desmitgadēs to izmantošana būs ierobežota ņemot vērā ievērojamās izmaksas, kas nepieciešams to uzstādīšanai eksistējošos objektos.
8. BNV algoritmu īpašību analīze var tikt veikta izmantojot detalizētas un precīzas rūpnieciskās energosistēmu elektromagnētisko pāreju procesu noteikšanas programmas.

3. Bojājumu noteikšanas vietas bāzes algoritmi.

BNV algoritmi. Vienpusējas un divpusējie. Izmantotie tuvinājumi un hipotēzes. Statiskais un statiski adaptīvais BNV vienpusīgais algoritms. Aprēķinātā attāluma līdz bojājuma vietai un apgaitas (apskates) zonas dispersija. Līnija ar atzariem un savstarpējas indukcijas parādības bojājumi. Apkārtceļa sakari???. Pārejas pretestības lieluma noteikšana bojājuma vietā. Automātiska atkārtota ieslēgšanās un BNV uzdevums. Pārejās pretestības izmaiņa un tās izmantošana BNV uzdevumos.

3.1.Ievads

Elektropārvades līnijas bojājuma vietas noteikšanas process var izrādīties sarežģīts un norisēt dažādi, taču vienmēr beidzas ar elektropārvades līnijas konkrētas bojājuma vietas atrašanu. BNV uzdevuma atrisināšanai tiek izstrādāti algoritmi, tāpat kā tas ir ar citiem sarežģītiem uzdevumiem.

Termins algoritms ir radies no vārda "alghoritmus", kurš radies no senās Horezmas matemātiķa Al Horezmi (mūsu ēras 8. gs.) uzvārda latīņu transkripcijas. Mūsdienu izpratnē algoritms ir noteikumu kopums, kas nodrošina kāda uzdevuma atrisināšanu. Pie tam tiek uzskatīts, ka izejas dati var noteiktās robežās mainīties , bet noteikumi paliek nemainīgi.

Pieņemot algoritma definīciju un tā izmantošanas iespēju noteikt bojājuma vietu, mēs varam secināt, ka piedāvātie algoritmi, stingri runājot, risina tikai uzdevuma daļu, kura gala rezultāts ir elektropārvades līnijas bojājuma vietas noteikšana trasē. Ar BNV algoritmu saprot:

- noteikumu kopumu, kas nosaka apstākļus un veidus kā rodoties bojājumam veikt mērījumus;
- attāluma līdz bojājuma vietai izskaitļošanas procedūru.

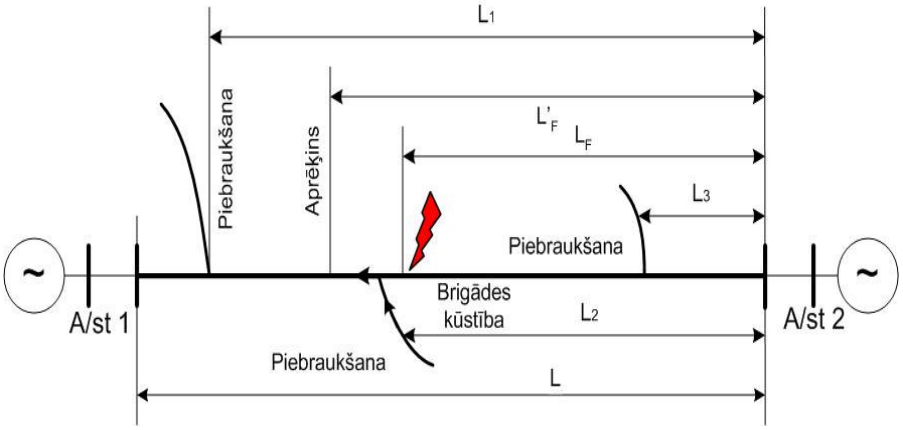
Pie tam paliek nenoteikti vairāki jautājumi, kas ir svarīgi priekš BNV gala mērķa:

- kā noteikt bojājuma rašanās faktu un izvēlēties laika intervālu, kad veikt mērījumus;
- vai izmantot iespēju saņemt informāciju no citām mērījumu vietām;
- kā izvēlēties elektropārvades līnijas trases apskates maršrutu;
- ko darīt, ja elektropārvades līnijas apskates gadījumā bojājuma vieta netiek konstatēta.

Tātad, attāluma līdz bojājuma vietai noteikšanas algoritmi ir tikai daļa no bojājuma vietas atrašanas uzdevuma. Lai īpaši norādītu uz šo faktu, šajā darbā tiek izmantots termins – bāzes algoritms, kas nosaka noteikumu kopumu attāluma līdz bojājuma vietai noteikšanai.

3.2.Augstsprieguma līnijas bojājumu meklējumi.

Pieņemsim, ka ir atslēgusies augstspriegumu līnija, bojājums ir stabils (shēma attēlota Att.3.1.). Tīkla rajona vai iecirkņa personāls ir saņēmis uzdevumu – atrast bojājuma vietu un veikt remonta darbus.



Att. 3.1. Bojājuma noteikšana AL trasē.

Pirmais etaps – tā ir bojājuma vietas meklēšana. Kā to nepieciešams organizēt? Tas ir atkarīgs no tās informācijas, kas pieejama elektrisko tīklu uzņēmumu, rajonu vai iecirkņu dispečeriem.

1. variants. Nav nekādas informācijas, bojājums jebkurā AL iecirknī ir vienlīdz iespējams. Ja tāda iespēja pastāv, tad var veikt AL apskati no helikoptera. Priekšrocība – konstatējot bojājuma vietu var noteikt bojājuma raksturu, nepieciešamo remontdarbu apjomu, instrumentus, rezerves daļas utml. Trūkumi – apskates lidojuma augstās izmaksas, laika apstākļu ietekme, neiespējamība noteikt visus bojājuma veidus, piemēram, ataugas pārsegumi aizaugošās trasēs u.c. Ja nav iespējams piesaistīt helikopterus, tad nepieciešams organizēt AL apgaitu ar vienu vai vairākām brigādēm, kurai jānotiek līdz bojājuma atrašanai. Pie tam šāda apgaita, kā likums, notiek jebkuros laika apstākļos. Teorētiski ir vienalga no kuras vietas sākt apskati, jo visi AL iecirkņi ir vienādi no bojājuma konstatācijas vietas viedokļa. Praktiski sāk ar tuvāko iespējamo piebraukšanu trasei.

2. variants. Tika veikts bojājuma vietas aprēķins (vispārējā gadījumā – noteikšana), noteikts attālums līdz AS vai ES. Šajā gadījumā meklējumu organizatoriem uzreiz rodas jautājums par tālāko rīcību. Neapšaubāmi, ka meklējumi ir jāturpina līdz bojājuma vietas atrašanai. Bet kādā veidā? Ja AL ir pietiekami svarīga, tad būs nepieciešamība piesaistīt vēl vienu brigāde, bet dažreiz pat vairākas. Bet kurā virzienā tām doties? Ko darīt pirmajai brigādei? Kurā virzienā veikt apskati? Visdrīzāk tiks izmantos helikopters, bet arī tas neatrisina visu uzdevumu, īpaši, ja laiks ir lidošanai nelabvēlīgs vai bojājuma raksturs ir tāds, ka bojājums nav atpazīstams no attāluma, ko nosaka helikoptera kustības augstums. Jebkurā gadījumā tiek patērēts laiks. Tāpēc, ja nav ticamības aprēķiniem, helikopteru pasūta uzreiz (katram gadījumam) ar visām no tā izrietošajiem tēriņiem. Ja šādas iespējas

nav, tad svarīgās AL tiek izsūtītas divas, trīs vai četras brigādes, kas dodas pretējos virzienos no piebraukšanas vietas. Atkal tiek zaudēts laiks.

Vēl nenoteiktāka situācija rodas ja AL bojājums ir nestabils. Patiesībā, ja nav nekādu datu par bojājuma vietu, tad ir nepieciešama visas AL apskate no gaisa vai ar apgaitas palīdzību, kas no elektrisko tīklu darbinieka viedokļa praktiski ir bezcerīgi un bezjēdzīgi. Praktiski neiespējami ir atrast bojājuma vietu uz AL negaisa laikā un veikt sekojošu AL veiksmīgu ieslēgšanu. Lielāka vai mazāka cerība ir citu bojājumu gadījumos, bet tā nav liela, jo nepieciešama visas AL stāvokļa pārbaude. Ja ir noteikta bojājuma vieta, tad bez papildus informācijas jautājums tiek noskaidrots tikai nedaudz. Praktiski neiespējami atrast bojājumu aprēķinātā vietā. Jautājums par to cik tālu jāveic apskate pa kreisi vai pa labi no aprēķinātās vietas praktiski nav noteikts.

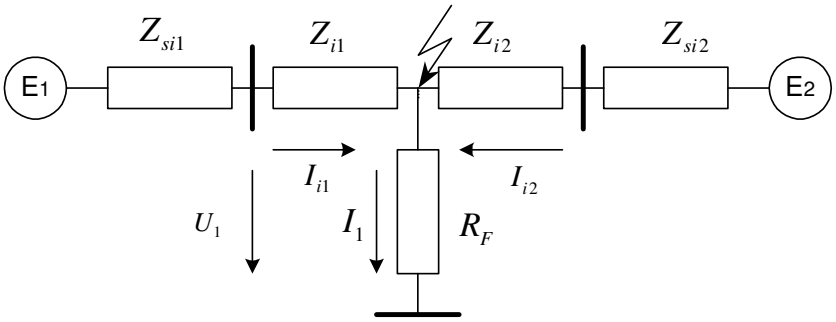
Neviļus rodas secinājums, ka aprēķinātais attālums līdz AL bojājuma vietai tiek raksturots ar papildus lielumiem, kas raksturo aprēķina vietu tā, lai dotu līnijas personālam pilnīgu informāciju, ko darīt pilnīgi visos augstāk izskatītajos gadījumos.

Šādu bojājuma vietas papildus raksturojumu var nosaukt par rekomendējamo apgaitas (apskates, aplidojuma) zonu. Šim raksturojumam jābūt šādām papildīpašībām – tai jābūt pietiekami plašai, tik plašai, lai praktiski visas bojājuma vietas atrastos šajā zonā. Vienlaicīgi zonai jābūt pietiekami mazai, tādai, lai ar to varētu praktiski operēt. Šīs divas prasības ir pretrunīgas un nosaka apgaitas zonas būtību. Citiem vārdiem šo jēdzienu var noteikt kā AL daļu, kas atrodas abās pusēs no aprēķinātās bojājuma vietas, tādu daļu, lai ar augstu ticamības pakāpi faktiskais bojājums atrastos šīs daļas robežās.

Apgaitas zona ir BNV fundamentāls jēdziens. Šim jēdzienam nav pievērsta pienācīga uzmanība, kaut arī tas ir pamatā AL bojājuma vietas meklējumu organizācijai.

3.3. Homogēnu, atsevišķi stāvošu AL vienpusējie algoritmi.

Atgriezīsimies pie trīsfāzu, simetriskas elektropārvades līnijas, kas savieno divas energosistēmas, izskatīšanas. Šādas EPL ekvivalentā shēma parādīta Att.3.2



Att. 3.2 EPL ekvivalentā shēma

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

$$U_i = U_{i1} I_{i1} - I_{i1} Z_{i1} I_{i1} - R_F I_i \ , \qquad (3–1)$$

Ņemot vērā, ka īsslēguma punktā tiek saglabātā vienādība:

$$U_1 I_1^* = -(U_2 I_2^* + U_0 I_0^*) \ , \quad (3–2)$$

kā arī izsakot strāvas I_i bojājuma vietā, tās caur mērījumiem strāvām iegūstam:

$$\mathrm{Im}\left\{ \sum_{i=0}^{2} \frac{U_{i1} I_{i1}^*}{K_i^*} - \sum_{i=0}^{2} \frac{\left|I_{i1}\right|^2 Z_{i1}}{K_i^*} - \frac{U_{11} \cdot I_L^*}{K_1^*} + \frac{I_1 I_L^* Z_{11}}{K_1^*} \right\} = 0 \ , \quad (3–3)$$

(3–1), (3–2) un (3–3), U_{i1}, I_{i1}– mērāmie spriegumi un strāvas *i*–tajā secībā, *I** salāgota pret strāvas *I* lielumu, I_L – stāva režīmā līdz avārijai, *Ki* – strāvas sadalījuma koeficientu izmaiņas, bet *Ki** – ar *Ki* salāgotie lielumi.

Pretestības Zi_1 un Zi_2 ir atkarīgas no attāluma līdz bojājuma vietai L_F:

$$\left.\begin{aligned} Z_{i1} &= L_F Z_{iap} \\ I_{i2} &= (L - L_F) Z_{iap} \end{aligned}\right\} \ , \quad (3–4)$$

Vienādojums (3-3) pie zināmām ekvivalentām pretestībām Zsi_2 ir kvadrātvienādojums, un attiecībā pret nezināmo attālumu L_F tas var uzskatīt par pamatu tā aprēķināšanai.

Vienādojuma (3–3) atrisinājums satur divas saknes. Gadījumā, ja abas saknes atbilst kontrolējamās AL garumam, rodas īstā saknes izvēles problēma. Šo problēmu var atrisināt ar pretestības R_F lieluma papildus aprēķiniem, kas pēc L_F lieluma noteikšanas var tik atrasta no vienādojuma:

$$U_F = \left(I_F + K \cdot I_{01}\right) Z_{1ap} L_F + \frac{3 R_F I_{01}}{K_0} \ , \quad (3–5)$$

Pareiza atbilde attiecībā pret nezināmo L_F, kas iegūstams no (3-5) vienādojuma, var būt tikai pozitīvs pret R_F lielumu (ņemot vērā fizisko dabu). Gadījumos, kad abi R_F lielumi ir pozitīvi, par pareizo tiek izvēlēts tāds L_F, kas atbilst tālākajam punktam no bojājuma vietas.

Ja ņemt vērā, ka pie vienfāžu iezemētiem īsslēgumiem bojājuma vietās strāvas ir vienādas, tad pamatojoties uz (3-3) varām iegūt vēl vairākus kvadrātvienādojums attiecībā pret L_F:

$$I_m \left\{ \frac{\Delta U_{11} I_{01}^*}{K_0^*} + \frac{\Delta U_{21} I_{01}^*}{K_0^*} + \frac{\Delta U_{01} I_{01}^*}{K_0^*} \right\} = 0 \, , \qquad (3\text{-}6)$$

$$I_m\left\{\frac{\Delta U_{11}I_{21}^*}{K_2^*}+\frac{\Delta U_{21}I_{21}^*}{K_2^*}+\frac{\Delta U_{01}I_{21}^*}{K_2^*}\right\}=0\,, \qquad (3\text{-}7)$$

$$I_m\left\{\frac{\Delta U_{11}I_{21}^*}{K_2^*}+\frac{\Delta U_{21}I_{21}^*}{K_2^*}+\frac{\Delta U_{01}I_0^*}{K_0^*}\right\}=0\,, \qquad (3\text{-}8)$$

Vienādojumos (3–6), (3–7) un (3–8)

$$\Delta U_{i1}=U_{i1}-I_{i1}\cdot Z_i\ , \quad (3\text{–}9)$$

Vienādojumi (3–3), (3–6), (3–7) un (3–8) nodrošina vienādus L_F lielumus, pat ja ir zināma tikai viena no pretestības lielumiem Zs_{12}, Zs_{22} vai Zs_{02}. Pie tam (3–6), (3–7) un (3–8) ir realizācijai vienkāršāki, jo nesatur pirmsavārijas strāvas lielumus. Šī strāva nevar tikt izmērīta, piemērām, pie neveiksmīgas automātiskas atkārtotas ieslēgšanas (AAI).

Gadījumos, kad informācijai par ekvivalentām pretestībām Zsi_2 ir gadījuma vai nenoteikts raksturs, no izskatāmo vienādojumu precizitātes viedokļa vienādība tiek ekvivalenti tiek traucēti. Precizitāte, ko nodrošina katra vienādojuma izmantošana, tiek noteikta ar Zsi_2 varbūtējiem raksturlielumiem un citiem ekvivalentas shēmas parametriem (Att. 3–2.)).

3.4. BNV algoritmu sintēzes statistiskā pieeja.

Pie nekontrolējama AL pretējiem galiem ekvivalentās pretestības Zsi_2 var tikt uztverti kā nenoteikti (fuzzy) mainīgi [120]) vai gadījuma rakstura (kuriem ir kāds zināms, vai noteikts sadalījuma likums) lielumi. Šajā darbā aprobežosimies ar statiskas pieejas analīzi, tas ir uzskatīsim, ka nezināmās ekvivalentās pretestības Zsi_2 ir gadījuma lielumi. Tad jebkurš no (3–3), (3–6 – 3–8) vienādojumiem var būt par pamatu meklējamā attāluma L_F sadalījuma funkcijas vai tā skaitlisko raksturlielumu izskaitļošanai, piemēram, matemātisko cerību $M[L_F]$ un vidēji kvadrātisko novirzi $\sigma\,[L_F]$. Papildus raksturojumi attāluma $M[L_F]$ novērtēšanai, kas nosaka izkliedi, iespējamā bojājuma īstās vietas atšķirību no aprēķinātās, var tikt izmantoti par pamatu AL trases apgaitas (apskates) zonas noteikšanu, kur ar ievērojamu iespējamību atrodas bojājuma vieta.

No sākuma izskatīsim uzdevuma matemātisko formulējumu.

Attālums līdz bojājuma vietas pie AL nekontrolējamā gala ekvivalento pretestību gadījuma lielumiem var tikt uzskatīts kā atsevišķa funkcija no šīm pretestībām:

$$L_F=\varphi\left(Z_{s12},Z_{s22},Z_{s02}\right)\ , \quad (3.10)$$

tad pie zināma daudzdimensija blīvuma sadalījuma

$$f\left(Z_{s12},Z_{s22},Z_{s02}\right)\ , \quad (3.11)$$

un vienīgā (3.10) vienādojuma risinājuma esamības attiecībā pret vienu no vektora Zsi_2 veidojošajiem, piemēram Xsi_2:

$$X_{s12} = \varphi\left(L_F, r_{s12}, r_{s22}, r_{s02}\right) , \quad (3.12)$$

var iegūt sadalījuma blīvumu $f(L_F)$:

$$f(L_F) = \underbrace{\int_{-x}^{+\infty} \ldots \int_{-x}^{+\infty}}_{5} f(\varphi, r_{s12}, r_{s22}, r_{s02}) \left| \frac{d\varphi}{dL_F} \right| \bullet dr_{s12} dr_{s22} dr_{s02} , \quad (3.13)$$

(3.13) vienādojumu satur izskatāmā uzdevuma pieckārtīgu integrāli ar sarežģītu zemintegrāļa funkciju un nevar novest līdz risinājumiem, kas pieņemami pēc sarežģītības pakāpes.

Ir zināmi divi galvenie izskatāmā uzdevuma vienkāršošanas paņēmieni:

1. Momentu metodes izmantošana [131]. Pie tam aprobežojas ar pamata skaitlisko meklējamā sadalījuma raksturlielumu atrašanu.
2. Monte–Karlo metode. BNV uzdevumos šī metode līdz šim brīdim netika izmantota tās laika patēriņa neekonomiskuma realizācijas laikā dēļ. Tomēr, kā tiks pierādīts vēlāk, mūsdienu skaitļošanas līdzekļi nodrošina risinājumu pieņemamā laikā.

Momentu metodes izmantošana nepieļauj stāvokļa funkcijas dažādību (3.11). Šīs funkcijas nosaka kontrolējamās AL konfigurācijas un, kā var pierādīt, daudzos pat pamatmomentu aprēķina gadījumos – matemātiskās cerības un vidēji kvadrātiskās novirzes – nonākam pie Monte–Karlo metodes izmantošanas nepieciešamības. Šajā gadījumā zūd momentu metodes priekšrocības un jau no pirmā brīža priekšroka var tikt dota Monte–Karlo metodei, kā meklējamā sadalījuma noteikšanas metodei.

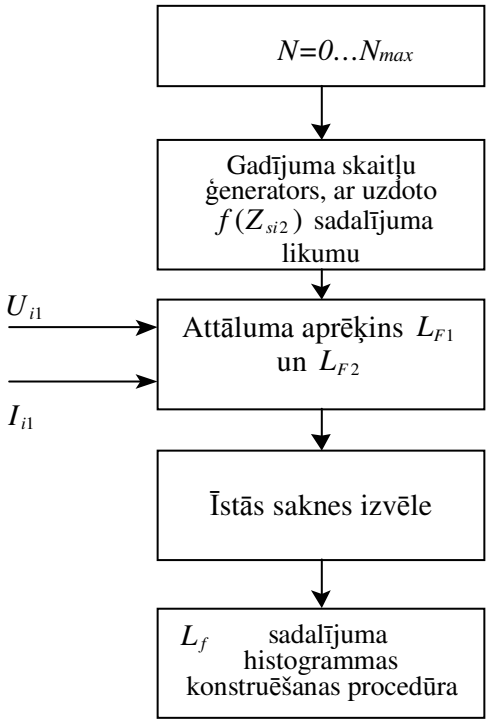
3.4.1. Ar Monte–Karlo metodi pamatotie BNV algoritmi

Izmantojot iepriekš iegūtos kvadrātiskos vienādojumus attiecībā pret nezināmo L_F, Monte–Karlo metodi, un, pieņemot, ka ekvivalento pretestību Zsi_2 sadalījuma likumi ir zināmi, varam iedomāties BNV algoritmu struktūrshēmas veidā, kas parādīta Att.3.3.

3.3. zīm parādītais algoritms realizē daudzkārtējus (N_{max} reizes) attāluma līdz bojājuma vietai aprēķinus. Pēc aprēķinu rezultātiem tiek konstruēta sadalījumu histogramma un, iespējams, tiek aprēķinātas matemātiskā cerība un vidējā kvadrātiskā attāluma L_F novirze. Izmēģinājumu N_{max} skaita izvēles uzdevums ir izskatīts 4. nodaļā.

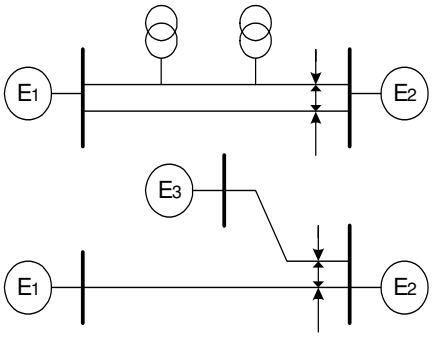
3.3. Att. piedāvātajā algoritmā paredzēta (3–3), (3–6), (3–7) un (3–8) vienādojumu izmantošana, kuri sastādīti atsevišķi stāvošām, simetriskām līnijām ar koncentrētiem parametriem. Šajā gadījumā vienādojumi ir salīdzinoši vienkārši. Vispārējā gadījumā līnijām var būt sarežģītāka konfigurācija, tas ir:

– tām var būt atzarojumi,
– tās var sastāvēt no vairākiem neviendabīgiem iecirkņiem,
– tās var tikt pakļautas savstarpējas indukcijas vai pašindukcijas parādībai. Šādu līniju piemēri parādīti Att.3.4



Att.3.3 Statistiskā algoritma struktūrshēma

Sarežģītu konfigurāciju līniju gadījumā, bojājuma vietas jaudas aprēķins kļūst sarežģītāks, var parādīties papildus nenoteiktības avoti. Piemēram, pretestības ar slodzi regulējamos transformatoros, ģeneratoru ekvivalentās pretestības, kas baro nekontrolējamo paralēlo līniju (Att.3.4). (3–3) veida vienādojumu sastādīšanas mēģinājumi sarežģītākas konfigurācijas līnijām rada nepieciešamību izmantot papildus loģiskos mainīgos, kas ir atkarīgi no bojājuma vietas atrašanās attiecībā pret elementiem, kas rada neviendabīgumu.



Att.3.4 Sarežģītas konfigurācijas pārvades līnijas piemērs

Izskatīsim iespēju radīt universālu algoritmu, kas nodrošina BNV uzdevuma atrisinājumu. Tā pamatā, tāpat kā iepriekšējā gadījumā, izmantosim tiešās, pretējās un nulles secību jaudas metodi un Monte–Karlo metodi. Sintezējamā algoritma pamatā ir ņemti divi tālāk formulētie apgalvojumi, kuru patiesums neizsauc šaubas:

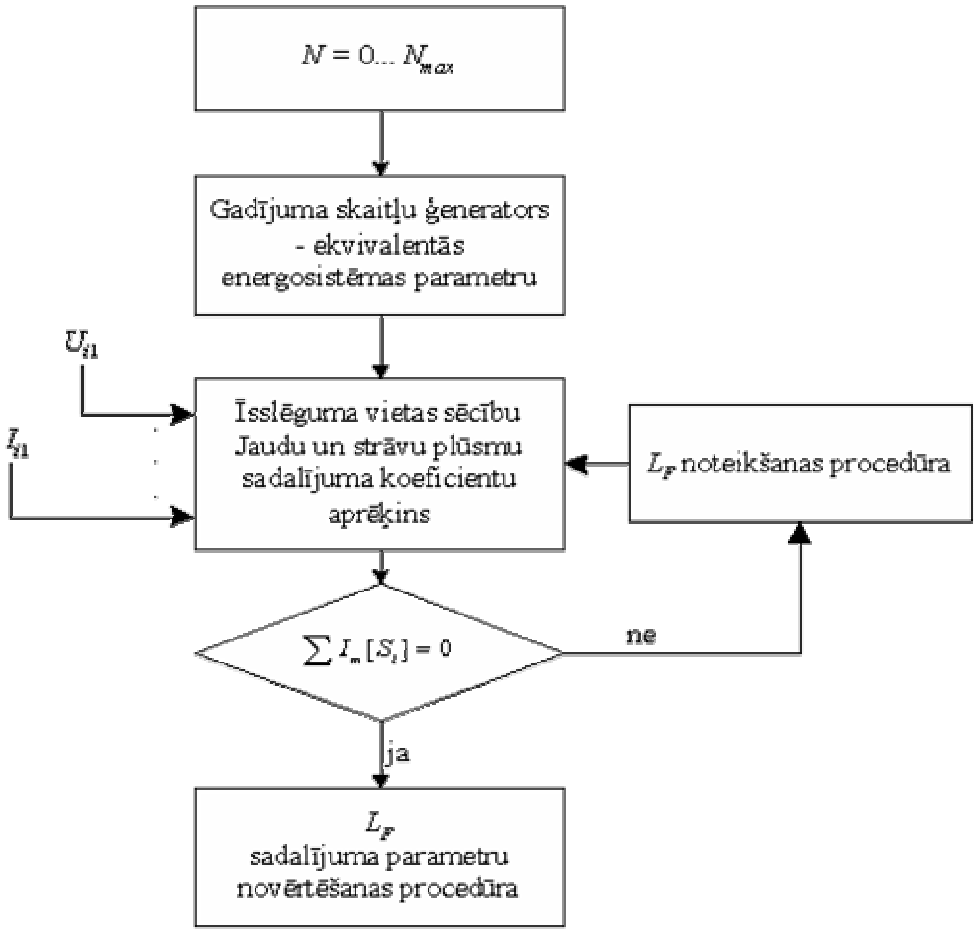
1. Secību jaudu noteikšana bojājuma vietā pie uzdotās bojājuma vietas, uzdotām ekvivalentajām pretestībām Zsi_2 un uzdotajiem elementu parametriem, kas rada neviendabīgumu, nerada principiālas grūtības pat gadījumā, ja līnija sastāv no daudziem posmiem, katrs no kuriem ir ekvivalents četrpols.

2. Pie uzdotās bojājuma vietas un pārējiem parametriem (sk. 1. p.) viegli tiek noteikti arī strāvas sadalījuma koeficienti *Ki* (fiziskā būtība tiek paskaidrota attiecībā pret 3–3 vienādojumu). Atzīmēsim, ka šie koeficienti nav atkarīgi no pārejas pretestības lieluma un tātad var tikt aprēķināti pie tā nulles vērtības.

Formulētie apgalvojumi izriet no elektromagnētisko pārejas procesu teorijas atzinumiem [8], izstrādāto un pārbaudīto programmu paketēm, kas nodrošina strāvu un īsslēguma spriegumu aprēķinus sarežģītās elektroenerģētiskās sistēmās. Izskatāmajā uzdevumā sistēma tiek vienkāršota galīgā variantā līdz divmašīnu, kas savienota ar elektropārvades līniju, bet procesu modelēšana šādā sistēmā nerada principiālas grūtības.

Formulētu apgalvojumu izmantošana tieši noved līdz BNV algoritmam, kura struktūrshēma parādīta Att.3.5

Att.3.5 parādītais algoritms uzbūvēts par pamatu modelējot bojātu elektropārvades līniju, lai aprēķinātu strāvas sadalījuma un sprieguma tiešās, pretējās un nulles secības koeficientus uzdotajā bojājuma vietā, kuru rada attāluma līdz bojājuma vietai L_F meklēšanas procedūra, kurā reaktīvo jaudu secību summai ir nulles vērtība. L_F meklējumu procedūra pēc būtības veic vienādojuma sakņu meklējumus, kas satur vienu nezināmo mainīgo, un tātad tās pamatam var tik ņemts viens no daudzajiem zināmajiem algoritmiem [131] (sk. 4. nodaļu)

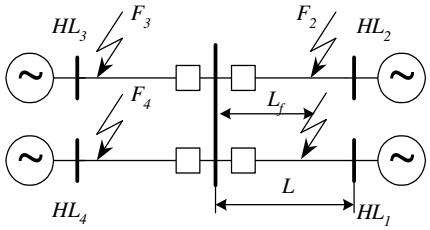


Att.3.5 Statistiskā algoritma struktūra

3.4.2. Statistiski adaptīvais BNV algoritms

3.3.2. apakšnodaļā izskatītais BNV statistiskais algoritms pamatots ar informācijas izmantošanu par nekontrolēto AL galu ekvivalento pretestību statistiskajām īpašībām. Šo informāciju var iegūt:

1. Analizējot energosistēmas shēmu un, iespējams, izmantojot esošās ekvivalentēšanas programmas [ ]. Praktiski, šādā veidā var iegūt minimāli un maksimāli iespējamās pretestības vērtības, bet Zsi_2 sadalījuma likums var tikt pieņemts kā vienmērīgs.

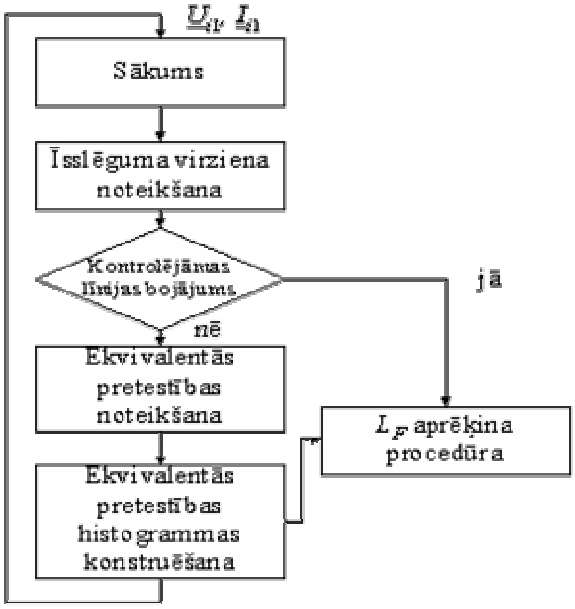


Att.3.6 Tipiska apakšstacijas struktūra

2. Veicot energosistēmas ekvivalento pretestību mērījumus īsslēgumu laikā. Daudzkārtēju mākslīgu īsslēgumu radīšana ar mērķi iegūt nepieciešamo informāciju ir neiespējama. Tomēr, kā tiks paskaidrots tālāk, var tikt izmantota informācija un īsslēgumu mērījumi, kas ir ārēji attiecībā pret kontrolējamo AL.

Izskatīsim Att.3.6. attēloto vienkāršotu tipveida augstsprieguma apakšstacijas shēmu, kas satur vairākas elektropārvades līnijas.

Attiecībā pret kontrolējamo līniju HL1 ārējie īsslēgumu F2, F3, F4 gadījumā var tikt izmērīti līnijā HL1 esošie apgrieztās un nulles secības spriegumi un strāvas, atbilstoši U_0, U_2, I_0, I_2. Tad, pie zināmām līnijas HL1 nulles un apgrieztās secības pretestībām varam iegūt energosistēmas ekvivalento pretestību novērtējumus, kas baro AL pretējo galu:



$$Z_{si2} = Lz_i + U_i / I_i \quad , \quad (3.14).$$

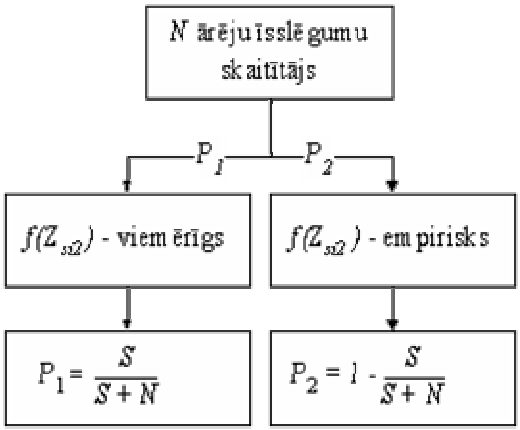
Att.3.7 Empīriskā sadalījuma likuma aprēķinu algoritma struktūra pretējā gala ekvivalentai pretestībai

Atzīmēsim, ka reālos apstākļos īsslēgumu lielākā daļa ir ārējie attiecībā pret kontrolējamo līniju, tātad statistisko datu uzkrāšana var notikt salīdzinoši īsā laikā (dažos mēnešos). Statistiski adaptīva BNV algoritma struktūra parādīta Att.3.7

Lai nodrošinātu ierīces darbspēju, kas realizē izskatāmo algoritmu uzreiz pēc tā ekspluatācijas sākuma, kad vēl nav datu par ekvivalento pretestību statistiskajām

īpašībām, pirmkārt nepieciešams noteikt sadalījuma likumus. Datiem ienākot, pieņemto likumu jāaizvieto ar empīrisko. Nomaiņas procedūru var īstenot dažādi. Viens no variantiem, pieņemtais šajā darbā parādīts Att.3.8.

Saskaņā ar Att.3.8 parādīto algoritmu, iespējama divu sadalījuma likumu izmantošana: vienmērīgā un empīriskā. Katra no tiem izvēles varbūtība P_1 un P_2 tiek noteikta ar diviem skaitļiem: *S*–skaitli, kas raksturo ticamības pakāpi informācijai par vienmērīga sadalījuma hipotēzi, un *N*–skaitli, kas ir ekvivalento pretestību Zsi_2 mērījumu skaits. Pieaugot *N*–skaitlim no sākuma pieņemtās hipotēzes ietekme samazinās.



Att.3.8 Sadalījuma likuma izvēles procedūra

3.4.3. Ievērojama garuma līniju BNV algoritmi

Iepriekš izskatītie BNV algoritmi pamatojās ar tādu vienādojumu izmantošanu, kas izveidoti līnijām ar koncentrētiem parametriem. Elektromagnētisko pārejas procesu teorijā [8] ir zināmi ierobežojumi, kas nosaka minēto vienādojumu izmantošanas lauku. Pie reāliem gaisa elektropārvades līniju parametriem, sākot ar līniju garumu 200 – 250 km, rodas nepieciešamība uzskaitīt šķērsenisko kapacitatīvo vadītspēju (kā īsslēgumu strāvu aprēķinos, tā arī risinot BNV uzdevumus). Tālāk tiek izskatīti divi minēto kapacitāšu uzskaites veidi:

1. Labojumu ievadīšana. ( ) piedāvātais algoritms bāzējas uz garo līniju bez zudumiem vienādojumu izmantošanu, lai ievadītu labojumu rezultātus, kas iegūti bez šķērsvadītājspējas ievērošanas. Gala rezultātā, tiek piedāvāts izmantot labojumus starpfāžu slēgumu tipam:

$$l' = l - \frac{\alpha^2}{3} l^3 \ , \quad (3.15),$$

kur *l'* – attālums līdz bojājuma vietai pēc labojuma ievadīšanas attāluma *l* aprēķinos, kas veikts izmantojot modeli ar koncentrētiem parametriem;

$\alpha = \omega\sqrt{L_{ap}C_{ap}}$ – fāzes koeficients, bet L_{ap} un C_{ap} īpatnējā garenvirziena?? induktivitāte un tiešās secības škērseniskā kapacitāte. (3.15) izteiksmes izmantošana dod apmierinošus rezultātus AL ar garumu 300–400 km.

(3.15) izteiksme ir Maklorena rindas aproksimācija [13,131] ar rindas vienādojumu pirmo četru locekļu saglabāšanu, kas nosaka ieejošo pretestību īsslēguma līnijai bez zudumiem [ ]:

$$l\omega L_{ap} = \sqrt{\frac{L_{ap}}{C_{ap}}} tg\,\omega \sqrt{L_{ap}C_{ap}}\, l' , \quad (3.16)$$

(3.15) izteiksme no (3.16) iegūta, lai vienkāršotu aprēķinus ievērojot 20. gs. 80. gadu mikroprocesoru tehnikas iespējas. Pašreiz (3.16) var tikt realizēts tieši.
Vienfāžu īsslēgumos vienādojums labojumu ieviešanai paliek sarežģītāks un pieņem šādu veidu [ ]:

$$l' = l - \frac{\alpha_1^2 l^3}{3} + \frac{\alpha_0^2 - \alpha_1^2}{2} l^2 \frac{I_m U_0 / I_0}{I_m \left[\frac{(I_F + kI_0)\, jx_{1ap}}{I_0} \right]} , \quad (3.17),$$

kur α_0 – nulles secības fāzes koeficients.

Izskatīto pieeju labojumu ieviešanai piemērosim tikai homogēnām garām līnijām. Pie tam, neievērojot zudumus, rodas algoritmiska kļūda.

2. elektropārvades līnijas aizvietošana ar četrpoliem, kas savienoti kaskādparalēlā slēgumā. Šajā gadījumā elektropārvades līnija var tikt iedomāta kā zināma skaita četrpolu savienojums. Aprēķinus ir ērti veikt izmantojot četru polu vienādojumus matrices formā (tiešajai, apgrieztai un nulles secībai). Vienādojumi ir diezgan smagnēji un šeit netiek attēloti. Tomēr to realizācijai nerāda īpašu grūtību, bet BNV algoritms tāpat kā iepriekš var tikt pamatots ar reaktīvās jaudas zudumu noteikšanu. Pie tam nepieciešams summēt zudumus četrpolā. Atbilstoši strāvu sadalījuma koeficientiem arī jābūt noteiktiem izejot no izmantojamās aizvietošanas shēmas.

Kā jau tika minēts, jautājums par šķērseniskās kapacitātes uzskaiti rodas līnijām ar garumu virs 200 km (neuzskaitot šo vadāmību 200 km līnijai rodas papildus kļūda ap 1%, bet pie garuma 300 km kļūda sasniedz 15 – 20 %). Nepieciešams atzīmēt, ka Baltijas reģiona valstīm šis jautājums nav aktuāls, jo neekstistē tāda garuma līnijas. Tomēr Krievijā un citās teritoriāli lielās valstīs ir AL vairāk kā 400 km garumā. Šādām līnijām var tikt izmantota izskatītā pieeja.

3.4.4. BNV divpusējās metodes

Sakarā ar jaunu sakaru līdzekļu strauju attīstību un to masveida ieviešanu energosistēmu ekspluatācijas praksē, atdzimst interese par divpusējiem BNV algoritmiem. Pie tam pastāv vairākas iespējas:

Abi AL gali tiek nodrošināti ar BNV līdzekļiem, kas realizē pietiekami efektīvu BNV algoritmu. Pie tam, ja ņemam vērā rādītājus no abām pusēm, esot rekomendācijām par apgaitas zonas garumu no katras puses, ievērojamu kļūdu rašanās iespēja praktiski nepastāv.

AL otrajā galā var uzstādīt vienkāršotu mērījumu iekārtu. Tiešām, lai palielinātu iepriekš izskatīto algoritmu precizitāti, pietiekami veikt kaut vai vienu no ekvivalento pretestību Zs_{02} vai Zs_{22} mērījumu.

"Klasisko" algoritmu izmantošana (2. nodaļa).

Mērījumu sinhronizācija [3].

Zināmo [24] vai tālāk piedāvātās starptautiskās procedūras izmantošana, kas nodrošina attāluma līdz bojājuma vietai aprēķinu bez papildus tuvinājumu izmantošanas.

Tālāk izskatītas metodes izmantošana, kas pamatojas uz tiešās, apgrieztas vai nulles secības jaudu plūsmu novērtējumu.

Īsi izskatīsim klasiskus divpusējās bojājuma vietas noteikšanas metodes pamatprincipus. Ņemot vērā, ka isslēguma momentā tiek fiksēti četri lielumi: $U_{i1}, U_{i2}, I_{i1}, I_{i2}$, varam uzrakstīt vienādojumus spriegumam īsslēguma punktā:

$$U_{iF} = U_{i1} + I_{i1} Z_{i1}, \quad (3.18)$$

$$U_{iF} = U_{i2} + I_{i2}(L - L_f) Z_{1ap}, \quad (3.19)$$

kur Z_{i1} - līnijas pretestība līdz bojājuma vietai;

$(L - L_f) Z_{iap}$ - līnijas pretestība līdz bojājuma vietai no otra gala.

Vienādot vienādojumus (3.18) un (3.19), iegūstam, ka:

$$U_{i1} + I_{i1} Z_{i1} = U_{i2} + I_{i2}(L - L_f) Z_{iap} \quad (3.20)$$

$$(I_{i1} + I_{i2}) Z_{iap} L_f = U_{i2} - U_{i1} + I_{i2} Z_{iap} L \quad (3.21)$$

$$L_f = \frac{U_{i2} - U_{i1} + I_{i2} Z_{iap} L}{(I_{i1} + I_{i2}) Z_{iap}} \quad (3.22)$$

Praktiski, visbiežāk tiek izmantoti nullsecībās vērtības, bet atsevišķos gadījumos izmantojami arī apgrieztās secības vērtības.

3.4.5. Ar jaudu kontroli pamatotais divpusējais BNV algoritms

Šajā apakšnodaļā parādīsim, ka (3.20) vienādojuma izmantošana nodrošina divpusējas BNV realizācijas iespēju, pie tam atšķirībā no citiem zināmajiem algoritmiem:

1. Nav nepieciešama mērījumu sinhronizācija (salīdzinot ar algoritmiem, kas parādīti [ ] un [3].
2. Nav nepieciešamības izmantot starptautisko procedūru ([22] tika pielietota Ņūtona–Rafsona metode [131], lai kompensētu nesinhronizēto mērījumu laika nobīdes).

Uz 3.2. Att. attēlotās ekvivalentās shēmas pamata izskatot jaudas plūsmas, kas tiek pievadītas bojājuma vietai no abām pusēm, varam pierakstīt:

$$I_m\left[\sum_{i=0}^{2}(S_{i1}-|I_{i1}|^2 Z_i l)+\sum_{i=0}^{2}(S_{i2}-|I_{i2}|^2 Z_i(L-l))\right]=0\ ,\quad (3.23\ )$$

un no (3.23) iegūstam:

$$l=\frac{\sum_{i=0}^{2}S_{i1}+\sum_{i=0}^{2}S_{i2}-\sum_{i=0}^{2}|I_{i2}|^2 Z_i L}{\sum_{i=0}^{2}|I_{i1}|^2 Z_i-\sum_{i=0}^{2}|I_{i2}|^2 Z_i}\ ,\quad (3.24)$$

Diemžēl, (3.24) vienādojums nav universāls. Uz katras elektropārvades līnijas eksistē punkts, tuvojoties kuram (3.24) skaitītājs un saucējs tuvojas nullei, rodas nenoteiktība un, atbilstoši, nepieciešamība izmantot citas metodes.

3.4.6. Divpusējas BNV iterācijas algoritms

Atgriezīsimies pie "klasiskās" BNV divpusējās metodes, kas pamatojas ar vienu no šādām izteiksmēm

$$l=\frac{U_{01}-U_{02}-I_{02}Z_0 L}{(I_{01}^2+I_{02}^2)Z_0}\ ,\quad (3.25)$$

$$l=\frac{U_{21}-U_{22}-I_{22}Z_2 L}{(I_{21}^2+I_{22}^2)Z_0}\ ,\quad (3.26)$$

Pie mērījumu sinhronizācijas neesamības tika izmantota izteiksmju (3.25) un (3.26) tuvināta realizācija. Par pamatu tuvinājumiem kalpoja argumentu vienādība:

$$\arg U_{01}\approx\arg U_{02}\approx\arg I_{02}I_0\ ,\quad (3.27),$$

vai

$$\arg U_{21}\approx\arg U_{22}\approx\arg I_{22}I_2\quad (3.28).$$

Īstenībā, vektoru leņķu atšķirība var sasniegt 15 – 25 el. grādu un kā sekas – aprēķinot attālumu līdz bojājuma vietai, rodas kļūdas ar lielumu līdz dažiem procentiem.

Pieņemsim, ka nesinhronizētu mērījumu rezultātā ir iegūtas divu vērtību grupas (izskatīsim pretējas secības spriegumu un strāvu izmantošanas piemēru, attiecībā pret nulles secību – spriedumu ir līdzīgi):

1. U_{21}, I_{21} (vektori var būt to ortogonālie veidojošie);

$$U_{22}e^{j(n)},UI_{22}e^{j(n)}$$

Pie tam leņķis *(n)* ir nezināms, sakarā ar mērījumu sinhronizācijas neiespējamību, kas tiek veikti AL dažādajos galos.

Aprēķināsim leņķa atkarību starp I_{21} un I_{22} strāvām. Par pamatu ņemot 3.2. Att. iegūstam, ka:

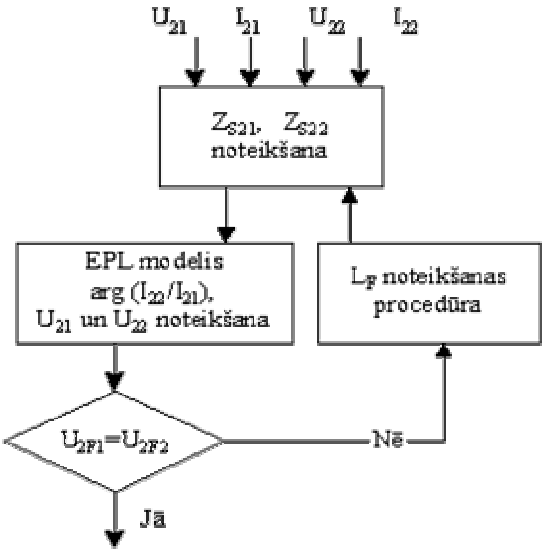
$$^{(n)} = \arg(I_{22} / I_{21}) = \arg\left[\left(Z_{s21} + Z_2 \cdot l\right)/(Z_2(L-l) + Z_{s22})\right], \quad (3.29)$$

Ja iegūto izteiksmi ievietot ( ), tad iegūstam nelineāru vienādojumu attiecībā pret nezināmo *l*, kuru var atrisināt ar jebkuru atbilstošu metodi (Ņjūtona–Rafsona, Regula-Falsi, pārlikšanas??? перебора).

Piedāvātā pieeja var tikt paplašināta attiecībā pret sarežģītākas konfigurācijas līnijām (neviendabīgi iecirkņi, atzarojumu esamība, škērsenisko indukciju uzskaite). Šajos gadījumos nepieciešams izmantot algoritmu, kas parādīts Att.3.9 Algoritma pamatā likts bojātas līnijas modelis, leņķu nobīdes aprēķins starp I_{21} un I_{22} vektoriem (pie metāliskiem īsslēgumiem, jo šis leņķis nav atkarīgs no pārejas pretestības lieluma), i–tās secības spriegumu aprēķins pie uzdotās bojājuma vietas un tāda *l* lieluma meklējumu procedūra, pie kura pēc datiem no abiem elektropārvades līnijas galiem aprēķinātie *i*–tās secības spriegumi ir vienādi.

Par meklējumu procedūru pietiekami sekmīgi un efektīvi var izmantot vienkāršu metodi – pārlikšanas??перебора metode (ar klasisko metodi aprēķinātā punkta apkārtnē).

U_{2F1} un U_{2F2} – pretējās secības spriegumi, kas aprēķināti pēc datiem no abiem AL galiem un ievērojot nobīdi, kas aprēķināta pie noteiktā *l*.



Att.3.9 BNV iterācijas algoritma struktūra.

3.4.7. BNV kvadrātiskais divpusējais algoritms

Ar atgrieztas secības komponenšu izmantošanas piemēru parādīsim iespēju iegūt kvadrātisku vienādojumu attiecībā pret nezināmo attālumu līdz bojājuma vietai *l*. Pie tam, *l* aprēķinam nav nepieciešama mērījumu sinhronizācija.

Pieļausim, ka nesinhronu mērījumu gadījumā katrā AL galā iegūtas pretējas secības spriegumu un strāvu vērtības, atbilstoši:

U_{21}, I_{21} и $U_{22}\, e^{j(n)}; I_{22}\, e^{j(n)}$, *(3.30)*

kur *(n)* – nezināms leņķis; pieprasa pretējas secības spriegumu vienādību bojājuma vietā, kas aprēķināti no abiem AL galiem:

$$U_{21} - I_{21} \cdot lZ_2 = U_{22}e^{j(n)} - I_{22}e^{j(n)}(L-l)Z_2 \ , \quad (3.31),$$

un reizināsim katru no spriegumiem (atbilstošie labajai un kreisajai vienādojuma pusēm) ar atbilstošo sajūgšanas spriegumu:

$$\begin{aligned}&(U_{21} - I_{21}Z_2 l)(U_{21} - I_{21}Z_2 l)^* = \\ &= (U_{22}e^{j(n)} - I_{22}e^{j(n)}Z_2(L-l))(U_{22}e^{j(n)} - I_{22}e^{j(n)}Z_2(L-l))\end{aligned} \ , \quad (3.32),$$

no kurienes iegūstam:

$$\begin{aligned}&U_{21}U_{21}^* - U_{21}(I_{21}Z_2)^* l - U_{21}^* I_{21}Z_2 l + I_{21}I_{21}^* Z_2^2 l^2 = \\ &= U_{22}U_{22}^* - U_{22}(I_{22}Z_2)^* L - U_{22}^* I_{22}Z_2 L + U_{22}(I_{22}Z_2)^* l + \ , \quad (3.33). \\ &+ U_{22}^* I_{22}Z_2 l + I_{22}I_{22}^* Z_2^2 l^2\end{aligned}$$

Tātad: $Al^2 + Bl + C = 0$, kur

$$\left.\begin{aligned}&A = (I_{21}I_{21}^* - I_{22}I_{22}^*)Z_2^2 \\ &B = -[U_{21}(I_{21}Z_2)^* + U_{21}^* I_{21}Z_2 + U_{22}(I_{22}Z_2)^* + U_{22}^* I_{22}Z_2] \\ &C = U_{21}U_{21}^* - U_{22}U_{22}^*\end{aligned}\right\} \ , \quad (3.34).$$

Acīmredzot, analoģiskus vienādojumus var iegūt arī tiešās un nulles secības komponentēm.

Izmantojot mikroprocesoru tehniku kvadrātiska vienādojuma atrisinājums nerada grūtības.

3.4.8. BNV divpusējs algoritms, kas pamatots ar pirmsavārijas režīma kontroli

Mērījumu veikšana pirmsavārijas režīmā ļauj aprēķināt nezināmo leņķi (n), kas rodas neesot mērījumu sinhronizācijai. Pierādīsim teikto par piemēru ņemot līniju bez škērsvadāmības un kapacitātes. Šādai līnijai:

$$I_{11} = I_{12} \ , \quad (3.35),$$

tas ir, tiešās secības (tāpat kā fāžu) strāvas abos līnijas galos ir vienādas. Faktiski pie nesinhroniem mērījumiem starp strāvām rodas nobīdes leņķis (n), tas ir:

$$I_{11} = I_{12}e^{j(n)} \ , \quad (3.36),$$

tātad no šī vienādojuma var atrast nezināmo leņķi $^{(n)}$:

$^{(n)} = \arg[I_{11} / I_{12}]$, (3.37).

Izmantojot (3.37) var izskaitļot leņķi $^{(n)}$,pēc tam, aprēķinot attālumu līdz bojājuma vietai pietiekami pagriezt pretējā AL gala sprieguma un strāvas vektorus par šo leņķi (ar pretēju zīmi).

Pirmsavārijas režīmos līnijas strāvas var iegūt zemas vērtības, tāpēc, lai realizētu izskatāmo pieeju labāk izmantot spriegumus, tas ir aprēķinus veikt izmantojot savā galā izmērītos spriegumus un strāvas, spriegumu pretējā AL galā un salīdzinot to ar pretējā gala mērījumiem noteikt novirzes leņķi $^{(n)}$.

Izmantoto pieeju var piemērot arī līnijām ar šķērsvadāmību un kapacitātēm. Šajā gadījumā, lai aprēķinātu pretējā AL gala spriegumu pietiekami izmantot četrpolu vienādojumu.

Tomēr atzīmēsim, dotās pieejas būtisku trūkumu – to nevar izmantot līnijām ar atzarojumiem (ar starplaika??? Промежуточным jaudas noņemšanu).

3.4.9. Algoritms, kas pamatos ar pārejas pretestības izmaiņu kontroli

Baltijas valstīs fiksēto vienfāžu īsslēgumu lielākā daļas cēlonis ir krītoša koka saskarsme ar vienas no fāzēm vadu. Šajos gadījumos, pārejas pretestība īsslēguma vietā iegūst lielas vērtības un kā sekas rodas lielas kļūdas bojājuma vietas noteikšanā. Reālu slēgumu oscilogrammu analīze rāda, ka īslēguma procesā pārejas pretestība nav pastāvīga, bet, kā likums, būtiski samazinās. To var paskaidrot ar strāvu ietekmi uz koku, ievērojamas enerģijas izdalīšanos, kas sekmē pretestības samazināšanos.

3.10. Att. parādīta reāla īsslēguma oscilogramma. Oscilogrammā redzams bojātās fāzes strāvas pieaugums nulles secībā. Parādīsim, ka šādos gadījumos ir iespēja neņemt vērā pārejas pretestības ietekmi uz bojājuma vietas noteikšanas precizitāti, veicot divkārtējus mērījumus.

Veicot divkārtējus strāvas un spriegumu mērījumus, varam pierakstīt:

$$\left.\begin{aligned} U_F^1 &= (I_F^1 + kI_0^1)Z_1 l_{k3} + 3R_p I_{0*}^1 \\ U_F^2 &= (I_F^2 + kI_0^2)Z_1 l_{k3} + 3R_p I_{0*}^2 \end{aligned}\right\}, \quad (3.38)$$

kur indeksi “1” un “2” atbilstoši ataino pirmo un otro mērījumu rezultātus.

I_0, I_{0*} – nulles secības strāvas mērījumu un bojājuma vietā atbilstoši, bet R_f^1 un R_f^2 esamība vienādojumos norāda uz mērījumu faktu pie divām R_f vērtībām.

Sadalot (3.38) vienādojumus atbilstoši kontrolējamām strāvām I_{01} un I_{02},iegūstam:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\underline{U}_F^1}{\underline{I}_0^1} &= \frac{(\underline{I}_F^1 + k\underline{I}_0^1)Z_1 l_{k3}}{I_0^1} + \frac{3R_p \underline{I}_{0*}^1}{\underline{I}_0^1} \\ \frac{\underline{U}_F^2}{\underline{I}_0^2} &= \frac{(\underline{I}_F^2 + k\underline{I}_0^2)Z_1 l_{k3}}{\underline{I}_0^2} + \frac{3R_p \underline{I}_{0*}^2}{\underline{I}_0^2} \end{aligned}\right\}. \quad (3.39)$$

Ieviesīsim apzīmējumus:

$$\underline{A}^1 = \underline{U}_F^1 / \underline{I}_0^1 \ , \qquad \underline{A}^2 = \underline{U}_F^2 / \underline{I}_0^2 \ ,$$
$$\underline{B}^1 = (\underline{I}_F^1 + \underline{k}\underline{I}_0^1) Z_1 / \underline{I}_0^1 , \qquad \underline{B}^2 = (\underline{I}_F^2 + \underline{k}\underline{I}_0^2) Z_1 / \underline{I}_0^2 \ .$$

Tā kā mērījumu tiek veikti pie divām dažādām pārejas pretestības R_f vērtībām un nemainīgām citām pretestībām, kas ietilpst 3.2. Att. aizlieguma shēmā, varam apgalvot, ka :

$$\arg(3R_p^1 \cdot \underline{I}_{0A}^1 / \underline{I}_0^1) = \arg(3R_p^2 \cdot \underline{I}_{0*}^2 / \underline{I}_0^2) , \quad (3.40)$$

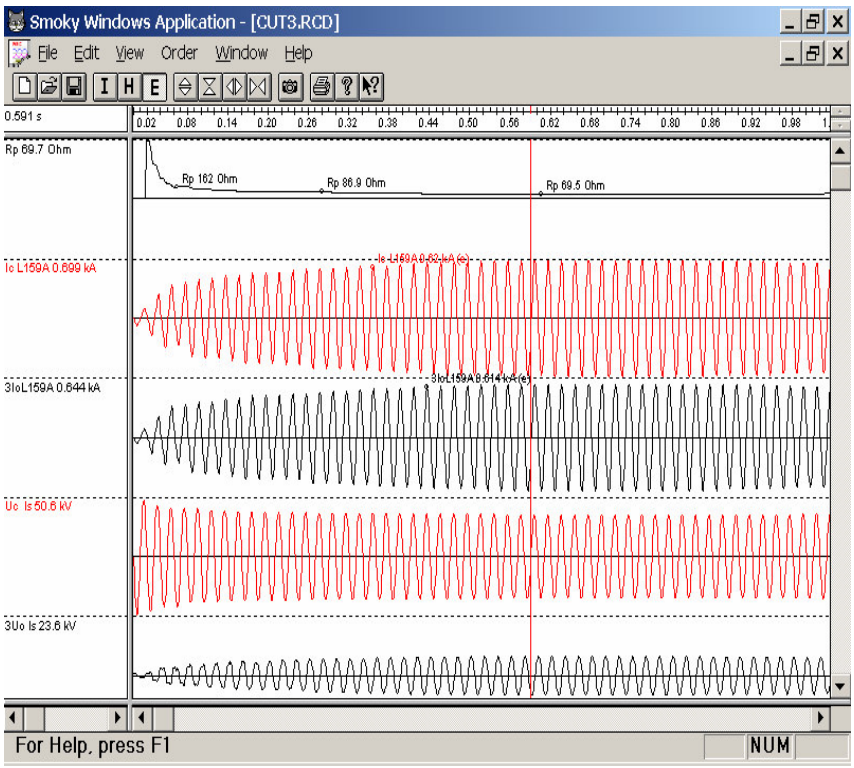
tātad, ja nosaka:

$$3R_p^1 \cdot \underline{I}_{0*}^2 / \underline{I}_0^1 = \underline{C} ,$$

tad

$$3R_p^2 \cdot \underline{I}_{0*}^2 / \underline{I}_0^2 = S\underline{C} , \quad (3.41)$$

pie tam koeficients S (3.41) vienādojumā ir reāls skaitlis.



Att. 3.10 Issleguma oscilogramma

Ievērojot pieņemtos (3.41) apzīmējumus nonākam pie veida:

$$\left.\begin{aligned}\underline{A}^1 &= \underline{B}^1 l_{k3} + \underline{C} \\ \underline{A}^2 &= \underline{B}^2 l_{k3} + S\underline{C}\end{aligned}\right\}. \quad (3.42)$$

Aprēķinot (3.42) vienādojumus, sareizināsim pirmo un otro vienādojumus atbilstoši ar $\underline{B}^2$ un $\underline{B}^1$. Iegūstam:

$$\underline{D} = \underline{C} - S\underline{C} = \underline{A}^1 \underline{B}^2 - \underline{A}^2 \underline{B}^1 \quad (3.43)$$

Ja ņemam vērā, ka koeficients S ir reāls skaitlis, varam apgalvot, ka

$$\arg \underline{D} = \arg \underline{C} = \arg S\underline{C}. \quad (3.44)$$

Iegūtais apgalvojums rada jebkura (3.39) vienādojuma stingras atrisināšanas iespēju attiecībā pret nezināmo l_f:

$$l_{k3} = \frac{U_F^i / \underline{D}}{(\underline{I}_F^i + \underline{k}\underline{I}_0^i) Z_1 / \underline{D}}, \quad (3.45)$$

3.5. Elektropārvades līnijas slēdžu vienmērīgs atslēgums un ieslēgšanās

Bojāta, parasti elektropārvades līnija ar diviem galiem, komutējas (ieslēdzas un atslēdzas) ar diviem slēdžiem. Pie tam, izmainot slēdža stāvokli ir iespējama būtiska atšķirība laikā dēļ diviem pamatfaktoriem:

- Gadījuma, ko izsauc releju aizsardzības un slēdžu darbības apstākļu atšķirības.
- Ar nodomu noteikts elektropārvades līnijas automātikas un aizsardzības nodrošināšanas algoritmā.

Atslēgšanas nevienlaicība rodas visos gadījumos, tomēr bojājuma vietas noteikšanas jautājuma kontekstā par nevienlaicīgu atslēgšanos uzskatīsim gadījumus, kad atšķirība laikā ir ne mazāk kā 10 μs, tas ir laiks, kas pietiekams lai veiktu strāvas un spriegumu parametru mērījumus. Nevienlaicīga slēdžu atslēgšanās gadījumā bojājuma vietas noteikšanas apstākļi būtiski mainās un šie mērījumi var tikt izmantoti precīzāka attāluma noteikšanai līdz bojājuma vietai. Teiktais ir acīmredzams vispirms atslēdzoties elektropārvades līnijas pretējam galam. Šajā gadījuma rodas bojājuma vietas vienpusējas barošanās situācija un pārejas pretestības ietekme var būt pilnībā izslēgta. Pretējā gadījumā saglabājas iespēja izmantot kontrolējamā objekta struktūras izmaiņas precīzākai bojājuma vietas noteikšanai. Tālāk tiek izskatīti divgalu elektropārvades[2] līniju bojājuma vietas nevienlaicīgas komutācijas dažādi varianti.

[2] Trīsgalu AL, kā arī vienas fāzes nevienlaicīgas atslēgšanas gadījumi jāizskata atsevišķi.

3.5.1. No kontrolējamā gala puses barojama bojātā AL

Šajā gadījumā, lai pilnībā izslēgtu pārejas pretestības ietekmi, pietiekami izmantot vienādojumu:

$$l_{k3} = \frac{\underline{U}_F / \underline{I}_0}{\frac{(I_F + kI_0)Z_1}{I_0}} \qquad (3.46)$$

pie noteikuma, ka strāvas un spriegumi atbilst izskatāmajam režīmam. Rodas uzdevums atpazīt tā rašanās faktu. Šis uzdevums viegli tiek atrisināts, jo AL pretējā gala atslēgšanās momentā tiek novērota simetrisko veidojošo strāvu izmaiņas un AL pretējā gala atslēgšanās notikums var tikt noteikts kā vien no šādu noteikumu izpilde:

$$k\left|\left[I_0(T_1) - I_0(T_0)\right]\right| > \left|I_0(T_0)\right|, \qquad (3.47)$$

$$k\left|\left[I_2(T_1) - I_2(T_0)\right]\right| > \left|I_2(T_0)\right|, \qquad (3.48)$$

kur $I(T_1)$ un $I(T_0)$ – nulles un pretējās secības (atbilstoši indeksam) strāvas, kas mērīti esošajā (T1) vai iepriekšējā laika momentā.

No realizācijas viedokļa visvienkāršāk ir pieņemt, ka

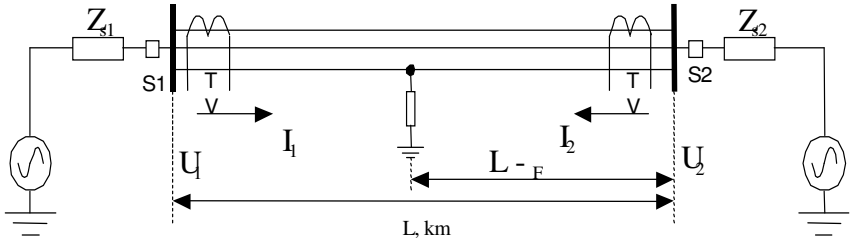
$$T_1 - T_0 = 0{,}02$$

tas ir salīdzināt esošā un iepriekšējā perioda rūpnieciskās frekvences strāvas.

Bojātas AL vienpusēja barošana no kontrolējamā gala puses var tikt organizēta mākslīgi, veicot atkārtotu automātisku ieslēgšanos. Tam ir nepieciešams saskaņot iestatījumus, kas nosaka katra gala bezstrāvas aizsardzības pauzi. Atzīmēsim, ka izmantojot aizsardzības mikroprocesoru komplektus tas tiek realizēts un nevienlaicīga slēdžu ieslēgšanās tiek plaši pielietota.

3.5.2. No AL nekontrolējamā gala barota bojātā AL

Interesi izraisa gadījums, kad sprieguma mērtransformatori attiecībā pret slēdzi ir pievienoti no elektropārvades līnijas puses (sk. Att.3.11).



Att.3.11 Sprieguma transformatori, kas pieslēgti no AL puses.

Šajā gadījumā , pat pie izslēgta slēdža *S1* iespējami bojātas līnijas spriegumu mērījumi. Tālāk tiek izskatītas šādu mērījumu izmantošanas iespējas ar mērķi precizēt attāluma fiksāciju līdz bojājuma vietai. Pie tam tiek pieņemts, ka mērījumi ir veikti gan pie ieslēgta, gan izslēgta slēdža *S1*.

Nav izdevies iegūt izskatāmā jautājuma analītisku risinājumu. Tomēr risinājums ir iespējams izmantojot divus modeļus:

1. Līnijas ar divpusējas barošanas statistisko modeli (*S1* ir ieslēgts).
2. No pretējā gala barotas līnijas statistiskais modelis.

Organizējot nezināmā attāluma līdz bojājuma vietai *l* meklējumus, izskatāmajā gadījumā rodas papildus ierobežojums:

$$\left.\begin{aligned} \underline{U}_{ZME} &= \underline{U}_{2MOD} \\ \underline{U}_{0ME} &= \underline{U}_{0MOD} \end{aligned}\right\} \quad (3.49)$$

ko rada prasība – pretējās un nulles secības spriegumu U_{ZME} un U_{0ME} mērījumu vērtībai pēc slēdža atslēgšanas jābūt vienādai ar modelējamām U_{2MOD} un U_{0MOD} vērtībām.*

*var dot algoritma struktūrshēmu – analoģisku tām, kas dotas rakstos.

Veiktie papildus ierobežojumu sašaurina nezināmo telpu meklējot *l* parametrus un, atbilstoši, palielina bojājuma vietas noteikšanas precizitāti. **

** Būtu labi, protams, atrast oscilogrammu ilustrācijai.

3.6. Divķēžu līnijas

Izskatīsim bojājuma vietas noteikšanas īpatnības divķēžu (paralēlajām) ar mijindukciju saistītām līnijām (sk.Att 3.4).

Šādas līnijas tiek plaši pielietotas energosistēmās. Parādīsim, ka bojājuma vietas noteikšanas uzdevums uz šādām līnijām vienkāršojas.

Pieņemsim, ka AL1 īsslēguma gadījumā tiek veikti strāvas un spriegumu abu līniju mērījumi. Tātad, var tikt izmērīti pretējās secības spriegumu un strāvas elektropārvades līnijas pretējā galā $\underline{U}_2^{''}$:

$$U_2'' = \underline{U}'_2 - \underline{I}'^{p}_2 Z_1 L, \quad (3.50)$$

kur $\underline{I_2^{'p}}$ – pretējās secības strāva, kas plūst AL2 , ja AL1 ir īsslēgums, tas ir izskatāmajā gadījumā, atšķirībā no vienas???одиночных līnijas, kļūst zināms AL pretējā gala pretējās secības spriegumu vektors.

Ir nepieciešama AL abu galu pretējās secības spriegumu vienādība bojājuma vietā:

$$U_2' - I_2' lZ = U_2'' - I_2''(L-l)Z \qquad (3.51)$$

no kurienes

$$I_2'' = \frac{-(U_2' - U_2'' - I_2' lZ)}{(L-l)Z} \qquad (3.52)$$

Ievērojot (3.52) vienādojumu, reizinot vienādojumu ar $\dot{I}_2^{'} + \dot{I}_2^{''}$, iegūstam

$$U_F\left(\overset{*}{I'}_2 + \frac{A-Bl}{L-l}\right) = (I_F + kI_0)r_1 l\left(\overset{*}{I'}_2 + \frac{A-Bl}{L-l}\right) + 3R_p I_2 \cdot \overset{*}{I}_2 \qquad (3.53)$$

kur

$$\underline{A} = -\left[\frac{U_2' - U_2''}{Z_1}\right]^* \qquad \underline{B} = -\left[I_2'\right]^*,$$

(*) – vektora saistīšanas сопряжения operācija. Reizinot (3.53) vienādojumu ar *(L–l)* un pieprasot iedomāto daļu vienādību, iegūstam:

$$I_m\left[U_F I_2'(L-l) + U_F A - U_F Bl\right] = I_m\left[\left(I_F + kI_0\right)Z_1 l(\overset{*}{I'}_2(L-l) + A - Bl)\right] \qquad (3.54)$$

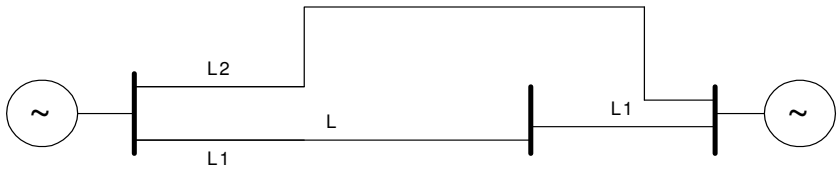
Iegūtais vienādojums (3.54) ir kvadrātisks attiecībā pret nezināmo attālumu līdz bojājuma vietai *l*. Viena no divām vienādojuma saknēm atbilst bojājuma vietai. Nepareizā sakne var tikt identificēta, izmantojot apsvērumus, kas doti 3.3. apakšnodaļā.

Tādā veidā, divķēžu līnijas gadījuma, bojājuma vietas noteikšana vienkāršojas un var tikt īstenota pamatojoties tikai ar bojātās un nebojātās līniju viena gala strāvas un spriegumu mērījumiem.

Izskatītā pieeja un atbilstošie apsvērumi var tikt izmantoti arī izplatītajiem "gredzenshēmu" (3.12. Att.) gadījumiem. Šajā gadījumā (3.52) vienādojuma vietā, viegli iegūt:

$$I_2'' = \frac{U_2' - I_2' lZ - U_2''}{L_1 Z_1 + (L-l)Z_1} \qquad (3.55)$$

Izmantojot (3.55) vienādojumu, viegli iegūt vienādojumu analoģisku (3.54) lai noteiktu attālumu līdz bojājuma vietai.



Att.3.12. Tīkla gredzenshēma.

Līnijai L2 var būt atzarojumi, tai var būt vai nebūt savstarpējās indukcijas ietekme ar kontrolējamo līniju L1.

3.7.Secinājumi

1. Pēc strāvu un spriegumu mērījumu rezultātiem attāluma līdz bojājuma vietai aprēķins vispārējā gadījumā ir atkarīgs no nekontrolējamiem gadījuma faktoriem. Tātad, BNV uzdevums var tikt pieskaitīts pie varbūtību uzdevumu klases, bet meklējamais attālums līdz bojājuma vietai var tikt attēlots ar sadalījuma likumu vai tā skaitliskajiem raksturojumiem.
2. Lai veiktu bojājuma vietas meklēšanu AL trasē vēlams noteikt apskates līnijas iecirkņa remontbrigādes uzdevums.
3. BNV vienpusēju algoritmu sintēzes pamatā var ņemt tiešās, pretējās un nulles secības jaudu metodi, kas noved pie kvadrātiska vienādojuma attiecība pret meklējamo bojājuma vietas attālumu.
4. BNV statistiskais algoritms var tikt īstenots par pamatu ņemot Monte–Karlo metodi, vienādojuma ar vienu nezināmo saknes meklējumu procedūru, līnijas modeli, kas vispārējā gadījumā sastāv no kaskādē savienotiem četrpoliem.
5. Ir iespējams izveidot statistiski adaptīvo algoritmu, kas formulē ekvivalenti pretestību sadalījuma empīrisko likumu automātiskā režīmā ārēju īsslēgumu gadījumā.
6. Mērījumi, ko veic paralēlā līnijā (tās esamības gadījumā), ļauj zināmā veidā vienkāršot BNV uzdevumu, ievērojot iespēju aprēķināt AL pretējā gala spriegumu vektorus.
7. Pārejas pretestību vērtību izmaiņu laikā uzskaite īsslēguma vietā noved pie kvadrātiska determinēta attiecībā pret nezināmo attālumu vienādojuma.
8. Automātiska atkārtota AL ieslēgšana var tikt veikta tā, lai vienkāršotu BNV uzdevumu.

4. Bojājumu vietu noteikšanas algoritmu efektivitāte

Efektivitāte un efektivitātes kritēriji un to izmantošana BNV algoritmu optimizācijā. Zudumu funkcija, matemātiskā cerība un Monte–Karlo metode, kā zudumu noteikšanas līdzeklis. Statistiskās informācijas avoti. Īsslēguma vietas pārejas pretestības sadalījuma empīriskais likums. Ekvivalento pretestību sadalījuma empīriskie likumi. Energosistēmas statistiskais modelis kā BNV algoritmu īpašību izpētes līdzeklis. BNV algoritmu pamatīpašības 110 un 330 kV līnijās. Lielākajā daļā gadījumu pieņemamie kļūdu un apskates iecirkņa garuma lielumi.

4.1. Efektivitātes kritēriji un to aprēķinu procedūra

BNV algoritmu funkcionēšanas efektivitāti var raksturot ar skaitliskiem rādītājiem (efektivitātes kritērijiem), kas atbilst prasībām, ko izvirza šiem algoritmiem. Izskatīsim iespēju veikt efektivitātes kritēriju atlasi, kas pietiekami pilnīgi apraksta visas izskatāmo algoritmu pamatīpašības.

BNV algoritmu funkcionēšana ir atkarīga no vairākiem gadījuma faktoriem: pārejas pretestības R_f, pirmsavārijas slodzes strāvas, īsslēguma vietas attāluma u.c. Šo faktoru kopumu apzīmēsim ar $\underline{X}$. Algoritmu funkcionēšanu nosaka arī struktūra un parametri, kas nosaka algoritmus līdz uzdotās konstantes precizitātei. Pieņemsim, ka ir uzdotas virkne šādu struktūru Σ_s un tām atbilstošo konstantu $\underline{K_s}$. Ja papildus pieņemt, ka ir zināma tāda zudumu funkcija Z, kas apraksta, iespējams naudas izteiksmē, zaudējumus, kas rodas algoritma darbības rezultātā pie ietekmējošo faktoru $\underline{X}$ kombinācijas, tad BNV algoritmu optimizācijas uzdevumu var izteikt kā uzdevumu, lai atrastu struktūras Σ_{OPT} lielumu un parametru K_{OPT} vektoru, kas atbilst prasībai

$$K_{OPT,}\Sigma_{OPT} = \arg\min M\left[Z(x,\Sigma_S,K_S)\right], \quad (4.1)$$

pie

$$K_{OPT},\Sigma_{OPT} \in \{K_S,\Sigma_S\},$$

kur

– $M[...]$ matemātiskā cerība
– $\{K_S,\Sigma_S\}$ - pieļaujamo parametru un struktūru daudzums, bet

$$M[Z] = \int ... \int_W Z(X,\Sigma_S,K_S)dF(X) \quad (4.2)$$

, kur $F(x)$ – sadalījuma X daudzaspektu funkcija ar eksistences apgabalu W, bet integrālis ir jāsaprot pēc Lebega–Stiltesa [131], kā apzīmējošs daudzaspektu integrāli no funkcijas, kas iespējams satur diskrētas konstantes.

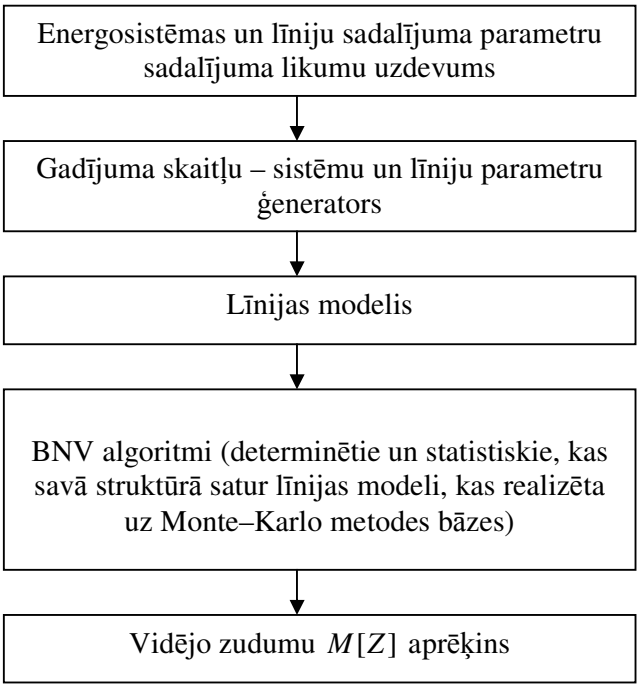
Lai uzstādītu BNV izvēles uzdevumu (4.1) veidā galvenais ir zudumu funkcijas $Z(x)$ izvēle. Relejaizsardzības iekārtu un energosistēmas automātikas darbības algoritmu optimizācijas vispārējā gadījumā zudumu funkcijas noteikšanai var būt ievērojamas grūtības [ ]. Izskatāmajā uzdevumā šī izvēle ir nosacīti vienkārša, jo neizmantojot rupjus tuvinājumus var pieņemt. ka zudumi ir proporcionāli attāluma līdz bojājuma vietas vērtējumam pret patieso attālumu:

$$Z(L_F) = C(.....)^2 \quad (4.3)$$

vai

$$Z(L_F) = C\left|.....\right| \ . \quad (4.4)$$

(4.3.) un (4.4.) veidu zudumu funkcijas diezgan būtiski atšķiras viena no otras, no novērtēšanas teorijas [ ] ir zināms, ka izvēloties (4.3) ir racionāli izmantot attāluma L_f noteikšanai tā matemātisko cerību. (4.4) izmantošanas gadījumā noteikšanai tiek izmantota sadalījuma mediāna. Praksē izmantojot jebkuru no zudumu funkcijām rādītāji ir pietiekami tuvi, bet simetrisko sadalījumu gadījumā – pilnīgi sakrīt. Tātad, ja izmanto vienu no zudumu funkcijām (4.3) vai (4.4), tad algoritmu optimizācijas uzdevums būs:



Att.4.1 BNV algoritma optimizācijas procedūras struktūra

- BNV algoritmu struktūru un parametru pārskate ar mērķi atrast labāko, minimizējošo izvēlēto zudumu funkciju;
- daudzkārtēja zudumu funkcijas matemātiskās cerības aprēķināšana.

Noformulēta optimizācijas uzdevuma otras daļas risinājumam atkal ir nepieciešama Monte-Karlo metodes izmantošana. Šī uzdevuma risinājuma algoritma struktūra ir paradīta Att.4.1

Atzīmēsim, ka lai atrisinātu optimizācijas uzdevumu nepieciešams liels statistiskās informācijas apjoms (salīdzinot ar to daudzumu, kas nepieciešams, lai realizētu 3. nodaļa izskatītos BNV statistiskos algoritmus), piemēram nepieciešams zināt pārejas pretestības sadalījuma likumus bojājuma vietās, pirmsavārijas režīma slodzes strāvas, energosistēmas ekvivalentās pretestības, kas baro kontrolējamās AL galu. Vislielākās grūtības sagādā vācot statistiskos datus par pārejas pretestībām īsslēguma vietā. Algoritmu efektivitāte var izrādīties atšķirīga atkarībā no līnijas parametriem un tās energosistēmas barības avotiem.

4.2. Bojājuma vietas pārejas pretestību reālie uzdevumi

Galveno elektropārvades līniju bojājumu veidu – īsslēgumus ir pieņemts sadalīt divās grupās:

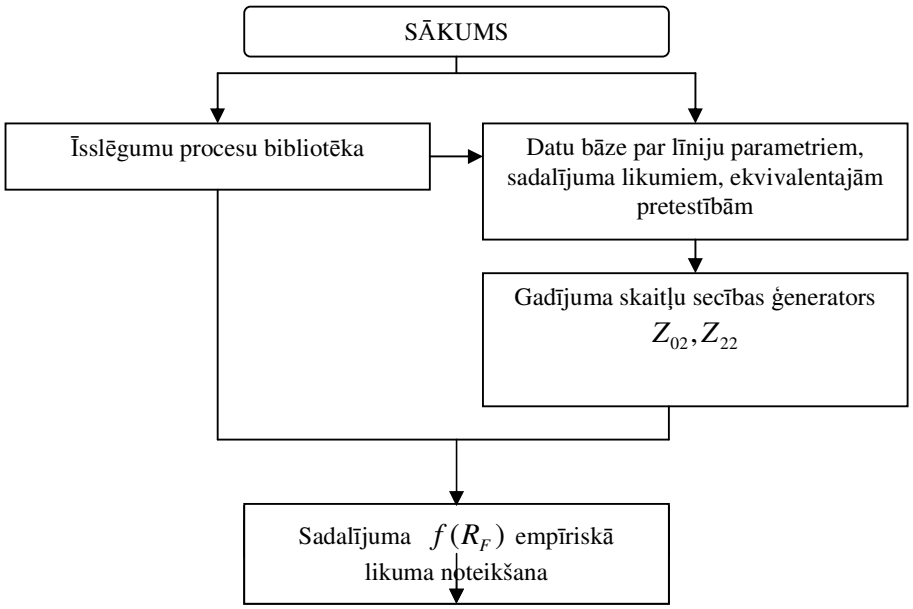
– metāliskie. Šajā gadījumā uzskata, ka bojājuma vietā (fāze–fāze, fāze–zeme) rodas īsslēgums caur pretestību, kuras vērtība tuvojas nullei un šīs pretestības lielumu var neievērot.
– caur pārejas pretestību. Šādu bojājumu gadījumā īsslēguma vietā rodas loks, un bez tam īsslēguma strāva plūst caur papildus priekšmetu (nokritušo koku, elektropārvades līnijas stabu utml.), kuriem ir gala pretestība.

Elektriskā loka pretestība ir nelineāra [8,139,140]. Ir zināmi analītiski izteikumi, kas nosaka elektriskā loka pretestību atkarībā no tās garuma un tajā plūstošās strāvas. Pārejošās pretestības otra daļai ir gadījuma raksturs, ko nosaka priekšmeta īpašības, kas izsaucis īsslēgumu. Diemžēl, līdz pat šim laikam nepastāv pietiekami pilnīgi pētījumi par īsslēguma vietas pārejas pretestību statistiskajām īpašībām [63].

Parādīsim pārejas pretestību R_f lielumu iegūšanas iespēju, kas pamatojas uz strāvu un spriegumu mērījumu rezultātu izmantošanu, risinot BNV uzdevumus. Priekš tam pietiek vērsties pie (2.8) vienādojuma. (2.8) ir kompleksais vienādojums un ņemot to par pamatu, pie zināmas energosistēmas ekvivalentās pretestības, kas baro pretējo AL galu, var tikt noteikts ne tikai attālums līdz bojājuma vietai l, bet arī pārejas pretestības R_f lielums. Tiešām, ja pieņemam, ka *l* lielums ir iegūts, tad no (2.8) izriet:

$$3R_F = \mathrm{Re}\left[U_{F1} / I_0\right] - \mathrm{Re}\left[(I_F + kI_{01}) / I_0\right], \quad (4.5)$$

kur I_0 – tiek noteikts saskaņā ar (2.7).



Att.4.2 Pārejas pretestības R_F sadalījuma empīriskā likuma veidošanas algoritma struktūrshēma

Izskatītie vienādojumi var tikt izmantoti par pamatu lai vāktu statistiskos datus par pārejošo pretestību R_f reālajiem lielumiem. Lai tas notiktu ir nepieciešams izpildīties vismaz vienam no trijiem nosacījumiem:

1. Ir zināms vismaz vienas pretestības Z_{s22} vai Z_{s02} sadalījuma likums (līnijas pretējais gals netiek kontrolēts).
2. Līnijas nekontrolējamais gals ir atslēgts. Šajā gadījumā $I_{01} = I_0$.
3. Ir zināms (noteikts) vismaz viens vektoru pāris $[U_{02}, I_{02}]$ vai $\lfloor U_{22}\ I_{22} \rfloor$. Tas ir mērījumi tiek veikti abos AL galos.

Izpildot pēdējos nosacījumus R_f noteikšanas uzdevums ir determinēts un izskaitļotie R_f lielumi var tikt izmantoti tieši sadalījuma empīriskā likuma uzbūvei $f(R_F)$.

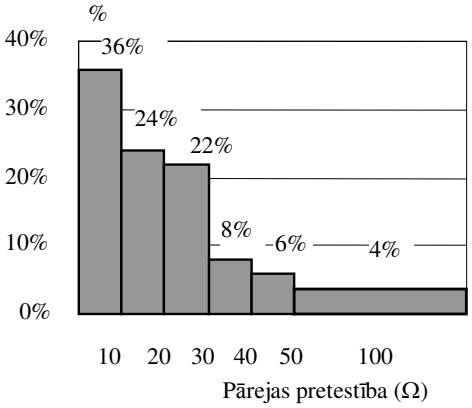
Pirmā nosacījuma izpildes gadījumā nonākam pie varbūtību teorijā [15, 71] jau zināmā gadījuma argumentu funkcijas $\varphi(x)$ sadalījuma blīvuma noteikšanas uzdevuma, ar zināmiem sadalījuma likumiem. Teorētiski uzdevums var tikt atrisināts analītiskā veidā (integrēšana [13, 131]). Tomēr, ievērojot, ka statistisko datu savākšanai ir nepieciešama dažādu AL mērījumu apstrāde, varam apgalvot, ka izskatāmajā uzdevumā gadījuma argumentu funkcija $\varphi(x)$ tiek noteikta ar parametriem, kas atkarīgi no konkrētās līnijas, un, iespējams, struktūras. Lai atrisinātu šādu uzdevumu mums atkal nepieciešams izmantot Monte–Karlo metodi. Pārejas pretestības R_F sadalījuma empīriskā likuma noteikšanas algoritma struktūra ir parādīts Att.4.2.

Lai realizētu algoritmu nepieciešams izmantot īsslēgumu procesu ierakstus, izvēloties konkrēto procesu no datu bāzes izvēlēties konkrēto struktūru un līnijas parametrus, uz kuras noticis īsslēgums, daudzkārtēji aprēķināt attālumu l un pārejas pretestību R_F, lai

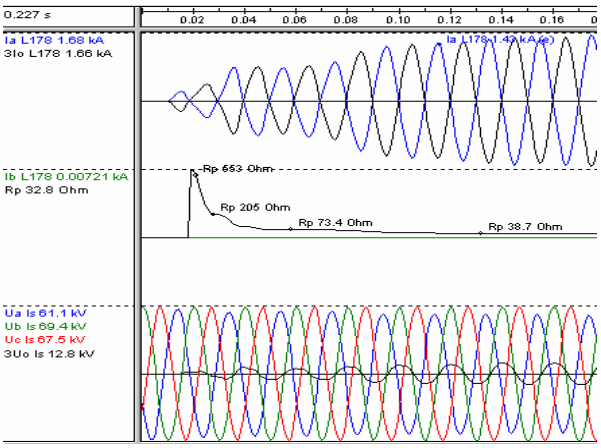
noteiktu sadalījuma $f(R_F)$ empīrisko likumu. Tātad, izskatītais algoritms realizē īsslēgumu procesu pārbaudi uz noteiktas klases AL.

4.3. zīmējumā attēlots sadalījuma $f(R_F)$ empīriskais likums 110 kW AL, kas konstruēts apstrādājot 100 īsslēgumu oscilogrammas.

No vienkāršuma un Rf noteikšanas precizitātes viedokļa vislabvēlīgākais ir gadījums, kad elekotropārvades līnijas otrs gals atvienots. Diemžēl, šādi gadījumi ir pietiekami reti. Att.4.4. attēlota vienfāzu īsslēguma oscilogramma (Eesti Energia, 2002. g. janvāris), kas noticis uz līnijas ar vienpusēju barošanu. Att.4.4. parādīta arī pārejas pretestības lieluma izmaiņas laikā.



Att.4.3 Pārejas pretestības R_F sadalījuma histogramma

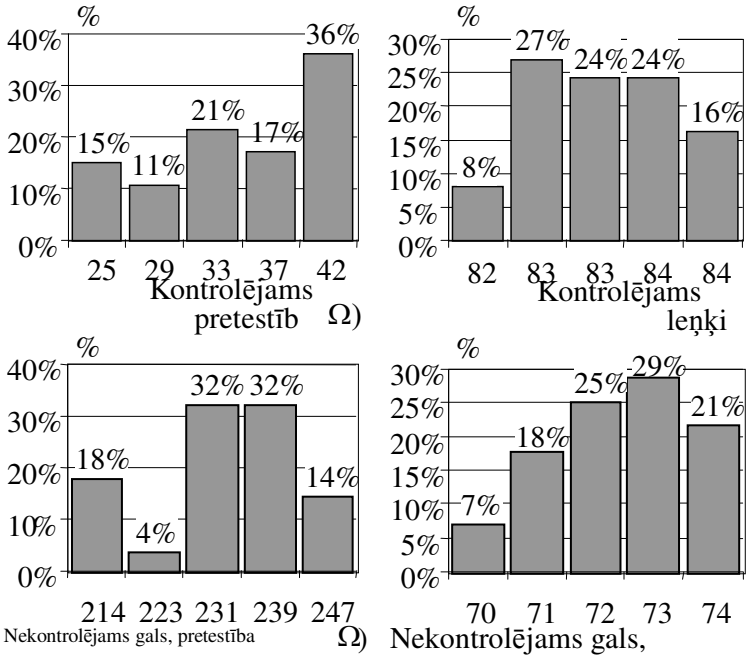


Att.4.4. Pārejas pretestības lieluma izmaiņa laikā

4.3. Barojošo energosistēmu ekvivalento pretestību sadalījuma likumi

Lai uzbūvētu ekvivalento pretestību, kas baro energosistēmas kontrolējamās līnijas abus galus, sadalījuma empīriskos likumus var izmantot īsslēgumu uz zemi oscilogrammas. Pie tam, īsslēgumi, kas atbilst virzienam no kopnes uz līniju, acīmredzot var būt par avotu lai noteiktu "aizmugures" pretestības (var tikt izmantoti īsslēgumi ne tikai uz kontrolējamās līnijas, bet arī ārējie, attālinātie). "Aizmugures" īsslēgumi, kā parādīts 3.3.3. punktā var palīdzēt noteikt AL pretējā gala pretestības noteikšanai.

Att.4.5 attēlotas histogrammas, kas parādavairāku ekvivalento pretestību sadalījumu energosistēmās, kas baro 110 kV līnijas.



Att.4.5 Ekvivalentās pretestības sadalījums

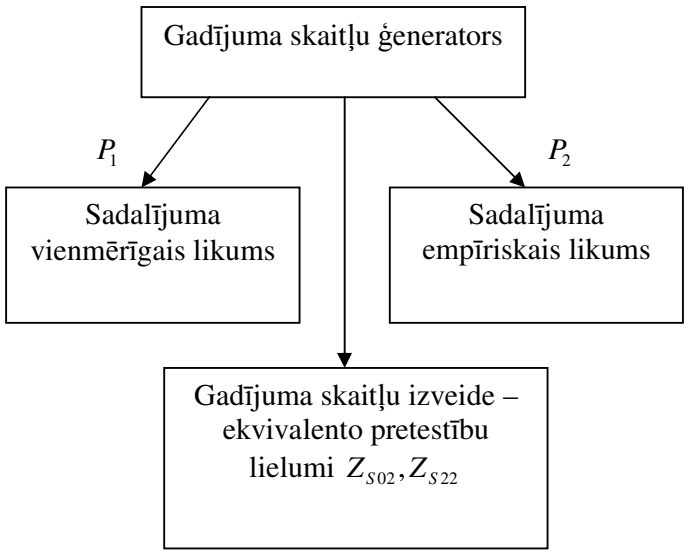
Atzīmēsim, ka eksperimentālo datu savākšanas un apstrādes process ir pietiekami darbietilpīgs un, kā parāda daudzie aprēķini (sk. tālāk), diezin vai sevi attaisno, jo šo likumu pielietošanas precizitāte maz ietekmē BNV algoritmu efektivitātes rādītājus. Vairumā gadījumu var izmantot sadalījuma vienmērīgo likumu. Svarīga pie tam ir prasība, lai uzdotais sadalījuma intervāls patiesi aptvertu visu reālo ekvivalento pretestību eksistences diapazonu. Tam ir nepieciešams, lai personāls, kas izvēlas iestatījumus, saprastu noteikto konstantu ietekmi un fizikālo būtību. Teiktais pirmkārt attiecas pret ekvivalento pretestību leņķiem. Pieraduma dēļ, kas radies aprēķinot

īsslēguma strāvas, daudzos gadījumos ekvivalentās pretestības tiek pieņemtas induktīvi, kas izskatāmajā uzdevumā nav pieļaujami.

4.4. Empīriskā sadalījuma likuma uzbūve ar statistiski adaptīvo algoritmu

Lai nodrošinātu BNV statistiski adaptīvā algoritma darboties spēju (sk. 3.3.3. punktu) vispirms nepieciešams formulēt iespējamo sadalījuma likumu. Viss pamatotākā šajā gadījumā ir hipotēze par vienmērīgo likumu starp pretestībām, kas atbilst minimālajam un maksimālajam režīmam. Ienākot statistiskajiem datiem iespējamais sadalījuma likums ir jānomaina ar empīrisko. Nomaiņas procedūras var tikt organizētas dažādi. Piemēram, iespējamais sadalījuma likums tiek lietots līdz brīdim, kad pēc lietotāja domām ir veikta pietiekama izlase. Pēc tam, kad atlase ir sasniegusi zināmu apjomu, tiek veikta pāreja uz empīriskā likuma izmantošanu.

Att.4.5 parādīta cita, šajā darbā pieņemtā sadalījuma empīriskā likuma uzbūves algoritma, struktūra, kas izmanto informāciju tai ienākot.



Att.4.6 Statistiski adaptīvā algoritma struktūrshēmas fragments

Saskaņā ar Att.4.6. algoritmu nosakot attālumu līdz bojājuma vietai l var tikt izvēlēti divi sadalījuma likumi:

1. Vienmērīgais ar varbūtību P1
2. Empīriskais ar varbūtību P2.

Pie tam:

$$\left.\begin{aligned} P_1 + P_2 &= 1, \\ P_1 &= \frac{N_1}{N_1 + N_2}, \\ P_2 &= \frac{N_2}{N_1 + N_2}, \end{aligned}\right\} \quad (4.6)$$

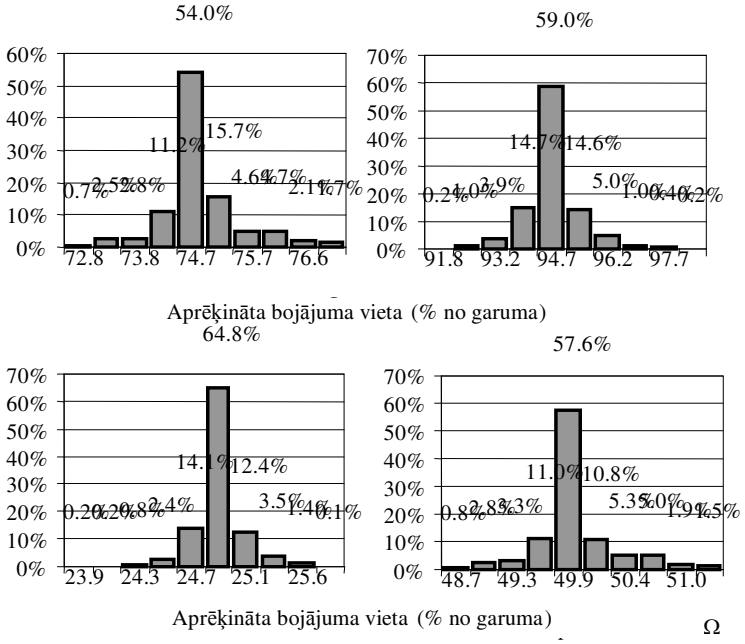
kur N_1 – ir kāds lietotāja noteikts skaitlis, kura lielumu izvēlas ņemot vērā informācijas uzticamības subjektīvo aspektu par vienmērīgo sadalījuma likumu; N_2 – veikto pretestību Z_{S02} un Z_{S22} mērījumu skaits. Pieaugot mērījumu datu apjomam apriorās hipotēzes ietekme samazinās.

Precīza N_1 lieluma noteikšana diezin vai ir iespējama. Taču 4.6. Att. parādītā algoritma darbam nepieciešamā izlase var tikt veikta izejot no šāda pieņēmuma: ticamības vienmērīgam sadalījumam līmenis vienādojas ar ticamību empīriskajam sadalījuma likumam pēc tam, kad veikto mērījumu skaits sasniedz mazās izlases apjomus. Praktiskos uzdevumos [ ] par apjomu, kas nosaka mazo izlasi, uzskata skaitļus 8–12. Ja pieņemam par augšējo robežu (12), tad no (4.6.) izriet, ka $N_1 = 12$.

4.5. Bojājuma vietas noteikšanas statistiski adaptīvais algoritms.

Ievērojot šīs nodaļas iepriekšējās apakšnodaļās aprakstītās metodes, tika veikti BNV statistiski adaptīvā algoritma izmēģinājumi (sk. 3.3.3. punktu) izmantojot 110 kV elektropārvades līnijas 100 km modeli. Īsslēgumi tika modelēti 25, 50, 75 un 100 km attālumā

Att.4.7 parādītas histogrammas, kas raksturo attāluma līdz bojājuma vietai sadalījumu. Kā redzams attēlā rezultātam ir pietiekami augsta precizitāte.



Att.4.7. Aprēķināmās bojājuma vietas histogramma

Papildus informācijas priekšrocība, kas var raksturot iespējamo BNV algoritma neprecizitāti, īpaši vērtīga pārejas pretestību augstu vērtību gadījumos un gadījumos ar īpaši lielu intervālu nekontrolējamās līnijas gala ekvivalento pretestību iespējamajiem lielumiem.

Gadījumos, ja algoritms nav spējīgs aprēķināt attālumu līdz bojājumam, vai precizitāte nav pietiekama, ir paredzēta lietotāja brīdināšanas iespēja par nepieciešamību saņemt datus no attālinātā līnijas gala, tādā veidā realizējot divpusējo BNV metodi.

4.6. Secinājumi

1. BNV algoritmu darbības efektivitāti var raksturot ar kvantitatīviem rādītājiem atbilstošiem prasībām, ko uzstāda šiem algoritmiem.
2. BNV algoritmu darbība ir atkarīga no virknes gadījuma rakstura faktoriem. To noteikšanas efektivitāte tieši ietekmē paša algoritma efektivitāti.
3. BNV algoritma izvēlē centrālais faktors ir zudumu funkcija. BNV gadījumā tā ir tieši atkarīga no algoritma darba precizitātes.
4. Lai noteiktu zudumu funkciju var izmantot Monte–Karlo metodi.
5. Zudumu funkcijas noskaidrošana pieprasa liela apjoma statistiskās informācijas savākšana. Vislielākās grūtības izraisa informācijas par pārejas pretestību bojājuma vietā iegūšana.
6. Pārejas pretestība nemetāliska īsslēguma gadījumā ir nelineārs un gadījuma rakstura lielums. To nosakot par pamatu var ņemt statistisko datu apstrādi ar Monte–Karlo metodi un histogrammu uzbūve, kas raksturo tās sadalījuma likumu.
7. Lai noteiktu sistēmas nekontrolējamā gala ekvivalentās pretestības sadalījuma likumu var tikt izmantotas "aizmugures" īsslēgumu oscilogrammas, tādā veidā, sadalījuma likuma uzbūvei var izmantot vairāku reģistratoru rādījumus, kas būtiski paātrina šī likuma noteikšanas ātrumu.
8. Statistiski adaptīvais algoritms uzsākot darbu ar vienmērīgo sadalījuma likumu, saņemot jaunu statistisko informāciju, pārveidojas par empīrisko sadalījuma likumu, kas tiek izmantots tālākajos aprēķinos. Sadalījuma likuma izvēles pamatā ir likts speciāls varbūtības novērtēšanas algoritms.
9. Statistiski adaptīvā algoritma izmēģinājumu rezultāti uzrādīja pietiekami augstus aprēķinu precizitātes rādītājus.
10. Ir paredzēta iespēja ar izstrādāto algoritmu ģenerēt brīdinājumu par iespējamo nepietiekamo precizitāti un papildus informācijas nepieciešamību.

5. Realizācija, ieviešana, ekspluatācijas pieredze

Baltijas valstu BNV sistēmas struktūra. Apakšējā līmeņa ierīču realizācija un šo ierīču veidi. Apakšējā līmeņa ierīču programmnodrošinājums. Dispečera dators, tā programmnodrošinājums, sakaru vadība un sakaru kanāli. Novērošanas loga izvēle, palaišana un apstādināšana. Atsevišķu programmas bloku realizācija: gadījuma ciparu ģenerators (fon Neimaņa metode), vienādojuma sakņu meklēšanas procedūra (Regula-Falsi), bojājuma veida izvēles procedūra. AL trases apskates iecirkņa garuma izvēle. Reālu īsslēgumu piemēri, oscilogrammas un vektoru diagrammas. Staciju un apakšstaciju saraksts, kas izmanto izstrādātos BNV algoritmus.

5.1. Ievads

Lai atrisinātu bojājuma noteikšanas vietas uzdevumu Baltijas valstīs tiek izmantota hierarhiska sistēma, kas izstrādāta ar tiešu RTU dalību un kas attēlota 2.6. Att.

BNV algoritmi var tik realizēti divos līmeņos:

- Apakšējā līmenī. Ar specializētām ierīcēm – indikatorus fiksējošiem mikroprocesoriem (MFI), avārijas procesa reģistratoriem un releju termināliem.
- Augšējā līmenī, tas ir dispečera personālā datora līmenī. Šajā gadījumā nepieciešams nodrošināt informācijas ienākšanu izmantojot sakaru kanālus.

Dotā darba 3. nodaļā izklāstītie algoritmi ir realizēti abos nosauktajos līmeņos un visās minētajās ierīcēs.

Avārijas procesa reģistratori un releju termināli ir izveidoti uz vienotas elementu bāzes, izmantojot vienu un to pašu konstruktīvu, vienu principiālo elektrisko shēmu un daudzus kopīgus programmas blokus. Atzīmēsim galvenās programmu-iekārtu īpatnības, kurām ir nozīmē realizējot BNV uzdevumus.

5.2. Aparātrealizācija.

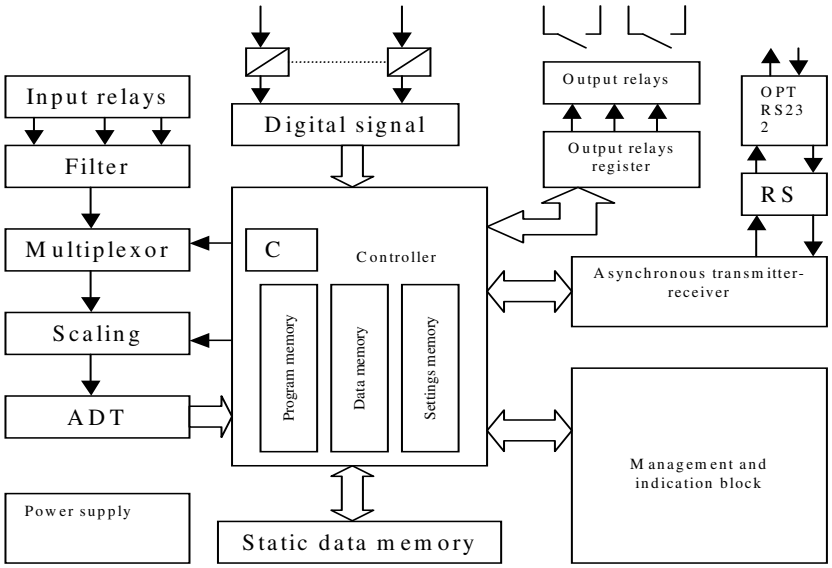
Avārijas procesu reģistratoru (REMI) un releju terminālu (REDI) aparātrealizācijas struktūrshēma attēlota Att.5.1

Lai atrisinātu BNV uzdevumus Att.5.1. Attēlotajā struktūrā būtiski ir:

1. Pietiekamas pakāpes AC-pārveidotāja (14 pakāpju). Pie tam tiek nodrošināta pietiekami augsta pārveidošanas precizitāte.
2. Pietiekami liela apjoma (2 Mb) energoneatkarīgas atmiņas esamība. Tāds atmiņas daudzums ir spējīgs reāli saglabāt desmitiem avārijas situāciju pierakstu, kas garantē īsslēgumu rašanās procesu un novēršanas saglabāšanu.
3. ātrdarbīga Texas Instruments firmas signālprocesora izmantošana. Tomēr, neskatoties uz procesora ātrdarbīgumu nepieciešams atzīmēt, ka BNV uzdevumus nākas realizēt nevis reālā laika režīmā, bet izmantojot procesu

pierakstus, pēc visu īsslēguma rašanās un likvidācijas laikā notikušo funkciju izpildes.

4. Sakaru interfeisa esamība, kas nodrošina komunikāciju ar ārējo pasauli. Ir iespējams izmantot visu veida telefonijas sakarus.
5. Iebūvētā šķidro kristālu displeja esamība, kas nodrošina iespēju nolasīt informāciju bez papildus līdzekļu nepieciešamības.
6. Iespēja izmantot izejas relejus, lai signalizētu par palaišanas un aprēķinu veikšanas konstatāciju.
7. Ārējo loģisko signālu kontrole, kas nodrošina papildus iespējas, lai realizētu novērošanas loga (sk. tālāk) palaišanu un izvēli.
8. Iebūvēta pulksteņa esamība un to sinhronizācijas iespēja ar ārēju avotu. Pulksteņa precizitāte nenodrošina mērījumu sinhronizāciju, bet, kas arī ļoti svarīgi, ka ir iespēja noskaidrot laikā dažādu īsslēgumu sekas.



Att.5.1. Reģistratoru aparātrealizācija

5.3. Programmnodrošinājums

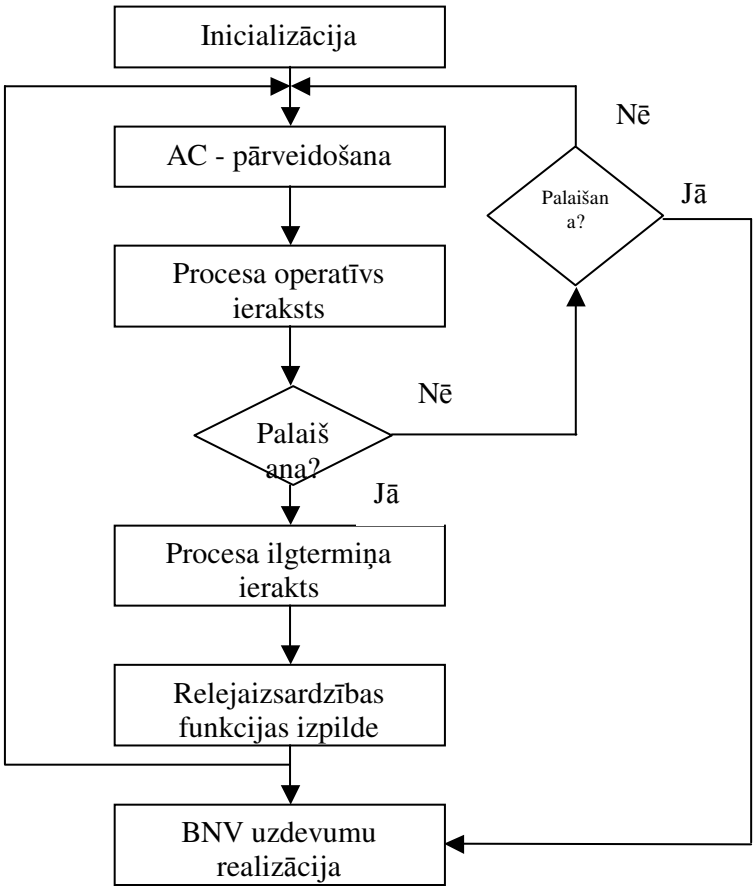
Pati par sevi 5.2. punktā izskatītā iekārta nav darbaspējīga. Nepieciešams radīt noteiktu instrukciju kopumu – programmu, saskaņā ar kuru mikroprocesoru iekārta darbosies. Visa kompleksa normālai funkcionēšanai kopumā nepieciešams radīt programmnodrošinājumu ne tikai pašiem reģistratoriem – apakšējam līmenim, bet arī no reģistratoriem saņemtās informācijas atainošanas, analīzes un apstrādes programmas – augšējā līmeņa programmas. Papildus tam nepieciešams nodrošināt sakarus starp šiem diviem līmeņiem – reģistratoru un centrālo datoru. Parasti sakaru un datu nodošanas funkcijas ir integrētas gan reģistratoru, gan centrālā datora programmnodrošinājumā. Izejot no tā sistēmas programmnodrošinājums dalās divās daļās:

Apakšējā līmeņa iekārtas – algoritmi, kas strādā pašā reģistratorā un veic tā galvenās funkcijas. Parasti šīs programmas ir uzrakstītas ar zema līmeņa valodu, kas specifiska mikroprocesoram uz kura bāzes ir uzbūvēts reģistrators.

Augšējā līmeņa iekārtas, vai energosistēmas dispečera dators – realizē no reģistratora saņemto datu atainošanu, apstrādi un analīzi. Dotajām programmām ir grafiskais interfeiss un tās ļauj viegli manipulēt ar saņemto informāciju.

5.4. Apakšējā līmeņa iekārtas

Apakšējā līmeņa iekārtu funkcionēšanas algoritmu struktūrshēma parādīta 5.2. attēlā. Saskaņā ar šo struktūru, pēc iekērut ieslēgšanas darbam notiek signālu AC pārveidošana un to ierakstīšana salīdzinoši neliela apjoma buferatmiņā. Ienākošie jaunie dati tiek ierakstīti visvecāko vietā un tādā veidā tiek nodrošināta ierakstu saglabāšana ar kārtu sekundes daļa. Procesa laikā tiek kontrolēta iedarbināšanas priekšnoteikumu izpilde. Iedarbināšanas fiksācijas gadījumā, dati no minētā bufera un dati, kas sekoja pēc iedarbināšanas notikuma teik pārrakstīti ilglaicīgā atmiņā, kuras apjoms ļauj saglabāt procesus ar vairāku desmitu sekunžu ilgumu.



Att.5.2. Apakšējā līmeņa iekārtu funkcionēšanas algoritma struktūra

BNV uzdevuma funkcijas izpildei apakšējā līmeņa iekārtās ir piešķirta zema prioritāte, tas ir pirmkārt tiek izpildīti citi uzdevumi (releju aizsardzības, automātiskās atkārtotās ieslēgšanas u.c.) un tikai izejot no iedarbināšanas režīma notiek pāreja tieši pie BNV

uzdevuma. 5.1. tabulā uzrādītas galvenās apakšējā līmeņa iekārtu programmnodrošinājuma funkcionālās grupas.

Tabula 5.1. Apakšējā līmeņa iekārtu programmnodrošinājuma funkcionālās grupas

Funkcija	Risināmā problēma
Primāro uzdevumu izpildes nodrošināšana	1. Analogi-digitālās pārveides un informācijas ievades vadība. 2. Iedarbināšanas apstākļu monitorings 3. Lokālā un globālā tīkla sakaru vadība 4. Notikumu žurnāla uzturēšana 5. Saņemtās un nosūtītās informācijas ticamības/uzticamības monitorings
Servisa uzdevumu nodrošinājums	1. Operatora-reģistratora interfeiss. Informācijas attēlošana uz displeja. 2. Reģistratora bloku darbaspējas pastāvīgs monitorings. 3. Informācijas kompresācija 4. Iestatījumu lielumu pareizības monitorings 5. Barošanas bloka sprieguma monitorings 6. Signālu releju vadība 7. Dialoga nodrošināšana ar operatoru, nosakot iestatījumus. 8. No tīkla saņemto komandu dekodēšana un izpilde.
Papildus uzdevumu nodrošinājums	1. Astronomiskā laika nolasīšana un sinhronizācija 2. Bojājuma vietas noteikšana 3. Strāvas un spriegumu vektoru vērtību noteikšana 4. Asinhronā režīma noteikšana.

Atzīmēsim apakšējā līmeņa iekārtu programmnodrošinājuma realizācijas lielo darbietilpību. Bez tieši iedarbināšanas, bojājuma veida noteikšanas un attāluma līdz bojājuma vietai aprēķina algoritmu realizācijas, nepieciešams realizēt virkni otršķirīgu, bet ļoti svarīgu veiksmīgai ekspluatācijai, funkciju:

- iestatījumu ievades un darbības kontrole
- notikumu attainošana un paskaidrošana
- informācijas apmaiņa ar ārējiem atoriem, iespējams, izmantojot sakaru kanālus
- ārējo ķēžu (strāvu un spriegumu) un iekšējo bloku darbības pārbaudes.

5.5 Energosistēmas dispečera datoru programmnodrošinājums

Datoru programmnodrošinājums satāv no divām pamatdaļām:

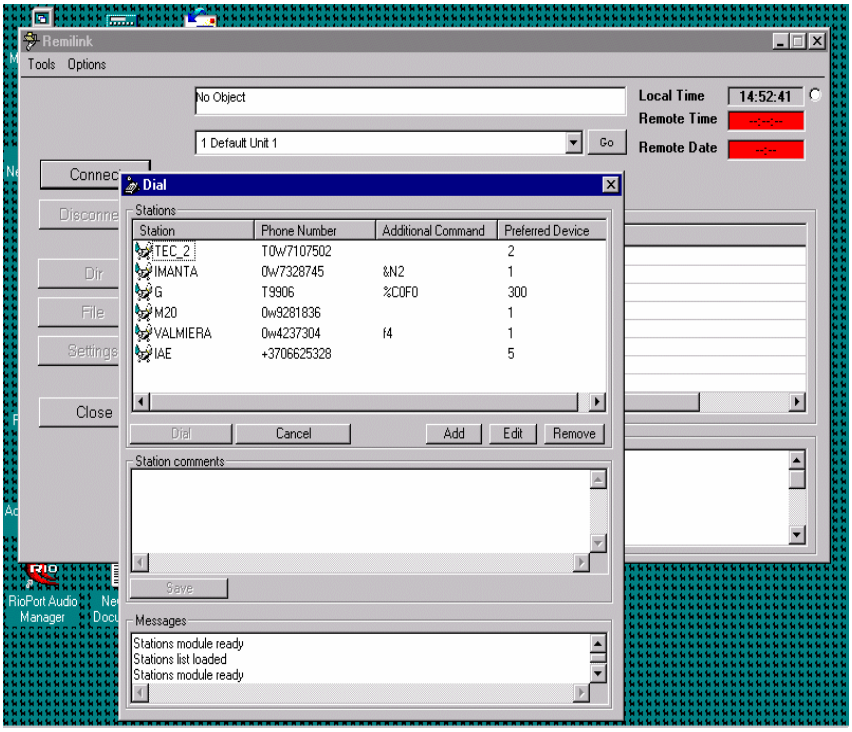
1. Sakaru nodrošināšanas programmas: dators – apakšējā līmeņa iekārta, saņemtās kompresētās informācijas par fiksētajiem notikumiem (Remilink programmu komplekss) saņemšana un atainošana.
2. Smoky programma, kas attēlo un analizē reģistrētos notikumus. Tieši šis programmu komplekss satur apakšprogrammas, kas realizē BNV uzdevumu.

REMILINK programmu komplekss ar BNV uzdevumu ir tieši saistīts sakarā ar informācijas par attāluma līdz bojājuma vietai, bojājuma veida un bojājuma laika saņemšanu un attēlošanu. Šī informācija tiek uzrādīta operatoram uzreiz pēc sakaru rašanās starp datoru un apakšējā līmeņa iekārtu. Att.5.3. attēlots ekrāna displejs saņemot informāciju par bojājuma vietu.

SMOKY programmu kompleks nodrošina BNV uzdevuma realizāciju ar tiešu operatora dalību. No sākuma operators saņem procesa attēlojumu oscilogrammas veidā Oscilogrammas piemērs ir parādīts Att.5.4

Parasti oscilogrammas satur strāvu un spriegumu pierakstus. Eksistē arī iespēja papildināt oscilogrammu ar pietiekami lielu skaitu papildus signālu, kuru parametrus programma izskaitļo automātiski, signālu filtrāciju, atvasināto lielumu aprēķinu, vektordiagrammu uzbūvi, līnijas bojājuma veida aprēķinu. Uz oscilogrammas pamata, kas attēlo kā noris bojātās līnijas procesi, energosistēmas dispečers var noteikt viņam nepieciešamos datus, kā arī iedarbināt bojājuma noteikšanas vietas procedūru. 3. nodaļā parādītie BNV algoritmi ir tieši realizēti SMOKY pielikumā. Ja apstākļi pieprasa ierakstītās informācijas apmaiņu ar citām avārijas procesu attēlošanas programmām, tad rpogrammai ir iespēja eksortēt datus COMTRADE formātā. Nepieciešams atzīmēt, ka SMOKY programmu komplekss pamatā realizē vienpusējās bojājuma noteikšanas vietas metodes.

Vēl viena programma, kas ietiplst programmu kompleksā, ir Vectroid II, kas ļauj attēlot datus, kas saņemti no MFI iekārtām, un tādā veidā padara iespējamu realizēt bojājuma noteikšanas vietas divpusējās metodes par pamatu ņemot divu MFI iekārtu rādītājus.



Att.5.3 Datu saņemšāna REMILINK programmā.

5.6 Novērošanas loga iedarbe, apture un izvēle

Īsslēguma rašanās notikumu uz kontrolējamās elektropārvades līnijas nepieciešams precīzi noteikt, un ka sekas, ir nepieciešams nodrošināt pietiekama skaita nolasījumu pierakstu (AC pārveidojumu rezultātu) un radīta iespēja tos izmantot aprēķiniem, kurs veic tempos, kas nesakrīt ar reālo laiku. Eksistē vairākas pieņemamas iedarbes realizācijas iespējas (daļai no šīm metodēm ir plašš pielietojums elektropārvades līniju releju aizsardzībā):

- pēc kaut vai īslaicīgas nesimetrijas rašanās fakta. Šajā gadījumā par iedarbes noteikumu izmanto nevienādību

$$k|I_2| > |I_1| + const\,, \quad (5.1.),$$

kur k – koeficients, kas nosaka iedarbes bloka jūtību, I_1 un I_2 – tiešās un pretējās secības strāvas.

- pēc ievērojamu avārijas sastāvdaļu rašanās fakta. Tad iedarbes noteikumu var uzskatīt kā nevienādojumu:

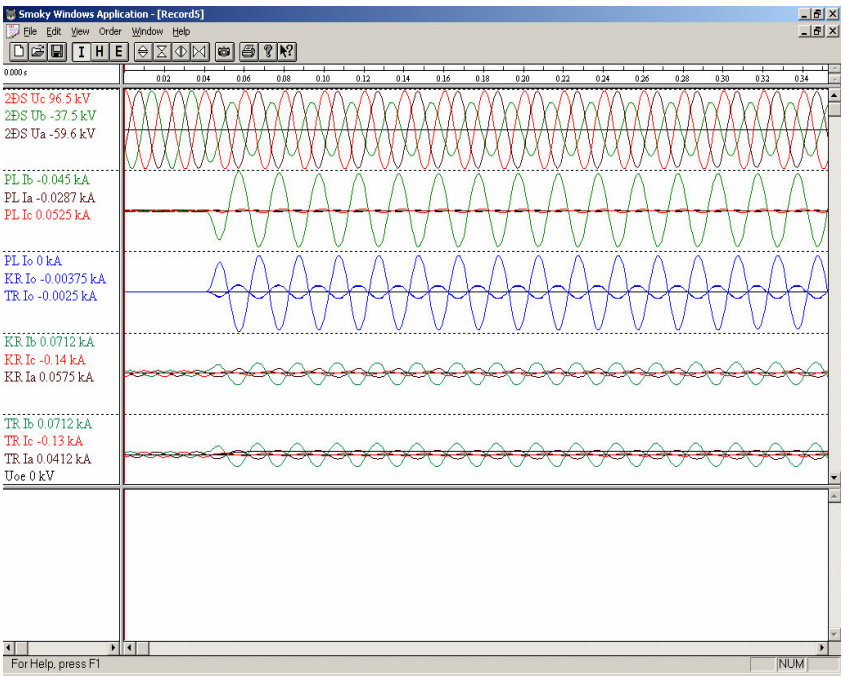
$$k\left[I(t) - I(t-0.02)\right] > const, \quad (5.2.),$$

tas ir šajā gadījumā tiek fiksēti strāvas „lēcieni”.

- par pamatu izmantojot distances principu. Šajā gadījumā iedarbes noteikumiem ir šāds veids:

$$Z = \frac{U}{I} \in Z_S \ , \quad (5.3.),$$

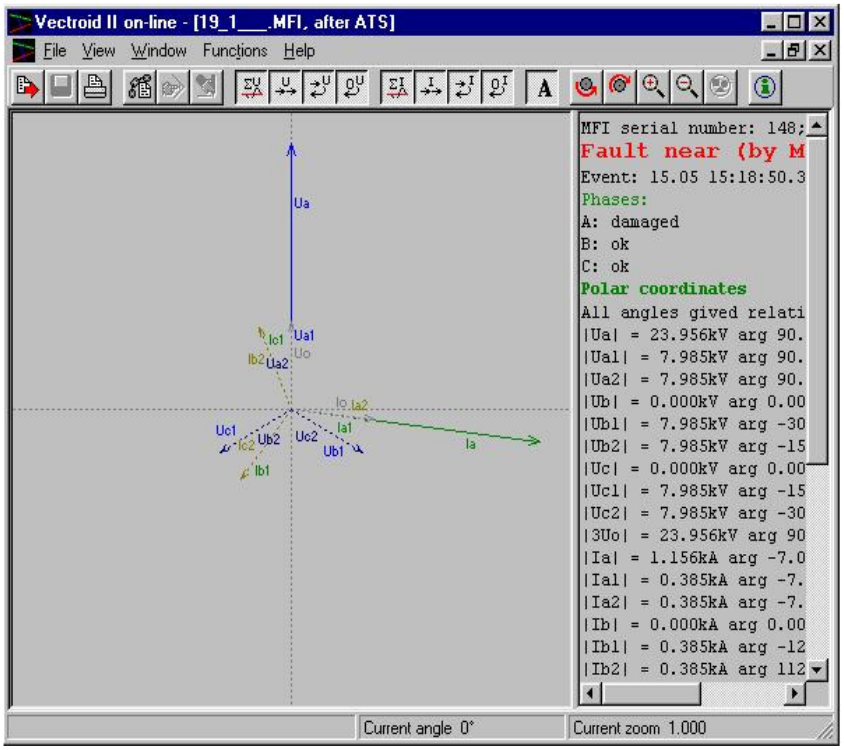
tas ir ja izmērītā pretestība Z pieder noteiktai uzdotajai zonai Z_S (piemēram, kas sakrīt ar otro distances aizsardzības zonu).



Att.5.4 Procesa oscilogrammas piemērs.

Pēdējais paņēmiens ir vissarežģītākais, tomēr, arī viņš ir pilnībā pieņemams, lai realizētu BNV algoritmu uz personālā datora bāzes.

Bez nosauktajiem paņēmieniem, kas pamatojas ar strāvu un spriegumu kontroli, iespējama iedarbe no loģiskajiem signāliem, kuriem būtu jābūt noformētiem ar relejaizsardzības izejas kontaktiem vai ar līnijas izslēdzēju blokkontaktiem. Šajā gadījumā izmantotās iekārtas operatīvajai atmiņai ir jāsatur pietiekamu skaitu iepriekšējo (līdz iedarbei) pierakstīto nolasījumu.



Att.5.5 Programmas VEKTROID II darbības rezultāts

Visas nosauktajiem iedarbes paņēmieniem ir savstarpējas priekšrocības un trūkumi, kas izpaužas konkrētās situācijās. Tāpēc iedarbes gala noteikumu izvēlei jātiek piedāvātai lietotājam.

Pieraksta apturi viennozīmīgi ir jābūt veiktai bojājumam atslēdzoties. Kā bojājuma atslēgšanas pazīme var tikt izmantoti loģiskie signāli, ko nodod izslēdzēja blokkontakti vai arī kontrolējamās strāvas lieluma straujas samazināšanās fakts.

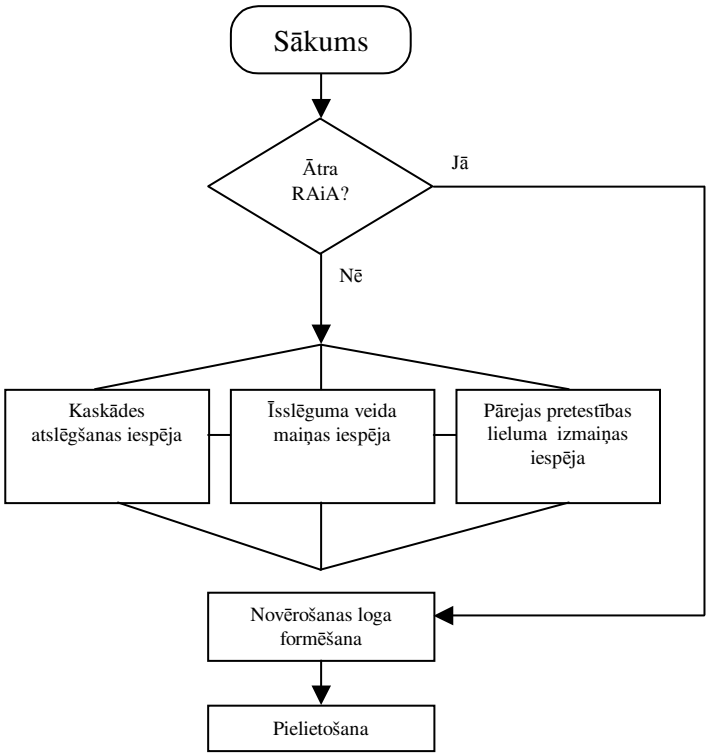
Atzīmēsim, ka derīgo loģisko signālu kontroli veiksim nebūt ne visos gadījumos. Iekārta, kas realizē BNV uzdevumu, var būt viena uz vairākām elektropārvades līnijām (to radiāla izvietojuma gadījumā), tātad bojātie iecirkņus var atslēgt ar dažādiem, ģeogrāfiski attālinātiem viens no otra, izslēdzējiem. Tiešā kontrole par izslēdzēja stāvokli, nepiesaistot telemehānikas līdzekļus, ir iespējama tikai galvenajā apakšstacijā.

Novērošanas loga izvēle ir viennozīmīga un tātad vienkārša tikai tajā gadījumā, kad bojājuma atslēgšana notiek releja aizsardzības ātrdarbības pakāpē. Šajā gadījumā viss īsslēguma eksistences intervāls (30-50 ms) var tikt izmantots. Īsslēguma atslēgšanās ar laika aizturi gadījumā novērošanas loga izvēli nosaka sekojoši trīs pamatfaktori:

- Īsslēguma kaskādes iespējamā atslēgšanās. Vispirms atslēdzas augstspreigumu līnijas pretējais gals. Novērošanas logam ir jāpatver tika ikviens no režīmiem: vai nu kad abi izslēdzēji ir ieslēgti, vai arī laika sprīdis pēc pretējā gala atslēgšanās līdz bojājuma pilnīgai atslēgšanai.
- Īsslēguma veida iespējamā maiņa laika intervālā starp tā rašanos un likvidāciju. Visiespējamākais ir tā pāreja no vienfāžu īsslēguma uz divfāzu īsslēgumu uz zemi. Tāpat, novērošanas logam ir jāpatver tikai viens bojājuma veids.

- Pārejas pretestības lieluma izmaiņa īsslēguma vietā. Att.5.4. parādīts īsslēguma procesa oscilogrammas piemērs. Piemērs raksturīgs ar pretestības samazināšanos laikā. Tāda aina ir tipiska vienfāžu īsslēgumos uz zemi caur koku. Tomēr ir zināmi arī gadījumi, kad pārejas pretestības lielums laikā pieaug, kas ir iespējams pie „loka uzpūšanas" [ ]. Rodas atbilstoša minimālā pārejas pretestības lieluma novērošanas loga izvēles uzdevums.

Ievērojot teikti novērošanas loga izvēles algoritmam ir veids, kas parādīts Att.5.6.



Att5.6 . Novērošanas loga izvēles algoritmam

5.7. Elektropārvades līnijas apskates iecirkņa garuma izvēle.

Pieņemsim, ka aprēķināmais attālums līdz bojājuma vietai ir pakļauts normālajam sadalījuma likumam ar noteiktu matemātisko cerību $M[l]$ un vidēji kvadrātisko novirzi $\sigma[l]$. Atradīsim optimālo, no izdevumu Q viedokļa, bojājuma vietas meklējuma iecirkņa garumu Δl, kas ir jāapskata. Priekš tam papildus pieņemsim:

1. ka ir zināmi izdevumi uz vienu iecirkņa vienību q.
2. ka gadījumā, ja bojājums nav atrasts noteiktajā iecirknī, jāpaskata visa līnija ar garumu L.

Otrais pieņēmums ir ārkārtīgi pesimistisks, tomēr, ja bojājums neeksistē rekomendētajā iecirknī, tiešām krītas ticamība iekārtu rādījumiem un visbiežāk tiek organizēta visas elektropārvades līnijas vai arī ievērojama garuma iecirkņu apskate. Bez tam, pieņemtais pieņēmums noved pie iespējami garākā apskates iecirkņa garuma.

Ar pieņemtajiem pieņēmumiem atradīsim vidējās izmaksas bojājuma meklēšanai:

$$M[Q] = p \cdot \Delta l \cdot L \cdot q / 100 + (1 - p) \cdot L \cdot q, \quad (5.4.)$$

kur p – bojājuma vietas atrašānas iecirknī Δl varbūtība.

Papildus pieņemsim, ka iecirkni Δl nosaka ar vidēji kvadrātisko novirzi σ (procentos no līnijas garuma):

$$\Delta l = s\sigma[l] \ , \quad (5.5.)$$

kur s – proporcionalitātes koeficients.

Papildus ņemsim vērā arī, ka

$$p = 2\Phi(x) - 1 \ , \quad (5.6.)$$

kur $\Phi(x)$ – normāla sadalījuma funkcija, pie tam

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sigma(x)\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x - m[x]}{\sigma[x]}\right)^2} dx - \frac{1}{2}, \quad (5.7.)$$

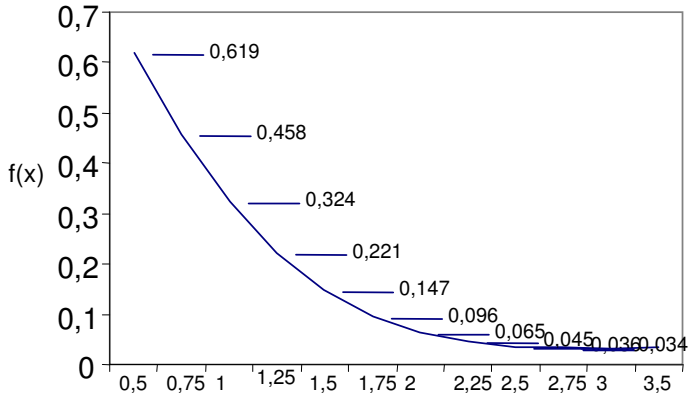
tātad:

$$p = 2\Phi(x) - 1.$$

Pārveidojot (5.4.) iegūstam:

$$M[Q] = L \cdot q \left[p \frac{s\sigma[x]}{100} + (1 - p) \right]. \quad (5.8.)$$

Funkcijas (5.8.) minimuma atrašanās ir atkarīga tikai no s un $\sigma[x]$, šīs funkcijas grafiks ir attēlots 5.7. Att. Ņemot par pamatu attēloto grafiku, acīmredzams, ka pie zināmām vidēji kvadrātiskām novirzēm $\sigma[x]$ un līnijas garuma L var tik izdarīta rekomendējamās apgaitas zonas izvēle.



Att.5.7 Funkcijas (5.8.) grafiks

Vispārējā gadījumā attāluma līdz bojājuma vietai noteikšanas pamatā var būt patvaļīga sadalījuma likums $F(l)$. Tad, izmantojot iepriekš minētos pieņēmumus apskates iecirkņa garuma izvēles uzdevumu varam reducēt līdz uzdevumam minimālizēt šāda veida funkciju:

$$\begin{aligned}&\{F[M[l]+\Delta l/2]-F[M[l]-\Delta l/2]\}\cdot\frac{\Delta l}{100}+\\&+\{1-[F[M[l]+\Delta l/2]-F[M[l]-\Delta l/2]]\}\cdot\frac{\Delta l}{100}\Rightarrow \min,\end{aligned} \qquad (5.9.)$$

kura ir viegli atrisināma, piemēram, ar šķirošanas metodi, pie $F(l)$ iestatījuma ar histogrammu vai tabulu.

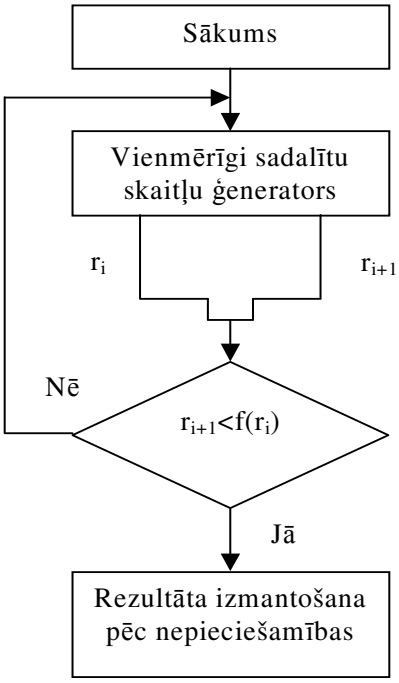
5.8. Gadījuma skaitļu ģeneratora realizācija.

Ir zināmi divi galvenie gadījuma skaitļu ģeneratoru uzbūves principi [28]:

1. Pamatā izmantojot fiziskās gadījuma parādības (radiolampu trokšņi, pusvadītāju ierīču procesi).
2. Kas bāzēti uz skaitļu teorijas atzinumiem. Šajā gadījumā tiek iegūti pseidogadījuma, kā likums vienmērīga sadalījuma sekojoši skaitļi.

Otrā metode ir plašāk izplatīta. Vairākums augsta līmeņa programmēšanas valodu nodrošina vienmērīgi sadalītu gadījuma skaitļu realizāciju kā iebūvētu funkciju.

3. nodaļā sintezētais statistiski-adaptīvais BNV algoritms uzbūvēts izmantojot tabuliski dotos divdimensiju gadījuma konsekvences. Lai iegūtu šādus skaitļus ērti izmantot fon Neimaņa metodi (algoritmu) [28]. Algoritma struktūrshēma parādīta 5.8. attēlā. Algoritma darbība tiek paskaidrota 5.9. attēlā.



Vienmērīgi sadalīto gadījuma lielumu ģenerators tiek būvēts tā, ka katru reizi vēršoties pie tā, tiek iegūti divi skaitļi. Pirmais – no tabuliski uzdotā gadījuma lieluma x eksistences diapazona, bet otrais – no diapazona no 0 līdz $f_{\max}$ (sk. 5.10. Att.)

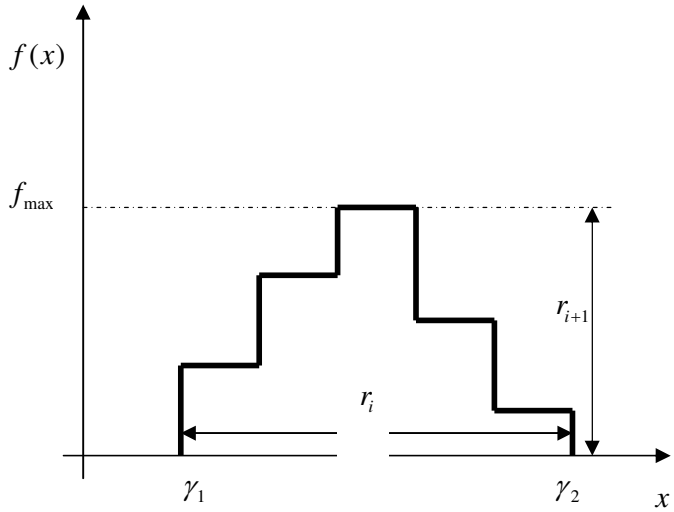
Acīmredzams, ka Att.5.9 algoritma noteikumu pārbaude nodrošina iespēju iegūt sadalījuma blīvumu ar uzdoto funkciju $f(x)$.

Izskatītais algoritms viegli var tik pārveidots, lai iegūtu pieprasīto divdimensiju sadalījumu.

Att.5.8 fon Neimaņa algoritma struktūra

5.9. Bojājuma veida un bojāto fāžu identifikācija

Bojājuma noteikšanas vietas uzdevuma kontekstā būtu nepareizi runāt tikai par pašu BNV algoritma realizāciju, - tas ir tikai daļa no programmas, lai atrisinātu doto uzdevumu. Tieši pirms palaist darbā izskatāmo BNV algoritmu, tāpat kā jebkuru citu algoritmu, programmai ir jāsaņem algoritma darbībai nepieciešamos datus tai pieņemamā veidā, priekš kam tiek izmantots simetrisko veidojošo filtrs un jānosaka bojājuma veids un raksturs.



Att.5.9 Gadījuma lieluma sadalījuma pakāpienveida funkcija

Simetrisko veidojošo filtra realizācija ir pietiekami vienkārša un netiek izskatīta dotajā darbā.

Izskatīsim bojātās fāzes izvēles algoritma darbības principu. Slēdzienu par īsslēguma veidu un bojāto fāžu noteikšanu veic pamatojoties uz attiecībām starp novērojamās līnijas strāvu simetrisko veidojošo vektoriem. Parādīsim dotās metodes teorētisko pamatojumu.

Pieņemsim ir nepieciešams pārbaudīt vektoru $\dot{X}$ un $\dot{Y}$ atšķirību, ieejot intervālā starp 0 un π. Izsakot to nevienādībā iegūstam:

$$0 < \arg\frac{\dot{X}}{\dot{Y}} < \pi \quad . \quad (5.10.)$$

Šo pašu izteiksmi var parādīt šādā veidā:

$$\mathrm{Im}\frac{\dot{X}}{\dot{Y}} > 0 \quad . \quad (5.11.)$$

Ja nepieciešams noteikt ieejas leņķi kādā citā intervālā, tad to var izdarīt pārveidojot (5.10.) vienādojumu šādā formā:

$$\alpha < \arg\frac{\dot{X}}{\dot{Y}} < \pi + \alpha \quad , \quad (5.12.)$$

vai pārveidojot ērtākā formā

$$0 < \arg\frac{\dot{X}}{\dot{Y}} - \alpha < \pi \quad . \quad (5.13.)$$

Tādā veida lai pārbaudītu (5.13.) pietiekami, lai izpildītos nevienādība

$$\mathrm{Im}\frac{\dot{X} \cdot e^{-j\alpha}}{\dot{Y}} > 0 \quad , \quad (5.14.)$$

vai

$$\mathrm{Im}\frac{(X_A + jX_R)\cdot(\cos\alpha - j\sin\alpha)}{Y_A + jY_R} > 0 \quad (5.15.)$$

$$\mathrm{Im}\frac{(X_A\cos\alpha + X_R\sin\alpha) + j(X_R\cos\alpha - X_A\sin\alpha)}{Y_A + jY_R} > 0 \quad (5.16.)$$

$$(X_A\cos\alpha + X_R\sin\alpha)\cdot(-Y_R) + (X_R\cos\alpha - X_A\sin\alpha)Y_A > 0 \quad . \quad (5.17.)$$

Galarezultātā iegūstam

$$(X_R\cos\alpha - X_A\sin\alpha)Y_A > (X_A\cos\alpha + X_R\sin\alpha)Y_R \quad . \quad (5.18.)$$

Dotajā formulā pievienosim lielumu γ – leņķi, kas ir specifisks katram īsslēguma veidam. Ja izteikt (5.18.) formulu caur $\varphi > 0$, tad gala slēdziens par bojāto fāzi un bojājuma veidu, var tikt izdarīts atrisinot šādus vienādojumus:

$$\left.\begin{array}{r} \alpha = \gamma; \varphi > 0 \\ \alpha = -60^\circ + \gamma; \varphi > 0. \end{array}\right\} \quad (5.19.)$$

Izmantojot šos vienādojumus un variējot ar leņķa γ lielumiem nonākam pie bojājuma veida un bojātās fāzes noteikšanas uzdevuma.

5.10. Secinājumi

1. Lai atrisinātu BNV uzdevumu Baltijas valstīs tiek pielietota hierarhiska sistēma, kas sastāv no diviem līmeņiem. Apakšējā līmenī darbojas specializētas iekārtās – fiksējošie mikroprocesoru indikatori, augšējā līmenī personālie datori ar specifisku programmnodrošinājumu. Abi līmeņi savā starpā ir savienoti sar sakaru kanāliem.
2. Apakšējā līmeņa iekārtu aparātrealziācija ļauj izpildīt pietiekami plašu RAuA uzdevumu spektru. BNV funkcijas tiem ir otršķirīgas.
3. BNV algoritmu galvenā realizācija ir uzticēta augšējā līmeņa iekārtu programmrealizācijai, kas ļauj realizēt vissarežģītākās BNV metodes un operēt ar pietiekami lieliem statistiskās informācijas apjomiem.
4. Ir izskatīti novērošanas loga iedarbes, aptures un izvēles priekšnoteikumi.
5. Apskates iecirkņa izvēle ir tieši saistīta ar zaudējumiem, kas rodas to nosakot nepareizi. Apskates iecirkņa novērtēšana tiek veikta minimizējot zaudējumu funkciju. Ir izskatīta attāluma līdz bojājuma vietai novērtēšana gadījuma sadalījuma likuma gadījumā.
6. BNV programmu funkcionēšana un precizitāte tāpat ir atkarīga no papildus procedūrām, kas nodrošina to darbaspēju. Ir izskatīta gadījuma lielumu ģeneratoru realizācija un algoritms, kas nosaka bojājuma veidu un raksturu.

6. Noslēgums

6.1. Secinājumi

1. BNV līdzekļu attīstības tendences arvien vairāk nosaka mikroprocesoru un datoru tehnikas attīstība, integrējot BNV funkcijas releju terminālos, releju aizsardzības kompleksos un pretavārijas automātikā.

2. Centralizētas vadības un enerģētisko sistēmu monitoringa sistēmu plašā ieviešana, arvien ātrāki un drošāki sakaru kanāli ļauj paaugstināt BNV līdzekļu darba drošumu un operativitāti.

3. Mūsdienu skaitļošanas un analītiskās iespējas ļauj pielietot sarežģītus un darbietilpīgus BNV uzdevumu realizācijas algoritmus ar lielu efektivitāti.

4. Pārejot uz mikroprocesoru elementu bāzi strauji samazinās instrumentālo kļūdu iespēja, jo daudzas operācijas – signālu AC pārveidošanu, mērogošanu, aritmētiskos un citus aprēķinus veic elementi, kuru raksturojumi ir tuvu ideāliem.

5. Diemžēl, lielu materiālu izdevumu nepieciešamība un nesavietojamība ar esošajām sistēmām neļauj ieviest energosistēmu ekspluatācijā jaunās primāro signālu pārveides iekārtas un metodikas, un līdz ar to, vēl lielākā mērā samazināt instrumentālās kļūdas.

6. Algoritmu īpašību analīze var tikt veikta izmantojot enerģētisko sistēmu un pārejas procesu tajās modeļus, kas ļauj samazināt bojājuma noteikšanas vietas jauno metožu ieviešanas, izmēģinājumu un realizācijas izdevumus. Mūsdienīgi modeļi ļauj ņemt vērā diezgan lielu ietekmējošo faktoru skaitu un simulēt procesus, kas ir maksimāli pietuvināti reālajiem.

7. Lai samazinātu algoritmiskās neprecizitātes, kas saistītas ar sistēmas nekontrolējamā līnijas gala ekvivalento pretestību tuvināto lielumu izmantošanu vienpusējo BNV metožu gadījumā, tiek piedāvāts izmantot varbūtības un statistiskās pieejas to realizācijā. Uz šīs metodes bāzes ir radīti vairāki jauni algoritmi.

8. Ir izstrādāts, pārbaudīts un realizēts bojājuma noteikšanas vietas statistiski adaptīvais algoritms. Šī metode ir būvēta, veicot mērījumus pie ārējiem pret kontrolējamo līniju īsslēgumiem. Pie tam izveidojas empīriskais sadalījuma likums energosistēmas parametriem, kas baro elektropārvades līnijas nekontrolējamo galu.

9. Determinētā lieluma vietā piedāvāts izmantot bojājuma atrašanas vietas iespējamās zonas izmantošanu. Tas ļauj optimizēt bojātās elektropārvades līnijas atjaunošanas darbu. Bojājuma iespējamās atrašanās zona – ir tiešais statistiskās un varbūtību pieejas BNV uzdevumam izmantošanas rezultāts.

10. Bez īsslēguma iespējamās atrašanās zonas tāpat ir piedāvāts izmantot skaitliskos raksturojumus- matemātisko cerību un vidēji kvadrātisko novirzi, kas iegūtas pamatojoties uz attāluma līdz bojājuma vietai sadalījuma likumu.

11. Izmantojot piedāvātos BNV algoritmus nav nepieciešamas izmaiņas vai būtiski papildinājumi RziPA iekārtās, jo tie realizēti uz jau strādājošo Baltijas valstu energosistēmās mikroporocesoru reģistratoru bāzes.

12. Piedāvāto algoritmu efektivitātes pētījumi ir parādījuši to augsto precizitāti un darbaspēju.

13. Piedāvāto bojājuma noteikšanas vietas funkciju realizāciju, galvenokārt nodrošina dispečera datora programmnodrošinājums, kas ir kompleksa programmrealizācijas augšējais līmenis. Tādā veidā tiek panākta BNV līdzekļu neatkarība no aparātu realizācijas, kas rezultātā būtiski vienkāršo un padara lētāku pāreju uz BNV uzdevuma risinājuma algoritmiem un jaunām versijām.

6.2. Nākotnes darbs

Analizējot dotajā disertācijas darbā veiktos pētījumus, ņemot vērā mūsdienu tendences mikroprocesoru tehnikas līdzekļu attīstības un ieviešanas enerģētisko sistēmu ekspluatācijā, jaunos matemātiskos pētījumus, informāciju par enerģētisko sistēmu ekspluatācijas un vadības pieredzi, var izsecināt tālākās darbības virzienus:

1. Ievērojot mūsdienīgās skaitļošanas tehnikas un matemātisko līdzekļu iespējas iespējams attīstīt BNV uzdevuma parametru nenoteiktības problēmas risinājuma metodiku, izmantojot tādus jēdzienus kā:

    a. mākslīgie neironu tīkli
    b. Fuzzy loģika
    c. Haosa teorija
    d. fraktālā ģeometrija

2. Jauna un papildus programmnodrošinājuma izstrāde, lai nodrošinātu savāktās statistiskās informācijas glabāšanu, apstrādi un analīzi.

3. Procesu datu bāzes radīšana, lai atvieglotu jaunu metodiku, kas pamatojas uz statistisko pieeju, izmantošanu, modelēšanu un ieviešanu. Dotajai sistēmai ir jābūt informācijas apmaiņas iespējai ar citiem pielikumiem.

7. Literatūras saraksts

1. Partonen et al “Possibilities for power distribution network fault location with radio frequency direction finding”, IEEE 23 National Convention on Radio Sciences and Remote Sensing Symposium, 1998
2. V.Ortega et al “A predictive out-of-step protection system based on observation of the phase difference between substations”, IEEE Transactions on Power Delivery vol. 5 No. 4 November 1990 pp. 1695-1704
3. K.Urasawa, K.Kanemaru, S.Toyota, K. Suglyama “New fault location system for power transmission lines using composite fiber-optic overhead ground wire (OPGW)”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, October 1989, pp. 2005-2008
4. A.M. Raujbar, A.N. Shirani, A.F. Fathi “A new approach for fault location problem on power lines”, Transaction on power delivery. Vol. 7, No.1, February 1992, pp. 145-151
5. J.A. Jiang et al “An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. Part 1: theory and Algorithms”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No.2, April 2000
6. D.Novosel, D.G. Hart, M.M. Saha Optimal fault location for transmission systems. ABB Review 8, 1994, pp. 20-27
7. I. Bilinskis, I Mednieks Introduction to digital alis-free signal processing, Rīga, 2001, p. 65
8. С.А. Ульянов Электромагнитные переходные процессы. Энергетика, Москва 1970
9. Б.П. Демидович, И.А. Марон Основы вычислительной математики, Наука, Москва 1970
10. В.Л. Фабрикант, В.П. Глухов, Л.Б. Паперно Элементы устройств релейной защиты и автоматики энергосистем и их проектирование, Высшая школа, Москва 1974
11. Г.И. Атабеков Теоретические основы электроткхники, Энергия, Москва 1978
12. Н.С. Бахвалов Численные методы, Наука, Москва 1973
13. В.С. Шипачев Высшая математика, Высшая школа, Москва 1985
14. В.А. Кудрявцев, Б.П. Демидович Краткий курс высшей математики, Наука, Москва 1989
15. В.Л. Левкович Теория вероятностей, АН БССР, Минск 1952
16. А.С. Саухатас, Э.П. Ванзович, Э.Й. Гяджюс Фиксирующие измерители расстояния до места короткого замыкания, Электротехника, 1990 3, с. 44-46
17. А.С. Саухатас, Э.Й.Гяджюс Комплекс микропроцессорных фиксирующих приборов для определения места повреждения линий электропередачи, Изв. вузов. Электромеханика, 1989 2, с. 57-61
18. А.С. Сухатас, Т.В. Ломан Инструментальные погрешности программируемых дистанционных измерительных органов, Изв. вузов. Энергетика 1984 8

19. А.С.Саухатас, Т.В.Ломан Вычислительный эксперимент как средство оценки точности программируемых дистанционных измерительных органов, Изв. вузов. Энергетика 1984 6
20. А.М. Федосеев Основы релейной защиты, Энергия, Москва 1976
21. 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, pp. 2892-2898, Aug. 1982.
22. 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, pp. 424-436, 1985
23. K.Brinkis, A.Svalovs, A.Staltmanis, T.Liebach, "Principles of Relay Protection for Three-ended HV Transmission Lines", in *Proc.12th International Conf. on Power System Protection*, Slovenia, Sep. 2000.
24. R.K.Aggarwal, D.V.Coury, A.T.Johns, A.Kalam, "A Practical Approach to Accurate Fault Location on Extra High Voltage Teed Feeders", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 8, No. 3, Jul. 1993.
25. И.В. Якимец, А.В. Наровлянский, И.А. Иванов Определение места замыкания на линии электропередачи на основе измерения потока мощности, Электричество, 1999 №5 с. 5-9
26. А.К. Белотелов, А.С. Саухатас, И.А. Иванов, Д.Р. Любарский Функциональный алгоритм и опыт эксплуатации микропроцессорных устройств для определения места повреждения на линиях электропередачи, Электрические станции, 1997 №12, с.7-12
27. Antans Sauhats, Aleksandrs Jonins, Vladimir Chuvychin, Marija Danilova, "Fault location algorithms for power transmission lines based on Monte-Carlo method", in Proc. 2001 IEEE Porto Power Tech Conf.
28. J. Neumann, "Various Techniques Used in Connection with Random Digits", *NBS Applied Mathematics Series*, No.12, pp. 36-38, 1951.
29. D.Hard, D.Novosel, E.Udren, "Application of synchronized phasors to fault analysis", *Phasor measurement conference*, Washington DC, October 1993.
30. A.Sauhatas, T.Lomane, A.Utan, A.Dolgicer, L.Leite, "System for electrical power processes recording", *The 8th International conference on Present-day Problems of Power Egineering,* Poland, Gdansk-Jurata, June 11-13, 1997, pp.249-256.
31. B.Lundqvist, H.Kronander, A.J.Macrell, "The Integration of Protection, Monitoring, Control and Communication Functions in Modern Electrical HV Installations. Development in Power System Protection", *IEEE Conference Publication No.434*, March 1997.
32. Б.С. Стогный, В.В. Рогоза, А.В. Кириленко и др. Микропроцессорные устройства в энергетических системах, Киев, Научная мысль, 1988 с.232
33. Javad Sadeh, N.Hadjsaid, A.M. Ranjbar, R.Feuillet „ Accurate fault location algorithm for series compensated transmission lines" , IEEE Tarn. On Power delivery, vol.15, no.3, July 200, pp. 1027-1033
34. Toshihisa Funabashi, Hitomi Otoguro, Yoshishige Mizuma, Laurent Dube, Akihiro Ametani „Digital fault Location for Parallel Double-Circuit Multi-Terminal Transmission Lines" , IEEE Tran. On Power Delovery, vol.15, no.2 April 2000, pp. 531-537

35. Heung-Jae Lee, Deung-Yong Park, Bok-Shin Ahn, Young-Moon Park, Jong-Keun Park, S.S. Venkata „ A Fuzzy Expert System for the Integrated Fault Diagnosis” , IEEE Tran. On Power Delivery, vol.15 no. 2, April 2000, pp. 833-838
36. Anton Poetl, Klaus Frohlich „ Two new methods for very fast fault type detection by means of parameter fitting and artificial neural networks” , IEEE Tran. On Power Delivery, vol.14 no. 4, October 1999, pp.1269-1275
37. Zoran M. Radojevic, Vladimir V. Terzija, Milenko B. Djuric „ Numerical algorithm for overhead lines arcing faults detection and distance and directional protection” , IEEE Tran. On Power Delivery vol.15 no.1, January 2000, pp.31-37
38. Ramachandran Venkatesan, Balasubramanian Balamurugan „A real-time hardware fault detector using and artificial neural network for distance protection” IEEE Tarn. On Power Delivery vol.16 no.1, January 2001, pp.75-82
39. Julio Cesar Stacchini de Souza, M.A.P.Rodrigues, Marcus Theodor Schilling, Milton Brown Do Coutto Filho „ Fault location in Electrical power systems using intelligent systems techniques” IEEE Tran. On Power Delivery vol. 16 no.1, January 2001 pp. 59-67
40. Alessandro Ferrero, Silvia Sangiovanni, Ennio Zappitelli „ A fuzzy-set approach to fault-type identification in digital relaying” IEEE Tran. On Power Delivery vol.10 no. 1, January 1995, pp. 169-175
41. Oinis Chaari, Patrick Bastard, Michel Meunier „ Prony’s method: an efficient tool for the analysis of earth fault currents in Pattersen coil prtected networks” IEEE Tran. On Power Delivery vol.10 no. 3, July 1995, pp. 1234-1241
42. Zhang Qingchao, Zhang Yao, Song Wennan, Fang Dazhong „ Transmission line fault location for single-phase-to-earth fault on non-direct-ground neutral system” IEEE Tran. On POwer Delivery vol.13 no.4, October 1998, pp.1086-1092
43. Alona Ben-Tal, Viven Kirk, Graeme wake „ Banded Chaos in Power systems” IEEE Tran. On Power Delivery vol. 16 no.1, January 2001, pp.105-110
44. A.M. Ranjbar, A.R. Shirani, A.F. Fathi „ A new approach for fault location problem on power lines” IEEE Tran. On Power Delivery vol.7 no.1, january 1992, pp. 146-151
45. Toshihisa Funabashi, Hitomi Otoguro, Yoshishige Mizuma, Takaaki Kai, Nobutaka Takeuchi, Satoka Akiyama, Laurent Dube, Akihiro Ametani „ Digital fault location for high resistance grounded transmission lines” IEEE tran. On Power Delivery vol.14 no. 1, January 1999, pp. 80-85
46. Yan Tian, Li Erxue, Yang Shiyou „ Improved simulated algorithm and its application in fault location of power transmission lines” IEEE Tran. On Power Delivery, 1998
47. M.S. Sachdev, T.S. Sidhu „ A technique for estimating the location of a transmission line shunt fault” IEEE Tran. On Power Delivery, 1994, pp.562-564
48. Zhihong Chen, jean-Claude Maun „ An artificial neural network based real time fault locator for transmission lines” IEEE Tran. On Power Delivery 1998, pp. 163-168
49. G. Eberl, S.Hanninen, M.Lehtonen, P.Schegner „ Comparision of Artificial Networks and Conventional Algorithms in Ground Fault Distance Computation” IEEE Tran. On Power Delivery 2000, pp. 1991-1996
50. K.K. Li, L.L. Lai, A.K. David „ Application of Artificial Neural Network in Fault Location Techniques” IEEE Tran. On Power Delivery 2000, pp.226-231

51. M.B. Djuric, Z.M. Radojevic, V.V. Terzija „ Distance Protection and Fault Location Utilizing Only Phase Current Phasors” IEEE Tran. On Power Delivery, vol.13 no. 4, October 1998, pp. 1020-1026
52. Mladen Kezunovic, Branislava Perunicic „ Synchronized Sampling Improves Fault Location” IEEE Computer Application in Power, 1995 April, pp. 30-33
53. G.B. Ancell, N.C. Pahalawaththa „ Effects of frequency dependence and line parameters on single ended travelling wave based fault location schemes” IEEE Proceedings C, vol. 139 no. 4, July 1992, pp.332-342
54. Fernando H.magnago, Ali Abur „ fault Location Using Wavelets” IEEE Tran. On Power Delivery vol.13 no.4, October 1998, pp.1475-1480
55. Isabel Beinchi, Francis Sullivan „ A=B?” Computing in Science and Engineering , May/June 2000, pp.84-87
56. Thompson Adu „A New Transmission Line Fault Locating System” IEEE Tran. On Power Delivery, vol.16 no.4, October 2001, pp. 498-503
57. M.M. Eissa, M.Masoud „A Novel Digital Distance Relaying Technique for Transmission Line Protection” IEEE Tran. On POwer Delivery, vol. 16, no. 3, July 2001, pp.380-384
58. Toshihisa Funabashi, Hitomi Otoguro, Yoshishige Mizuma, Laurent Dube, Mustafa Kizilcay, Akihiro Ametani „Influence of Fault Arc Characteristics on the Accuracy of Digital Fault Locators” IEEE Tran. On Power Delivery, vol. 16, no. 2, April 2001, pp. 195-199
59. M.M. Tawfik, M.M. Morcos „ANN-Based Techniques for Estimating Fault Location on Transmission Lines Using Prony Method” IEEE Tran. On Power Delivery, vol.16, no.2, April 2001, pp. 219-224
60. Juhwan Jung, Chen-Ching Liu, Mingguo Hong, Massimo Gallanti, Giorgio Torinelli „Multiple Hypotheses and Their Credibility in On-Line Fault Diagnosis” IEEE Tran. On Power Delivery, vol.16, no.2, April 2001, pp. 225-230
61. William G. Fenton, T.M. McGinnity, Liam P. Maguire „Fault Diagnosis of Electronic Systems Using Itelligent Techniques: a Review” IEEE Tran. On Systems, Man, And Cybernetics – Part C, vol. 31, no. 3, August 2001, pp. 269-280
62. Guoqiang Peter Zhang „Neural Networks for Classification: A Survey” IEEE Tran. On Systems, Man, And Cybernetics Part C, vol. 30, no. 4, November 2000, pp. 451-462
63. Xian Jun Zeng, Xianggen Yin, Deshu Chen „A Novel Technique for Measuring Grounding Capacitance and Grounding Fault Resistance in Ineffectively Grounded Systems” IEEE Power Engineering Review, vol. 21, no. 3, March 2001, pp.65-67
64. N.I. Voropai, E.J. Handschin „Liberalization and Modernization of Power Systems” IEEE Pwer Engineering Review, vol. 21, no. 1, January 2001, pp.16-19
65. Ryo Tsukui, Phil Beamont, Tatsuji Tanaka, Katsuhiko Sekiguchi „Intranet-Based Protection and Control” IEEEComputer Application in Power, vol. 14, no. 2, April 2001, pp. 14-17
66. Feng He, Fengquan wang, Wei Li, Xiaolin Han, Jianhua Liu „Object Request Brokers for Distributed Measurement” IEEE Computer Application in Power, vol. 14, no. 1, January 2001, pp. 50-54
67. Е.А. Аржаников, А.М. Чухин «Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи», Энергетика, М. 1998г.

68. А.И. Айзенфельд, Г.М. Шалыт «Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлениями», Энергоатомиздат, М. 1988г.
69. А. Утан «Система рагистрации, анализа и физического моделирования элктроэнергетических процессов», RTU, 1997
70. Ванин В.К., Павлов Г.М. «Релейная защита на элементах вычислительной техники», Санкт-Петербург, Энергоатомиздат, 1991
71. Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров «Теория вероятностей и её инженерные приложения», Высшая школа, Москва 2000
72. Hassan Nouri, Chun Wang, terry Davies „ An Accurate fault Location Technique for Distribution Lines with Tapped Loads Using Wavelet Transform", IEEE Porto Power Tech Conference proceedings, 2001
73. Edwin Mitacc Meza, Julio cesar Stacchini de Souza, marcus Th. Schilling, Milton brown Do Coutto Filho „Exploring Fuzzy Relations for Alarm Processing and Fault Location in Electrical Power Systems" , IEEE PowerTech Conference Proceedings, Porto, 2001
74. Tadeja babnik, Ferdinand Gubina „fast transformer fault classifications by means of recorded protection signals", IEEE PowerTech 2001 Conference Proceedings, 2001
75. J. Izykowsky, R.Kawecky „ Loaction of Faults in Partially Parallel Transmission networks", IEEE PowerTech 2001 Conference Proceedings, 2001
76. „Fundamentals of Utilities Communication Architecture", CAP Tutorial, IEEE Computer Application in Power, vol. 14, no. 3, Julay 2001, pp. 15-21
77. Scott Bricker, Turan Gonen, Lew Rubin „Substation Automation Technologies and Advantages", IEEE Computer Applications in Power, vol. 14, no.3, July 2001, pp. 31-37
78. A.J. Mazon, I.Zamora, J.Gracia, K.J. Sagastabeitta, J.R. Saenz „Selecting ANN Structures to Find Transmission Faults", IEEE Computer Applications in Power, vol. 14, no. 3, July 2001, pp. 44-48
79. Liisa Pottonen, Philippe Martinole, Oliver Huet „Selecting Protective Relays with Digital Test Methods", IEEE Computer Applications in Power, vol.14, no. 4, October 2001, pp. 47-52
80. Andrzej Augusiak, Waldemar kamrat „Automated Network Control and Supervision", IEEE Computer Applications in Power, vol. 15, no. 1, Janyary 2002, pp. 20-23
81. T. Cegrell „Power System Control Technology", Prentice-Hall International ltd., 1986
82. S.Chen, F.Y. Lu „Web-Based Simulations of Power Systems", IEEE Computer Applications in Power, vol. 15, no. 1, January 2002, pp. 35-40
83. Arturs Tiesnieks, Jay Etherton „Baltic update", Power Engineering International, June 2002
84. C.S. Yu, C.W. Liu, S.L. Yu, J.A. Jiang „A New PMU-Based Fault Location Algorithm for Series Compensated Lines", IEEE Tran. On Power Delivery, vol. 17, no. 1, January 2002, pp. 33-47
85. J.A. Jiang, J.Z. Yang, Y.H. Lin, C.W. Liu, J.C. Ma „An Adaptive PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines Part 1: Theory and Algorithms" IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 15, pp. 486-493, 2000

86. Y.C. Huang „Abductive Reasoning Network Based Giagnosis system for Fault Section Estimation in Power System", IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 17 no. 2, April 2002, pp. 369-375
87. C.S. Chen, C.W. Liu, J.A. Jiang „A New Adaptive PMU Based Protection Scheme for Transposed/Untransposed Parallel Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 17, no. 2, April 2002, pp. 395-405
88. Z. Galijasevic, A.Abur „fault Location Using Voltage measurements", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 17, no. 2, April 2002, pp. 441-446
89. Y.H. Lin, C.W. Liu, C.S. Yu „A New Fault Locator for Three-Terminal Transmission Lines – Using Two-Terminal Synchronized Voltage and Current", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 17, no. 2, April 2002, pp. 452-460
90. Y.C. Huang „Fault Section estimation in Power Systems Using a Novel Decision Support System", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 17, no. 2, May 2002, pp. 439-445
91. B.F. Wollenberg, T. Sakaguchi „Artificial intelligence in power system operations", Proc. IEEE, vol. 75, no. 12, December 1987, pp. 1678-1685
92. K.H. Kim, J.K. Park „Application of hierarchial neural networks to fault diagnosis of power systems", Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 15, no. 2, pp. 65-70, 1993
93. A. Dysko, C. booth, J.R. Mcdonald, A.Carter „Protection System Performance Analysis Using Dynamic Modeling Methods", IEEE Power Engineering Review, vol. 21, no. 5, May 2001, pp. 54-57
94. M.M. Trawfik, M.M. Morcos „Prony Application for Locating faults on Loop Systems", IEEE Power Engineering Review, vol. 21, no. 8, August 2001, pp. 41-42
95. D. Subbarao, R. Uma, Biswajit Saha, M.V.R. Phanendra „Self-Organization in Power System", IEEE Power Engineering Review, vol. 21, no. 12, December 2001, pp. 59-61
96. J.L. castro, C.J. mantas, J.M. benitez „Interpretation of Artificial Neural Networks by Means of Fuzzy Rules", IEEE Trans. on Neural Networks, vol. 13, no. 1, january 2002, pp. 101-116
97. A.T. Johns, P.J. Moore, R. Whittard „New technique for the accurate location of earth faults on trasmission systems", IEEE Proc. Generation, Transmission, Distribution, vol. 142, no. 2, march 1995, pp. 119-127
98. D. Novosel, D.G. hart, E. Udren, M.M. Saha „fault location using digital relay data", IEEE Computer Application in Power, pp. 45-50, July 1995
99. M.B. Djuric, V.V. terzija „A New approach to the Arcing faults Detection for fast Autoclosure in Transmission Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10, no. 4, October 1995, pp. 1793-1798
100. M.S. Sachdev, R.Agarwal „A technique for estimating transmission line fault locations from digital impedance realy measurements", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 3, no. 1, June 1988, pp.121-129
101. A.A. Girgis, C.M. Fallon „fault location techniques for radial and loop transmission systems using digital fault recorder data", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 7, no. 4, October 1992, pp. 1936-1945
102. A.T. Johns, S.K. Salman „Digital Protection for Power Systems", London: Peregrinus, 1995

103. G.B. Ancell, N.C. Pahalawaththa „Maximum likehood estimation of fault location on transmission lines using travelling waves”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 9, no. 2, April 1994, pp. 1461-1468
104. Y. Sekine, Y. Akimoto, M.Kunugi, C. Kunugi, S. Fukui „fault diagnosis of power systems”, proceedings of the iEEE, May 1992, pp. 673-683
105. C. Y. Teo „Conventional and knowledge based approaches in fault diagnosis and supply restoration in power network”, IEEE Trans. on Power Systems, feb. 1998, pp. 8-14
106. T. Minakawa, M.Kunugi, K. Shimada, Y. Ichikawa, N. wada, M. Utsunamiya „development and implementation of a power system fault diagnosis expert system”, IEEE Trans. on Power systems, May 1995, pp. 932-940
107. E. Vasquez, O. Chacon, H.J. Altuve „An on-line expert system for fault section diagnosis in power systems”, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 12, no. 1, February 1997, pp. 357-362
108. „Neural Network Applications in Power Systems”, Int. journal of Ingineering Itelligent Systems, vol. 1, no. 3, December 1993, pp. 133-158
109. E.H.P. Chan „Application of neural network computing in intelligent alarm processing”, Proceedings of the iEEE PICA Conference, 1989, pp. 246-251
110. E. Handschin, D. Kuhlmann, W. Hoffmann „Fault diagnosis in electrical energy systems using device-specific artificial neural networks”, Enegineering Intelligent systems, vol. 2, December 1994, pp. 255-262
111. T.W. Parks, C.S. Burrus „Digital Filters Design”, John Wiley&Sons Inc, 1987
112. B. Cheng, D.Titterington „neural networks : A review from a statistical perspective”, Statistical science, vol. 9, no. 1, 1994, pp. 2-54
113. H.Gish „A probabilistic approach to the unerstanding and training of neural networks classifiers”, Proc. IEEE Int. Conf. Acoustic, Speech, Signal Processing, 1990, pp. 1361-1364
114. J. hertz, A.Grogh, R.Palmer „Introduction to the Theory of Neural Computation”, Reading, MA: Adisson-Wesley, 1991
115. A.ripley „Statistical Aspects of Neural Networks”, Network and Chaos – Statistical and Probabilistic Aspects, London, U.K.: Chapman&Hall, 1993
116. B.Lian, M.M.A. Salama, „An overview of digital fault location algorithm for power transmission lines using transient waveforms”, Elect. Power Syst. Res., vol. 29, 1994, pp. 17-25
117. J.Z. Yang, C.W. Kiu „A precise calculation of power system frequency and phasor”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 5, April 2000, pp. 494-499
118. M. Kezunvic, B.Perunicic „Automated transmission line fault analysis using synchronized sampling at two ends”, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 11, February 1996, pp. 441-447
119. P. Jarventausta, P.Verho, J. Partanen „Using fuzzy sets to model the uncertainty in the fault location process of distribution networks”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 92, April 1994, pp. 954-960
120. B. Kosko, „Fuzzy Engineering”, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1997
121. Дж. Поллард «Справочник по вычислительным методам статистики», Москва, Финансы и Статистика, 1982
122. С.М. Ермаков «Метод Монте-Карло и смежные вопросы», Москва, Наука, 1975

123. Загускин В.Л. «Численные методы решения плохо обусловленных задач», издательство Ростовского Университета, 1976
124. И.М. Соболь «Метод Монте-Карло», Москва, Наука, 1985
125. Н.П. Бусленко и др. «Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло)», Москва, Издательство Физико-математической литературы, 1962
126. «Вычислительные методы и программирование», сборник статей, Издательство Саратовского Университета, 1981
127. Loman, T.; Sauhatas, A.; Voinovska, A. "Statistical analysis of digital distance protection", Electric Power Engineering, 1999. PowerTech Budapest 99. International Conference on , 1999, p. 176
128. Popovic L.J.M, Radojevic Z.M. "Digital fault-location algorithm including grounding impebance at fault place", IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, vol. 148, no. 4, pp. 291-295
129. El-Naggar K.M. "A genetic based fault location algorithm for transmission lines", Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ No. 482) , Volume: vol.3 , 2001, pp. 5
130. Mazon, A.J.; Zamora, I.; Gracia, J.; Sagastabeitia, K.; Eguia, P.; Jurado, F.; Saenz, J.R. "Fault location system on double circuit two-terminal transmission lines based on ANNs", Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto , Volume: vol.3 , 2001
131. G.Korn, T.Korn "Mathematical handbook", McGraw-Hill Book Company, 1968
132. P.J. Moore, Bartlett E.J., Vaughan M "Fault location using radio frequency emissions", Developments in Power System Protection, 2001, 17th International Conference on
133. Zheng Chen, Chengmu Luo, Jinxi Su, Xinrong Wu "A fault location algorithm for transmission line based on distributed parameter", Developments in Power System Protection, 2001, 17th International Conference on
134. M.M. Saha, K. Wikstrom, J.Izykowski, E. Rosolowski "New accurate fault location algorithm for parallel lines", Developments in Power System Protection, 2001, 17th International Conference on
135. D.W.P. Thomas, C. Christopoulos, Y.Tang, P.Gale "A single ended fault location scheme", Developments in Power System Protection, 2001, 17th International Conference on
136. M.Aurangzeb, P.A. Crossley, P.Gale "Fault location using the high frequency travelling waves measured at a single location on a transmission line", Developments in Power System Protection, 2001, 17th International Conference on
137. M.Kezunovic, I.Rikalo "Automating the Analysis of Faults and Power Quality", IEEE Computer Application in Power, January 1999, pp. 46-50
138. Анхимюк В.Л., Олейко О.Ф., Михеев Н.Н., «Теория автоматического управления», Москва, Дизайн ПРО, 2000
139. Шалыт Г.М., «Определение места повреждения в электрических сетях», Москва, Энергоиздат, 1982
140. Шалыт Г.М., Аизенфельд А.И., Малый А.С., «Определение мест повреждения линии электропередачи по параметрам аварийного режима», под редакцией Г.М. Шалыт, 2-ое издание, Москва, Энергоатомиздат, 1983

141. Арцишевский Я.Л., «ОМП линий электропередачи в сетях с заземлённое нейтралью», Москва, Высшая школа, 1988
142. Б.С. Стогный, «Теория высоковольтных измерительных преобразователей переменного тока и напряжения», Киев, Научная мысль, 1984
143. У.Титце, К.Шенк «Полупроводниковая схемотехника», Москва, Мир, 1982
144. Т.В. Ломан, «Анализ и синтез программируемых дистанционных измерительных органов», Диссерт. На соискание учёной степени канд. техн. наук, Рига, РПИ, 1984
145. W.W. Seifert, C.S. Steeg edition, “Control System Engineering”, McGraw-Hill Book Corp Inc., 1960
146. D.G. Hart, D.Novosel, E.Udrin, “Application of Synchronized Phasors to Fault Analysis”, Precise Measurements in Power Systems, Arlington, Virginia, USA, October 1993, pp. 27-29
147. P. Bonanomi, “Phase angle measurements with synchronized clocks – principle and applications”, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 2, December 1981