

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
ENERĢĒTIKAS UN ELEKTROTEHNIKAS FAKULTĀTE  
ENERĢĒTIKAS INSTITŪTS

**Edīte BIEŁA-DAILIDOVICĀ**

Doktora studiju programmas „Enerģētika un elektrotehnika” doktorante

**ENERGOSISTĒMU RELEJAIZSARDZĪBAS UN PRETAVĀRIJAS  
AUTOMĀTIKAS VIRTUĀLI-REĀLĀ LABORATORIJA UN TĀS  
IZMANTOŠANAS PIEMĒRI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs  
profesors *Dr. habil. sc. ing.*  
**ANTANS SAUHATS**

Zinātniskais konsultants  
docents *Dr. sc. ing.*  
**DMITRIJS ANTONOVVS**

**RTU Izdevniecība**  
**Rīga 2017**

Bieļa-Dailidoviča E. Energosistēmu  
relejaizsardzības un pretavārijas automātikas  
virtuāli-reālā laboratorija un tās izmantošanas  
piemēri. Promocijas darba kopsavilkums – R.:  
RTU, 2017. – 49 lpp.

Iespiepts saskaņā ar RTU promocijas padomes  
„RTU P-05” (Enerģētika) 2017. gada 2. oktobra  
lēmumu Nr. 40/17



Šis darbs izstrādāts ar daļēju Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

Šis darbs izstrādāts ar daļēju atbalstu Eiropas Sociālā fonda līdzfinansēta projektā „Energosistēmu stratēģiskās attīstības un vadības tehniski ekonomisko problēmu izpēte un risināšana”.

Šis darbs izstrādāts ar valsts pētījumu programmas enerģētikā daļēju atbalstu projektā „LATENERGI”.

**ISBN 978-9934-22-019-7**

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2017. gada 9. novembrī plkst. 13 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 306. auditorijā.

**OFICIĀLIE OPONENTI**

***Dr. sc. ing. Vladimirs Čuvičins***  
Rīgas Tehniskā universitāte, profesors

***Dr. sc. ing. Aleksandrs Lvvovs***  
AS „Augstsprieguma tīkls”, Režīmu un plānošanas dienesta vecākais elektroinženieris

***Dr. sc. ing. Arturas Klementavicius***  
Lietuvas Enerģētikas institūts, vadošais pētnieks

**APSTIPRINĀJUMS**

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts neviens citā universitātē.

Edīte Bieļa-Dailidoviča..... (paraksts)

Datums .....

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi un rekomendācijas turpmākam darbam, kā arī literatūras saraksts. Darba kopējais apjoms ir 149 lappuses, kurās ietverti 83 attēli un astoņas tabulas. Literatūras sarakstā iekļauti 160 izmantotās literatūras avoti.

## SATURS

PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE	5
PROMOCIJAS DARBA MĒRĶI UN ATRISINĀTIE UZDEVUMI	6
PĒTĪJUMA METODES	7
PROMOCIJAS DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE	7
PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME	7
AIZSTĀVĒSANAI IZVIRZĪTAS PAMATNOSTĀDNES	8
AUTORA PERSONISKAIS IEGULDĪJUMS VEIKTAJOS PĒTĪJUMOS	8
PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA	8
PUBLIKĀCIJAS	9
PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS	10
1. ENERGOSISTĒMAS AUTOMĀTIKAS KOMPLEKSU PĀRBAUDES LABORATORIJA	11
2. VIRTUĀLI-REĀLAS LABORATORIJAS IEKĀRTAS UN PROGRAMMATŪRAS	16
3. ENERGOSISTĒMAS ASINHRONĀ REŽĪMA NOVĒRŠANAS AUTOMĀTIKAS DARBĪBAS ANALĪZE UN JAUNU PAŅĒMIENU IZSTRĀDE	21
4. VIRTUĀLI-REĀLĀS LABORATORIJAS PIELIETOŠANA ENERGOSISTĒMAS AUTOMĀTIKAS DARBĪBAS MODELĒŠANĀ UN ALGORITMU NOVĒRTĒŠANĀ	36
SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS TURPMĀKAJAM DARBAM	45
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	46

## PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE

Mūsdienē energosistēmas satur miljoniem elementu, aptver milzīgas ģeogrāfiskas teritorijas, prasa milzīgus attīstības un uzturēšanas kapitālieguldījumus. Energosistēmas darbību ietekmē daudzi gadījuma rakstura procesi un faktori [1.1]. Lai nodrošinātu tās efektīvu un drošu darbību, ir nepieciešama funkcionāla vadības sistēma. Vairums gadījumos vadības funkcijas tiek nodotas automātikas iekārtām un ierīcēm. Fiziski cilvēks nespēj pietiekami ātri analizēt un pieņemt apsvērtus lēmumus, kā arī savlaicīgi un ātri reaģēt uz izmaiņām energosistēmas režīmos komplikētu bojājumu gadījumos. Tieki izstrādātas jaunas enerģijas ražošanas iekārtas un vadības sistēmas, kas nepārtraukti attīstās, tomēr to nodrošināšanai nepieciešami:

- kvalificēts personāls;
- efektīva un progresīva zinātnē.

Savukārt personāla sagatavošanai un pētījumu veikšanai ir nepieciešamas zinātniskās pētniecības laboratorijas (ZPL), kuras var iedalīt divos ZPL veidos:

- reālās laboratorijas – pieļauj veikt eksperimentus, izmantojot reālas iekārtas vai to fiziskus modeļus;
- virtuālās laboratorijas – nodrošina procesu imitēšanu, izmantojot digitālos iekārtu modeļus.

Protams, ka var pastāvēt arī iepriekš minēto laboratoriju kombinācijas. Virtuālās laboratorijas tiek izmantotas daudzās zinātnes nozarēs [1.2], un tās strauji attīstās līdzās mūsdienīgām informācijas tehnoloģijām.

Enerģētikas zinātnes nozarē virtuālās laboratorijas sākā izmantot krieti agrāk par personālajiem datoriem, to lietošana aizsākās 20. gadsimta vidū ar energosistēmu apvienošanu, kad parādījās pirmās elektromehāniskās skaitlošanas mašīnas. Praktisko ieinteresētību minētajām laboratorijām var skaidrot ar:

- energosistēmas ietekmi uz ekonomikas rādītājiem, kas veicināja investīcijas dārgās skaitļošanas iekārtās;
- problēmas būtību, kas ir saistīta ar energosistēmas paplašināšanos un komplikētību, kas gala rezultātā izslēdza iespēju veidot tās fiziskos modeļus.

Var apgalvot, ka virtuālā energosistēmu izpētes laboratorija šodien ir neatņemams pārvades un sadales tīklu operatoru darbarīks un jaunu speciālistu apmācības līdzeklis. Protams, virtuālās laboratorijas kalpo operatoru dispečeru apmācībām un kvalifikācijas celšanai [1.3, 1.4, 1.5].

Virtuālo laboratoriju iespējas ir ierobežotas reālo automātikas iekārtu uzvedības izpētes gadījumā, jo eksperimentus var veikt tikai ar modeļiem. Lai izslēgtu minēto trūkumu, 20. gadsimta beigās sākās virtuāli-reālo laboratoriju (VRL) izmantošana. Tāda iespēja parādījās kā mikroprocesoru tehnikas attīstības rezultāts. Par VRL pamatiem kārtām var uzskatīt sarežģītos relejaizsardzības pārbaudes kompleksus *OMICTRONS* [1.6], Freja [1.7], ISA DRTS [1.8].

Relejaizsardzības pārbaudes kompleksi ir piemēroti rūpnieciski ražojamo iekārtu pārbaudei un stipri ierobežoti zinātnisko pētījumu veikšanā, kad ir nepieciešams ģenerēt sarežģītus testēšanas signālus. Šis promocijas darbs virzīts tālākai VRL attīstībai, laboratorijas izveidei un iespēju pārbaudei, veicot eksperimentus ar reālām automātiskām iekārtām. Par izpētes priekšmetu izvēlēti energosistēmu elektromehāniskie pārejas procesi un to vadībai piemērota automātika (asinhrona režīma novēršanas un salas režīma atpazīšanas). Tādas laboratorijas pastāvēšana ir svarīga ne tikai zinātniskai pētījumu efektivitātes paaugstināšanai, bet arī universitātes mācību procesa uzlabošanai un pilnveidošanai.

## **PROMOCIJAS DARBA MĒRKI UN ATRISINĀTIE UZDEVUMI**

Promocijas darba mērkis ir energosistēmu efektivitātes un drošuma paaugstināšana. Definētā mērķa sasniegšanai atrisināti šādi uzdevumi:

1. veikta energosistēmu automātikas iekārtu un to programmatūru testēšanas un verifikācijas metožu un instrumentu analīze;
2. piedāvāta pamatota un realizēta virtuāli-reāla ZPL struktūra, iekārtu un programmatūras sastāvs, kas iekļauj: avārijas procesu digitālo ierakstu bibliotēku, dinamisko procesu simulēšanas programmatūru, ciparu-analogos pārveidotājus (CAP), automātikas iekārtu prototipus;
3. sintezētas un patentētas jaunas adaptīvas energosistēmu asinhronā režīma novēršanas automātikas sistēmas un paņēmieni, un ir pierādītas to priekšrocības;
4. veicot piedāvāto sistēmu un algoritmu testēšanu un verifikāciju, pierādītas VRL priekšrocības un testējamo iekārtu efektivitātes novērtēšanas iespējas.

## **PĒTĪJUMA METODES**

1. Skaitliskie eksperimenti ir veikti, izmantojot Rīgas Tehniskās universitātes valsts nozīmes centra serveri un programmatūras *ETAP*, *MathCad*, *SMOKY*, *EUROSTAG*.
2. Automātikas testēšana un verifikācija veikta, izmantojot Latvijas energosistēmas ģeneratoru un pārvades tīkla datus, kā arī IEEE testēšanas sistēmas [1.9].
3. Automātikas prototipa realizēšanai izmantoti signālprocesori TMS-320 [1.10] un to attiecīgie programmnodrošinājumi ar attīstības iespējām.
4. Pārejas procesu ģenerēšanai izmantoti avārijas procesu ieraksti, kas ievākti ar avārijas procesu reģistrācijas iekārtām „REMI” Latvijā, Igaunijā, Lietuvā.

## **PROMOCIJAS DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE**

1. Pamatota jauna zinātniskās pētniecības automātikas laboratorijas struktūra, kas ļauj veikt sarežģītus eksperimentus automātikas pārbaudei.
2. Pārbaudītas laboratorijas iespējas un pierādītas tās priekšrocības, kā arī iespējas testēt pretavārijas automātikas kompleksus, kuru sastāvā ietilpst vairāki termināli, kuru darbība ietver desmitiem procesu kontroli un izpildi.
3. Pamatota jauna pretavārijas automātikas struktūra, kas ir spējīga kontrolēt plašu energosistēmas daļu, kas sastāv no vairākiem termināliem, kas ir savienoti ar sakaru kanāliem un apvieno lokālo un centralizēto sistēmu priekšrocības.
4. Pamatots ģeneratoru sprieguma modelēšanas algoritms, kas novērtē ekvivalento energosistēmas pretestību, izmantojot iepriekš zināmo ģeneratoru sprieguma moduļa vērtību.
5. Sintezēts jauns ģeneratoru rotoru leņķa kontroles algoritms, kas nav jutīgs pret energosistēmas parametru izmaiņām avārijas procesu gaitā.

## **PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME**

Pētījumu rezultāti iekļauti un izmantoti:

1. izstrādātajā metodikā valsts pētījumu programmas energētikā izpildei;
2. VRL, ko var izmantot, veicot eksperimentus, pārbaudes, verifikācijas un pārbaudot jaunas metodes, algoritmus, kā arī mācību procesā: laboratorijas darbiem, kas saistīti ar elektromehāniskiem pārejas procesiem, relejaizsardzības un automātikas darbību [1.11];

3. izstrādātajā virtuālās testēšanas un programmatūras metodikā, ko var izmantot esošas reļajaizsardzības elementu drošuma, ātrdarbības un selektivitātes pārbaudei;

4. virtuālās testēšanas metodikā, kas izmantota Eiropas kopienas finansēto projektu *PEGASE*, *ICOEUR* un valsts pētījumu programmas enerģētikā izpildei [1.12];

5. izstrādātajos un izdotajos mācību līdzekļos laboratorijas darbu veikšanai „Energosistēmas modelēšanas pamati un īsslēguma procesu izpēte *ETAP* vidē” un „Laboratorijas darbu komplekss *ETAP* vidē maģistra studiju programmai. 1. daļa un 2. daļa”.

## AIZSTĀVĒŠANAI IZVIRZĪTAS PAMATNOSTĀDNES

1. Izstrādāta energosistēmas virtuālā zinātniskās pētniecības laboratorijas struktūra un rīki.

2. Piedāvātas un patentētas jaunas, efektīvas asinhronā režīma novēršanas automātikas ierīces struktūras un paņēmieni.

3. Sintezēts pārbaudes aparatūras testēšanas un verifikācijas komplekss, izmantojot *ETAP* un specializētu programmatūras bāzi.

4. Piedāvāta salas režīma atpazīšanas automātikas struktūra un tās izmantošanas iespējas.

## AUTORES PERSONĪGAIS IEGULDĪJUMS VEIKTAJOS PĒTĪJUMOS

VRL struktūra un sastāvs pamatoji kopā ar zinātnisko vadītāju profesoru Antanu Sauhatu, izmantojot RTU Enerģētikas institūta iepriekšējo gadu zinātniskās darbības rezultātus (avārijas procesu reģistrācijas sistēma un analīzes programmatūras „*SMOKY*”), kā arī tiek izveidots modernais analogdigitālā simulatora komplekts, kas sastāv no enerģētisko sistēmu un objektu darbības procesu modelējošās iekārtas un iekārtu simulācijas, pārbaudes un verifikācijas bloka. Kopā ar asociēto profesoru Andreju Utānu tika sintezēts automātikas prototips uz signālprocesoru TMS-320 bāzes. Vairums no aprakstītiem skaitiskiem eksperimentiem un to rezultātiem pieder personīgi promocijas darba autorei, izņēmumi atzīmēti promocijas darba tekstā.

## PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

Promocijas darbs tika prezentēts un apspriests dažādu līmeņu semināros un konferencēs.–

1. The 6th International Conference on Electrical and Control Technologies, Kaunas University of Technology Faculty of Electrical and Control Engineering, May 5–6, 2011.

2. The 52nd International Scientific Conference of Riga Technical University, Section of Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, October 2011.

3. The 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering (EPE 2012), Czech, BRNO, May 23–25, 2012.

4. Riga Technical University 53rd International Scientific Conference and 1st World Congress of RPI-RTU Engineering Alumni on Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, 10–12 October 2012.

5. Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ 2012), Estonia, Tartu, 11–13 June, 2012.

6. The 54th International Scientific Conference of Riga Technical University, Section of Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, 14–16 October, 2013.

7. The 2013 International Conference on Education and Modern Educational Technologies (EMET'13) Recent Advances in Education & Modern Educational Technologies: Educational Technologies Series 9, Italy, Venice, 28–30 September, 2013.

8. 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, Latvia, Riga, 14 October, 2015.

9. 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, Latvia, Riga, 14 October, 2016.

## PUBLIKĀCIJAS

Par pētāmo disertācijas tēmu ir publicēti raksti.

1. Sauhats A., Silarajs M., Kucajevs J., Pasnins G., Antonovs D., **Biela E.** Testing of Protection and Automation Devices Using Dynamical Simulation Processes of Power System. Electrical and Control Technologies. Lietuva, 2011, No.6, ISSN 1822-5934, 184.–189. lpp.

2. Sauhats A., Utāns A., Kucājevs J., Pašņins G., Antonovs D., **Biela E.** Protection and Automation Devices Testing using the Modeling Features of EUROSTAG. RTU zinātniskie raksti. 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika. 28.sējums, 2011, 7.–12. lpp.

3. Survilo J., **Biela E.** Adverse Currents in Simple Closed Networks. Electrical and Control Technologies, Lietuva, 2011, No. 6, ISSN 1822-5934, pp. 190–195.

4. Survilo J., **Biela E.** Extra Losses in Imperfect Closed Grids. RTU zinātniskie raksti. Enerģētika un elektrotehnika. Vol.29, 2011, ISSN 1407-7345, pp.19–24.

5. Sauhats A., Utāns A., Silarajs M., Kucajevs J., Antonovs D., **Biela E.**, Moskins I. Power System Dynamical Simulation Application for Out-of-Step Relay Testing. Scientific Journal of Riga Technical University, Power and Electrical Engineering. – Volume 6, 2012, pp. 1343.–1348.

6. Sauhats A., Žalostība D., Bočkarjova G., **Biela-Dailidoviča E.**, Dinevičs J. Latvian Project of Smart Grid and Renewables Technological Park. Recent Researches in Environmental Science & Landscaping: Energy, Environmental and Structural Engineering Series 2. WSEAS Press, 2012, ISBN 978-1-61804-090-9. ISSN 2227-4359, Griekija, pp. 205.–210.

7. Survilo J., Antonovs D., **Biela E.** Non-uniformity Impact of Power Losses in Kurzemes Ring Project Case. Electric Power Quality and Supply Reliability Conference, Estonia, 2012, ISBN 9781467319805, e-ISBN 9781467319782, pp. 137–142.

8. Survilo J., Antonovs D., **Biela E.** The Extent of Network Non-uniformaty Impact on Power Losses. Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering, Czech Republic, 2012, ISBN 9788021445147, pp. 99–104.

9. Sauhats A., Žalostība D., Dolgicers A., Utāns A., Bočkarjova G., **Biela-Dailidoviča E.**, Antonovs D. Power System Simulation Laboratory as a Modern Educational Tool. Recent Advances in Education & Modern Educational Technologies, Italy, ISBN 9781618042101, 2013, pp. 103–110.

10. Antonovs D., **Biela E.**, Sauhats A., Zicmane I. Laboratorijas darbu komplekss ETAP vidē maģistra studiju programmai. 2.daļa. Rīga, RTU Izdevniecība, 2013. ISBN 9789934104466, 52. lpp.

11. Antonovs D., **Biela E.**, Sauhats A., Zicmane I. Laboratorijas darbu komplekss ETAP vidē maģistra studiju programmai. 1. daļa. Rīga: RTU Izdevniecība, 2013, ISBN 9789934104459, 41. lpp.

12. Antonovs D., **Biela E.**, Sauhats A., Zicmane I. Energosistēmas modelēšanas pamati un īsslēguma procesu izpēte ETAP vidē. Rīga: RTU Izdevniecība, 2013, ISBN 9789934104053, 42. lpp.

13. Survilo J., Antonovs D., **Biela-Dailidovicha E.** The Stipulation for Orthogonality of the Nodal and Extra Currents. Journal of Energy and Power Engineering. Vol.31, 2013, ISSN 14077345, pp. 68–73.
14. Sauhats A., Zalostība D., Dolgicers A., **Biela-Dailidovicha E.**, Antonovs D. Application of Power System Modelling Software for Educational and Research Purpose. Electrical engineering and information complexes and system, Russia, Vol.10, No.1, 2014, ISSN 1999-5458, pp. 5.–14.
15. Dolgicers A., **Biela-Dailidovicha E.**, Antonovs D., Kozadajevs J. Учебные пособия в лаборатории релейной защиты, Training Facilities in the Relay Protection Laboratory. Electrical Facilities and Systems. Electrical and Data Processing Facilities and Systems, Vol.11, No.4, 2015, ISSN 1999-5458, Russia, pp. 5.–12.
16. Sauhats A., Zalostība D., Dolgicers A., **Biela-Dailidovicha E.**, Broka Z. University Impact on Power Supply Economy, Reliability and Sustainability Enhancement Decreasing Climate Changes. 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University: Proceedings, ISBN- 978-1-5090-0334-1, Riga, 2015, pp. 37.–42.
17. Sauhats A., Utāns A., **Biela-Dailidovicha E.**, Wide-area measurements-based Out-of-Step Protection System, 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University: Proceedings, ISBN- 978-1-5090-0334-1, Riga, 2015, pp. 11.–15.
18. Sauhats A., Utāns A., **Biela-Dailidovicha E.**, Antonovs D. Out-of-Step Protection Using Equal Area Criterion in Time Domain, 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University: Riga, 2016, pp. 1.–6.

Stenda referāts

1. Sauhats A., Antonovs D., Svalovs A., Svalova I., Utāns A., Bočkarjova G., **Biela-Dailidoviča E.**, Energosistēmas asinhronā režīma novēršanas aizsardzības shēma. Forums „Latvijas zinātne – kā sasniegt izcilību?”, Latvija, Rīga, 9. oktobris, 2015, Rīga, 1. lpp.

Iegūtie patenti

1. Antonovs D., Sauhats A., Utāns A., **Biela E.** Patents LV 14832 B, 05.07.2013.:
  - Asinhronās gaitas novēršanas automātikas ierīce;
  - Asinhronās gaitas novēršanas automātikas paņēmiens.
2. Antonovs D., Sauhats A., Utāns A., **Biela-Dailidoviča E.** Patents LV 14912 B, 27.06.2014.:
  - Asinhronā režīma novēršanas automātikas ierīce;
  - Asinhronā režīma novēršanas automātikas paņēmiens.

## PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi un rekomendācijas turpmākam darbam, kā arī izmantotās literatūras saraksts. Darba kopējais apjoms ir 149 lapaspuses, kurās ietverti 83 attēli un astoņas tabulas. Literatūras sarakstā norādīti 160 izmantotās literatūras avoti.

Ievadā pamatota promocijas darba tēmas aktualitāte, definēts mērķis un uzdevumi, zinātniskā novitāte. Dots publikāciju un konferenču saraksts.

Pirmajā nodaļā aprakstītas veiktās sarežģito energosistēmu automātikas kompleksu pārbaudes, testēšanas un verifikācijas uzdevumu un atrisināšanas metožu un līdzekļu analīze. Aplūkoti automātikas darbības principi un izmantojamās pieejas, metodes un līdzekļi pārbaužu veikšanai. Veikts zinātnisko laboratoriju attīstības apskats un analīze, sākot no energosistēmu dinamiski fiziskiem modeļiem un visbeidzot ar VRL [1.13].

Otrā nodaļa veltīta VRL nepieciešamības un struktūras pamatojumam, programmnodrošinājumam un iekārtu izvēlei.

Trešajā nodaļā ir aprakstīti, analizēti un pilnveidoti kā piemēri divi svarīgie energosistēmu pretavārijas automātikas veidi:

- asinhronā režīma atpazīšanas un novērtēšanas automātika „AGNA”;
- „Salas” atpazīšanas automātika (SAA).

Abi nosauktie automātikas veidi izmanto lielu skaitu ieejas procesu un relatīvi sarežģītus algoritmus. Nodaļā aprakstīta esošā situācija, izmantojamās automātikas trūkumi un iespējas uzlabošanai. Piedāvātas jaunas struktūras un algoritmi, kas novērš trūkumus.

Ceturtajā nodaļā aprakstīta automātiku algoritmu un iekārtu pārbaudes gaita un rezultāti. Tika izmantoti rūpnieciskās programmatūras *EUROSTAG*, *ETAP*, Latvijas energosistēmas pārvades tīkla un lielo elektrostaciju dati. Papildu pārbaudes veiktas, izmantojot IEEE testēšanas modeli. Doti testēšanas rezultātu piemēri. Aplūkota testēšanas signālu bibliotēka un energosistēmas modeļa validācijas testēšanas procedūra.

Secinājumos un rekomendācijās turpmākam darbam ir priekšlikumi, kas formulēti divos pamatvirzienos:

- energosistēmu simulēšanas programmatūru papildināšana ar jauno tehnoloģiju modeļiem;
- programmatūru pilnveidošana eksperimentu tālākas automatizēšanas nolūkos.

# 1. ENERGOSISTĒMAS AUTOMĀTIKAS KOMPLEKSU PĀRBAUDES LABORATORIJA

Energosistēma sastāv no miljoniem elementu, kas var būt iedalīti divās grupās:

- spēka elementi, kas izstrādā, pārvada, sadala un izmanto enerģiju;
- vadības elementi, kas veic procesu kontroli un atkarībā no kontroles rezultātiem maina energosistēmas stāvokli un parametrus. Lielākā daļa vadības elementu darbojas automātiskā režīmā, jo energosistēmu stāvokļa un procesu izmaiņu ātrums nepieļauj izmantot cilvēku – operatoru, lai veiktu minētās izmaiņas.

Daļa iespējamo procesu ir bīstami energosistēmas spēka elementiem, var izsaukt elementu bojājumus, ugunsgrēkus, energoapgādes pārtraukumus utt. Tādu procesu pārtraukšanai vai novēršanai tiek izmantotas relejaizsardzību un pretavāriju automātikas iekārtas un sistēmas. Šīs sistēmas ir spējīgas veikt būtiskas izmaiņas energosistēmas darbībā. Kļūdainas automātikas iedarbības varbūtību samazināšanai ir jāveic to dažāda veida scenāriju, darbību un algoritmu pārbaudes. Tādas pārbaudes tiek veiktas speciālās laboratorijās, izmantojot piemērotu aparātūru un mērinstrumentus, kuru izvēle ir atkarīga no automātikas veida un izpildījuma.

Laboratorijās veicamos eksperimentus var aizvietot ar pārbaudēm reālos energosistēmas objektos. Minētās pārbaudes tiek veiktas, bet tikai jaunas aparatūras izveides beigu stadijā, jo ir ievērojami dārgas un ierobežotas šādu iemeslu dēļ:

- nevar vai ir pārāk dārgi mākslīgi veidot avārijas procesus un situācijas;
- zema avāriju notikumu varbūtība reālos objektos. Pārbaudes attiecīgi prasa ilgu laiku vai tās ir jāveic, izmantojot daudzus jaunu iekārtu paraugus. Neskatoties uz minētajiem trūkumiem, jaunu iekārtu pārbaudi reālos objektos var uzskaitīt par svarīgu etapu to attīstības gaitā.

Atšķirībā no aprakstītās beigu pārbaudes stadijas pirmās pārbaudes notiek, izmantojot energosistēmas un jaunizveidojamus automātikas modeļus un simulāciju ar datortehnikas palīdzību. Šī gadījuma pārbaudes notiek virtuālā laboratorijā, kuras struktūra ir paradīta 1.1. att.



1.1. att. Vienkāršota virtuālās laboratorijas struktūra.

Virtuālās laboratorijas sniedz iespēju veikt eksperimentus, izmantojot tikai modeļus – gan energosistēmas, gan arī veidojamās automātikas. Darbs ar modeļiem dod lielas priekšrocības veikt izmaiņas, automatizēt eksperimentus. Diemžel var atzīmēt vienu, bet nozīmīgu, trūkumu: sekmīgi pārbaudīts modelis nedod garantiju tam, ka pārbaudāmā iekārta ir derīga darbam reālos apstākļos. Šis apgalvojums ir īpaši aktuāls, pārbaudot mikroprocesoru iekārtas, kuru realizācijas gaitā var būt pieļautas kļūdas gan programmnodrošinājumā, gan arī aparatūras izveidē. Lai novērstu minēto trūkumu, tiek izmantotas virtuāli-reālās laboratorijas [1.18].

Tieši VRL iekārtas ir masveidā ražotas un tiek izmantotas energosistēmu ekspluatācijas praksē, veicot periodiskas automātikas iekārtu pārbaudes.

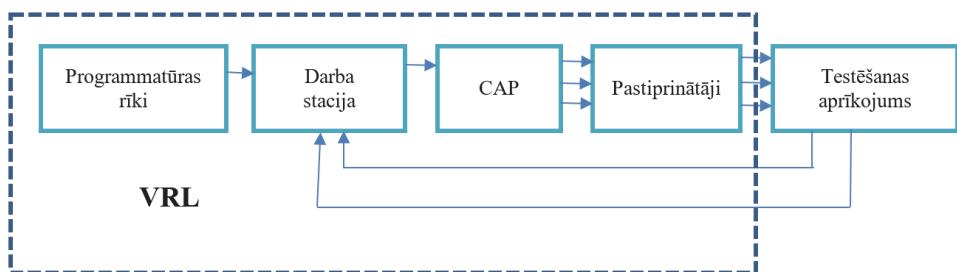
VRL struktūra un iekārtas šajā darbā ir ņemtas par pamatu pārbaužu metožu un aprikojuma tālākai attīstībai.

Var apgalvot, ka mūsdienu energosistēmu automātikas darbība notiek, izmantojot multidimensionālo procesu kontroli. Šo procesu novērošana (mērījumi) var notikt dažādās ģeogrāfiski attālinātās vietas. Starp tām notiek informācijas apmaiņa, kurai tiek izmantoti optiskie, ātrdarbīgie sakaru kanāli [1.25, 1.26].

Kontrolējamo procesu skaita pieaugums būtiski ietekmē iekārtu pārbaudes procesu, kas kļūst komplikēts.

Vienlaikus var novērot vēl vienu tendenci – mikroprocesoru termināli pieļauj izmantot mazjaudīgos signālus, kas būtiski atvieglo pārbaudes. Šī īpatnība ir ļoti svarīga pārbaudes procedūru veidošanā.

VRL struktūra ir dota 1.2. att.

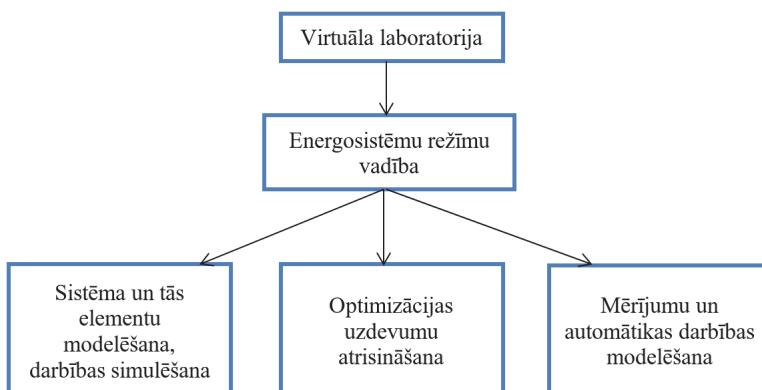


1.2. att. Virtuāli-reālas laboratorijas struktūra.

Kā redzams 1.2. attēlā, salīdzinājumā ar iepriekš minēto virtuālo laboratoriju papildus izmanto blokus: ciparu-analogu signālu pārveidotāju (CAP) un pastiprinātājus. Šāda paplašināšana pieļauj izpēti reālas automātikas īpašības. Būtiski trūkumi šādai laboratorijai var būt:

- dārga realizācija;
- energosistēmas digitālā modeļa neprecizitāte.

Virtuālā laboratorija ir programmatūru un aparatūras komplekss, kas ļauj veikt pētījumus bez fiziski realizētas iekārtas [1.28]. Virtuālās laboratorijas pamatlēmekļi parādīti 1.3. att.



1.3. att. Virtuālās laboratorijas pamatlēmekļi.

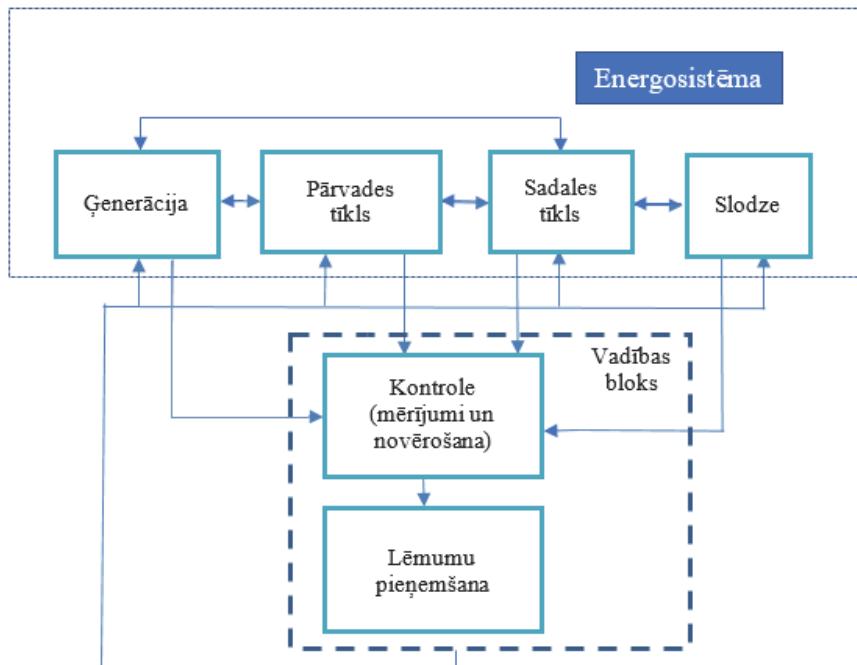
Var nosaukt daudz energosistēmu modelēšanas programmatūru:

- *NEPLAN* programmatūra [1.37–1.39];
- simulators *RTDs* un *NI PXI. RTDs* [1.40–1.44];

- *ICT* tālvadības augstsriegumu HV laboratorija [1.44–1.46], [2.17];
- virtuālās laboratorijas prototips (*VEMA*) [1.47–1.48];
- *e-LABORATORY PROJECT* [1.28];
- *VLABPOWER* virtuālā laboratorija [1.49, 1.50];
- distantlaboratorijas (attālinātas pieejas) aprakstītas [1.23];
- *EUROSTAG* programmatūra [1.51–1.57];
- *ETAP* (*Electrical Transient Analyzer Program*) [1.54];
- *PSS/E* (*Power Transmission System Planning Software*) [1.58].

Apkopojoj energosistēmu virtuālo laboratoriju apskatu, var apgalvot, ka programmas ir atbilstošas mācību [1.59] un procesu analizei, bet tās nevar lietot reālu iekārtu pārbaudes nolūkā [1.60, 1.61].

Nepieciešams pievērst uzmanību avārijas procesu simulācijas problēmu analīzei. Tātad, energosistēma ietver (1.4. att.) četras apakšsistēmas: ģenerāciju, pārvadi, sadali un slodzi. Energosistēmas mērķi tiek realizēti ar spēcīgas vadības sistēmas palīdzību, kas savukārt ietver mērījumu novērošanas un lēmumu pieņemšanas blokus [1.62]. Vadības bloks (*Control System – CS*) var ietvert lielu skaitu automātisko iekārtu, kas var būt organizētas daudzfunkcionālā vadības sistēmā. Relejaizsardzība un avārijas automātika ir svarīga *CS* apakšsistēma [1.51]. Šī apakšsistēma papildina mērījumus un avārijas gadījumā nodrošina nepieciešamās izmaiņas ģenerācijā, pārvadē, sadalē vai slodzē [1.63].



1.4. att. Energosistēmas un to vadības vienkāršota struktūra.

Sintezējot aizsardzību algoritmus un aparatūru, to realizēšanai nepieciešami testēšanas rīki, ko var realizēt, izmantojot divus pamatprincipus [2.12]: testēšanas signāli parametru un iestatījumu telpā un testēšana aizsardzības iekārtas parametru telpā.

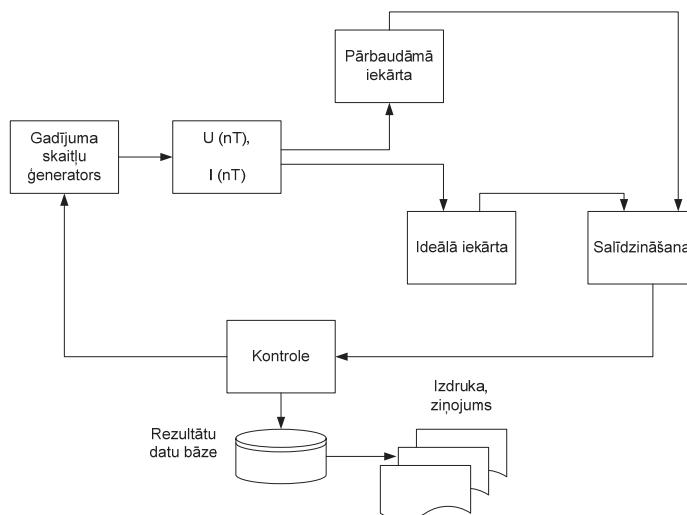
Termināla pārbaudes procedūra parādīta 1.5. att. Šajā gadījumā pārbaude nozīmē gadījuma skaitļu ģeneratora brīvi izvēlētu signālu padošanu, šo vērtību saglabāšanu pārbaudāmās iekārtas atmiņā ar sekojošu atbildes reakciju no ideālās iekārtas un reakciju salīdzināšanu. Minēto procedūru var vienkāršot, nododot gadījuma skaitļu ģeneratora un ideālās iekārtas funkciju izpildi pētniekam – testēšanas izpildītājam.

Aplūkotai pieejai ir šādi trūkumi:

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

Pat relatīvi maza energosistēma sastāv no simtiem tūkstošiem elementu, kas rada kompliečību modelēšanas uzdevumā. Lai paskaidrotu šo apgalvojumu, jāaplūko Latvijas energosistēmas struktūra, sākot ar augstsprieguma tīklu. Var secināt, ka šis tīkls ietver desmitus 330 kV un virs simta 110 kV PEL un katra no tām ir jāmodelē [1.64].

Augstsprieguma tīkls ir saistīts ar vidsprieguma tīklu. Vidsprieguma shēma satur tūkstošiem elementu, bet tā vēl varētu būt papildināta ar zemsprieguma tīkla shēmu, kas kopā ar pieslēgtām slodzēm satur simtiem tūkstošu elementu. Protams, nevar aizmirst par ģenerācijas avotiem, kas pašlaik tiek pieslēgti gan pie augstsprieguma tīklu pamata ģenerācijas, piemēram, HES un TEC, gan pie sadales tīkla ar izkliedētās ģenerācijas avotiem, piemēram, vēja parki, kogenerācijas stacijas.



1.5. att. Termināla pārbaude, padodot signālus tieši uz pārbaudāmo iekārtu.

Energosistēmas tīkliem ir pieslēgti enerģijas avoti ar turbīnām un ģeneratoriem, kuru skaits, ņemot vērā atjaunojamos avotus, ir izsakāms simtos [1.65], [2.18–2.19]. Sarežģītāks ir gadījums, kad Latvijas energosistēma tiek sasaistīta ar kaimiņvalstīm (Igaunija, Krievija, Lietuva) [1.66, 2.20].

Varam secināt, ka energosistēmas sarežģītības dēļ, modelējot tās darbību, ir jāpieņem vienkāršojumi.

Modelēšanas praksē parasti tiek pieņemti šādi ierobežojumi un vienkāršojumi:

1. atsevišķi tiek modelēti elektromagnētiskie un elektromehāniskie pārejas procesi;

2. kaimiņvalstu energosistēmas tiek aizvietotas ar ekvivalentiem ģeneratoriem, saglabājot starpvalstu pārvades elektrolīnijas;
3. modelējot elektromagnētiskos pārejas procesus, viens no otra tiek atdalīti dažāda sprieguma tīkli;
4. modelējot elektromagnētiskos pārejas procesus, tiek ņemts vērā tikai augstsprieguma tīkls, pievienojot slodzes pie tīkla kopnēm [1.67].

Modelējot elektromagnētiskos pārejas procesus, tiek izmantota attīstīta teorija, procesi tiek aprakstīti ar algebriskiem vienādojumiem, tiek izmantota simetrisko komponenšu metode un ir pieejamas komerciālās programmatūras, piemēram, PSS/E [1.68].

Modelējot elektromehāniskos pārejas procesus, tiek pieņemts, ka pirms jebkādām izmaiņām sistēma ir stacionāra un var būt raksturota ar:

- visu turbīnu parametriem  $TR_i$ ;
- ģeneratoru aktīvo  $P_i$  un reaktīvo  $Q_i$  jaudu;
- konkrētam pārvades tīkla shēmām;
- sprieguma un strāvas konkrētiem lielumiem tīkla zaros un mezglos.

Sākoties svārstībām sistēmā, var notikt strāvu un spriegumu izmaiņas, ko var aprakstīt ar diferenciālvienādojumu sistēmu:

$$\left. \begin{array}{l} T_1 \frac{di_1}{dt} = F_1 \\ \vdots \\ T_j \frac{du_j}{dt} = F_j \end{array} \right\}, \quad (1)$$

$$\text{kur } F_j = F_j(i_1, i_2, \dots, i_m; u_{m+1}, \dots, u_n; TR_i; P_i; Q_i; P_{cj}; Q_{cj}; \Delta f; \Pi_s), \quad (2)$$

kur  $\Pi_s$  – sistēmas parametri (pārvades elektrolīnijas induktivitāte, pretestības, turbīnu, ģeneratoru un transformatoru parametri utt.).

Svārstību modelēšana pat relatīvi mazās energosistēmās ir saistīta ar nozīmīgiem sarežģījumiem, kas rodas: lielā mainīgo skaita dēļ ir nepieciešamības ņemt vērā milzīgu ģenerācijas un slodzes kombināciju skaitu [1.69].

Lai izmantotu (1) un (2), ir nepieciešams daudzs datu par slodzēm, ģeneratoriem, līniju parametriem, izmantojamiem automātikas veidiem un parametriem. Pētnieki var iedalīt uzdevumus daļas un katram režīmam uzrakstīt vienādojumu (1). Nēmot vērā lielo publikāciju skaitu, kas saistīts ar energosistēmas rīku modelēšanas attīstību, varam secināt, ka šadas metodoloģijas lietošana nerada ievērojamus sarežģījumus [1.52]. Sarežģītākais uzdevums ir saistīts ar energosistēmas dimensijsām. Lai atrisinātu minētos sarežģījumus, ir radīti spēcīgi programmatūru rīki *ETAP*, *EUROSTAG* [1.53–1.56]. Izmantojot minētos rīkus, ir iespējams vienkārši, bet ne lēti, radīt dinamisku virtuālās energosistēmas laboratoriju, kas būtu aprīkota ar lietotājam draudzīgu interfeisu un iespēju risināt dažādus uzdevumus. Diemžēl esošo programmatūru rīku iespējas ir ierobežotas. Minēto ierobežojumu analīze uzrāda, ka:

1. virtuālās laboratorijas nesniedz iespēju testēt reālu aparatūru un var pētīt tikai to modeļus. Šis ierobežojums ir ļoti nozīmīgs un būtisks, kad tiek izstrādāta relejaizsardzība vai pretvārijas automātika. Minēto ierīču izbūvi sāk no modeļiem, kurus testē virtuālā laboratorijā. Taču pēc sekmīgas modeļa testēšanas nākamais solis ir reālas aparatūras radīšana un tās verifikācija;

2. izejas procesi minētajām programmatūrām tiek izteikti vektoru formā, piemēram, strāvai  $i(t)$ :

$$i(t_j) = A_i(t_j) \exp(j\omega(t_j) + \Theta(t_j)), \quad (3)$$

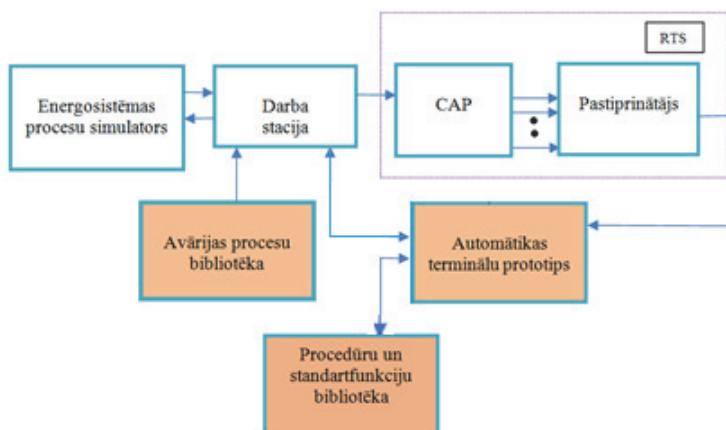
kur  $A_i$ ;  $\Theta(t)$  – vektora modulis un leņķis.

Šāds signāls nevar būt tieši izmantots reālā aparatūrā testēšanas un izpētes procesā.

Minētās programmatūras nav paredzētas testēšanas aprīkojuma detalizētai modelēšanai. Piemēram, reāla automātika ietver analogciparu pārveidotāju, digitālo filtru, lielu ievades komandu skaitu. Šo elementu darbība nevar tikt modelēta ar rūpnieciskās programmatūras palīdzību.

## 2. VIRTUĀLI-REĀLAS LABORATORIJAS IEKĀRTAS UN PROGRAMMATŪRAS

Lai novērstu pirmajā nodaļā minētos VRL trūkumus, tiek piedāvāta 2.1. att. redzamā paplašinātā laboratorijas struktūra.



2.1. att. Paplašinātā virtuāli-reālas laboratorijas struktūra.

VRL sastāv no šādiem pamatblokiem:

- virtuālais procesu simulators, kas veic energosistēmas elektromagnētisko un elektromehānisko procesu modelēšanu un ir realizēts datoru programmatūru kompleksa veidā;
- darba stacija, kas ir aprīkota ar procesu simulācijas programmatūru un ir spējīga glabāt procesu bibliotēku;
  - procedūru un standartfunkciju bibliotēka, kurā tiek apkopota un uzglabāta informācija un datubāze par aparātūras un iekārtu parametriem;
  - RA testēšanas sistēma (RTS), piemēram, *ISA DARTS*, *OMICRON* utt.;
  - reālo procesu bibliotēka, kas glabā avārijas procesu ierakstus (sarežģītas formas strāvas un spriegumus). Bibliotēkas formēšanai tiek izmantoti energosistēmas objekti, kas reāli darbojas un ir aprīkoti ar avārijas procesu reģistratoriem. Šāda bloka izveide VRL mērķiem būtu nereāla kapitālieguldījumu un apjoma dēļ. Tieki izmantota reģistratoru esamība mūsdienu energosistēmās un RTU dalībā projektos, kas saistīti ar reģistrācijas sistēmu izveidi, kas sniedz iespēju ievākt un apkopot plašu avārijas procesu bibliotēku un veikt tās papildināšanu. Faktiski tiek piedāvāts laboratorijas sastāvā ievest visu energosistēmu, kurā

notiek avārijas procesi, veikt šo procesu reģistrāciju un glabāšanu. Šis priekšlikums ir praktiski realizējams tikai tāpēc, ka avārijas procesu reģistratori ir plaši lietojami energosistēmu ekspluatācijas prakse citu mērķu sasniegšanas nolūkos (relejaizsardzību darbības analīze, līniju bojājumu vietas noteikšana [2.1] un citi);

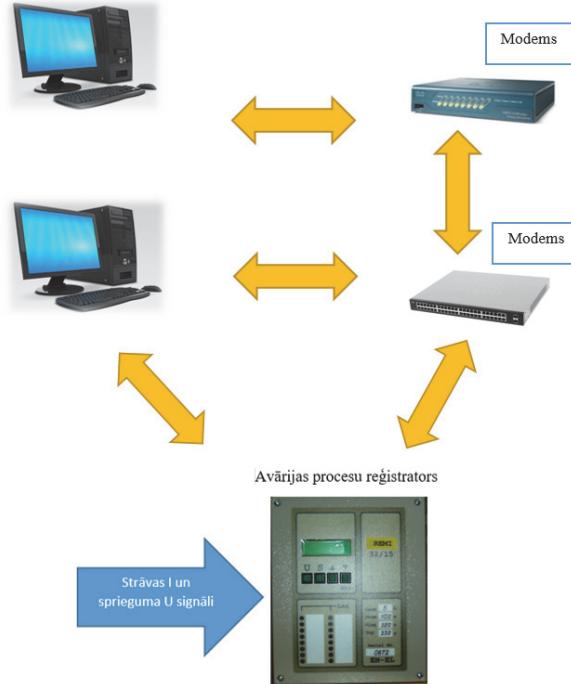
- automātikas iekārtu (mikroprocesoru izpildījumā) termināli, kuriem izvēlēta struktūra (kontrolējamo procesu un izejas signālu skaits, atmiņas apjoms, ātrdarbīgums), kas ļauj veidot vissarežģītākās un mūsdienīgākās automātikas sistēmas, ieskaitot globāla tipa [1.14] relejaizsardzību un automātiku. Automātikas prototipa ieviešana laboratorijas sastāvā ir iespējama, pateicoties mikroprocesoru tehnikas īpašībām. Ir iespēja izveidot pietiekami universālu iekārtu plašam uzdevumu klāstam, kas ir tikai nedaudz dārgāka un sarežģītāka, salīdzinot ar specializētām iekārtām konkrētiem uzdevumu termināliem.

Gadsimta beigās strauji attīstījās mikroprocesoru avāriju reģistratori. Kopējais darbības princips ciparu oscilogrāfiem (reģistratoriem) ir ļoti vienkāršs: noteiktā laikā momentā reģistrējamo signālu vērtības tiek pārvērstas ciparu formā. Ciparu dati saglabājas elektroniskā atmiņā un var būt pārsūtīti citas aparatūras tālākai apstrādei. Mikroprocesoru avārijas reģistratoriem piemīt tehniskie rādītāji: precizitāte, pastāv iespēja ierakstīt pirmsavārijas režīmu, nav sarežģīta ekspluatācija, pietiekams drošums, kā arī iespēja oscilogrammu tālāk apstrādāt, attēlot oscilogrammu grafika veidā, iespēja aprēķināt jaudas, leņķus, pretestības, frekvenci, strāvu un spriegumu vērtības, kā arī iespēja atpazīt avārijas situācijas.

Mikroprocesoru reģistrācijas sistēmas struktūra ir ievērojami sarežģītāka par iepriekš minētiem oscilogrāfiem. Ar mikroprocesoru reģistratoru izstrādi un ražošanu nodarbojas daudz enerģētikas virziena uzņēmumu. Baltijas valstīs tiek izmantoti vairāki simti mikroprocesoru reģistratoru „REMI”, kurus izstrādātāja ir RTU Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātes problēmu laboratorija [2.2].

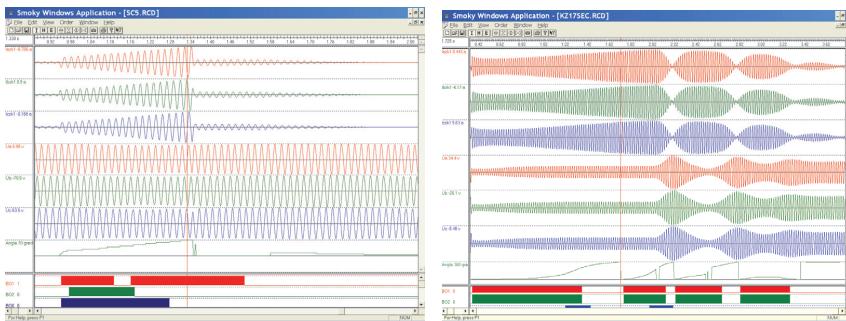
2.2. att. redzamais „REMI”, reģistrators caur modemiem ar vai bez interneta ir spējīgi nodot ierakstus operatora datoram.

Reģistrators APR ir paredzēts strāvu, spriegumu, relejaizsardzības un automātikas kontaktu stāvokļa pierakšanai kontrolējamā objektā avārijas un nenormālā tīkla darba režīmā. Reģistrators pārveido līdz 15 analogās ieejas signālu momentānās vērtības ciparu formā un iegūtos ciparu datus saglabā savā iekšējā atmiņā. Vienlaikus tiek pierakstīti 32 diskrēti signāli (ārējo ierīču kontaktu stāvoklis). Analogu un diskrētu signālu pārveidošana notiek ar 1000 Hz frekvenci. Pirmsavārijas gaidīšanas režīmā reģistratora atmiņā tiek saglabātas un nepārtraukti atjaunotas visu signālu vērtības, kā arī tiek pārbaudīti reģistratora palaišanas nosacījumi. Ja tiek fiksēti nosacījumi pēc jebkura no kontrolējamiem signāliem, atmiņā tiek saglabāta pirmsavārijas režīma informācija, fiksēts palaišanas laiks, iemesls un turpināts avārijas režīma pieraksts saskaņā ar izvēlēto oscilogrammas pieraksta ilgumu. Pabeidzot oscilogrammas pierakstu, reģistrators pāriet savienota gaidstāves režīmā. Gatavības laiks reģistratora atkārtotai palaišanai nepārsniedz piecas milisekundes. Oscilogrammas atspoguļošanai displejā un automatizētai apstrādei var tikt nodotas personālam datoram tieši vai ar tālruņu sakaru kanālu palīdzību (2.2. att.) [1.23].



2.2. att. Avārijas procesu reģistratora (APR) informācijas apmaiņas struktūra.

Izmantojot Latvijā, Lietuvā un Igaunijā uzstādīto reģistratorus (pateicoties Baltijas valstu energosistēmu releju dienestiem), ir apkopota avārijas procesu bibliotēka, kurā ir daudzi simti ierakstu ar dažāda veida darba režīmiem un procesiem energosistēmā. Daži piemēri attēloti 2.3. att. (1.23.).



2.3. att. Avārijas procesu oscilogrammu attēlošana, izmantojot programmu *SMOKY*.

Oscilogrammu attēlošanas programma „*SMOKY*” uz esošās oscilogrammas ļauj konstruēt papildu signālus, lai varētu efektīvi verificēt ierīces darbības algoritmus [2.3]. Svarīga opcija ir arī vektordiagrammas izveidošana pēc operatora pieprasījuma, ko var uzbūvēt jebkuram uzdotajam laika momentam. Svarīgi ir tas, ka jebkuru oscilogrammu var viegli pārvērst attiecīgos lielumos, piemēram, spriegumos un strāvās, un izmantot eksperimentiem ar reālām iekārtām.

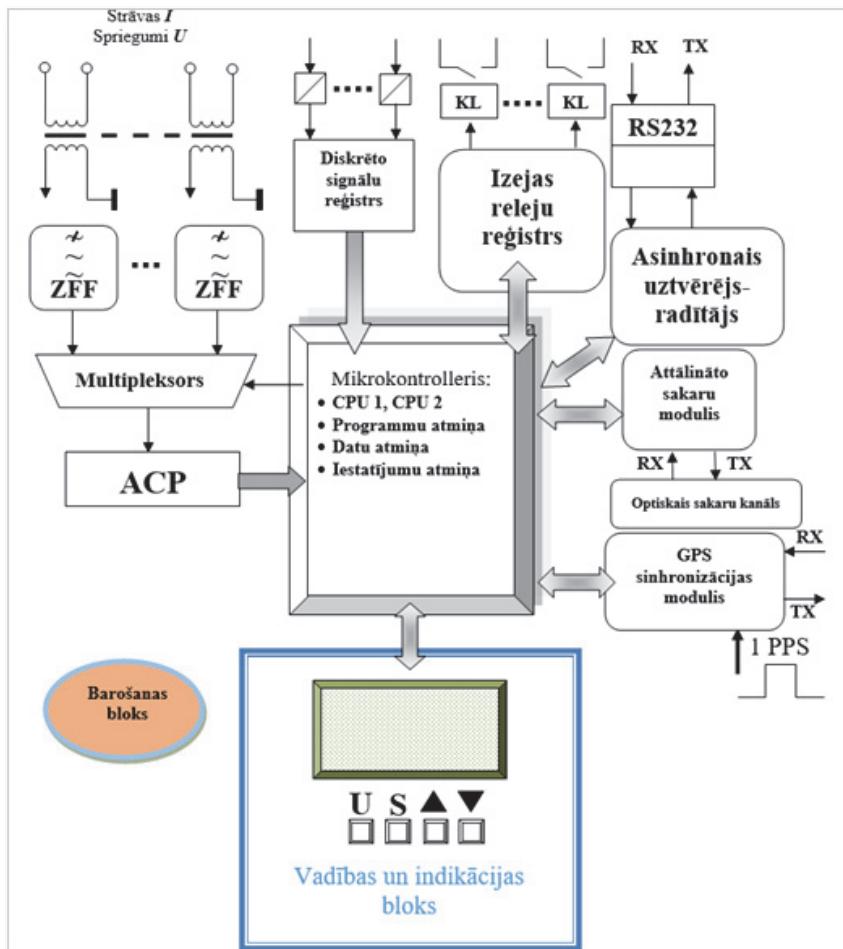
Vēidojot termināla prototipa struktūru un izvēloties mikroprocesoru elementus, jāņem vērā šādi galvenie faktori:

- kontrolējamo analogo (strāvas, spriegumi) un loģisko signālu skaits;
- izejas releju skaits;
- nepieciešamais atmiņas apjoms (programmu un datu glabāšanai);
- analogu-ciparu pārveidotāja (ACP) precizitāte un frekvence [2.4];
- datu apstrādes apjomi un nepieciešamais ātrums.

Nepieciešams paredzēt maksimālu izskatāmos uzdevumos sastopamu ieeju vai izeju skaitu, atmiņas apjomu un procesora jaudu un, iespējams, izveidot vienotu, derīgu struktūru visos gadījumos. Minētās struktūras vienkāršota shēma ir atspoguļota 2.4. att. Struktūras pamatā divi 16 bitu signālprocesori TMS 320 [2.5]. Svarīgi, ka procesori aprīkoti ar 64 kilo baiļu apjomu iekšējo programmu atmiņu, kas nodrošina sarežģito relejaizsardzības un automātikas kompleksu programmu ierakstu. Balstoties uz līniju aizsardzību un slēdžu vadības uzdevumu analīzes rezultātiem, paredzēti 16 izejas releji un 32 ieejas loģiskie signāli. Sakariem ar ārējām iekārtām paredzēti divi interfeisi: RS 232 nodrošina sakarus ar ārējo personālo datoru vai modemu, savukārt RS 422 paredzēts datu apmaiņai caur optiskiem šķiedru kanāliem, kas var būt izmantots, realizējot, piemēram, līniju garendiferenciālās aizsardzības (GDA). Operatīvu datu glabāšana notiek 1024 kilo baiļu apjoma atmiņā ar iebūvēto akumulatoru, kas nodrošina informācijas saglabāšanu pat ilgstošu operatīvas barošanas avota bojājumu gadījumos. Izmantojamās atmiņas apjoms nodrošina dažu minušu garu avārijas procesu ierakstu glabāšanu. Informācijas atspoguļošanai izmantots šķidro kristālu četru rindu indikators, kas ļauj ģenerēt ūsus paziņojumus un paskaidrojumus, vadības pultīj ir tikai četras pogas, un tas ļauj iestatījumu ierakstu un caurskatī gadījumos, kad netiek izmantots ārējais dators. Signāli tiek filtrēti 50 Hz frekvencei, izmantojot zemfrekvences filtras (ZFF), skat. 2.4. att. Indikācijas un vadības bloks nodrošina informācijas apmaiņu ar ārējo datoru. Izmantojot šo iespēju, var realizēt termināla virtuālās pārbaudes. Divu procesoru esamība un paredzētās iespējas informācijas apmaiņai viegli izmantojamas pašpārbaudes realizācijai. Ja viens no procesoriem tiek bojāts, klūdās aprēķinos vai nav spējīgs sazināties ar otru procesoru, veselais procesors spēj dot signālu par bojājumu. Lai ģenerētu trauksmi abu procesoru bojājuma gadījumā, termināla struktūrā paredzēta izpilda „sarga” funkciju mikroshēma „watch dog” [2.12].

Automātikas termināla prototipa bāzes programmnodrošinājums ir izstrādāts, nēmot vērā, iepriekšējā apakšnodaļā aprakstīto, aparātrealizāciju, un tam ir šādas apakšprogrammas:

- ACP procesu vadība;
- ciparu filtri;
- elektrisko lielumu novērtēšana. Tieki aprēķinātas aktīvas un reaktīvas pretestības, jaudas, leņķi, vektoru moduli, vektoru lineārās kombinācijas;
- programmnodrošinājuma izpildes pareizības bloks;
- programmnodrošinājuma atmiņas darbotiespējas kontroles bloks;
- terminālu darbības kontrolei, analīzei un atspoguļošanai pielāgota RTU projektos izstrādāta programmatūra „SMOKY” [2.6].



2.4. att. Vienkāršota ierīces realizācijas struktūra.

Tā kā pārvades elektrolīniju relejaizsardzības un automātikas termināla realizācijā izmantots divprocesoru risinājums, parādās uzdevums programmu sadalei starp procesoriem. Izvēlētā programmu nodrošinājuma struktūra ir parādīta 2.5. att. Iekārtas funkcijas sadalītas šādi.

Pirmais procesors (CPU1) nodrošina šādas funkcijas:

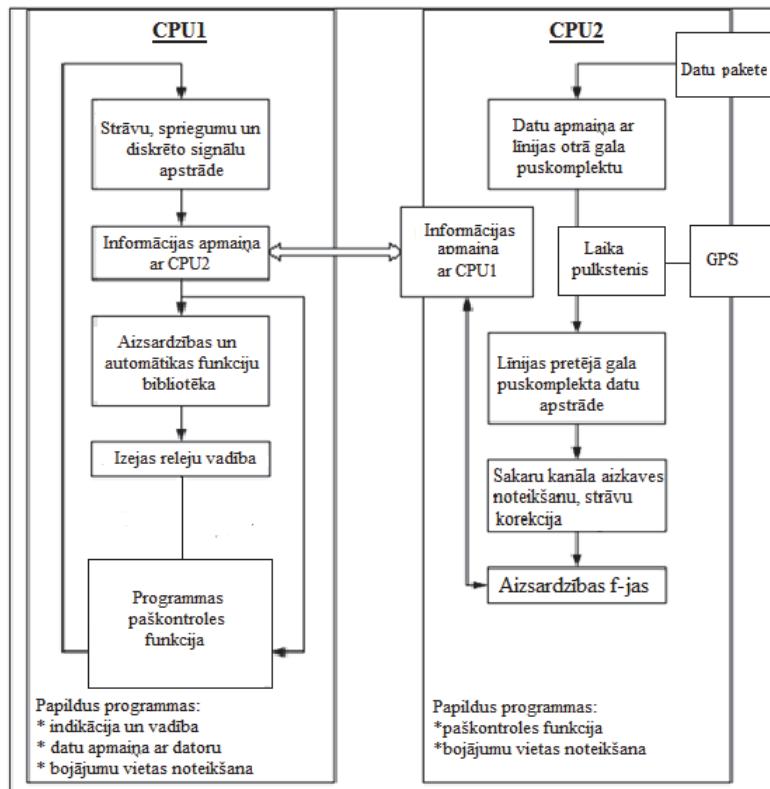
- ACP vadība, strāvas un spriegumu ieeju apstrāde un izejas releju vadība;
- aizsardzības un automātikas funkciju bibliotēka;
- notikumu reģistrācija;
- attāluma līdz bojājuma vietai noteikšana;
- indikāciju displeja vadība;
- iestatījumu ievades bloka vadība;
- oscilogrammu un iestatījumu nolasīšanas/ievades RS-232 interfeisa vadība.

Otrs procesors (CPU2) nodrošina šādas funkcijas:

- abu puskomplektu informācijas apmaiņas RS-422 interfeisa vadība;
- otra puskomplekta leņķiskās kļūdas, kas rodas datu pārraides laikā, korekcija;
- laika pulkstenis;

- GPS moduļa vadības programma;
- aizsardzības funkcija (AF).

Attēluma līdz bojājuma vietai noteikšana, izmantojot abu terminālu mērījumus. Informācijas apmaiņu starp abiem procesoriem nodrošina ātrdarbīga datu pārraides kopne. Abi procesori nodrošina paškontroles funkciju, kā arī veic viens otrs kontroli [2.7].



2.5. att. Programmas struktūra.

### 3. ENERGOSISTĒMAS ASINHRONĀ REŽĪMA NOVĒRŠANAS AUTOMĀTIKAS DARBĪBAS ANALĪZE UN JAUNU PAŅĒMIENU IZSTRĀDE

Energosistēmā, kuras sastāvā ir divi vai vairāk sinhronie ģeneratori, var izveidoties asinhronais režīms (AR) [3.1]. AR raksturo krasas izmaiņas režīma parametros (piemēram, strāva, spriegums), jo ģeneratora vai ģeneratoru kopas elektrodzinējspēka (EDS) leņķis sāk pārvietoties (paātrinās vai palēninās) attiecībā pret sistēmas un citu ģeneratoru leņķiem atkarībā no esošās jaudas bilances. Energosistēmās, kas atrodas normālajā statiskajā režīmā, tiek nodrošināta parametru uzturēšana tuvu nominālajiem parametriem. Normālos režīmos pastāv bilance starp ģenerētām un patēriņtām aktīvām un reaktīvām jaudām un spriegumu novirzes ir 5 % robežās, bet sistēmas frekvence lielās energosistēmās var mainīties pavisam šaurā diapazonā  $+/-0,02$  Hz [3.2].

Energosistēmas bojājumi, līniju atslēgšanas/ieslēgšanas, ģeneratoru atslēgšana vai lielas slodzes atslēgšana izraisa pēkšņas izmaiņas elektriskajā jaudā, bet ģeneratoru mehāniskā jauda (ūdens vai tvaika padeve turbīnām) paliek relatīvi konstanta. Tāda veida perturbācijas izraisa ģeneratoru rotora leņķa oscilācijas un rezultātā var novest pie bīstamām jaudas svārstībām. Atkarībā no perturbācijas rakstura un vadības iedarbību, energosistēmas režīms var palikt stabils un atgriezties līdzsvara stāvoklī, t.s. stabilās energosistēmas jaudas svārstības (*stable power swings*) [3.3].

Energosistēmas AR var klasificēt kā īpaši bīstamo gadījumu, jo sekas, kas iestājas energosistēmā, ir katastrofālas un saistītas ar milzīgiem ekonomiskiem zaudējumiem. Cenšoties izvairīties no šiem zaudējumiem, neskaitoties uz AR relatīvi mazo varbūtību, šī režīma novēršanai un negatīvo seku samazināšanai tiek lietota speciāla automātika *AGNA* [1.23].

Pasaulē ir izstrādāti un realizēti daži *AGNA* paņēmieni, piemēram, plaši tiek izmantoti distanitreļi [3.4], kas balstās uz pilnas pretestības vai leņķu izmaiņām kontroles principiem laikā.

Kaut gan AR iestāšanās varbūtība ir daudzas reizes mazāka, nekā vienfāzes īsslēgumu varbūtība, tomēr racionālā AR vadība ir ārkārtīgi svarīga. Tieki izvairīts mērķis nodrošināt kontrolējamu energosistēmas sadalīšanu un turpmāku vadību paliekošajās energosistēmas daļās, cenšoties sasniegt jaudas bilances un nominālās frekvences uzturēšanas pasākumus.

Šajā nodaļā ir veikta *AGNA* pārbaude un testēšana, lai realizētu izvairīto mērķi. Jāatzīmē, ka izvairītā mērķa sasniegšanai ir kritiska nozīme, lai varētu izvairīties no energosistēmas elementu kaskādes veida atslēgšanas (energosistēmas sabrukums).

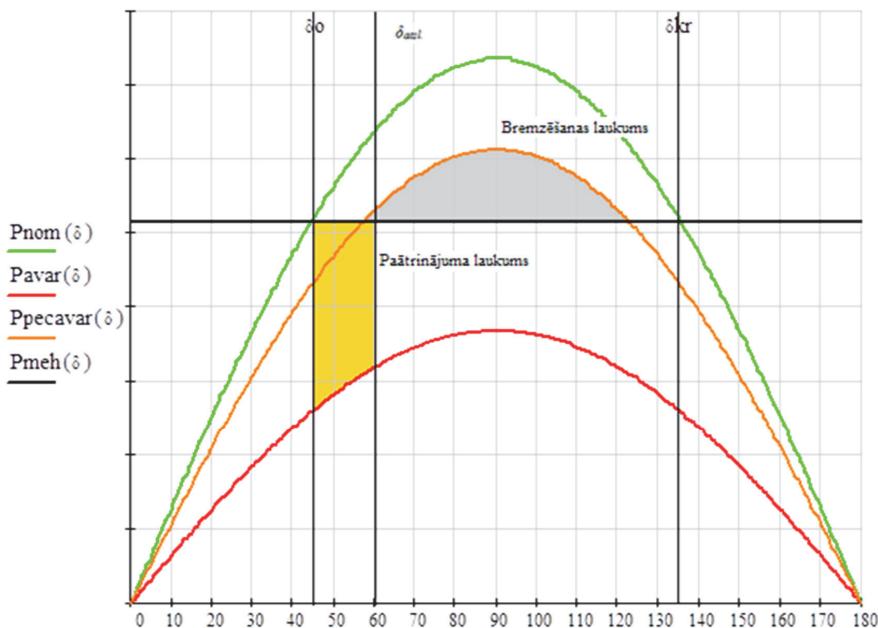
Asinhronā režīma novēršanas automātika (RNA) pamatuzdevumus var definēt šādi:

- fiksēt avārijas perturbāciju vai kontrolējamo parametru pārsniedzam pieļaujamās robežas;
- novērtēt perturbācijas smagumu un bīstamību;
- fiksēt pirmsavārijas stāvokli, režīma datus un shēmas parametrus;
- izvēlēties atbilstošas vadības iedarbības tipu, apjomu un vietu;
- realizēt vadības iedarbību pēc noteiktā algoritma un noteiktā laika intervālā.

Pamatprasības šādām ierīcēm ir selektivitāte, bloķēšana īsslēgumu režīmos, sprieguma leņķu pārrāvumu gadījumos un bezstrāvas pauzes laikā, t.i., ierīcēm droši jāidentificē AR, paliekot miera stāvoklī, cita veida bojājumu gadījumos. Ir zināms, ka tiešā leņķa mērīšana starp ekvivalentiem ģeneratoriem ir saistīta ar noteiktām problēmām [3.8]. Tāpēc tipveida RNA izmanto netiešus režīma parametrus, tādus kā: strāvas, spriegumus, pretestības, leņķi starp spriegumu un strāvu utt. [3.9].

Ir zināms risinājums, mērot sprieguma izmaiņu ātrumu šūpošanās centrā [3.12]. Šī paņēmiena trūkums ir saistīts arī ar laika aizturi. Ir zināma ierīce, kas nosaka AR iespējamību pēc izrēķinātā paātrinājuma un bremzēšanas laukuma salīdzinājuma [3.12]. Ja bremzēšanas laukums ir mazāks par paātrinājuma laukumu, ierīce nostrādā un atslēdz ģeneratoru no sistēmas. Šajā gadījumā lēmumu par bīstamās situācijas iestāšanos ierīce pieņem un atslēdz ģeneratoru tad, kad AR jau sāk attīstīties.

Stabilitātes novērtējumam vienkāršotos gadījumos ir zināma un plaši lietojama laukumu metode [3.14]. Šī metode ļauj aplūkot pārejas procesa enerģētiskas attiecības, nerisinot rotora kustību diferenciālvienādojumu. Tātad, kad energosistēma atrodas normālā režīmā (3.1. att.), turbīnas jauda  $P_{Meh}$  ir līdzsvarota ar ģeneratora elektrisko jaudu, kas nodrošina esošo slodzes pieprasījumu. Mehāniskās un elektriskās jaudas krustojās pie leņķa  $\delta_0$ , un šo punktu uzskata par stabili. Eksistē vēl viens „nosacīti stabils” punkts pie leņķa  $\delta_{kr}$ . Šajā punktā arī ir līdzsvars starp patērieto un ģenerēto jaudu, tomēr pat nenozīmīgas perturbācijas gadījumā tas tiek zaudēts, un energosistēmā pāriet AR [3.15].



3.1. att. Laukumu metodes režīmu raksturlīknēs  
(normālais, avārijas un pēcavārijas režīms).

Galvenie secinājumi, kas izriet no laukumu metodes, ir šādi: ja bremzēšanas laukums ir lielāks nekā paātrinājuma laukums, dinamiskais pārejas process būs stabils un sinhronisms tiks atjaunots pēc dažām leņķa svārstībām. Bet, ja paātrinājuma laukums ir lielāks nekā bremzēšanas laukums, rodas AR, kas var izraisīt sistēmas sabrukumu, ja tas savlaicīgi netiks pārtrauks.

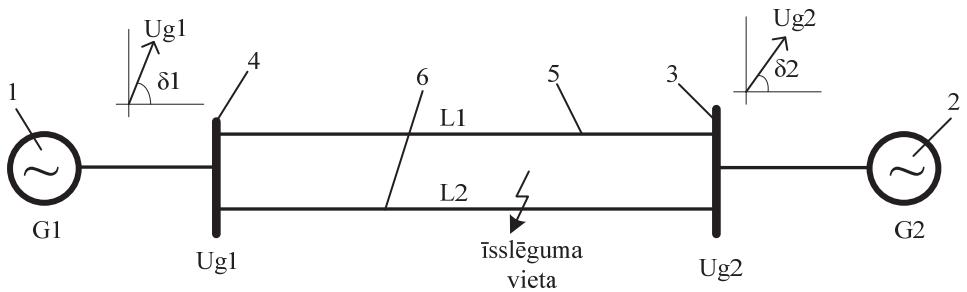
Tātad laukumu metodes lietošanas pamatā ir trīs etapi.

1. Normālais režīms, kad raksturlīknēs amplitūda ir normālā režīma maksimālās pārvadāmas jaudas robežās (3.1. att.).

2. Avārijas (īsslēguma) režīms, kad notiek bojājums vienā no elektriskās sistēmas elementiem. Jaudas pārvades nosacījumu krasī pasliktinās, kas izraisa raksturlīknēs amplitūdas samazināšanu (3.1. att.).

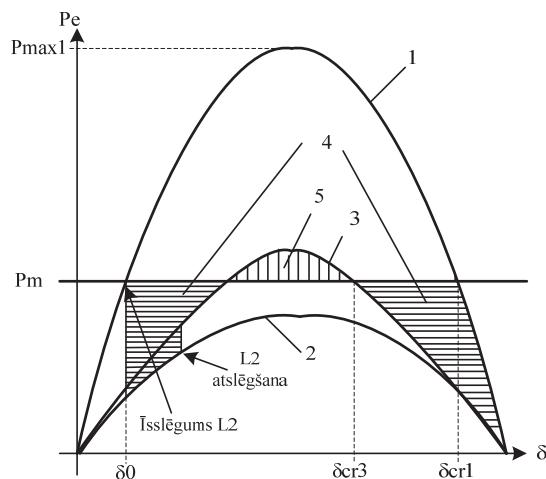
3. Pēcavārijas režīms, kas parasti ir smagāks par normālo, jo īsslēguma lokalizācijas rezultātā parasti tiek atslēgti viens vai daži elektriskās sistēmas elementi (līnija, transformatori u. c.). Rezultātā pārvadāmās jaudas robeža (amplitūda) būs starp normālo un avārijas raksturlīknī (3.1. att.) [3.16].

Ekvivalento laukumu metode ļauj atklāt AR rašanās momentu pirms leņķis starp ģeneratoriem sasniedz  $180^\circ$  vērtību [3.17]. Metodes darbības princips paskaidrots 3.2. un 3.3. att. Pirmsavārijas režīmā (normālais režīms) elektriskās jaudas plūsma starp diviem jaudu ģenerējošiem avotiem  $G1$  un  $G2$  notiek pa divām pārvades elektrolīnijām  $L1$  un  $L2$  (3.4. att.).



3.2. att. Energosistēmas pētāmā shēma:  
1, 2 – ekvivalenti ģeneratori; 3, 4 – ģeneratoru pieslēgšanas kopnes; 5, 6 – PEL.

Normālajam režīmam atbilst jaudas pārvades raksturlīkne nr. 1 (3.3. att.). Normālajā režīmā ģeneratora mehāniskā jauda  $P_m$ , kas pievadīta ģeneratora turbīnai, ir vienāda ar elektriskā tīkla patērieto jaudu  $P_e(t)$ , normālā režīmā leņķis ir  $\delta_0 = \delta_2 - \delta_1$  un ģeneratora rotors griežas ar nemainīgu ātrumu, kas ir tuvs elektriskā tīkla nominālās frekvences vērtībai. Pārvades elektrolīnijas  $L2$  īsslēguma režīmam (3.2. att.) atbilst raksturlīkne nr. 2 (3.3. att.). Līnijas  $L2$  īsslēguma rezultātā notiek ģeneratora rotora paātrinājums, jo ģeneratora mehāniskā jauda  $P_m$  pārsniedz elektriskā tīkla patērieto jaudu  $P_e(t)$  (3.3. att.). Aizsardzības nostrādes rezultātā notiek līnijas  $L2$  atslēgšana, un līnijas  $L2$  atslēgtam stāvoklim atbilst raksturlīkne nr. 3 (3.3.att.). Ģeneratora rotora bremzēšana notiek, kad elektriskā jauda  $P_e(t)$  pārsniedz ģeneratora mehānisko jaudu  $P_m$ . ELK metode ir balstīta uz ģeneratora rotora paātrinošās un bremzējošās enerģijas salīdzināšanu. Paātrinošajai energijai atbilst „paātrinājuma laukums”, un bremzējošajai energijai atbilst „bremzēšanas laukums” (3.3. att.). Saskaņā ar ELK metodi ģenerators zaudē sinhronismu ar elektrisko tīklu, jo, leņķim pārsniedzot  $\delta_{cr3}$  vērtību, “paātrinājuma laukums” ir lielāks par “bremzēšanas laukumu”.



3.3. att. Ģeneratoru jaudas – leņķu raksturlīknes:  
1 – normāla režīma raksturlīkne, 2 – īsslēguma režīma raksturlīkne; 3 – bojātas līnijas  $L2$  atslēgšanas režīma raksturlīkne, 4 – paātrinošās enerģijas laukums; 5 – bremzēšanas enerģijas laukums.

Asinhronā režīma novēršanas automātikas darbības paņēmiens, izmantojot ELK metodi, aprakstīts [3.18]. Šim darbības paņēmiens izrēķināta pilnā (bremzējošā un paātrinošā) ģeneratora energija  $A(\delta(t))$ , kā arī kritiskais leņķis  $\delta_{cr3}$  (3.3. att.) [3.18]:

$$A(\delta(t)) = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr3}} (P_e(t) - P_m) d\delta . \quad (4)$$

Pēc aplūkotā darbības principa ģeneratora sinhronisma zaudēšanas pārbaude saskaņā ar (5) notiek laika momentā, kad  $\delta(t) \geq \delta_{cr3}$ :

$$A(\delta(t)) = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr3}} (P_e(t) - P_m) d\delta < 0 . \quad (5)$$

Energosistēmu sinhronā režīma izjaukšanas analīze ir parādījusi, ka tās ievērojama daļa attiecas uz energosistēmām ar jaudas deficitu, kas galvenokārt ir saistīts ar šādiem iemesliem:

- vienas vai vairāku pārvades elektrolīniju atslēgšanas gadījumā elektroenerģija netiek pievadīta energosistēmai pietiekamā apjomā, lai uzturētu nominālo frekvenci un spriegumu;
- ģenerējošās jaudas trūkums, kas saistīts ar viena vai vairāku ģeneratoru atslēgšanos.

Efektīvākais risinājums ir mērīt leņķi  $\varphi$  un tā izmaiņu ātrumu  $d\varphi/dt$ . Šis princips ir izmantots asinhronas gaitas novēršanas automātikā – AGNA. Energosistēmā AGNA realizē 110–330 kV pārvades elektrolīniju procesu kontroli, slēžu vadību un ir apgādāts ar automātikas funkcijām. Aparatūra izveidota uz mikroprocesoru tehnikas elementu bāzes un informācijas apstrādei izmanto ciparu principus.

Lēmumu par AR iestāšanos var pieņemt, leņķim  $\varphi$  starp modelētiem spriegumiem nesasniedzot robežu tad, kad jau sākas ģeneratora rotora pagrieziens.

AGNA modelē spriegumus uz ģeneratora kopnēm, izmantojot lokālus režīma parametrus (līnijas strāvas un kopnes spriegumus), pēc formulām:

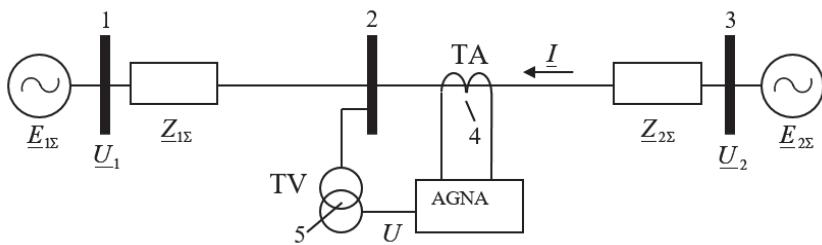
$$\underline{U}_1 = \underline{U} \pm \underline{I} Z_{K1} \quad (6)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{U} - \underline{I} Z_{K2} , \quad (7)$$

kur  $\underline{U}$  – fāzes spriegums iekārtas uzstādīšanas vietā;

$\underline{I}$  – fāzes strāva;

$Z_{K1}, Z_{K2}$  – kompensācijas pretestību iestatījumi.



3.4. att. AGNA pieslēgšana shēma:  
1, 2, 3 – kopnes; 4 – strāvmainis; 5 – spriegummainis.

No 6. un 7. formulas AGNA modelē spriegumus uz kopnēm kompleksa veidā, kas ļauj aprēķināt leņķi starp tiem. Modelējot leņķi  $\varphi$ , ir iespējams noteikt arī ātruma izmaiņas  $d\varphi/dt$  un to zīmi: pozitīvu vai negatīvu.

Uzmanība vērsta uz ARNA modelēšanas algoritmu uzlabošanu, palielinot ierīces izmantošanas potenciālu, nostrādes selektivitāti un precizitāti.

[3.21] paņēmiens darbojas ievērojami precīzāk nekā AGNA realizētais paņēmiens, tomēr katras ierīces izvēlētiem iestatījumiem ir būtiskā nozīme. Ir jāatzīmē, ka gadījumā, ja vienas ierīces iestatījumi ir izvēlēti nepareizi, tiek izraisīta kontrolējamā EDS leņķa novirze no reālas vērtības un var notikt kļūdainas nostrades. Iestatījumi izvēle klūst vienkāršāk, jo iespējamo konfigurāciju elektrostacijā var samērā vienkāršāk analizēt, vienlaikus tiek izslēgtas izmaiņas pārvades tīkla topoloģijā.

[3.21] patentā ierīces mērījumu un modelēšanas precizitāte ir atkarīga no stacijas esošā generatoru (kā arī transformatoru) skaita un tipa, to slēgumu shēmas, noslodzes pakāpes, ierīces konstantes utt. Sakarā ar to [3.21] ierīcē realizētais paņēmiens nenodrošina pietiekamu ierīces nostrādes precizitāti un selektivitāti, tāpat gadījumos, kad ģeneratori un to noslodze atšķiras vienas stacijas robežās.

Iekārta modelē  $i$ -to ģeneratoru EDS  $E_i$  no pirmās kopnes sprieguma  $U_{K1}$  un  $i$ -tā ģeneratora strāvas  $I_i$  reizinot ar atbilstošo pretestības iestatījumu  $Z_i$ . Iekārtai ir pievienots sakaru kanāls, izmantojot to, tiek saņemta informācija no otrās iekārtas par  $j$ -to ģeneratoru EDS  $E_j$ , kas modelēts no otrās kopnes sprieguma  $U_{K2}$ ,  $j$ -tā ģeneratora strāvas  $I_j$  reizinātu

ar atbilstošo pretestības iestatījumu  $Z_j$ , kas tiek padoti no otrā iekārtas (indeksi  $i$  un  $j$  atbilst pirmās un otrās ARNA iekārtu datiem). Mērījumu laiku sinhronizē, izmantojot GPS pavadoņu impulsus. Viena no galvenajām aplūkotā paņēmienu priekšrocībām ir paaugstināta mērījumu un modelēšanas precizitāte, jo netiek ieviesta kļūda, kas rodas, ekvivalentējot ģeneratorus ar atšķirīgiem tipiem, ierīces konstantēm un neviem mērīgo noslodzi. Mērījumi tiek veikti zaros „ģenerators-kopne”. Sākumā jāaplūko četru ģeneratoru gadījums, un pēc tam vērst uzmanību vispārinātam gadījumam ar  $N$  ģeneratoriem. 3.5. att. ir parādīts realizācijas piemērs ar četriem ģeneratoriem. Tātad ARNA iekārtas ir pieslēgtas kopnēm, kurām ir pieslēgti tīkla elementi (piemēram, transformatori, kompensācijas iekārtas, slodze u. c. ierīces).

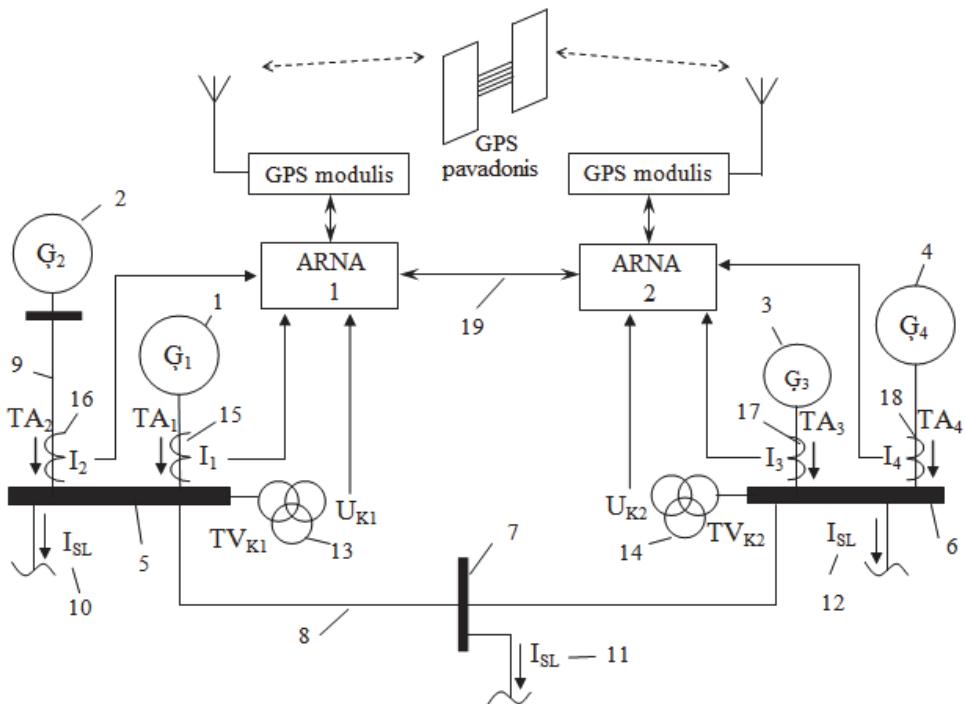
Ģeneratoru EDS aprēķina pēc formulām:

$$E_i = U_{K1} + I_i Z_i, \quad i = 1, 2 \quad (8)$$

$$E_j = U_{K2} + I_j Z_j, \quad j = 3, 4, \quad (9)$$

kur  $I_1, I_2, I_3, I_4$  – ģeneratoru strāvas;  
 $E_1, E_2, E_3, E_4$  – ģeneratoru EDS;  
 $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  – zaru ģenerators-kopne pretestības;  
 $U_{K1}, U_{K2}$  – ARNA pieslēgšanas kopes spriegumi.

Asinhronā režīma novēršanas iekārtas kontrolē leņķus  $\delta_{ij}$  starp ģeneratoru EDS vektoriem un to izmaiņu ātrumu  $d\delta_{ij}/dt$ . Lai paaugstinātu šīs operācijas precizitāti, ierīcei ir summators, kas modelē  $i$ -to ģeneratoru EDS  $E_i$  no pirmās kopnes sprieguma  $U_{K1}$  un  $i$ -to ģeneratoru strāvām  $I_i$ , reizinātām ar atbilstošiem pretestību iestatījumiem  $Z_i$ . Šī summatora izeja ir pieslēgta pie pirmās procesora ieejas, pie tā otras ieejas pieslēgts sakaru kanāls, kas nodrošina  $j$ -to ģeneratoru EDS  $E_j$  (tieki modelēti no otrās kopnes sprieguma  $U_{K2}$  un  $j$ -to ģeneratoru strāvām  $I_j$  reizinātam ar atbilstošiem pretestību iestatījumiem  $Z_j$ ) pārsūtīšanu.



3.5. att. ARNA realizācijas paņēmiens [3.22]:

1, 2, 3, 4 – dažāda tipa un jaudas ģeneratori; 5, 6 – terminālu pieslēgšanas kopnes ar jaudas patēriņu; 7 – starpkopne (starppakšstacija), kur ir jaudas patēriņš; 8, 9 – tīkla līnijas; 10, 11, 12 – jaudas patēriņa strāvas; 13, 14 – spriegummaiņi; 15, 16, 17, 18 – strāvmaiņi; 19 – sakaru kanāls.

Jāatzīmē arī tas, ka  $i$ -to ģeneratoru EDS  $E_i$  tiek pārsūtīti otrajai aizsardzības iekārtai pilnīgi identiski.

Atgriežoties pie EDS vektoriem, ir skaidrs, ka starp četriem EDS vektoriem ir kopumā seši atšķirīgi leņķi. Kontrolējot katru leņķi starp vektoriem, ir piedāvāts kontrolēt maksimālo leņķi  $\delta_{\max k}$  starp esošiem EDS.

Protams, datu diskretizācijas pakāpei jābūt pietiekamai, lai varētu novērot energosistēmas straujas režima izmaiņas, t. i., ātrumu  $d\dot{\theta}_i / dt$  vērtības un EDS vektoru pagrieziena virzienus.

Lenķa  $\delta_{mxk}$  izmaiņas ir saistītās gan ar normāliem pārejas procesiem (lēnas leņķa izmaiņas), gan ar avārijas pārejas procesiem (ātra režima parametru izmaiņas, piemēram, īsslēgumu vai/un citu spēcīgo perturbāciju dēļ). Sakarā ar to datu atjaunošanas laika intervālam jābūt pietiekamam, lai ierīce vārētu precīzi un selektīvi nostrādāt. Vispārinātam gadījumam, t. i.,  $N$  ģeneratoru gadījums (3.5. att.) var pierakstīt šādas formulas:

$$\underline{E}_i = \underline{U}_{K1} + \underline{L}_i Z_i \quad (10)$$

$$\underline{E}_j = \underline{U}_{K2} + \underline{L}_j Z_j, \quad (11)$$

kur  $i$  – ar iekārtas vienu kontrolējamo ģeneratoru skaits;

$j$  – ar iekārtas diviem kontrolējamo ģeneratoru skaits;

$N$  – kopējais kontrolējamo ģeneratoru skaits ( $N = i + j$ ).

GPS modulis uztver informāciju no zemes pavadoņiem, raida sinhronizācijas impulsu un precīzē mēriju laiku. Abas aizsardzības iekārtas veic kontrolējamo lielumu (strāvu un spriegumu) nepārtraukto apstrādi, un GPS moduļa sinhronizācijas impulsa pienākšanas momentā notiek mēriju laika nepieciešamās korekcijas. GPS modulis nosūta sinhronizācijas impulsu ik pēc 1 sekundes, tāpēc, ja informācijas pārraides aizture no viena termināla uz otru nepārsniedz 1 s, minētā laika aizture neiespēido aizsardzības darbību.

Piedāvāto risinājumu verifikācija tika veikta Dr. sc. ing. Dmitrija Antonova promocijas darbā un rakstos [2.6].

Šajā apakšnodalā tiek apskatīts AGNA algoritms, ko var realizēt bez sakaru kanālu izmantošanas. Tieka ņemta vērā papildu informācija par vektoru  $E_1$  un  $E_2$  īpatnībām, proti, minēto vektoru modulis realitātē energosistēmā mainās šaurās robežās un ir paredzams ar relatīvi augsto precīzitāti. Šis pieņēmums ļauj atgriezties pie vienādojumiem (10), (11) un tos pārrakstīt:

$$\begin{aligned} |\underline{U} + Z_1 \underline{L}_1| &= const = |\underline{E}_C| \\ |\underline{U} + Z_2 \underline{L}_2| &= const = |\underline{E}_C| \end{aligned} \quad (12)$$

un aplūkot tikai  $Z_1$  novērtēšanas uzdevumu:

$$(U_{1a} + r_1 I_{1a} - x_1 I_{1r})^2 + (U_{1r} + r_1 I_{1r} + x_1 I_{1a})^2 = |E_C|^2 \quad (13)$$

Vienādojums (13) satur divus nezināmos lielumus ( $r_1$  un  $x_1$ ) un nevar būt tieši atrisināts. Bet var ņemt vērā, ka augsts prieguma tīklā aktīva pretestība tiecas uz nulli, kas ļauj, izmantojot (13) un (14) formulu, aprēķināt  $x_1$  un  $x_2$ .

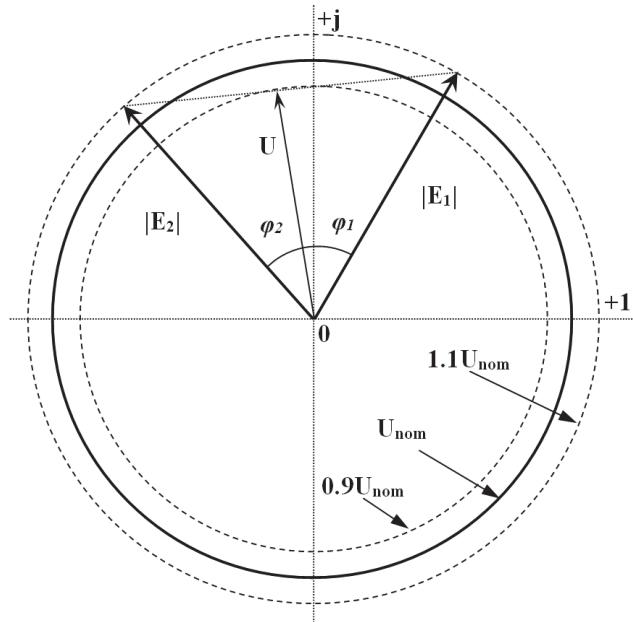
(13) vienādojums ir kvadrātvienādojums un var rasties sarežģījumi mikroprocesoru realizācijā. Minētās grūtības var atrisināt algoritms, kas aprakstīts kā formulas pamats (12), izmantojot vienkāršo transponēšanu:

$$\begin{aligned} \|U + ZI\|_{r \rightarrow 0} &= |U + jX_I| = |U_A + jU_R + jXI_A + j^2XI_R| = \\ &= |(U_A - XI_R) + j(U_R + XI_A)| = (U_A - XI_R)^2 + j^2(U_R + XI_A)^2 \end{aligned} \quad (14)$$

Aprēķinām vienādojuma kreiso pusī, izmantojot tikai aritmētiskās darbības. Mainīgie  $x_1$  (vai  $x_2$ ) var būt novērtēti, izmantojot vienu kvadrātisko vienādojumu risinājumu metodi.

Rezultātā ir skaidrs, ka veicot lokālus mērījums, t. i., kontrolējot strāvu un spriegumu aizsardzības instalācijas vietā, var aprēķināt reaktīvas pretestības iestatījumus EDS ekvivalento ģeneratoru modelēšanai, pieņemot, ka EDS modulis ir konstants.

Piedāvātā paņēmienā būtība ir paskaidrota ar vektoru diagrammu, kas parādīta 3.6. att. Šajā diagrammā kompleksajā plaknē ir attēloti ģeneratoru EDS vektori ar garumu, kas vienādi ar  $1,1 U_{nom}$ . Šo vektoru konstruēšanai ir izmantoti sprieguma un strāvas mērījumi, t. i., sprieguma vektors tiek summēts ar strāvas vektoriem, reizinātiem ar aprēķinātiem iestatījumiem. Krustojuma punkti ar  $1,1 U_{nom}$  ir ekvivalento ģeneratoru EDS vektori.



3.6. att. Sprieguma un ģeneratoru EDS vektoru diagramma kompleksajā plaknē.

Uzskatāmi parādīts, ka, veicot strāvas un sprieguma mērījumus, var novērtēt nezināmās pretestības un aprēķināt EDS vektorus.

Aprakstīto algoritmu var izmantot vietās, kur nav iespēju izveidot pietiekami drošus sakaru kanālus.

Laukumu metodes darbības paņēmienā trūkums paskaidrots 3.7. attēlā. Parādīts, ka, lai gan laika momentā  $\delta(t) \geq \delta_{cr3}$  ģeneratora kopējā energija negatīva  $A(\delta(t)) < 0$ , pastāv iespēja, ka līnijas  $L_2$  sekmīgas AAI rezultātā parādās papildu bremzēšanas laukums, tāpēc izpildās nosacījums  $A(\delta(t)) > 0$  un līdz ar to ģeneratora atgriežas sinhronajā darbības režīmā. Ir iespējams, ka dažādu elektriskā tīkla konfigurācijas izmaiņu gadījumā prototipa darbības

paņēmiens var nekorekti atpazīt AR rašanās momentu, kas var izraisīt lieku aizsardzības nostrādi.

Lai novērstu šo trūkumu, tiek piedāvāts paņēmiens, kas ņem vērā ne tikai reālajā laikā izskaitloto pilno energiju  $A(\delta(t))$ , bet arī teorētiski iespējamo bremzēšanas energiju  $B(\delta(t))$ , kas var parādīties elektriskā tīkla elementu pārslēgšanas dēļ [3.24].

Piedāvāta paņēmienā darbības princips paskaidrots 3.7. att. Normālajā režīmā tiek izrēķināti šādi parametri:  $P_{\max 1} = \frac{P_e(t)}{\sin \delta_0}$ ,  $\delta_{cr1} = \pi - \delta_0$ ,  $P_m = P_e(t)$ ,

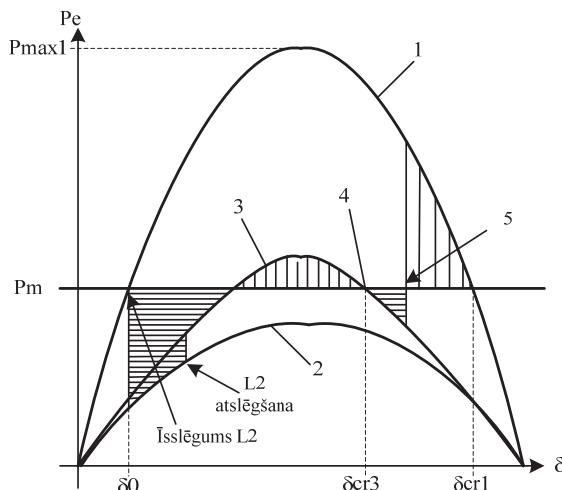
kā arī tiek kontrolēts palaišanas nosacījums:

$$\frac{dP_e(t)}{dt} > C_1, \quad (15)$$

kur  $C_1$  – palaišanas nosacījuma konstante.

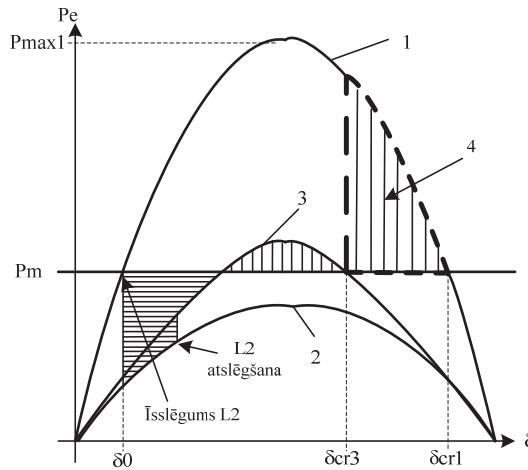
Īsslēguma rašanās momentā „Īsslēgums L2” sākas ģeneratora pilnās energijas  $A(\delta(t))$  aprēķināšana. Vienlaikus sākas teorētiski iespējamās bremzēšanas energijas  $B(\delta(t))$  izskaitlošana (16):

$$B(\delta(t)) = \int_{\delta(t)}^{\delta_{cr1}} (P_{\max 1} \sin \delta(t) - P_m) d\delta. \quad (16)$$



3.7. att. Generatoru jaudas – leņķu raksturlīknēs:

1 – normāla režīma raksturlīkne, 2 – īsslēguma režīma raksturlīkne; 3 – bojātas līnijas L2 atslēgšanas režīma raksturlīkne, 4 – nostrādes punkts paņēmienam; 5 – līnijas L2 AAI.



3.8. att. Piedāvātā paņēmienā teorētiski iespējamā bremzēšanas laukuma aprēķināšanas piemērs laika momentam  $\delta_{cr3}$ :

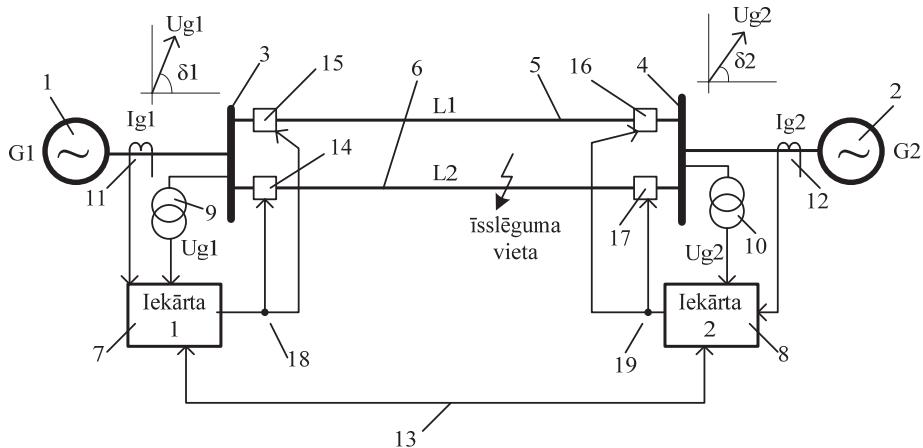
1 – normāla režīma raksturlikne, 2 – īsslēguma režīma raksturlikne; 3 – bojātas līnijas L2 atslēgšanas režīma raksturlikne, 4 – teorētiski iespējamais bremzēšanas laukums laikā momentam  $\delta_{cr3}$ .

$B(\delta(t))$  energijas laukums laika momentam  $\delta(t)=\delta_{cr3}$ . AR sākums tiek konstatēts tajā laika momentā, kad izpildās nosacījums (17). Nosacījuma (17) izpildīšanas momentā tiek padots signāls (releja nostrāde) energosistēmas dalīšanai:

$$A(\delta(t)) + B(\delta(t)) < 0 \quad (17)$$

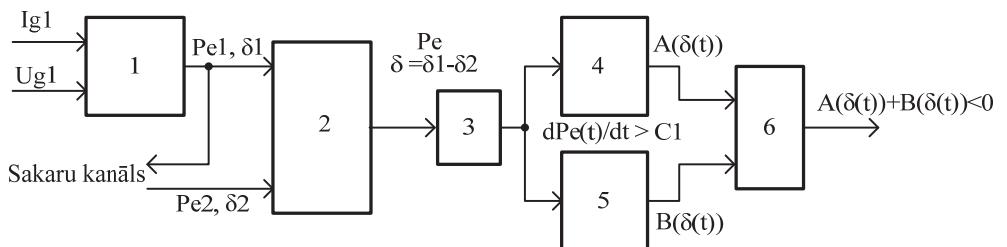
Aplūkosim paņēmienā realizācijas piemēru energosistēmas tīkla daļai, kas sastāv no diviem ģeneratoriem (1) un (2) un divām pārvades elektrolīnijām (5) un (6). Iekārta 1 (7) un 2 (8) kontrolē kopnes (3) un (4) spriegumus, izmantojot spriegummaiņus (9) un (10), un strāvas no ģeneratoriem (1) un (2), izmantojot strāvmaiņus (11) un (12). Balstoties uz šiem mēriņumiem, tiek izrēķināta ģeneratoru aktīva jauda un tiek pārbaudīti palaišanas nosacījumi (3). Īsslēguma gadījumā tiek veikta pilnās energijas (ģeneratora rotora pagrieziena paātrinošā un bremzējošā energija) un teorētiski iespējamās bremzēšanas energijas aprēķināšana un kontrole. Gadījumā, ja izpildās nostrādes nosacījumi, tad tiek padots impuls jaudas slēdžu (14, 15, 16, 17) atslēgšanai, lai atslēgtu līnijas L1 (5) un L2 (6) un pārtrauktu AR rašanos. Informācijas apmaiņai starp iekārtām 1 un 2 (7) un (8) tiek izmantots sakaru kanāls (13). Iekārtas padod vadības impulsu uz jaudas slēdžu vadības ierīcēm ar signāliem (18) un (19).

3.9. att. ir parādīta paņēmienā realizācijas principiālā shēma. Blokā (1) notiek ģeneratora aktīvās jaudas  $P_{e1}$  un ģeneratora sprieguma leņķa  $\delta_1$  aprēķināšana, izmantojot mēriņumus no mērmainīiem. Bloka (1) aprēķinātie lielumi tiek padoti otrā bloka pirmajā ieejā un aizsūtīti otrai iekārtai, izmantojot sakaru kanālu. Dati no 2. iekārtas ( $P_{e2}$ ,  $\delta_2$ ) tiek padoti bloka (2) otrajā ieejā. Blokā (2) tiek izrēķināta ģeneratoru spriegumu leņķu starpība. Bloks (3) nodrošina palaišanas nosacījumu izpildīšanās pārbaudi, t. i., ģeneratora jaudas izmaiņas ātrums  $dP_e(t)/dt$  pārsniedz noteikto iestatījumu  $C_1$ . Blokā (4) tiek izrēķināta ģeneratora  $A(\delta(t))$  – paātrinošā un bremzējošā energija. Blokā (5) tiek izrēķināta teorētiski iespējamā ģeneratora bremzējošā energija  $B(\delta(t))$ . Bloks (6) summē ģeneratora energiju  $A(\delta(t))$  un iespējamo ģeneratora energiju  $A(\delta(t))$  un iespējamo ģeneratora bremzējošo energiju  $B(\delta(t))$ , pārbaudot AR rašanās nosacījumu izpildīšanos, t. i.,  $A(\delta(t)) + B(\delta(t)) < 0$ .



3.9. att. Piedāvātā paņēmienas realizācijas piemērs:

1,2 – ģeneratori G1 G2; 3, 4 – ģeneratori pieslēgšanas kopnes; 5, 6 – pārvades elektroliņijas L1 un L2; 7, 8 – relejaizsardzības iekārtas 1 un 2; 9, 10 – spriegummaiņi, kas mēra spriegumu  $U_{g1}$  un  $U_{g2}$  uz ģeneratoru kopnēm; 11, 12 – strāvmaiņi, kas mēra strāvu  $I_{g1}$  no G1 un  $I_{g2}$  no G2; 13 – sakaru kanāls, kas savieno relejaizsardzības iekārtas; 15, 16, 17, 18 – jaudas slēdzi līnijām L1 un L2; 18, 19 – jaudas slēžu vadības signāli.



3.10. att. Relejaizsardzības mērījumu elementa darbības paņēmiens:

1 – ģeneratora aktīvās jaudas un ģeneratora sprieguma leņķa izskaitlošanas bloks; 2 – ģeneratoru spriegumu leņķu starpību aprēķināšanas bloks; 3 – palaišanu nosacījumu izpildīšanās pārbaudes bloks; 4 – bloks, kas izskaitlo ģeneratora paātrinošo un bremzējošo energiju A( $\delta(t)$ ); 5 – bloks, kas izskaitlo teorētiski iespējamo ģeneratora bremzējošo energiju B( $\delta(t)$ ); 6 – summatora un pārbaudes bloks, kas kontrolē AR rašanās nosacījumu izpildīšanos  $A(\delta(t)) + B(\delta(t)) < 0$ .

Tātad, ARNA vadības paņēmiens ir balstīts uz ekvivalento laukumu kritēriju un ir īpaši piemērots gadījumam, kad elektriskā tīkla pirmsavārijas konfigurācijā atjaunojas pārvades elektroliņijas sekmīgās AAI rezultātā. Paņēmienā realizācijā nēm vērā teorētiski iespējamo ģeneratora rotora bremzēšanas energiju, kas var papildus parādīties elektriskā tīkla konfigurācijas atjaunošanas dēļ [3.17, 3.18].

Nelabvēlīgs avārijas procesa attīstības rezultāts ir tad, kad viena elektrostacija (vai neliela grupa) atslēdzas no kopējās energosistēmas. Šajā gadījumā rodas ģenerācijas un patērētās elektroenerģijas nebalanss, kā rezultātā elektrostacija var atslēgties. Lai novērstu šādu problēmu, ļoti svarīgi ir novērst salas režīma rašanos pēc iespējas ātrāk. Minētais uzdevums ir analizēts tālāk kopsavilkumā.

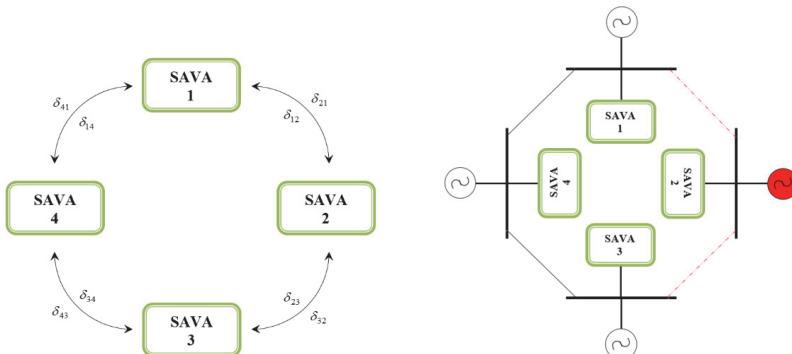
Sākumā šķiet, ka atpazīt salas ir vienkārši, nemot vērā pārvades elektrolīniju atdalītāju atrašanās vietās. Bet realitātē ir liels varbūtību kombināciju skaits ar iespējamām vietām, kur var rasties salas režīms. Minētais lēmums jārealizē ar centralizētu automātiku, kas savukārt rada ievērojamus sarežģījumus. Cenšoties izvairīties no centralizētas automātikas, tiek piedāvāta shēma, kuras pamatā ir vektoru vadība. 3.12. att. parādīta četru elektrostaciju energosistēma.

Svarīgi atzīmēt, ka elektrostaciju skaits var būt arī lielāks. Pieņemam, ka katra elektrostacija ir aprīkota ar leņķa mērījumu vienībām un tās ir gredzenveida saistītas ar ātrdarbīgajiem sakaru kanāliem (3.11. att.).

Kopumā varam secināt, ka jebkura elektrostacija, piemēram, Nr. 2 zaudē sinhronismu (3.12. att.). Šādā situācijā trīs ierīču grupā Nr. 1, Nr. 2, Nr. 3 ir iespēja noteikt izmaiņas leņķos. Šādu fenomenu var izmantot, sintezējot automātikas algoritmu.

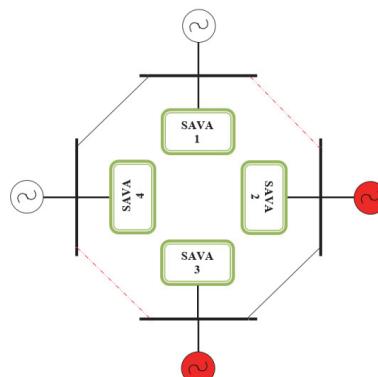
Pamats vienkāršajam algoritmam ir šāds:

- 1) trīs ierīces spēj atklāt neatļautu, aizliegtu  $\delta$  lielumu (vai novirzes no leņķa);
- 2) SAVA, kurai ir divas kaimiņierīces, kas nosaka avārijas režīmu neatļautiem leņķiem, var izmantot, lai noteiktu salu.



3.11. att. un 3.12. att. SAVA gredzenveida principa shēma; elektrostacija nr. 2 darbojas salas režīmā SAVA 2 un 4 ir izvietoti horizontāli.

Gadījumā, ja sala satur divas vai vairākas elektrostacijas, algoritms kļūst sarežģītāks, jo nepieciešams noteikt skaitu divām avārijas noteikšanas ierīču grupām un eksponēt visus SAVA numurus, kas ir zonā starp abām grupām (3.13. att.).

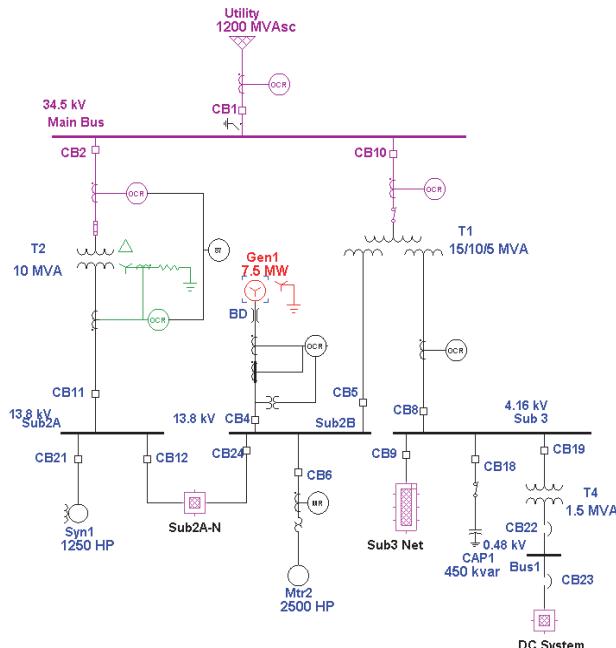


3.13. att. Elektrostaciju (2–3) un (1–4) grupas salas režīmā SAVA 2 un 4 ir izvietotas horizontāli

Var secināt, ka, lai energosistēmā nodrošinātu drošumu, ARNA jāīsteno kopā ar ELK laika metodi. Šis princips pieļauj ātri noteikt AR sākuma momentu, un tajā pašā laikā leņķa kontroles metode atklāj stāvokli, kad ģeneratori pāriet AR. Apvienotais aizsardzības ELK laika un leņķa vadības algoritms tika uzlabots un pārbaudīts. Aizsardzības sistēmas struktūra ir aprakstīta [1.14], ko var izmantot, ja abas metodes tiek īstenotas vienlaikus [3.38].

Veicot pētījumus ARNA jomā, tika identificēti daži gadījumi, kad ģeneratori, pārsniedzot 180 grādu leņķi attiecībā pret sistēmas bilances kopni, atgriezās stabila stāvoklī. Veicot iegūto rezultātu analīzi, izdevās konstatēt, ka ģeneratora stabilitāte tika nodrošināta, pateicoties laukumu metodes kritērija izpildei, t. i., paātrinājuma laukums bija mazāks nekā bremzēšanas laukums.

Aplūkosim piemēru. Lai veiktu šo pētījumu, no *ETAP* bibliotēkas piemēriem tika nēmta samērā vienkārša sistēma, kas satur vienu ģeneratoru, dažāda tipa slodzi un sistēmas kopni.



3.14. att. Energosistēmas shēmas struktūra.

Modelēts trīsfāžu īsslēgums uz galvenās kopnes un tā ilgums (no 0,1 s līdz 0,2 s). Dati no *ETAP* programmatūras tik eksportēti *MathCAD* programmatūrā [3.39].

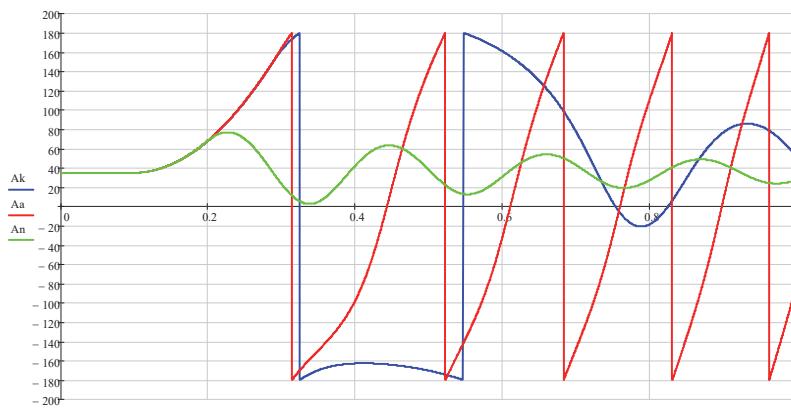
Sākumā tika modelēts īsslēgums, kas nedraudēja ģeneratoru stabilitātei (3.14. att.), t. i., paātrinājuma laukums bija mazāks nekā bremzēšanas laukums. Nākamais scenārijs skar gadījumu, kad ģeneratori zaudē stabilitāti, elektriskās jaudas svārstības nerimst, kā pirmajā gadījumā.

Veicot vēl dažu scenāriju modelēšanu, tika identificēts robežgadījums, kad ģeneratora stabilitāte vēl saglabājas. Šim gadījumam īsslēguma laikā leņķis pāriet 180 grādus, bet pēc īsslēguma atslēgšanās sāk norimt un nostabilizējās (3.15. att.).

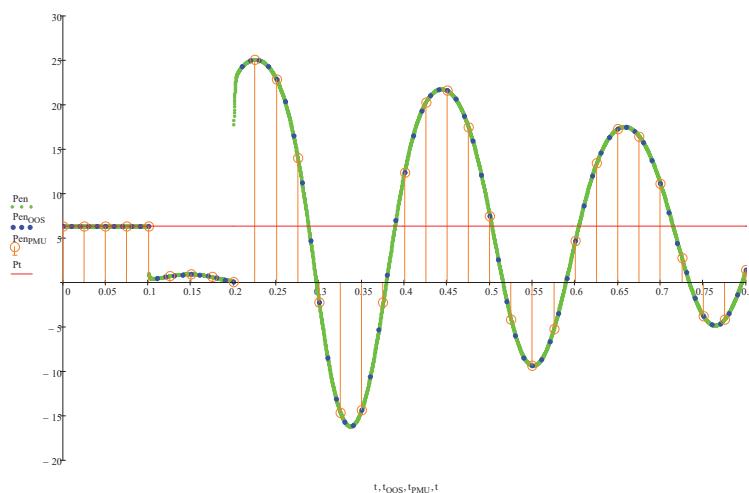
3.15. att. ir apkopoti trīs modelēšanas gadījumi: stabils gadījums, kad leņķu starpība nepārsniedza 180 grādu; nestabils gadījums AR, kad leņķu starpība pārsniedza 180 grādu un ģeneratori sāka veikt apgriezienus attiecībā uz sistēmas kopni; stabils robežgadījums, kad ģeneratora svārstības sāka rīmt, neskaitoties uz to, ka leņķis pārsniedza 180 grādu. Rezultātā

var secināt, ka paradās režīmu kopa, kad iespējama ģeneratoru stabilitātes atjaunošana pat tad, ja tā leņķis pārsniedz 180 grādu robežu.

Tomēr ir jāsaprot, ka katrā ierīce realizētais algoritms var būtiski atšķirties. Aplūkosim piemēru šiem trim gadījumiem, izmantojot teorētiskus datus, kas iegūti no *ETAP* programmatūras, un paraugus ARNA un *PMU* (*Phasor Measurement Unit*) iekārtai (3.16.–3.17. att.). Galvenā atšķirība starp teorētiskiem datiem un iekārtu datiem ir paraugu skaits viena laika intervalā, t. i., 1 s laikā 10 000 paraugu *ETAP* datiem, 100 paraugu ARNA iekārtai un 40 paraugu *PMU*.



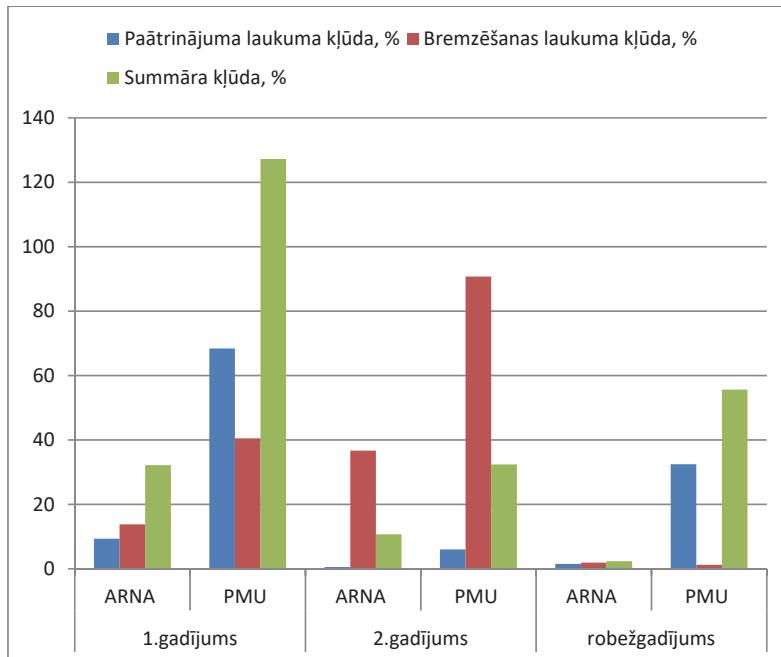
3.15. att. Ģeneratora leņķu izmaiņa laikā:  
zaļš – 1. gadījums,  $A_n$  (stabilis); sarkans – 2. gadījums,  $A_a$  (nestabilis, asinhronais režīms);  
zils – 3. gadījums,  $A_k$  (stabilis, robežgadījums).



3.16. att. Tehnisko un praktisko problēmu iespējamība 1. gadījumam:  
zaļš – *ETAP* modelēšanas dati ( $P_{ek}$ ) (teorētiski paraugi); zils – ARNA paraugi ( $P_{ekOOS}$ );  
oranžs – *PMU* paraugi ( $P_{ekPMU}$ ); sarkans – ġeneratora mehāniskā jauda ( $P_t$ , turbīnas jauda).

Lai aprēķinātu paātrinājuma un bremzēšanas laukumu vērtības un veiktu to salīdzināšanu, katram gadījumam tika izmantota trapeces metode paātrinājuma un bremzēšanas laukumu aprēķināšanai.

Veikto aprēķinu vizualizācija ir paradīta 3.17. att., kurā var redzēt novirzes no *ETAP* datiem katram gadījumam un iekārtai.



3.17. att. Laukumu aprēķināšanas precizitāte ARNA un *PMU* iekārtām.

Rezultātā var redzēt, ka starpība starp *ETAP* un AGNA datiem nepārsniedz 0,02 vērtību, kā arī laukumu aprēķināšanas kļūda nepārsniedz 3 % vērtību. Tas liecina, ka ir iespējams realizēt jauno ARNA vadības paņēmienu uz AGNA bāzes.

#### 4. VIRTUĀLI-REĀLĀS LABORATORIJAS IZMANTOŠANA ENERGOSISTĒMAS AUTOMĀTIKAS DARBĪBAS MODELĒŠANĀ UN ALGORITMU NOVĒRTĒŠANĀ

Virtuāli-reālās laboratorijas izmantošana ARNA darbības modelēšanā tiek uzskatīta par vienu no perspektīvākajiem virzieniem.

Ierīces vienkāršots modelis pamatots ar sprieguma vektoru tiešu kontroli un sprieguma fāzes leņķa starpības  $\varphi$  aprēķināšanu. Programmatūra *EUROSTAG* [1.53–1.56] tika izmantota energosistēmas modelēšanai un asinhronā režīma simulēšanai. Asinhronais režīms tika modelēts, izmantojot trīs ģeneratoru un astoņu kopņu sistēmu, kā arī komplikētu *IEEE 39* kopņu energosistēmas shēmu.

Izmantojot *EUROSTAG* programmu [1.53–1.56], tika modelēti dažādi energosistēmas režīmi (īsslēgumi PEL, slodzes samazināšana, ģeneratora atteice, PEL zaudēšana un slodzes dažādas variācijas). Viens no veiktajiem testēšanas piemēriem aplūkots tālāk kopsavilkumā.

Energosistēmas datubāzē tika izvēlēts modelēšanas piemērs, balstoties uz *IEEE 39* kopņu sistēmu [4.2], lai veiktu asinhronā režīma modelēšanu un piedāvāto algoritmu pārbaudi.

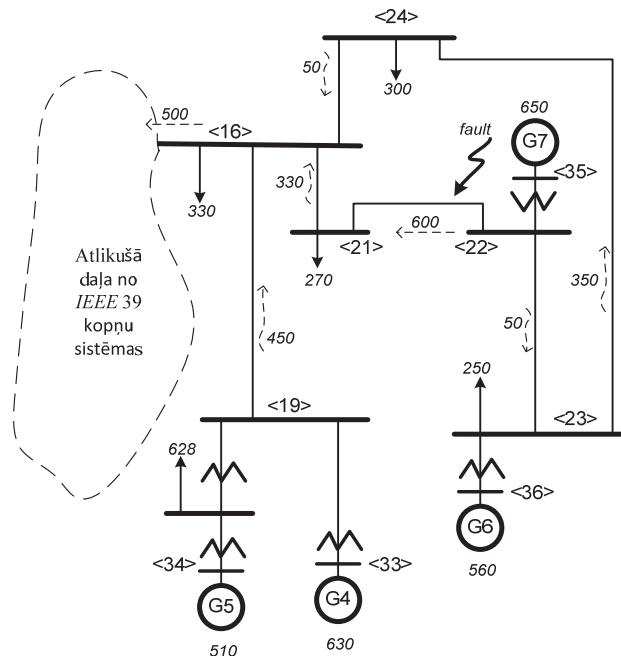
Modelis tika realizēts *EUROSTAG* programmēšanas vidē [1.53–1.56], izmantojot jaudas plūsmu un pārejas procesu analīzi [4.4].

Pārbaudes scenārijs paredzēts, lai veidotu notikumu gaitu, kas var ietekmēt energosistēmas stabilitāti (4.1. tab.). Pēc energosistēmas pārbaudes scenārija modeļa izmantošanas, tika analizēta energosistēmas uzvedība un secināts par tās stabilitāti. Detalizēts apskats IEEE 39-kopņu sistēmas daļai, kurai piemēroja testēšanas nosacījumus, attēlots 4.1. att. Slodzes, ģenerācija un jaudas plūsmas [MVA] stacionāram režīmam ir parādītas 4.1. attēlā [4.5, 4.6].

4.1. tabula

Modelēto notikumu scenārijs

Notiku ma laiks (s)	Notikums	Energosistēmas elements	Komentāri
0,00	Simulācijas sākums		
1,00	Izveidots 3-fāzu īsslēgums uz līnijas	Līnija „21–22” 22 % līnijas garuma beigām	
1,10	Jaudas slēdža atslēgšana 21-22-s	Līnijas „21–22” – sākums	Aizsardzības darbības modelēšana
1,30	Jaudas slēdža atslēgšana 21-22-b	Līnijas „21–22” beigas	Aizsardzības darbības modelēšana
1,30	Īsslēgums likvidēts	Līnija „21–22”	Pārejas procesa īsslēgums
2,5	Jaudas slēdža ieslēgšana 21-22-b	Līnijas „21–22” beigas	Automātiskās atkaliieslēgšanas (AAI) modelēšana
2,5	Jaudas slēdža ieslēgšana 21-22-s	Līnijas „21–22” – sākums	AAI modelēšana
60,0	Modelēšanas beigas		



4.1. att. Atlikusī daļa no IEEE 39 kopņu sistēmas testēšanas scenārijam.

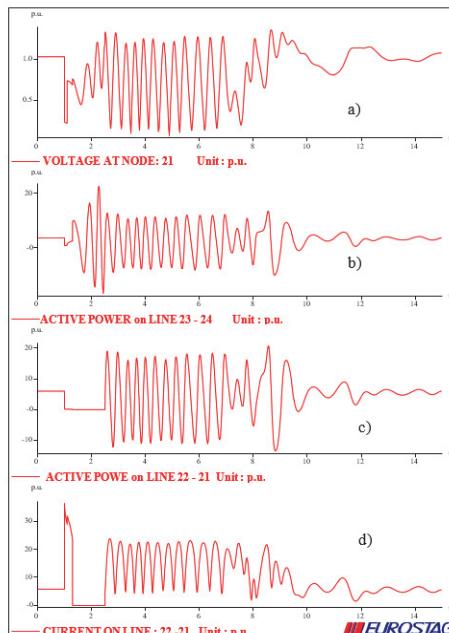
PEL aizsardzības ierīces darbība, kā arī AAI funkcionalitāte ir modelēta ar tās atslēgšanu/ieslēgšanu atbilstošajā zarā noteiktajā laikā.

Līdzīgs scenārijs tiek lietots divos pārbaudes gadījumos.

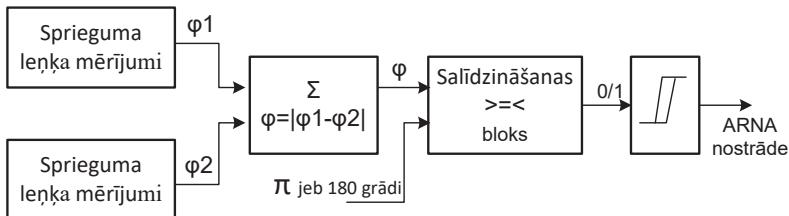
- Pirmais gadījums – energosistēmas modeļa dinamiskā uzvedība ir izpētīta bez ARNA.
- Otrs gadījums – atbilstošs ARNA modelis ir ietverts pārejas procesu modelēšanā un energosistēma tiek kontrolēta un vadīta ar ARNA palīdzību.

4.2. att. ir dotas raksturlīknes, kas attēlo energosistēmas pārejas procesus [4.7], kad energosistēmas testēšana notiek bez ARNA [4.8]. Analizējot minētās raksturlīknes, var secināt, ka:

- aktīvā jauda PEL „21–22” tika pārtraukta īsslēguma rezultātā (1,0 s) un jaudas svārstības parādās PEL „21–22” pēc veiksmīgas AAI nostrādes (2,5 s) 4.4. att. (c, d);
- kamēr PEL „21–22” bija atslēgta, notika aktīvās jaudas sadališanās, un rezultātā PEL „23–24” parādījās svārstības 4.2. att. (b);
- jaudas svārstības saglabājās apmēram līdz 10–11 s no sākotnējās perturbācijas (1,0 s), un tās tika klasificēta kā asinhronais režīms. Sākat no 12 s, svārstības samazinājās, un sistēma atgriezās normālā stāvoklī (pieļaujamā režīma robežās);
- ilgstošu jaudas svārstību gadījumā var notikt nopietni iekārtu bojājumi un nekontrolējamas slodzes/generācijas atslēgšanas (kopnes spriegums var pazemināties zem 0,2 no sprieguma nominālvērtības (4.2. att. (a));
- neskatoties uz to, ka energosistēma nonāk normālā režīmā pēc noteikta laika, sistēmas stāvoklis var tikt klasificēts kā nestabils, tādēļ jāveic pasākumi, lai izvairītos no asinhronā režīma energosistēmā [4.29].



4.2. att. Energosistēmas pārejas procesi pārbaudes scenārijā.



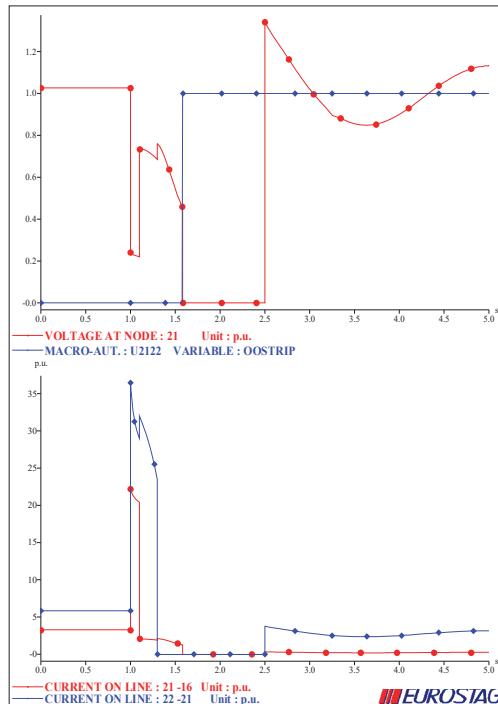
4.3. att. ARNA vienkāršots algoritms.

Modelēšanas procesā tika integrēti divi ARNA modelji. Pirmā ARNA „U21–22” kontrolē sprieguma leņķi starp  $<21>$  un  $<22>$  mezgliem un atslēdz „16–21” līniju, kad izpildās nostrādes nosacījumi. Otrā ARNA „U16–24” kontrolē sprieguma leņķus  $<23>$  un  $<24>$  minētos mezglos un atslēdz slēdžus pārvades elektrolīnijai „16–24”, kad nostrādes noteikumi ir izpildīti (4.3. att.). Energosistēmas sadalīšanai energosistēmas zari ar pārvades elektrolīnijām „16–21” un „16–24” ir izvēlēti. Pēc tās sadalīšanas jāmēģina sasniegt jaudas bilanci energosistēmas daļas (kopu  $<21>$  un  $<24>$  slodzēm jāpaliek kopā ar ģeneratoriem G6 un G7) [4.10].

RNA „U21–22” un „U16–24” darbību rezultāta energosistēma tika sadalīta divās daļās. Salas daļā bija G6 un G7 ģeneratori un slodzes uz kopnēm:  $<23>$ ,  $<21>$ ,  $<24>$ . 4.4. att. tika parādīti ARNA darbību modeļi „U21–22” un „U16–24”. Nostrādes signāls tika padots, kad leņķi starpība „DLTANGLE” pārsniedz  $\pi$  rad (jeb  $180^\circ$ ) (4.4. att.). Energosistēmas pārvades elektrolīnija „16–21” būs atslēgta, kad tiks saņemts nostrādes signāls no „U21–22” releja. Analogi zars „16–24” būs atslēgts, kad tiks saņemts nostrādes signāls no „U16–24” releja. Var redzēt, ka pēc zaru atslēgšanās (1,58 s) un energosistēmas sadalīšanās, ģeneratori stabilizējas, vienlaikus atjaunojot stabilitāti energosistēmā [4.11]. Tātad izveidojas sala, kuras sastāvā ir ģeneratori G6 un G7 kopā ar slodzēm uz kopnēm 21, 23, 24.

Tātad, energosistēmas daļas, kurās īsslēguma dēļ sinhronais režīms tika zaudēts, tika atdalītas viena no otras ar ARNA darbību. Pateicoties šai darbībai, energosistēma tika pasargāta no asinhronā režīma rašanās. Energosistēmas sadalīšana tika veikta optimālajā vietā, kas nodrošināja ģenerācijas-slodzes bilanci abās daļās pieņemamā laikā. Vienkāršotais ARNA modelis precīzi nosaka asinhronā režīma rašanās apstāklus.

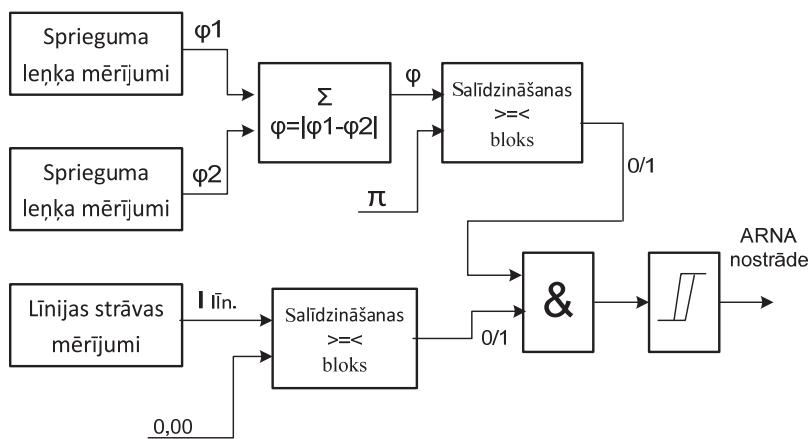
Pārejas simulācijas notikumu sarakstā asinhronā režīma novēršanas automāts „U21–22”, kas kontrolē spriegumus mezglos  $<21>$ ,  $<22>$ , jābloķē, lai pārvades elektrolīnijai „16–21” 1,5828 s laikā netiku atslēgta, jo slodze mezglā  $<21>$  nodrošināta no ģeneratora nodalītās salas (līnija „21–22” atslēgta no 1,1 s līdz AAI darbībai 2,5 s). 4.4. attēls parāda sprieguma vērtību mezglā  $<21>$ , kas ir nulle laika periodā no 1,58 s („U21–22” nostrāde) līdz 2,5 s (pārvades elektrolīnijas „21–22” AAI). Pārvades elektrolīnijā „16–21” ar iepriekš minētajiem nosacījumiem reāla ierīce nedarbosies, jo sprieguma vektori  $U_1$  un  $U_2$  būs ar vienādu fāzi, jo PEL strāvas neplūst. Viens trūkums vienkāršotam ARNA modelim tomēr tika konstatēts.



4.4. att. Energosistēmas spriegums mezglā <21> un strāvas PEL „21–16” un „22–21”.

Lai novērstu ARNA modeļa trūkumus, ir jāuzlabo darbības algoritms. Pilnveidotajam ARNA modulim (4.5. att.) jāveic nostrāde, ja vienlaikus tiek izpildīti divi nosacījumi:

- sprieguma leņķu starpība sasniedz  $\varphi = 180^\circ$ ;
- plūsma kontrolētajā pārvades elektrolīnijā (pārvades elektrolīnijā, kas savieno divus aplūkotos mezglus), ir strāva.



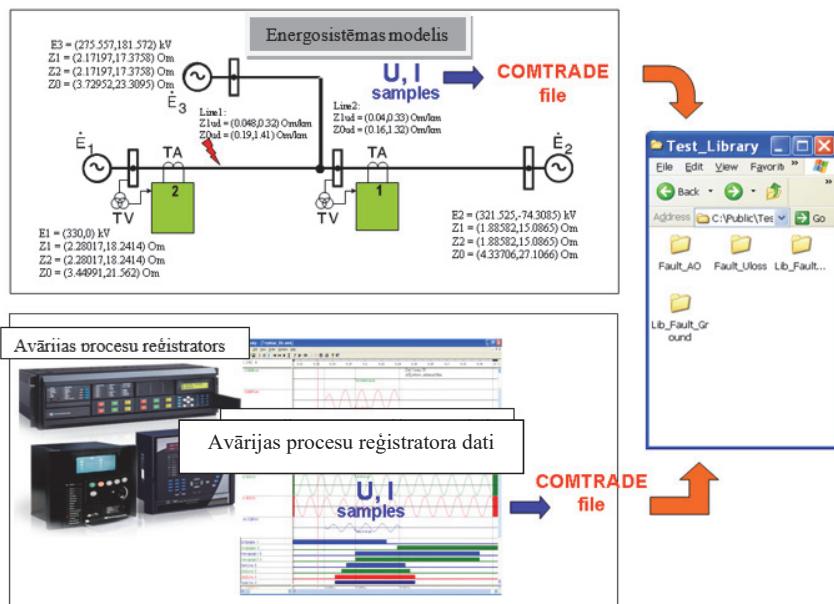
4.5. att. ARNA uzlabotais nostrādes algoritms.

Tas pats tests tika izmantots energosistēmai kopā ar uzlaboto ARNA algoritmu moduli. Pārejas procesu notikumu apraksts pēc pārbaudes scenārija izpildes *EUSTROG* vidē (scenāriju piemērs):

Notikumu sarakstā ir tikai viena ARNA „U16–24”, kas darbojas un sadala energosistēmu, atslēdzot PEL „16-24”. ARNA „U21–22” tika bloķēta brīdī, kad leņķis starp  $<21>$  un  $<22>$  mezgliem sasniedza  $180^\circ$  grādu vērtību. ARNA tika bloķēta, jo strāvas plūda caur PEL „21–22”, kas ir pareiza un precīza releja reakcija uz notiekošo procesu. Rezultātā energosistēma tika sadalīta divās daļās. AAI kvalitāte šai pārbaudei nav svarīga, jo sekmīga sistēmas atjaunošana noteikti ir atkarīga no tās veida un iestatījumiem.

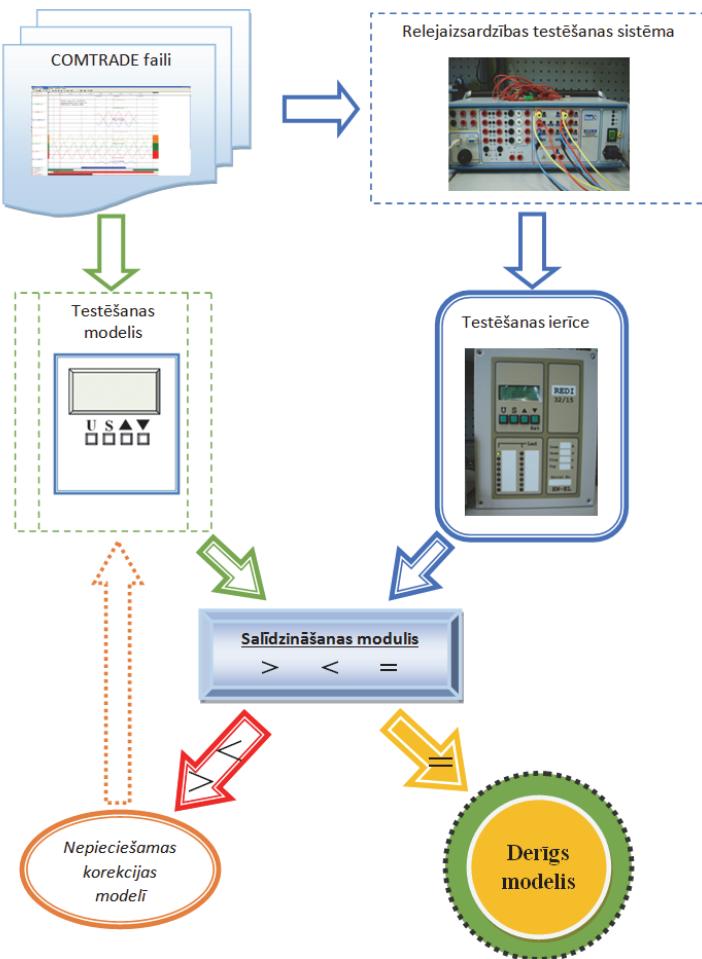
Pēc dažādu scenāriju simulācijas ARNA modeļa gala versija tika apstiprināta. Šis modelis precīzi identificē asinhrono režīmu, kā arī to var lietot energosistēmas stabilitātes novērtēšanai [4.14].

Pārbaudes signāli jāprezentē digitālā formā (modeļa testēšanai) kā reālas strāvas un spriegumus ierīces testēšanai. Konvertācijas funkcijas signāliem, kas attēloti kā momentānas vērtības ekvivalenti, ko var realizēt ar jebkuru mūsdienīgu releju testēšanas sistēmas palīdzību (*FREJA*, *ISA-DRTS* utt.). Sākotnējiem datiem jābūt *COMTRADE* formātā. Plaši lietojamā *COMTRADE* standarta izmantošana pieļāva radīt pārbaužu signālu bibliotēku, kurā var izmantot gan programmatūras modeļa modelēšanas radītos failus, gan pārējos procesus, kas ierakstīti no avārijas reģistratoriem (4.6. att.).



4.6. att. Pārbaudes signālu bibliotēkas izveidošana.

Modeļa validācijas process ir parādīts 4.7. att. Modeļa validācijai ir nepieciešams verificēt augstsprieguma pārvades elektrolīnijas distantaizsardzības modelis, izmantojot piedāvāto metodiku. Jāveic pārbaudes kopumus, izmantojot reālo ierīci (piemēram, distantaizsardzības iekārtai *REDI*) un ierīces matemātisko modeli. Šajā piemērā pārbaudes procedūrai tiek izmantots vienkāršots ierīces modelis – ievades signālu process netiek modelēts. Ierīces modelis aprēķina īsslēguma kontūra pilno pretestību.



4.7. att. Testēšanas procedūra modeļa validācijai.

Nemot vērā testēšanas procedūras rezultātus, jānosaka starpība starp iekārtu un modeli, izmantojot rezultātu:  $|P_{1\_device} - P_{1\_model}| = |0,980 - 0,982| = 0,002$ .

Kā redzams, starpība ir apmēram 0,2 %, kas ir daudz mazāk nekā ierīces klūda viena darbības gada laikā. Tādējādi var secināt, ka piedāvātais distantaizsardzības modelis ir derīgs.

RTU Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē 2015. gadā iepirkta jaunu aprīkojumu zinātniskai laboratorijai – virtuāli-reālās laboratorijas komplektu. Analogi-digītā simulators komplektu veido divas galvenās savstarpēji savietojamas sastāvdaļas:

- enerģētisko sistēmu un objektu darbības procesu modelējošā iekārta;
- iekārtu simulācijas, pārbaudes un verifikācijas bloks.

Analogidigītāls simulators ir iekārta ar plašām iespējām, kas nodrošina energosistēmas un tās elementu darba režīmu, tajos notikušo procesu modelēšanu un reāla laika simulācijas; kā arī iekārtu un automātikas darba testēšanu un izpēti, to darbības metožu, algoritmu un programmatūru izveidošanu un pārbaudi; kā arī ļauj analizēt piedāvātus risinājumus no ekonomiskā viedokļa, piemēram, modelējot elektroenerģijas tirgu un tā attīstības scenāriju. Analogo un ciparu ieejas un izejas kanālu dažādība nodrošina daudzveidīgas savienošanas

iespējas ar simulatoru. Simulators dod iespēju modelēt gan ļoti ātrus procesus (piemēram, pārejas procesus, kas norit milisekunžu laikā), gan ilglaicīgā perspektīvā (piemēram, plānojot energosistēmas attīstību). Izmantojot interneta pieslēgumu, tiks nodrošināta zinātnisko institūciju personāla attālināta piekļuve simulatora resursiem ar iespēju strādāt vienlaikus vairākiem cilvēkiem vai pielaut lielu simulāciju, izmantojot simulatora skaitļošanas jaudas.

Termināla aparātu moduļu galvenās tehniskas sastāvdaļas:

- 1) analogo signālu ievades modulis;
- 2) diskrēto (bināro) signālu ievades modulis;
- 3) izejas signālu modulis – releju modulis;
- 4) analogo-ciparu pārveidotāja modulis;
- 5) indikācija un vadības modulis;
- 6) sakaru modulis;
- 7) terminālu sakaru modulis;
- 8) operatīvas atmiņas modulis;
- 9) operatīvas energoneatkarīgas atmiņas modulis;
- 10) programmas atmiņas modulis;
- 11) reālā laika pulkstenis;
- 12) mikroprocesora modulis
- 13) operatīvas barošanas bloks.

Analogidigitālā simulatora iespējamās funkcijas un izmantošanas jomas:

- energosistēmas struktūras stratēģiska plānošana (ar 20–30 gadu perspektīvu), nemit vērā kaimiņvalstu energosistēmu attīstības plānus un tirdzniecības apstākļus;
- lielo, vidējo un mazo enerģētisko objektu (dažāda veida elektriskās stacijas, tradicionālas un izmantojošas alternatīvos energoavotus, elektriskie tīkli, ieskaitot viedos, augstsprieguma apakšstacijas un līnijas, siltumapgādes avoti un tīkli) tehniski ekonomiskais pamatojums, struktūru un shēmu pamatojums, skicu projektu un biznesa plānu izstrāde un optimizācija, minimizējot kurināma patēriņu, izmešu daudzumu atmosfērā un kapitālieguldījumus;
- energosistēmu drošuma un risku vadība, pretavāriju pasākumu izstrāde, stabilitātes līmeņa paaugstināšana;
- energosistēmas releju aizsardzības un automātikas algoritmu izstrāde, iestatījumu izvēle un pārbaude, iekārtu testēšana;
- enerģētisko objektu automātisko vadības sistēmu algoritmu un programmu izstrāde un pārbaude;
- energosistēmu avārijas situāciju definēšana un izmeklēšana.

Promocijas darbā ir ietverta iekārtu simulācijas, pārbaudes un verifikācijas bloka principiāla shēma, kurā ir paradītas galvenās saites starp pamata blokiem.

Lai nodrošinātu darbu ar šo kompleksu, tiek izmantots personālais dators, kurā ir instalēta attiecīga programmatūra, kas ļauj veikt eksperimentus un pārbaudīt algoritmus un modeļus. Šim nolūkam tiek izmantotas reālas iekārtas *REMI*, kurās var realizēt jaunus algoritmus un modifīcēt esošus algoritmus un modeļus. Arī shēmā ir *ABB* ražotie aizsardzības termināli *RED670* [4.39], kuriem galvenokārt nodrošina PEL diferenciālo aizsardzību.

*REMI* un *RED670* izejas un ieejas ir pieslēgtas pie strāvu un spriegumu ķēdēm, bināro ieejam un izejam, operatīvo spriegumu un signālu ķēdēm, kā arī datoram informācijas apmaiņai.

Iekārtu modeļa aprobācijai un verifikācijai ir jāveic virkne eksperimentu. Šīm nolūkam ir paredzēts strāvu un spriegumu ģeneratoru bloks jeb relejaizsardzības testēšanas bloks (*RTS*, *ISA DRTS*), kas tiek vadīts, izmantojot datoru.

Datorā tiek glābāta avārijas reģistratoru ierakstu datubāze, kā arī ir instalēta attiecīga programmatūra, kas ļauj ģenerēt *COMTRADE* failus un lejuplādēt to *RTS* blokā.

Tātad, izmantojot *ISA DRTS* un tā signālus, var veikt iekārtas algoritmu izpēti un verificēt modeļus, salīdzinot ar etaloniekārtu. Protams, šī procesa kontrolei tiek izmantota atbilstoša programmatūra, kas ir instalēta datorā. Papildus tam ir izveidota speciāla programmatūra “*SMOKY*”. Tā ļauj pietiekami efektīvi analizēt relejaizsardzības reakciju un konstruēt vektoru diagrammas. Pēc nepieciešamības var veikt korekcijas un uzlabojamus pārbaudamos algoritmos un modeļos.

Eksistē arī citas analogi-digitālās simulatora komplekta izmantošanas iespējas, piemēram, veikt relejaizsardzības speciālistu apmācību, izmantojot *RED670* iekārtu potenciālu. Apmācības laikā ir iespējams būtiski padziļināt praktiskās iemaņas un izpētīt iekārtas algoritmus, jo virkne avārijas scenāriju ir brīvi pieejami un aptvert samēra lielu bojājumu kopumu, ko reālas energosistēmas apakšstacijā gandrīz nav iespējami izpētīt.

Vēl jāpiemin iespēju apmācīt dispečerus un speciaлизētu personālu, izmantojot energosistēmas modeļus un dažāda veida avārijas scenārijus gan avārijas procesu reģistratoru ierakstus, gan teorētiski iespējamos pārejas procesus, izmantojot modelēšanas programmatūras (piemēram, *ETAP*, *EUROSTAG* utt.).

## **SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS TURPMĀKAJAM DARBAM**

- Energosistēmu automātikas eksperimentāla pārbaude un testēšana ir nozīmīga, svarīga, obligāta un darbietilpīga automātikas iekārtu darbspējas nodrošināšanas procedūras sastāvdaļa.
- Automātikas pārbaudes notiek, izmantojot specializētas laboratorijas, kurās var nodrošināt sarežģītu testēšanas signālu ģenerēšanu.
- Energosistēmu automātikas attīstības tendenču analīze ļauj apgalvot, ka notiek to funkciju apvienošana un kontrolējamo procesu skaita palielināšana. Šī tendence rada sarežģījumus testēšanā un verifikācijā.
  - Virtuālās laboratorijās tiek veikti tikai skaitliskie eksperimenti, un tajās var pārbaudīt automātikas iekārtu modeļus vai algoritmus, bet ne reālās iekārtas.
  - Reālo energosistēmu var izmantot eksperimentu nolūkos, bet šāda veida eksperimenti ir ārkārtīgi kapitālietilpīgi.
  - Virtuāli-reālās laboratorijas bāze satur: avārijas procesu bibliotēku, energosistēmas pārejas simulēšanas programmatūru, CAP un automātikas terminālu prototipu.
  - Lokālo pretavārijas automātikas apvienošana gredzenveida informācijas apmaiņas struktūrā dod iespēju izmantot lokālo un centralizēto automātikas uzbūves principu priekšrocības un izveidot nejūtīgo sakāru kanāla atteikumu sistēmu.
  - Gredzenveida pretavārijas automātikas struktūra dod iespēju vienlaikus realizēt divu mēriju mu sinhronizācijas paņēmienu, izmantojot globālās pozicjonēšanas sistēmu un optiskos sakaru kanālus. Šīs iespējas realizācija rada augstu drošuma līmeni.
  - Īsslēgumu un asinhronā režīma procesu sākumstadijā var novērtēt energosistēmas ekvivalentas pretestības, kas dod iespēju būtiski palielināt ģeneratoru leņķu kontroles precīzitāti.
  - Asinhronā režīma gaitā var notikt būtiskas energosistēmas konfigurācijas izmaiņas, kuru ietekme netiek ņemta vērā pašlaik izmantojamos automātikas algoritmos. Leņķu pāotrīnāšanas un bremzēšanas laukumu kontrole dod iespēju būtiski samazināt minēto trūkumu.
  - Energosistēmu avārijas procesu digitālos ierakstus var efektīvi izmantot jaunu iekārtu testēšanas nolūkos un dažādās mācību procesu stadijās.
  - Analogidigitālās simulators kompleksu var izmantot RA speciālistu apmācībās, izmantojot minētās *RED670* iekārtas potenciālus. Apmācību laikā ir iespējams izpētīt iekārtas algoritmus un būtiski padziļināt praktiskās iemaņas, jo virkne ar avārijas scenārijiem ir brīvi pieejama un ietvert apjomīgu bojājumu klāstu, kuru reālā energosistēmas apakšstacijā gandrīz nav iespējami izpētīt.
  - Izmantojot virtuāli-reālas laboratorijas kompleksu, pastāv iespēja apmācīt dispečerus un specializētu personālu, izmantojot energosistēmas modeļus un dažāda veida avārijas scenārijus, kas ietver gan avārijas procesu reģistratoru ierakstus, gan teorētiski iespējamos pārejas procesus, izmantojot modelēšanas programmatūras (piemēram, *ETAP*, *EUROSTAG* utt.).

## IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1.1] El-Hawary, M., E. Electrical Energy Systems // CRC Press 2000 by CRC Press, LLC, p. 365.
- [1.2] Xuemin Chen, Gangbing Song, Yongpeng Zhang. Virtual and Remote Laboratory Development: A Review. Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction and Operation in Challenging Enviroments: PP 3843–3852.
- [1.3] Miller, G., Storey, A., Vadari, S., V., Brewer, K. Experiences Using the Dispatcher Training Simulator as a Training Tool // IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, August 1993, pp. 1126–1132.
- [1.4] Hwang, P.-I., Ahn, S.-J., Hur, S.-I., Yoon, Y.-T., Moon, S.-I. Adaptive Step Size Method for the Power System Model of Dispatcher Training Simulator // IEEE PES General Meeting, 25–29 July 2010, p.7.
- [1.5] Nesterenko, M. Multi-Control Center Dispatcher Training // 2011 EMS Users Conference Philadelphia, PA, 18–21 September, 2011.
- [1.6] <https://www.omicronenergy.com/en/support/technical-support/>
- [1.7] Programma. Freja 300 / Freja Win 4.0 Relay Testing System. User's Manual. Sweden: Programma, 2001. 154 lpp.
- [1.8] <http://www.isatest.com/products-container/protective-relay-testing/drts-6>
- [1.9.] IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems, IEEE Std C37.111-1999, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 15 October 1999, 55 p.
- [1.10] <http://www.ti.com.cn/lit/ds/symlink/tms320c25.pdf>
- [1.11] Rosloniec, S., Fundamental Numerical Methods for Electrical Engineering // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [1.12] Strelkovs, V., Chuvychin, V., Sauhats, A., Lubarskyi, D., Rubtsov, A., Scheufeld, O., Shewarega, F., Vennegeerts, H., Panciatici, P., Utāns, A., Leite, L., Kucaevs, J., Erlich, I. Modeling requirements for the ETN // PEGASE Pan European Grid Advanced Simulation and state Estimation, 2011, p. 286.
- [1.13] Sauer, P., W., Hajj, I., N., Pai, M., A., Trick, T., N. Computer Methods in Electric Network Analysis // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 6, June 1983, pp. 1726–1731.
- [1.14] Sauhats A., Utāns A., Biela-Dailidovicha E., Wide-area measurements-based Out-of-Step Protection System, 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University
- [1.15] <http://www.arcelect.com/rs232.htm>
- [1.18] Khaitan, S., K., ed., Gupta, A. ed. High Performance Computing in Power and Energy Systems // Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, p. 378.
- [1.23] AGNA apraksts: [http://remi.eef.rtu.lv/docs/AGNA\\_eng\\_2008\\_lil.pdf](http://remi.eef.rtu.lv/docs/AGNA_eng_2008_lil.pdf)
- [1.24] Transmission Line Reference Book 345 kV and Above // General Electric Company, Electric Power Research Institute, Second edition, 1982.
- [1.25] Siemens AG, SIPROTEC 5 Distance Protection, Line Differential Protection, and Overcurrent Protection for 3-Pole Tripping, V 5.00, 2014, 1460 p.
- [1.26] ABB Inc., REL 512 Numerical Transmission Line Protection System, Substation Automation and Protection Division, Coral Springs, FL, Allentown, PA, 2011, 8 p.
- [1.28] <http://kpku.ru/docs/F324157708/Virtualnye.laboratori.pdf>
- [1.37] D.Bica, "Performant software in Power Engineering Education", Proceedings of Romanian National Symposium on Electrotechnics, Bucharest, October 2007, pp. 231–234.
- [1.38] BCP Busarello Cott Partner Inc., NEPLAN Planning and optimization system for electrical network, <http://www.neplan.ch>.
- [1.39][http://ieeexplore.ieee.org.resursi.rtu.lv/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4651684&queryText=Power+Engineering+Education+using+NEPLAN+software&newsearch=true&searchField=Search\\_All](http://ieeexplore.ieee.org.resursi.rtu.lv/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4651684&queryText=Power+Engineering+Education+using+NEPLAN+software&newsearch=true&searchField=Search_All)
- [1.40] RTDS hardware and RSCAD active line as on 06/10/2008. <http://www.rtds.com>
- [1.41][http://ieeexplore.ieee.org.resursi.rtu.lv/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5307318&queryText=Real+Time+Power+System+Simulation+using+RTDS+and+NI+PXI&newsearch=true&searchField=Search\\_All](http://ieeexplore.ieee.org.resursi.rtu.lv/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5307318&queryText=Real+Time+Power+System+Simulation+using+RTDS+and+NI+PXI&newsearch=true&searchField=Search_All)
- [1.42] NI-PXI Controller, Active link as on 06/10/2008 <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/4811>
- [1.43] Sunil Palla, Anurag K Srivastava, and Noel N. Schulz, "Hardware in the loop test for relay model validation," Proceedings of the IEEE Electric Ship Technologies Symposium, May 2007 Page(s): 449–454
- [1.44][http://ieeexplore.ieee.org.resursi.rtu.lv/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5442686&queryText=ICT+Enabled+High+Voltage+Laboratory%3A+Cost+Effective+Tool+for+Engineering+Education&newsearch=true&searchField=Search\\_All](http://ieeexplore.ieee.org.resursi.rtu.lv/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5442686&queryText=ICT+Enabled+High+Voltage+Laboratory%3A+Cost+Effective+Tool+for+Engineering+Education&newsearch=true&searchField=Search_All)
- [1.45]J. Campos, "Development in the application of ICT in condition monitoring and maintenance", Computers in Industry, vol. 60, pp. 1–20, 2009
- [1.46] Kikuchi, H., Matsufuji, Y., Kashiwagi, T., Takebayashi, T. Development of Technologies to Simulate Power Flow for Power Grid // FUJITSU Sci. Tech. J., Vol. 50, No. 2, April 2014, pp. 92–99.

- [1.47] M. Travassos Valdez, C. Machado Ferreira and F. P. Maciel Barbosa, "Distance Education Using a Desktop Virtual Reality (VR) System", 24th EAEEIE Annual Conference, EAEEIE2013 (European Association for Education in Electrical and Information Engineering), Chania, Crete, Greece, May 30–31, 2013
- [1.48][http://ieeexplore.ieee.org.resursi.rtu.lv/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6715005&queryText=Electric+al+Engineering+Teaching+and+Distance+Learning+using+a+Desktop+Virtual+Reality+System&newsearch=true&searchField=Search\\_All](http://ieeexplore.ieee.org.resursi.rtu.lv/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6715005&queryText=Electric+al+Engineering+Teaching+and+Distance+Learning+using+a+Desktop+Virtual+Reality+System&newsearch=true&searchField=Search_All)
- [1.49] C. M. Ionescu, E. Fabregas, S. M. Cristescu, S. Dormido, and R. De Keyser, "A Remote Laboratory as an Innovative Educational Tool for Practicing Control Engineering Concepts," *Education, IEEE Transactions on*, vol. 56, pp. 436–442, 2013.
- [1.50][http://ieeexplore.ieee.org.resursi.rtu.lv/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6715005&queryText=Electric+al+Engineering+Teaching+and+Distance+Learning+using+a+Desktop+Virtual+Reality+System&newsearch=true&searchField=Search\\_All](http://ieeexplore.ieee.org.resursi.rtu.lv/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6715005&queryText=Electric+al+Engineering+Teaching+and+Distance+Learning+using+a+Desktop+Virtual+Reality+System&newsearch=true&searchField=Search_All)
- [1.51] Sauhats A., Utāns A., Silarājs M., Kucajevs J., Antonovs D., Bieļa E., Moškins I. Power System Dynamical Simulation Application for Out-of-Step Relay Testing. *Journal of Energy and Power Engineering*. - 6. (2012), 1343.–1348. lpp.
- [1.52] Sauhats A., Zalostība D., Dolgicers A., Bieļa-Dailidovicha E., Antonovs D. Power System Modeling Software for Educational and Research Purpose. *Electrical engineering and information complexes and system*, Vol.10, No.1, 2014, ISSN 1999-5458, Russia, 5.–14. lpp.
- [1.53] Sauhats A., Utāns A., Kucajevs J., Pašņins G., Antonovs D., Bieļa E. Protection and Automation Devices Testing using the Modeling Features of EUROSTAG. *RTU zinātniskie raksti. 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika*. - 28. sēj. (2011), 7.–12. lpp.
- [1.54] Antonovs D., Bieļa E., Sauhats A., Zicmane I. Laboratorijas darbu komplekss ETAP vidē magistra studiju programmai. 2.daļa. Rīga, RTU Izdevniecība, 2013. ISBN 9789934104466, 52. lpp.
- [1.55] Antonovs, D., Bieļa, E., Sauhats, A., Zicmane, I. Laboratorijas darbu komplekss ETAP vidē magistra studiju programmai. 1.daļa. 1.daļa. Rīga: RTU Izdevniecība, 2013, ISBN 9789934104459, 41. lpp.
- [1.56] Antonovs, D., Bieļa, E., Sauhats, A., Zicmane, I. Energosistēmas modelēšanas pamati un īsslēguma procesu izpēte ETAP vidē. Rīga: RTU Izdevniecība, 2013, ISBN 9789934104053, 42. lpp.
- [1.57] Halilova N. Eurostag Software as Tool for Stability Study of the Power Systems, Power and Electrical Engineering, RTU, ISSN 1407-7345, 2008, pp 29–32
- [1.58] <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/software-solutions/planning-data-management-software/planning-simulation/pages/pss-e.aspx>
- [1.59] L.19-PowerWorld; Unified Power System Models through Integrated Topology Processing (ITP) // PowerWorld Corporation <http://www.powerworld.com>, Champaign Illinois USA. p. 13.
- [1.60] Overbye, T.J., Sauer, P.W., Marzinik, C.M., Gross, G. A User-Friendly Simulation Programm for Teaching Power System Operator // *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10. No. 4, November 1995.
- [1.61] Zhou, E., Z. Object-oriented Programming, C++ and Power System Simulation // *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 1, February 1996, pp. 206–215.
- [1.62] Duncan Glover, J., Sarma, M.S., Overbye, T.J. *Power System Analysis and Design* // Cengage Learning, Fifth edition, 2012.
- [1.63] Sauer, P., W. On The Formulation of Power Distribution Factors for Linear Load Flow Methods // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 2, February 1981, pp. 764–770.
- [1.64] Balodis, M., Ekmanis, J., Gavars, V., Kučinskis, M., Zeltiņš, N., Žīgurs Ā. The Latvian Electricity Supply Trilemma: Security, Social equity, and the Environment// WEC Central and Eastern Europe Regional Energy Forum - FOREN 2014 “Tomorrow’s Energy: From Vision to Reality”, 24 June, 2014. Bucharest, Romania, Palace of the Parliament.
- [1.65] Sauhats, A., Chuvychin, V., Gurov, N., Strelkovs, V., Svalova, I., Svalovs, A., Linkevics, O., Rivkins, J. The Latvian Experience and Problems of the Grid Integration of Renewable Energy Sources in the Power System // *IEEE Russia Power Tech*, 27–30 June 2005, p. 7.
- [1.66] Ayuyev, B., I., Yerokhin, P., M., Shubin, N., G., Neujmin, V., G., Alexandrov, A., A. Unit Commitment with Network Constraints // *IEEE Russia Power Tech*, 27-30 June 2005, p. 5.
- [1.67] Powell, L. *Power System Load Flow Analysis* // McGraw-Hill 2005 by the McGraw-Hill Companies, Inc., p. 183.
- [1.68] <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/software-solutions/planning-data-management-software/planning-simulation/pages/pss-e.aspx>
- [1.69] Bakken, D. ed. Smart Grids. Clouds, Communications, Open Source, and Automation // CRC Press 2014 by Taylor & Francis Group, LLC, p. 446.
- [2.1] Realization of Distance Relay Algorithm using EMTP MODELS J.Y. Heo, C.H. Kim, K.H. So, N.O. Park, International Conference on Power Systems Transients – IPST 2003 in New Orleans, USA.
- [2.2] 2014 Key World Energy Statistics // OECD/IEA, Paris, 2014.

- [2.3] Almeida, A., B., Reginatto, R., da Silva, R., J., G., C. A Software Tool for the Determination of Dynamic Equivalents of Power Systems // VIII IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control, 1-6 August 2010, Buzios, RJ, Brazil, p. 10.
- [2.4] L.22-Sauhats, A., Chuvychin, V., Antonovs, E., Zicmane, I., Strelkovs, V., Interconnection of power systems with different under-frequency load shedding schemes // EEEIC 2011: Rome, Italy, 8–11 May 2011, pp. 1–4.
- [2.5] A. V. Zhukov, A. N. Komarov, A. N. Safronov, I. V. Barsukov, Experience in connecting the power generating units of thermal power plants to automatic secondary frequency regulation within the united power system of Russia, Journal Article: Power Technology and Engineering 04/2012; 43(3):185-193. DOI:10.1007/s10749-009-0089-0
- [2.6] D. Antonovs, Promocijas darbs – Energosistēmu asinhronā režīma modelēšana, vadība un novēršana, Rīga, RTU, 2015.
- [2.7] Dolgicers A., Bieļa-Dailidovicha E., Antonovs D., Kozadajevs J. Electrical Facilities and Systems. Electrical and Data Processing Facilities and Systems, Vol. 11, No. 4, 2015, ISSN 1999-5458, Russia, 5.–12. lpp.
- [2.12] M. Silarājs, Promocijas darbs – Statistiskā pieeja energosistēmu aizsardzības algoritmu sintēzē un testēšanai Relejaisardzības un automātikas kompleksu pārbaudes metodes un līdzekļi, RTU, 2012.
- [2.17] Sauhats A., Zalostiba D., Dolgicers A., Bieļa-Dailidovicha E., Broka Z. University Impact on Power Supply Economy, Reliability and Sustainability Enhancement Decreasing Climate Changes. 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University: Proceedings, ISBN- 978-1-5090-0334-1, Riga, 2015, 37.–42. lpp.
- [2.18] R. Varfolomejeva, I. Umbrasko and A. Mahnitsko “Algorithm of smart control system operation of small hydropower plant” EEEIC 2013, no. 6549537, pp. 330–334
- [2.19] Varfolomejeva, R., Sauhats, A., Kucajevs, J., Petričenko, R., Jankovskis, N. Stochastic Approach to Economical Analysis of Biomass Power Plants. In: Environmental Biotechnology and Engineering — 2014: The Fourth Int. Symposium on Environmental Biotechnology and Engineering. Vol. 1, Mexico, México, 9–12 September, 2014. México D.F., México: Cinvestav, 2014, pp. 281–293. ISBN 978-607-9023-28-7.
- [2.20] A. Vanags, Z. Krišāns, Elektriskie tīkli un sistēmas, II daļa, Rīga, RTU, 2005, lpp. 270 – 272.
- [3.1.] B. A. Венников, Переходные электромеханические процессы в электрических системах, M., 1985. – 536 стр.
- [3.2] Ruiz, P., A., Sauer, P., W. Voltage and Reactive Power Estimation for Contingency Analysis Using Sensitivities // IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 2, May 2007, pp. 639–647.
- [3.3] Rubcovs, S., Smart Under-Frequency Load Shedding System // III Smart Communications & Technology Forum, June 5, 2013, W., Poland, pp. 88–103.
- [3.4] [http://alephfiles.rtu.lv/TUA01/000035993\\_e.pdf](http://alephfiles.rtu.lv/TUA01/000035993_e.pdf)
- [3.8] [https://books.google.lv/books?id=y3Zs7-R4hKsC&pg=PA303&lpg=PA303&dq=angle+between+two+equivalent+generators&source=bl&ots=lM\\_BcZjs8pE&sig=oACMMETcMxsnEuLEmSSKWF27bTc&hl=en&sa=X&ved=0ahUEwioxq2smIHUAhUKjSwKHTl1BMkQ6AEIIDAA#v=onepage&q=angle%20between%20two%20equivalent%20generators&f=false](https://books.google.lv/books?id=y3Zs7-R4hKsC&pg=PA303&lpg=PA303&dq=angle+between+two+equivalent+generators&source=bl&ots=lM_BcZjs8pE&sig=oACMMETcMxsnEuLEmSSKWF27bTc&hl=en&sa=X&ved=0ahUEwioxq2smIHUAhUKjSwKHTl1BMkQ6AEIIDAA#v=onepage&q=angle%20between%20two%20equivalent%20generators&f=false)
- [3.9] L.93- Fan, S., Li, X., Zuo, L., Li, Y. A New Asynchronous Parallel Load Flow Calculation Algorithm // IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 21–24 September 2008, pp. 1027–1031.
- [3.12] <http://library2.usask.ca/theses/available/etd-06272008-100122/>
- [3.14] H. Ito, I. Shuto, H. Ayakawa, P. Beaumont, K. Okuno, Development of an Improved Multifunction High Speed Operating Current Differential Relay for Transmission Line Protection, Developments in Power System Protection, Conference Publication No. 479, IEE 2001, 511–514 pp.
- [3.15] Yeu, R., H., Sauer, P., W. Post-Contingency Equilibrium Analysis Techniques for Power Systems // 37th Annual North American Power Symposium, 23–25 October 2005, pp. 429–433.
- [3.16] Papkovs, B., Zicmane, I. *Elektromagnētiskie pārejas procesi elektriskās sistēmās*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2007. 306 lpp. ISBN 978-9984-32-181-3.
- [3.17] Kimbark, E. W. „Power System Stability”, vol. 1, 1995, IEEE, Inc. New York: Wiley, pp. 122–132. ISBN 0-7803-1135-3
- [3.18] B. Alinezhad, H. K. Karegar „Out-of-Step Protection Based on Equal Area Criterion”, *IEEE Transactions on Power Systems* (Volume: PP, Issue: 99), 23 June 2016, 9 p. ISSN: 0885-8950, DOI: [10.1109/TPWRS.2016.2584121](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2584121). Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7498682>.
- [3.21] D. Antonovs, A. Sauhats, A. Utāns, E. Bieļa, Patents LV 14832 B, 05.07.2013., Asinhronās gaitas novēršanas automātikas ierīce un paņēmiens.

- [3.22] Antonovs D., Sauhats A., Utāns A., Bieļa-Dailidoviča E. Patents LV 14912 B, 27.06.2014.: Asinhronā režīma novēršanas automātikas ierīce. Asinhronā režīma novēršanas automātikas paņēmiens.
- [3.24] Yang, Z., Kui, W., Buhan, Z. A Real-time Dynamic Equivalent Solution for Large Interconnected Power Systems // 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Power Technologies (DRPT), Year 2011, pp. 871-875.
- [3.38] <http://www.nordpoolspot.com/>
- [3.39] <http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad>
- [4.2] Poon, K., K., Y., Emami, R., Bose, A., Abur, A. External Data Exchange Issues for State Estimation in Power Systems // IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27. No. 2, May 2012, pp.849-856.
- [4.4] Villega, F., Leclerc, S., Erlich, I., Rapoport, S. PEGASE Pan-European Test-beds for Testing of Algorithms on very Large Scale Power Systems // 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Berlin, 2012, p.9.
- [4.5] Korn, G., Korn, T., "Mathematical handbook", McGraw-Hill Book Company, 1968.
- [4.6] Sauhats A., Silarajs M., Kucajevs J., Pašņins G., Antonovs D., Bieļa E. Testing of Protection and Automation Devices Using Dynamical Simulation Processes of Power System. Electrical and Control Technologies. - 6. (2011), 184.-189.lpp.
- [4.7] Vempati, N., Silva, C., Alsac, O., Stott, B. Topology Estimation // IEEE Power Engineering Society General Meeting, 12-16 June 2005, p.5.
- [4.8] <http://www.scribd.com/doc/19864620/39-New-England>
- [4.10] Zhao, L. Multi-Area Network Analysis // Dissertation, Texas A&M University Doctor of Philosophy (subject Electrical Engineering), 2004.
- [4.11] Sauer, P., W., Pai, M., A. Steady-state Stability and Load Flow // 27th IEEE Conference on Decision and Control, 7-9 December 1988, pp. 2110-2113.
- [4.14] Ivanov, V., Rimarev, V., Gerhards, J., Mahnitko, A. Calculations of Steady and Transient States in The Complex Power Systems According To The Program "Mustang"// Control of Power & Heating Systems, 5th International Conf. CP&HS 02, Zlin, Czech Republic, May 21-22, 2002, p.116.
- [4.29]<http://new.abb.com/substation-automation/products/protection-control/line-differential-protection/red670>