

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte

Enerģētikas institūts

**Dmitrijs ANTONOVŠ**

Enerģētikas doktora programmas doktorants

**ENERGOSISTĒMAS ASINHRONĀ REŽĪMA MODELĒŠANA,  
VADĪBA UN NOVĒRŠANA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

Dr. habil. sc. ing., profesors

**A. SAUHATS**

Dr. sc. ing., asoc. profesors

**A. UTĀNS**

**RTU Izdevniecība**

**Rīga 2015**

Antonovs D. Energosistēmu asinhronā režīma modelēšana, vadība un novēršana. Promocijas darba kopsavilkums – R.: RTU Izdevniecība, 2015. – 43 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Promocijas padomes P-05 (Enerģētika) 2015. gada 24. februāra lēmumu Nr. 21/15



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

*Šis darbs izstrādāts ar Valsts pētījumu programmas enerģētikā daļējo atbalstu projektā „LATENERGI”.*

*Šis darbs izstrādāts ar daļējo atbalstu Eiropas Sociālā fonda līdzfinansēta projektā "Energosistēmu stratēģiskās attīstības un vadības tehniski-ekonomisko problēmu izpēte un risināšana).*

*Šis darbs ir izstrādāts ar daļējo Fundamentālo un lietišķo pētījumu projekta Nr. 256/2012 "Energosistēmu risku vadība" atbalstu.*

**ISBN 978-9934-10-666-8**

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. gada 16. aprīlī Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 306. auditorijā, plkst. 14:00.

**OFICIĀLIE OPONENTI**

*Dr. sc. ing.* **Kārlis Briņķis**

Latvijas Elektroenerģētiķu un energobūvnieku asociācijas izpilddirektors

*Dr. sc. ing.* **Diāna Žalostība**

RTU EEF, vadošā pētniece

*Dr. sc. ing.* **Arturas Klementavicius**

Lietuvas enerģētikas institūts, vadošais pētnieks

**APSTIPRINĀJUMS**

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

Dmitrijs Antonovs ..... (paraksts)

Datums .....

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, tas satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus un rekomendācijas turpmākam darbam, kā arī literatūras sarakstu. Darba kopējais apjoms ir 142 datorsalikuma lappuses, kurās ietverti 78 attēli un 34 formulas. Literatūras sarakstā iekļauti 125 izmantotās literatūras avoti.

## SATURS

<b>PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE</b> .....	5
<b>PROMOCIJAS DARBA MĒRĶI UN ATRISINĀTIE UZDEVUMI</b> .....	6
<b>PĒTĪJUMA METODES</b> .....	7
<b>PROMOCIJAS DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE</b> .....	7
<b>PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME</b> .....	7
<b>AIZSTĀVĒŠANAI IZVIRZĪTAS PAMATNOSTĀDNES</b> .....	8
<b>AUTORA PERSONISKAIS IEGULDĪJUMS VEIKTAJOS PĒTĪJUMOS</b> .....	8
<b>PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA</b> .....	8
<b>PUBLIKĀCIJAS</b> .....	9
<b>PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS</b> .....	10
1. <b>ENERGOSISTĒMAS ASINHRONĀIS REŽĪMS, SABRUKUMI UN TO NOVĒRŠANAS AUTOMĀTIKA</b> .....	11
2. <b>ASINHRONĀ REŽĪMA NOVĒRŠANAS AUTOMĀTIKAS IERĪCES REALIZĀCIJA</b> .....	22
3. <b>ENERGOSISTĒMAS SABRUKUMU UN ARNA DARBĪBAS MODELĒŠANA</b> .....	32
4. <b>ASINHRONĀIS REŽĪMA NOVĒRŠANAS AUTOMĀTIKAS TESTĒŠANA</b> .....	36
<b>SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS TURPMĀKAM DARBAM</b> .....	40
<b>IZMANTOTĀ LITERATŪRA</b> .....	41

## PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE

Energosistēma ir viena no sarežģītākajām cilvēces radītajām sistēmām, kas nodrošina progresīvu civilizācijas attīstības procesu, ka arī noteiktu un samērā augstu dzīves līmeni, lai cilvēki būtu apmierināti un varētu savā ikdienā veikt ierastās darbības. Pēdējos desmit gados atkarība no elektroenerģijas ir palielinājusies vairākas reizes. Tā kā elektroenerģiju plaši lieto, lai darbinātu dažādas elektroierīces, patērētāji jānodrošina ar nepārtrauktu un drošu elektroenerģijas piegādi. Lai sasniegtu šo mērķi, jābūt attīstītai energosistēmas struktūrai, kā arī vienlaicīgi jānodrošina augsta elektroenerģijas kvalitāte.

Pašlaik cilvēku dzīves atkarība no elektroenerģijas kļuvusi gandrīz kritiska un, analizējot attīstības tendences, var secināt, ka šī atkarība tikai palielināsies. Tāpēc pat īss elektroapgādes pārtraukums var izraisīt katastrofālās sekas, kuras nevar precīzi novērtēt un tās grūti prognozēt dažādu iemeslu dēļ. Elektroapgādes pārtraukums rada pārējo būtiski svarīgo inženierkomunikāciju darbības pārtraukumu. Minēsim tikai galvenās inženierkomunikāciju sistēmas, kuru darbības apstāšanās paralizē mūsdienu pilsētu un visas valsts dzīvi:

- Siltumapgāde.
- Visu veidu sakari (tālruni, internets utt.).
- Visu veidu transports.
- Finanšu sistēmas (biržas, bankas utt.).
- Medicīnas sistēmas.
- Pārtikas piegāde, glabāšana un ražošana.
- Policija un civilā aizsardzība.
- Kurināmā piegādes sistēmas.

Mūsdienu sabiedrība ir ārkārtīgi jutīga pret elektroapgādes pārtraukumiem. Pārtraukums, kas ilgst dažas stundas vai vairākas dienas, rada būtiskas sekas ikdienas dzīvē un ekonomikā. Nozīmīgāko struktūru, piemēram, komunikāciju vai transporta darbība kļūst apgrūtināta, tiek apturēta ūdens un apkures apgāde, ražošanas procesi un tirdzniecība biržās. Glābšanas dienesti (ugunsdzēsēji, policija un neatliekamā medicīniskā palīdzība) nevar komunicēt telekomunikācijas sistēmu sabrukuma dēļ. Slimnīcas paliek darbspējīgas tikai līdz brīdim, kamēr avārijas ģeneratoriem ir nodrošināta degviela. Finanšu biržas, bankomāti un tirdzniecības veikali tiek slēgti. Šie visi notikumi vienlaikus rada katastrofas draudus.

Daudzos gadījumos energosistēmas darbības apstākļi mainās tik ātri, ka cilvēki nespēj savlaicīgi pieņemt lēmumus un tos realizēt. Šis fakts nosaka automātisko vadības sistēmu izmantošanas nepieciešamību. Laiku pa laikam energosistēmās rodas nenormāli vai avārijas režīmi, daudzi no kuriem sākās ar īsslēgumiem kādā no energosistēmas elementiem. Īsslēgumu novēršanai un bojāto sistēmas elementu ātrai atvienošanai jāizveido ātri reaģējošas un no cilvēka neatkarīgas aizsardzības sistēmas, kuru reakcijas laiks mērāms sekundes simtdaļās. Relejaizsardzības (RA) un pretavārijas automātikas (PA) kompleksu uzdevums bīstamu režīmu gadījumā ir pieņemt korektu lēmumu par bojāta energosistēmas elementa atslēgšanu. Diemžēl arī kompleksi var atteikt. Tātad ir jārēķinās ar to elementu galīgo drošumu. RA un PA vai citu vadības procesā iekļautu elementu atteikuma gadījumā bīstamie procesi attīstās ātri. Rodas plaša mēroga katastrofas briesmas. Lai novērstu tādas situācijas, tiek rezervēta visu veidu automātika. Papildus tiek lietota automātika, kuras darbība ir nepieciešama parasti tikai tad, ja vienlaikus notiek daži nelabvēlīgi notikumi. Viena no svarīgākajām tāda veida pretavāriju automātikām ir izveidota, lai atpazītu energosistēmas stabilitātes zudumu un iedarbinātu atbilstošo vadības procesu, kas aptur bīstamā režīma attīstību un samazina ekonomiskos un sociālos zaudējumus. Tieši tāda veida automātikas attīstībai – **asinchronā režīma novēršanas automātikai (ARNA)** – ir veltīts šīs promocijas darbs.

Pēdējos divdesmit gados, radot drošas, ekonomiskas un tehniski pilnīgas pretavāriju sistēmas, ir vispārpieņemts izmantot mikroprocesoru elementu bāzi, ātrdarbīgus optiskos sakaru kanālus un globālo pozicionēšanas sistēmu (GPS). Nosaukto sistēmu un elementu izmantošana paver jaunas iespējas izveidot kompleksas, tehniski pilnīgas, vienotā sistēmā darbināmas RA un PA iekārtas. Šajā virzienā strādā daudzi pētnieki, pieejamas simtiem publikāciju. Eksploatācijas praksē strauji ienāk jauna tehnika. Salīdzinot RA un PA tehnisko stāvokli Baltijas valstīs un rūpnieciski attīstītajās valstīs, var konstatēt, ka automātisko sistēmu ražošana Latvijā ir atpalikusi. Viens no nedaudziem izņēmumiem, kas saistīts tieši ar asinhronā režīma novēršanas automātiku, ir „AGNA”, jo šim virzienam pēdējo 50 gadu laikā bija veltīti Latvijas pētnieku (V. Fabrikants, K. Briņķis, A. Sauhats, V. Krēsliņš, A. Utāns, A. Svalovs u. c.) darbi. Rezultātā Baltijas valstīs izmanto RTU izstrādāto un Latvijā jau 20 gadus ražoto moderno, uz mikroprocesoru bāzes sintezēto automātiku.

Jāatzīmē, ka Baltijas valstu enerģētikā tieši pēdējos 20 gados ir notikušas būtiskās pārmaiņas, kas saistītas ar restrukturizāciju un tirgus regulēšanas mehānismu ieviešanu. Strauji mainījies enerģijas pieprasījums, cenas, standarti. Enerģijas ražošanā un sadalē kļuvusi pieejama vesela virkne jauno tehnoloģiju (tvaika-gāzes tehnoloģijas, izkļiedētie ģeneratori, GPS, optiskie sakaru kanāli, alternatīvie enerģijas avoti, H<sub>2</sub>S iekārtas, jauna tipa vadi, elektronikas iekārtas, kontroles un vadības termināli utt.). Notikušās pārmaiņas būtiski ietekmē ARNA prasības un realizācijas iespējas. No vienas puses, prasības pieaug, jo tirgus regulēšanas mehānismu izmantošana galvenokārt nosaka to, ka jaudas plūsmu pielāgošanas uzdevums jāatrisina tā, ka ienākumi ir maksimālie, bet tas daudzos gadījumos ir pretrunā ar stabilitātes nodrošināšanu. No otras puses, atklājas jaunas iespējas paaugstināt automātikas tehnisko līmeni, lietojot GPS un ātrdarbīgos sakaru kanālus. Jauno prasību un realizācijas iespēju analīze, kā arī ievērošanas ceļu un līdzekļu izpēte un definēšana veido šī darba galveno uzdevumu.

Aktuālākas problēmas ir “N-1” kritērija nepietiekamība energosistēmas vadībā, varbūtisko kritēriju attīstības nepieciešamība, jaunākās paaudzes automātikas izstrādes nepieciešamība, lai nodrošinātu precīzāko darbību un selektivitāti.

## PROMOCIJAS DARBA MĒRĶI UN ATRISINĀTIE UZDEVUMI

Promocijas **darba galvenais mērķis** ir Baltijas valstu energosistēmu stabilitātes un drošuma līmeņa paaugstināšana. Šī mērķa sasniegšanai atrisināti **galvenie uzdevumi**:

1. Veikta izmantojamo ARNA sistēmu darbības principu, algoritmu un iekārtu realizācijas paņēmieni analīze.
2. Izmantojot mikroprocesoru bāzi, GPS un ātrdarbīgos sakaru kanālus, sintezēta testēšanai piemērota un Baltijas valstīs pieprasīta ARNA struktūra un termināls.
3. Dinamiskās stabilitātes aprēķiniem un terminālu algoritmu validēšanai izveidots Latvijas energosistēmas modelis un veikta atbilstošas programmatūras sintēze.
4. Veikti Latvijas energosistēmas asinhrono režīmu procesu aprēķini un pierādīta to iespējamība.
5. Veikta jaunas ierīces testēšana, algoritmu un mērījumu precizitātes pārbaude.
6. Izstrādāta ARNA vienkāršoto modeļu derības novērtējuma metodika un izveidota testēšanas procesu bibliotēka.
7. Sintezēta jauna pretavāriju automātikas struktūra, kas apvieno lokālo un globālo sistēmu priekšrocības un ir spējīga funkcionēt GPS un sakaru kanāla atteikuma gadījumos.

## PĒTĪJUMA METODES

1. Energosistēmas stabilitātes un drošuma standartu analīze.
2. Lielo energosistēmu stabilitātes zaudējuma procesu modelēšana veikta, izmantojot lielu nelineāru diferenciālu un algebrisku vienādojumu sistēmu, kas realizēta uz rūpniecisko programmatūru EUROSTAG un ETAP bāzes.
3. Algoritmu un iekārtu testēšanas nolūkos izmantoti reālu avārijas procesu digitālo oscilogrammu ieraksti un aizsardzību testēšanas iekārtas FREJA un ISA DRTS.
4. Pētījumiem izveidota RA terminālu testēšanas specializētā programmatūra.
5. Aizsardzības ierīces uzbūvētas, izmantojot *Texas Instrument* procesorus un atbilstošo atklādošanas programmatūru.
6. Avārijas procesu digitālo ierakstu apstrādei izmantota programmatūra SMOKY2.

## PROMOCIJAS DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

1. Veikta izmantojamo asinhrono režīmu novēršanas metožu un paņēmieni analīze un definēti to trūkumi.
2. Sintezētas jaunās ARNA sistēmas, pierādītas to priekšrocības un realizēšanas iespējas pretavāriju automātikas struktūrā, kura apvieno lokālo un globālo sistēmu priekšrocības un ir spējīga funkcionēt GPS un sakaru kanāla atteikuma gadījumos, kas var būtiski samazināt globālo avāriju riskus.
3. Izstrādāta jauna metodika sarežģītu automātikas terminālu pārbaudei.
4. Lielo energosistēmu dinamiskas stabilitātes zaudējuma modelēšanas nolūkos pamatoti vienkāršotie varbūtiskie relejaizsardzības un automātikas darbības algoritmi un izstrādāta to verifikācijas metodika.
5. Sintezēts ARNA algoritms, kas nodrošina pareizo darbību sprieguma ķēdes bojājuma gadījumos.
6. Izveidota testēšanas procesu bibliotēka.
7. Veikta ARNA pārbaude sarežģītu elektromehānisku procesu apstākļos.
8. Pierādīta iespēja ETAP 12.5 programmatūru izmantot energosistēmas režīmu modelēšanā ar nolūku pārbaudīt automātikas terminālu.

## PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

Promocijas darba praktiskā nozīme izpaužas šādi:

1. Piedāvāto relejaizsardzību, automātikas terminālu struktūru un jauno pārbaudes metodiku var lietot daudzu terminālu sintezē, kā arī lai paaugstinātu terminālu drošuma līmeni.
2. Piedāvāts termināls, kas realizē ARNA, kuru plāno ražot Latvijā un izmantot Baltijas valstīs. Sintezētā, pārbaudītā un izgatavotā termināla struktūra nodrošina ARNA uzdevumu atrisināšanu. Eksperimenti apliecina pieņemto risinājumu efektivitāti un pareizību.
3. Izstrādāto virtuālās testēšanas metodiku un programmatūru var izmantot, lai pārbaudītu esošo relejaizsardzības elementu drošumu, ātrdarbību un selektivitāti.
4. Izstrādātā virtuālās testēšanas metodika izmantota Eiropas kopienas finansēto projektu PEGASE un ICOEUR, kā arī Valsts pētījumu programmu Enerģētikā izpildei.

## AIZSTĀVĒŠANAI IZVIRZĪTAS PAMATNOSTĀDNES

1. Piedāvātas un patentētas jaunas, efektīvas ARNA struktūras un algoritmi. Pierādītas to priekšrocības, salīdzinot to izmantošanu Latvijā un ārzemēs.
2. Piedāvāts ARNA darbības algoritms, kas ir nejutīgs pret sprieguma ķēžu bojājumiem.
3. Piedāvāta testēšanai piemērota relejaizsardzības un automātikas terminālu struktūra ar papildus ciparu ieejas interfeisu.
4. GPS un optisko sakaru kanālu kopīga izmantošana mērījumu sinhronizācijas un sakaru kanālu testēšanas nolūkos.
5. Uz programmatūras ETAP un specializētās programmatūras bāzes sintezēts pārbaudes aparatūras testēšanas un verifikācijas komplekss.

## AUTORA PERSONISKAIS IEGULDĪJUMS VEIKTAJOS PĒTĪJUMOS

Aizstāvamo pamattēžu pamatā ir idejas, kas radītas ciešā sadarbībā ar zinātniskajiem vadītājiem profesoru Antanu Sauhatu un asociēto profesoru Andreju Utānu, kā arī ar *Dr. sc. ing.* Jevgēniju Kucājevu. Aizstāvamo promocijas darbu daļēji var uzskatīt par profesoru ilggadējas darbības turpinājumu. Risku vadības uzdevums risināts Eiropas kopienas finansēta projekta ietvaros kopā ar profesoru Antanu Sauhatu un *Dr. sc. ing.* J. Kucājevu. Ideju pārbaude, modeļi, sintezētās programmatūras, skaitliskie eksperimenti un to analīze, rekomendācijas efektīvai lietošanai pieder personiski promocijas darba autoram.

## PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

Promocijas darbs tika prezentēts un apspriests dažādu līmeņu semināros un konferencēs:

1. The 6<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Control Technologies, Kaunas University of Technology Faculty of Electrical and Control Engineering, May 5–6, 2011.
2. The 52<sup>nd</sup> International Scientific Conference of Riga Technical University, Section of Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga October 2011.
3. The 13<sup>th</sup> International Scientific Conference Electric Power Engineering (EPE 2012), Czech, BRNO, May 23–25, 2012.
4. Riga Technical University 53<sup>rd</sup> International Scientific Conference and 1<sup>st</sup> World Congress of RPI-RTU Engineering Alumni on Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga 10–12 October 2012.
5. The 54<sup>th</sup> International Scientific Conference of Riga Technical University, Section of Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga 14–16 October, 2013.
6. The Ninth International Conference on Systems, ICONS 2014, Nice, France, February 23–27, 2014.
7. 18<sup>th</sup> Power Systems Computation Conference, PSCC 2014, POLAND, Wroclaw, August 18–22, 2014.
8. 9<sup>th</sup> International Conference on Critical Information Infrastructures Security, CRITIS 2014, Cyprus, Limassol, October 13–15, 2014.



## PUBLIKĀCIJAS

*Ir publicēti šādi raksti par pētāmo disertācijas tēmu:*

1. 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.
2. 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.
3. Dolgicers, A., **Antonovs, D.** Internal Winding Fault Protection for Shunt Reactors // *RTU zin. raksti*. 4. sēr., *Enerģētika un elektrotehnika*. – 28. sēj. (2011), 43.–47. lpp.
4. Sauhats, A., Utāns, A., Pašņins, G., **Antonovs, D.** Out-of-Step Relays Testing Procedure // *RTU zin. raksti*. 4. sēr., *Enerģētika un elektrotehnika*. – 29. sēj. (2011), 9.–14. lpp.
5. 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.
6. Sauhats, A., **Antonovs, D.**, Dolgicers, A., Petričenko, R., Kucajevs, J. Dynamic Security Assessment and Risk Estimation. Digest Book: Riga Technical University 54<sup>th</sup> International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, 14–16 October, 2013. Riga: RTU Press, (2013), 56.–58. lpp.
7. Sauhats, A., Utāns, A., Dolgicers, A., **Antonovs, D.**, Pashnin, G. Out-of-Step Protection System Testing by Means of Communication Network Emulator. No: The Ninth International Conference on Systems (ICONS 2014), Francija, Nice: IARIA XPS Press, 2014, 166.–171. lpp.
8. **Antonovs, D.**, Sauhats, A., Utāns, A., Svalovs, A., Bochkarjova, G. Protection Scheme against Out-of-Step Condition Based on Synchronized Measurements, The 18<sup>th</sup> Power Systems Computation Conference (PSCC14), September, Wrocław, Poland, 2014, 8 lpp.

*Ir iegūti šādi patenti:*

1. Sauhats, A., **Antonovs, D.**, Svalovs, A., Kucajevs, J. Patents **LV 14375 B**, 12.05.2011., Nesinhronas gaitas automātikas ierīce.
2. **Antonovs, D.**, Sauhats, A., Utāns, A., Bieļa, E. Patents **LV 14832 B**, 05.07.2013.:
  - Asinhronās gaitas novēršanas automātikas ierīce;
  - Asinhronās gaitas novēršanas automātikas paņēmieni.
3. **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 paņēmieni.

*Grāmatas nodaļas autors:*

1. U. Häger, C. Rehtanz, N. Voropai (Eds.), Monitoring, Control and Protection of Interconnected Power Systems (*Dynamic Security Assessment and Risk Estimation* (Chapter 14), A. Sauhats, E. Kucajevs, **D. Antonovs**, R. Petrichenko, 255–279 pp.), Springer, 2014, 391 p.

## PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tas satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus un rekomendācijas turpmākam darbam, kā arī literatūras sarakstu. Darba kopējais apjoms ir 142 lappuses, kurās ietverti 78 attēli un 34 formulas. Literatūras sarakstā norādīti 125 izmantotās literatūras avoti.

*Pirmā nodaļa* ir veltīta energosistēmu struktūras, to režīmu, RA un automātikas un informācijas apmaiņas principu pētīšanai. Ir analizēti dažādos gados notikuši energosistēmas sabrukumi, lai izprastu seku bīstamību un ekonomisko zaudējumu apjomus. Analizējot sabrukumus, identificēti dažādi faktori, kas tos iniciē un ļauj izplatīties, radot katastrofālus zaudējumus, kā arī formulēti pamatvirzieni, kuros jāveic pētījumi, lai uzlabotu esošo situāciju. Tāpat ir veikts energosistēmas „N-1” drošuma kritērija kritiskais apskats, veicot tā trūkumu, nepilnības un ierobežojumu analīzi. Uzmanība ir pievērsta arī riska ideoloģijas formēšanai un analīzei. Ir piedāvāts varbūtiskās vadības kritērijs, kas paredzēts peļņas maksimizēšanai, ievērojot sistēmas struktūru, parametrus un gadījuma lielumus. Tomēr pamatā uzmanība ir pievērsta asinhronā režīma novēršanas automātikas darbības algoritmu principu izvērtēšanai – gan lokāla tipa automātikai *Alstom* (P54x), *Toshiba* (GRL100), *Siemens* (SIPROTEC 5), *SEL* (311L), *ABB* (REL 512), *AJAP-M* un *AGNA*), gan teritoriālai automātikai (PMU, WAMS). Rezultātā ir noformulēts problēmu loks, kurām ir nepieciešami noteiktie uzlabojumi un attīstība, kas ir aplūkota nākamajā nodaļā.

*Otrajā nodaļā* aplūkotas jaunās asinhronā režīma novēršanas automātikas ierīces realizācijas iespējas. Vispirms ir veiktā esošās asinhronā režīma novēršanas automātikas (ARNA) analīze un definēti nepieciešamie papildinājumi. Tāpat ir izstrādāti un patentētas trīs jaunās ARNA ierīces un divi paņēmieni, kas ļauj būtiski uzlabot precizitāti un selektivitāti, kā arī palielināt iespējamo iedarbju loku. Ir dots viens realizācijas piemērs ARNA shēmai ar N ģeneratoriem, lai paskaidrotu izklāstītos principus. Analizējot mūsdienīgas aizsardzības terminālus un esošās modernās tehnoloģijas, ir analizēta ARNA funkcijas realizācijas iespēja aizsardzības terminālā, izmantojot esošos garendiferenciālās aizsardzības ātrdarbīgos kanālus un GPS sinhronizāciju. Tāpat ir piedāvāti ARNA kontroles un bloķēšanas algoritmi, piemēram, ARNA darbība sprieguma ķēžu bojājumu gadījumā.

*Trešajā nodaļā* ir veikta energosistēmas sabrukumu un ARNA darbības modelēšana, lai pārbaudītu piedāvāto risinājumu efektivitāti un precizitāti. Tātad tiek modelēti dinamiski pārejas procesi, izmantojot Latvijas pārvades sistēmas modeļus ar kaimiņsistēmām, kas ir realizēti modernā programmatūrā ETAP 12.5. Pamatā uzmanība veltīta ARNA darbībai un efektivitātei šajos procesos, veicot salīdzinājumu ar „AGNA”. Nodaļā ir pamatoti vienkāršotie iespējamie relejaizsardzību un automātikas darbības algoritmi un izstrādāta to verifikācijas metodika, lai modelētu lielo energosistēmu dinamiskās stabilitātes zudumu.

*Ceturtnā nodaļā* veltīta energosistēmu relejaizsardzības un pretavārijas automātikas ierīču iestatījumu izvēles un verifikācijas problēmām, ka arī sakaru kanālu problēmu pētīšanai. Piedāvāto iestatījumu izvēles un verifikācijas algoritmu var izmantot plašam relejaizsardzības un automātikas klāstam. Kā atsevišķs pētījumu loks ir aplūkota jaunās automātikas darbību analīze dažādos energosistēmas režīmos, lai pierādītu piedāvāto bloķēšanas un nostrādes algoritmu pietiekamību un funkcionalitāti.

# 1. ENERGOSISTĒMAS ASINHRONĀIS REŽĪMS, SABRUKUMI UN TO NOVĒRŠANAS AUTOMĀTIKA

Asinhronais režīms (AR) ir viens no visbīstamākajiem režīmiem energosistēmā. Šis režīms ir saistīts ar paralēlas darbības stabilitātes izjaukšanu elektrostacijās vai atsevišķos ģeneratoros, kas var izraisīt energosistēmas elementu bojājumus, patērētāju elektroapgādes traucējumus, kā arī radīt nozīmīgus ekonomiskus un sociālus zaudējumus. Par AR galvenajām pazīmēm tiek uzskatītas stabilas, periodiskas strāvas, jaudas un sprieguma svārstības elektropārvades līnijās un energosistēmu objektos, kā arī frekvenču starpības rašanās starp atsevišķām energosistēmas daļām, kas traucē sinhronu darbību, neskatoties uz elektriskā savienojuma saglabāšanu [1], [2], [3].

Ilgstošs AR rada būtiskas negatīvas sekas (piemēram, ģenerējošās iekārtās bojājumus; stabilitātes režīmu pārkāpumus; patērētāju, kas jutīgi uz frekvences un sprieguma līmeņa izmaiņām, apgādes pārtraukumus). Tāpēc ir ļoti nozīmīga savlaicīga, selektīva un droša AR atpazīšana, kuras mērķis ir to ātrāk likvidēt un atgriezties normālā režīmā.

Energosistēmu režīmu un darbības analīze ir parādījusi, ka sinhronā režīma izjaukšana var notikt šādu iemeslu dēļ:

- elektroenerģijas pārvades neiespējamība uz pienākošo sistēmu pēc vienas vai vairāku elektropārvades līniju atslēgšanās,
- ģenerējošās jaudas deficīts, kas saistīts ar vienu vai vairāku ģeneratoru atslēgšanos,
- nepietiekošs pieslēgtas frekvences automātikas atslodzes slodzes apjoms.

Tirgus regulējošo mehānismu izmantošanas un attīstības dēļ elektrisko tīklu jaudas pārvades kļuvušas tuvākas stabilitātes robežu vērtībām. Sabrukumu risks pēdējos desmit gados ir būtiski pieaudzis, pateicoties ne tikai elektroenerģijas brīvā tirgus ietekmei. Otrs būtiski ietekmējošais faktors ir saistīts ar atjaunojamās enerģijas apjoma un uzstādītās jaudas pieaugumu. Pieauguma pamatā ir saprotama vēlme samazināt ietekmi uz klimata izmaiņām, kas izraisīja atjaunojamās enerģijas izmantošanas pieaugumu. Aplūkotie energosistēmu attīstības procesi daudzos gadījumos rada nepieciešamību pārvadīt enerģiju lielos attālumos. Bet pārvades spējas vienmēr ir ierobežotas.

Neapšaubāmi, paralēlas darbības stabilitāte avārijas gadījumā tiek uzturēta, pateicoties sinhronizējošo spēku ietekmei. Arī šajā gadījumā tiek izmantotas pretavārijas automātikas (PA) ierīces, kuras nostrādā avārijas sākuma momentā, atslēdzot daļu no elementiem vai ģeneratoriem, daļu no slodzes un veic energosistēmu sadalīšanu nesinhronās daļās. Tādas ierīces sauc par stabilitātes izjaukšanas/novēršanas automātiku, kas palīdz novērst daudz smagu avāriju un tajā pašā laikā palielināt pārvadāmo jaudu elektropārvades līnijās normālā (pirms avārijas) režīmā. Bet ir gadījumi, kad stabilitātes sabrukšanas novēršana ar PA palīdzību ir neiespējama vai ekonomiski neizdevīga. Šajos gadījumos izmanto ARNA, kas ietekmē sistēmu sadalīšanu.

Energosistēmas režīmi, kas rodas attīstoties AR, ir sarežģīti no matemātiskā apraksta un simulācijas viedokļa, un AR pētījumi gandrīz vienmēr jāveic nepilnas informācijas apstākļos. Eksploatācijā ir bijuši gadījumi, kad tika fiksēti vairāku ģeneratoru AR. Daudzfrekvenču AR parasti ir ļoti bīstamas sekas, jo resinhronizācijas varbūtība ir niecīga, bet tipveida ARNA ir neefektīva. Tipveida ARNA ierīču izmantošana daudzfrekvenču AR likvidēšanai var notikt tikai dažos apstākļos. Piemēram, ja saite starp divām asinhronām energosistēmas daļām un trešo daļu ir samērā vāja. Turklāt dalīšanas automātikai jāsadala komplicētā energosistēma sabalansētās daļās, kurām būtu maksimāla resinhronizācijas spēja un ģenerācijas-patēriņa bilance. Neapšaubāmi, ARNA izvietojuma vietas izvēle ir svarīgs un komplicēts uzdevums, kā arī tās darbības organizācija, ievērojot jutīguma pakāpi noteiktiem ekvivalento ģeneratoru AR un nejūtīgiem pret citu ģeneratoru AR, t. i. nodrošināt selektivitāti.

Daudzfrekvenču AR esamības kontroli un likvidācijas sistēmas realizāciju var veikt mikroprocesoru iekārta, kas definē leņķi starp ekvivalento ģeneratoru EDS vektoriem un prognozē stabilitātes saglabāšanas iespēju sadalītajās daļās, izmantojot speciālus algoritmus.

Lai izprastu AR sekas, pietiek aplūkot sabrukumus, kuri pēdējos gados notikuši pasaulē [4]–[11]. No aplūkotajiem piemēriem var konstatēt, ka sabrukumu sekas ir mainīgas gan pēc apjoma, gan pēc ilguma, gan iesaistīto cilvēku skaita utt. Acīmredzams, ka universālas pieejas, kā izvairīties no sabrukumiem nevar būt. Parasti sabrukumi netiek izraisīti viena notikuma dēļ, t. i. parasti notiek kāda notikumu virkne. Praksē nav zināmi gadījumi, kad avārijas notiktu viena notikuma dēļ adekvātā un drošā tīklā (*Adequacy and Security*). Analizējot notikušos sabrukumus, var secināt, ka vairākums bija saistīts ar AR, kas sekmēja avārijas mēroga paplašināšanos.

Ir jāsaprot tas, ka aizsargāties no dabas stihijām ir gandrīz neiespējami, tieši tāpēc uzņēmumiem jābūt gataviem ātri un efektīvi likvidēt sekas, t. i. veikt korektīvus pasākumus.

Šajā darbā galvenā uzmanība tiek pievērsta sabrukumu seku novēršanai, izmantojot ARNA, kas būtiski samazina šīs sekas, veicot bīstamās energosistēmas daļas(-u) atslēgšanu. Protams, selektivitāte un ātrdarbība ir vienas no galvenajām prasībām, kas ir izvirzītas modernām aizsardzības sistēmām. Mūsdienīgās PA sistēmās ir ieguldīti lieli līdzekļi, kas samazina sabrukumu iespējamību, veicot dažāda veida vadības iedarbes.

Ļoti svarīgi atzīmēt, ka automātikas darbība sākās, jau iestājoties bīstamai situācijai. Šo situāciju varbūtības samazināšanai energosistēmai ir jāizpilda drošuma nosacījumi režīma un struktūras izvēles stadijā. Lai to izdarītu, plaši tiek lietots drošuma kritērijs „N-1”. Drošuma kritērijs „N-1” eksistē jau ilgus gadus energosistēmas vadībā lietojuma vienkāršības dēļ. Tomēr līdz šim brīdim tas nav stingri un precīzi definēts. Tas rada būtiskas grūtības apvienoto energosistēmu vadības principu izstrādē un saskaņošanā. Lai pierādītu teikto, jāaplūko dažas „N-1” drošuma kritērija definīcijas [12]–[15].

Neapšaubāmi „N-1” kritērijam ir nozīmīga loma energosistēmas vadībā, bet tam piemīt virkne trūkumu [12]:

- Nav vienotas „N-1” kritērija pieejas, īpaši gadījumos, kas skar energosistēmas starpsavienojumu posmus.
- „N-1” kritērija neatbilstības gadījumā nav saskaņotas metodikas aizsardzības plāna (*Defence Plan*) izstrādei (ģenerācijas palielināšana/samazināšana, slodzes atslēgšana).
- Kaimiņvalstu datu apmaiņas process neļauj veikt „N-1” kritērija „uzturēšanas” nosacījumus informācijas nepilnības dēļ, kas savukārt izraisa nenoteiktības lēmumu pieņemšanas procesā.
- „N-1” kritērijs var atšķirties pat vienas sistēmas dažādās zonās.
- Energosistēmas vadības struktūru pamatā atšķirības (centralizēta, decentralizēta, vertikāla, horizontāla utt.) izraisa būtiskus sarežģījumus „N-1” kritērija uzturēšanā.
- Starpsavienojumu līniju jaudas (caurlaides spēja) ir ierobežotas vēsturiskās attīstības ietekmju dēļ.
- Netiek precīzi definēts laika intervāls, kurā sistēmai jāatgriežas normālā režīmā pēc „N-1” kritērija iestāšanās, lai tā varētu atkal pretoties jaunai perturbācijai.
- Pastāv apvienoto energosistēmu ideoloģijas atšķirības (*Nordel, UCTE* utt.).
- „N-1” kritērija netiek izpildīts dažos gadījumos (piem., Vācijā).
- Nekontrolējamas jaudas plūsmas ietekmē „N-1” kritēriju (Dānija un Vācija).
- Primārās rezerves jaudas apjoms ir nemainīgs un netiek optimizēts atbilstoši pastāvošajam patēriņam.
- „N-1” drošuma kritērijs pēc noteikumiem var būt izmainīts „N-k” vai „N-2”, kas savukārt pierada „N-1” kritērija nepietiekamību.

- Pastāv apvienotās sistēmas draudi, ja viena no tās sastāvā esošām sistēmām nespēj nodrošināt „N-1” kritērija izpildi.
- „N-1” kritērijā neievēro sekas, kā arī RA un PA darbības.

Esošo trūkumu izklāsts stimulē veikt izmaiņas energosistēmu vadības kritēriju jomā, izstrādājot jaunus kritērijus un ideoloģijas, kas spēs pretoties bīstamiem režīmiem un saglabāt energosistēmas stabilitāti (gan statisko, gan dinamisko), efektīvi un racionāli veicot režīmu vadību un izmantojot varbūtiskas pieejas.

Mūsdienās riska novērtēšana un vadība tiek plaši pielietota, intensīvi pētīta un attīstīta [16]. Risks skar daudzus sarežģīto sistēmu funkcionēšanas aspektus (piemērojot enerģētikas nozarei), ieskaitot [17]:

- kvalitatīvu drošuma novērtēšanu ģenerācijas, pārvades un sadales objektos,
- kritēriju izvēli energosistēmas plānošanā un vadībā,
- optimālā kompromisa starp sistēmas risku un ekonomisko efektu meklēšanu lēmumu pieņemšanas procesā,
- elementu novecošanas atteižu vadību,
- rezerves iekārtu stratēģiju izstrādi un izvēli,
- drošuma palielināšanas iekārtu tehnisko apkopi un remontu,
- slodzes (patērētāja) riska vadību,
- operacionālo risku monitoringu,
- energoapgādes pārtraukuma izmaksu novērtēšanu...

Riska vadība iekļauj sevī vismaz trīs galvenos aspektus:

- kvantitatīva riska novērtējuma veikšanu,
- riska samazināšanas pasākumu noteikšanu,
- pieņemamā riska līmeņa pamatošanu.

Smagākās energosistēmas avārijas, kas ir notikušas pēdējos gados, ļauj konstatēt, ka viena gadījuma drošuma kritērijs („N-1”) vairs nevar uzturēt energosistēmas režīma drošumu pieņemamā līmenī. Neapšaubāmi, uzņēmumiem nav izdevīgi izmantot stingrākus drošuma kritērijus („N-2” vai „N-3”) sistēmas plānošanā, jo tie ievērojami palielina nepieciešamo investīcijas apjomu. Acīm redzams, ka perspektīvākā alternatīva ir riska vadības ideoloģijas pielietošana plānošanā, projektēšanā (alternatīvu izstrāde un izvēle), tehniskā apkopē un remontā, reālā režīmu vadībā, nodrošinot sistēmas risku „uzturēšanu” optimālās robežās. Svarīgi izprast, ka riskam ir gan pozitīvā (peļņa), gan negatīvā puse (zaudējumi). Ir daudz veidu, kā sasniegt vadības mērķus, izmantojot atbilstošās metodes. Eksistē ļoti daudz galvenā termina „Risks” definīcijas [18]–[23]. Apkopojot riska definīcijas, var izdalīt divas pazīmju grupas [19], [24]:

1. Varbūtība, nenoteiktība, iespēja/iespējamība.
2. Sekas, zaudējumi, izmaksas.

Rezultātā veicot termina „Risks” komponentu (varbūtība un sekas) analīzi, risku pirmajā tuvinājumā var izteikt kā funkciju:

$$R = P \cdot C, \quad (1.1)$$

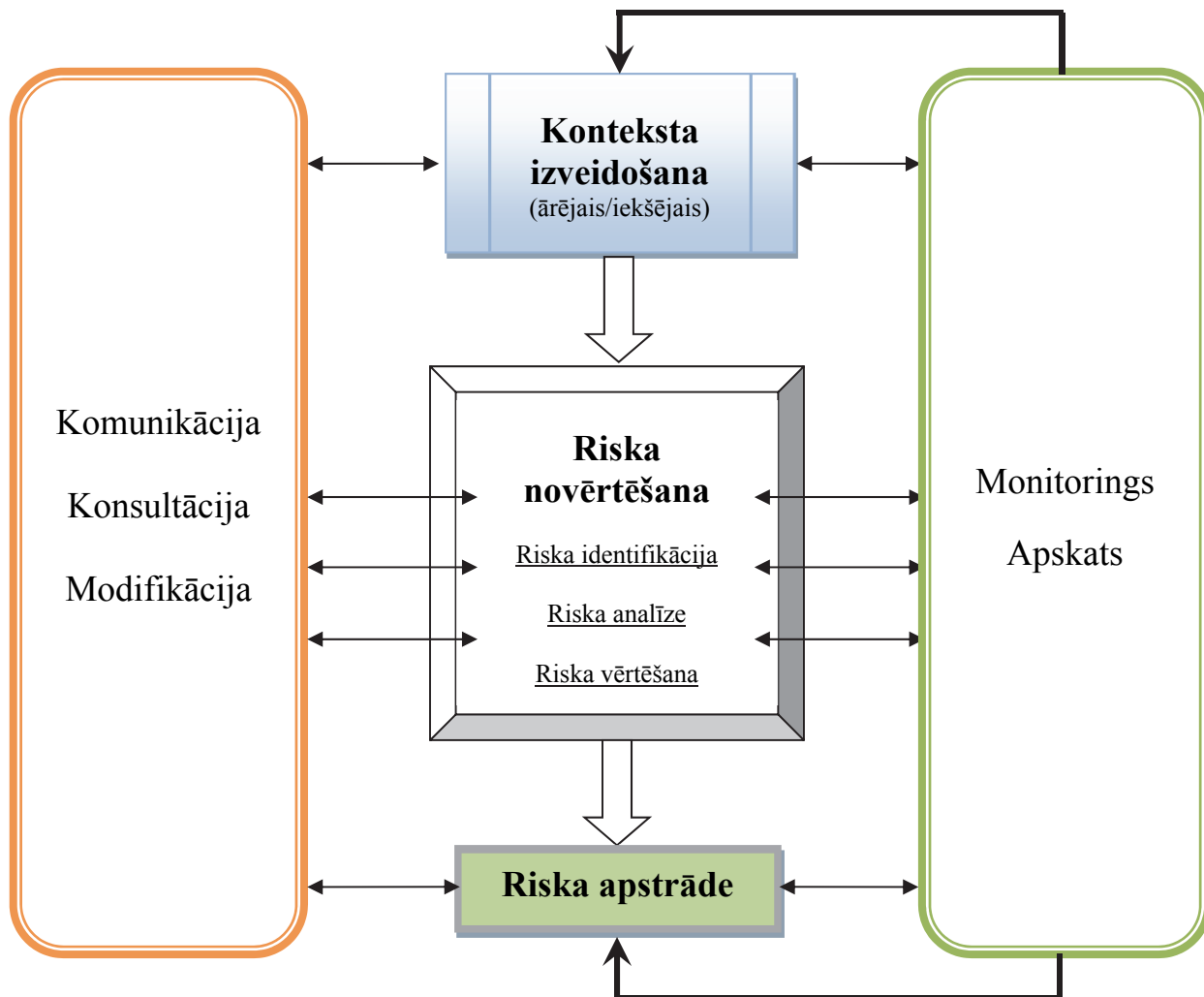
kur  $P$  – ir varbūtība,  $P \in [0, 1]$ ;

$C$  – ir sekas, izteiktas naudas vērtībā, €;

$R$  – ir risks, €.

Šo divu komponentu aprēķins ir ļoti komplicēts uzdevums. It īpaši šis uzdevums kļūst neatrisināms milzīgas energosistēmas gadījumā, kad ietekmes faktoru, kontrolējamo

parametru, iespējamo konfigurāciju skaits pārsniedz simts tūkstošus, kā arī jāatceras par to, ka visi šie lielumi mainās laikā. Tāpēc jāveic uzdevuma ierobežošana, lai varētu realizēt riska novērtēšanu un vadību. Viena no iespējamām riska novērtēšanas un vadības procesu struktūrām ir attēlota 1.1. attēlā. Riska vadības process palīdz lēmumu pieņemšanā, ņemot vērā nenoteiktību un nākotnes notikumu vai apstākļu iespēju (paredzēta vai neparedzēta) un to ietekmi mērķu īstenošanā.



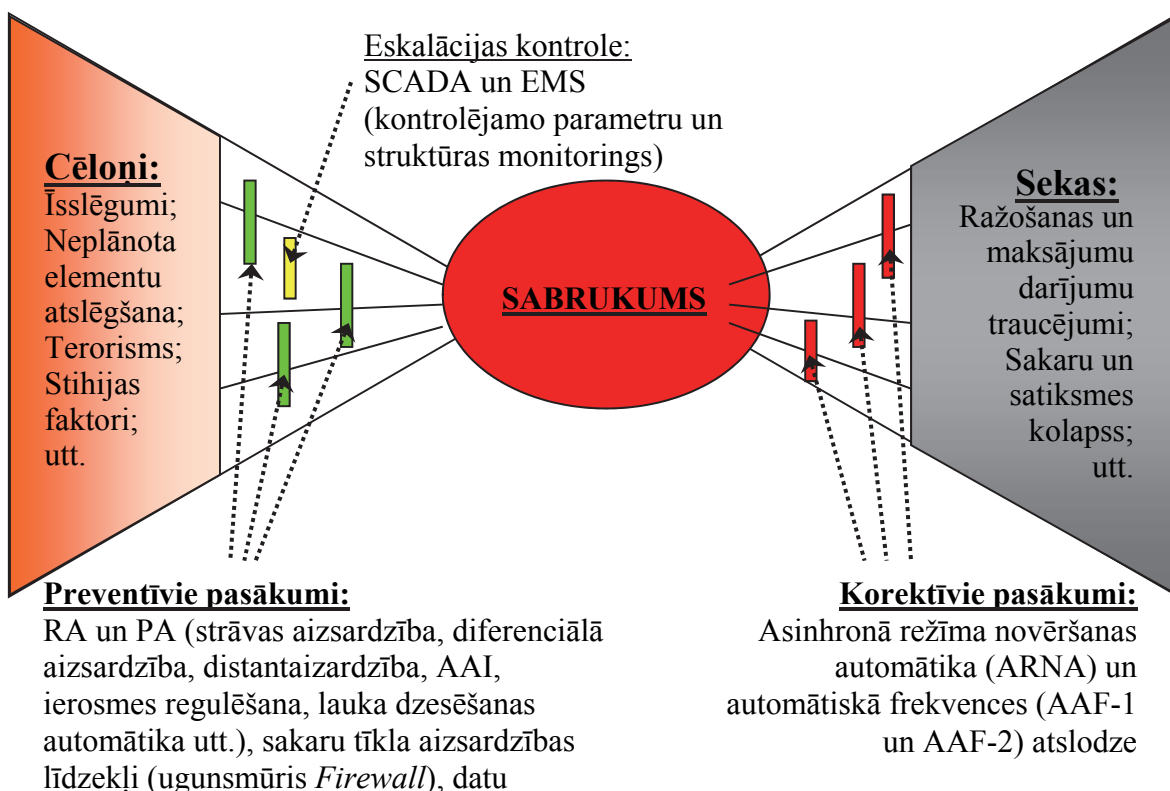
1.1. att. Riska novērtēšanas un vadības procesu struktūra [25]

Riska novērtēšana ir riska vadības procesa daļa, kas nodrošina strukturētu procesu, kas, savukārt, identificē iespējamo ietekmi uz mērķiem un analizē risku, izmantojot seku un to varbūtības izteiksmi, novērtējot, vai ir nepieciešama tālāka riska apstrāde. Riska novērtēšana ir process, kas sastāv no riska identifikācijas, analīzes un vērtēšanas (1.1. att.). Veids, kādā šis process ir realizēts, ir atkarīgs ne tikai no riska vadības konteksta, bet arī no metodes un tehnikas, kas izmantota riska novērtēšanai. Riska novērtēšanai var būt nepieciešama daudzdisciplināra pieeja, jo riski aptver plašu ceļoņu un seku diapazonu. Veicot riska analīzi, bieži jāsaskaras ar ievērojamām nenoteiktībām. Nenoteiktības izpratne ir nepieciešama, lai varētu veiksmīgi interpretēt un efektīvi pasniegt riska analīzes rezultātus. Nenoteiktības analīze, kas ir saistīta ar datiem, metodēm, modeļiem, tiek izmantota riska identifikācijā un analīzē. Vēl viena joma, kas cieši saistīta ar nenoteiktību analīzi, ir jutīguma analīze. Tā analīze ietver riska vērtības nozīmīguma un izmēra izmaiņu konstatēšanu, ja tiek izmainīti individuāli ieejas parametri. Tas ļauj identificēt tos datus, kuriem ir nepieciešama augstākā precizitātes pakāpe, un tos, kuri ir mazāk jutīgi un tāpēc mazāk ietekmē kopējo precizitāti.

Riska novērtēšana ir pilnīgi integrēta riska vadības procesā un ir cieši saistīta ar citām komponentēm. Riska novērtēšanas process vērsts uz faktoriem, kas varētu svārstīties laikā vai būtiski izmainīties, vai pat padarīt par nederīgu riska novērtēšanu. Šie faktori speciāli jāizvēlas patstāvīgam monitoringam, lai riska novērtēšanu varētu atjaunot tad, kad tās būtu nepieciešams. Riska novērtēšana var būt piemērota visos dzīves cikla posmos un parasti tiek pielietota dažas reizes ar atšķirīgiem detalizācijas līmeņiem (precizitāte), lai asistētu lēmumu pieņemšanas procesā. Ir jāsaprot, ka dzīves cikla fāzēm ir atšķirīgas prasības un atbilstoši tām ir attiecīgās tehnikas. Rezultātā var konstatēt, ka riska vadība ir ļoti komplicēts uzdevums, kas prasa visaptverošās zināšanas par objektu un procesiem, kas tajā notiek, kā arī par ārējiem ietekmes faktoriem. Tātad, lai veiksmīgi izmantotu riska novērtēšanu un vadību, ir jāspēj izvēlēties nepieciešamo riska novērtēšanas tehniku [26]. Riska novērtēšanas tehnikas var klasificēt dažādos veidos, lai saprastu to relatīvās priekšrocības un trūkumus.

Visas darbības, kas ir saistītas ar varbūtības izmaiņu, galvenokārt ir saistītas ar preventīviem pasākumiem: elementu stāvokļa kontroli, sistēmas monitoringu, plānoto remontu utt. Protams, eksistē arī korektīvie pasākumi, kas galvenokārt ir vērsti uz nevēlama notikuma seku minimizēšanu.

Lai dziļāk saprastu preventīvo un korektīvo pasākumu būtību, aplūkosim vienu piemēru, kas skar „Tauriņu” analīzes tehniku (*Bow Tie Diagram*) [26]. Šī tehnika attēlo problēmu un ļauj saprast esošās kontroles pakāpi. Tāpat, izmantojot šo tehniku, ir iespējams novērtēt esošās kontroles efektivitāti. Kā trūkumu var atzīmēt, ka „Tauriņu” metode nevar attēlot cēloņus, kas notiek vienlaicīgi un izraisa atbilstošās sekas. Izmantosim šo tehniku energosistēmas PA efektivitātes analīzei sabrukuma gadījumā (1.2. att.)



1.2. att. „Tauriņu” analīzes diagramma sabrukumam

Tātad par notikumu aplūkotajā piemērā ir ņemts energosistēmas sabrukums. Sākuma cēloņi var būt dažādi, piemēram, ilgstoši īsslēgumi, neveiksmīga automātiskā atpakaļieslēgšana (AAI), teroristiskie akti, hakeru uzbrukumi, dabas ietekmes utt. Tāpat eksistē dažāda veida relejaizsardzība (AR), PA un citi līdzekļi, kas tiek izmantoti kā preventīvi pasākumi, avārijas „attīstības ceļā”. Eskalācijas kontrole notiek dispečercentros,

izmantojot EMS un SCADA sistēmas [27]–[29]. Sabrukuma sekas var būt samazinātas, izmantojot dalīšanas automātiku (ARNA) un automātisko atslodzi pēc frekvences (AAF). Šajā darbā galvenā uzmanība tiek pievērsta ARNA.

Visas riskiem vēltītās publikācijas, zinātnisko pētījumu rezultātus, risku vadības metodes un paņēmienus var sadalīt divās lielās grupās [30], [31], kuru mērķi:

1. Samazināt nevēlamo, gadījumu un notikumu varbūtību, kas izraisa zaudējumus.
2. Samazināt zaudējumus, kurus rada šie notikumi.

Tāpat visas publikācijas var sadalīt divas grupās citā veidā. Pirmā grupa iekļauj publikācijas, kurās ir veikta risku identifikācija, analizēti iespējami riski un to sekas. Diemžēl to nav iespējams lietot, lai veiktu atbilstošo energosistēmas režīmu vadību vai tālāku struktūras attīstību. Šī publikāciju daļa vairākārt pārsniedz otro. Otrā daļa skar publikācijas, kurās ir piedāvāti skaitliski risinājumi, kurus var izmantot dažās sfērās, piemēram, banku, apdrošināšanas, loģistikas sfērā. Energosistēmas jomā arī ir samērā maz publikāciju, kurās ir sniegti risinājumi, ko var izmantot risku vadībā. Tātad ir konstatēts trūkums varbūtisko lēmumu energosistēmas risku vadībā. Šajā darbā tiek piedāvāts risinājums.

Tātad jāaplūko riski no statistisko lēmumu pieņemšanas teorijas viedokļa. Lai definētu riska jēdzienu, tika pieņemtās četras hipotēzes [30], [31]:

1. Sistēmas pamata mērķis ir iegūt peļņu  $R$  („sistēmas” jēdziens ir plašāks par energosistēmu).
2. Peļņa ir atkarīga no gadījuma  $X$  un nenoteiktiem  $X_n$  parametriem (gadījuma parametriem ir sadalījuma funkcija; nenoteiktiem tās nav).
3. Lēmumu pieņēmējs (eksperts) nenoteiktiem parametriem var izvēlēties subjektīvās varbūtības funkcijas [32]–[34] un ar šo paņēmieni pārvērst *nenoteiktus* parametrus gadījuma parametru klasē.
4. Sistēmas peļņa  $R$  ir atkarīga no neatkarīgiem no lēmuma pieņēmēja parametriem  $X$  un  $X_n$  un no izvēlētajām struktūrām  $\Sigma$  un struktūru parametriem  $\Pi$ .

Pamatojoties uz formulētām hipotēzēm, var apgalvot, ka sistēmas peļņa  $R$  var būt izteikta kā funkcija:

$$R = F_R(X, X_n, \Sigma, \Pi) = F(X, \Sigma, \Pi) \quad (1.2)$$

Funkcija  $F(X, \Sigma, \Pi)$  ir atkarīga no gadījuma parametriem  $X$  un, tādējādi var apgalvot, ka, zinot (izvēlies)  $\Sigma$  un  $\Pi$ , var izrēķināt peļņas  $R$  sadalījuma funkciju kā tās blīvuma funkciju. Protams, var izrēķināt arī sadalījuma funkcijas skaitliskās vērtības, piemēram, matemātisko cerību  $E(R)$ :

$$E(R) = \int_{\Omega} R(X, \Sigma, \Pi) d\varphi(X) \quad (1.3)$$

kur  $\varphi(X)$  – parametru  $X$  varbūtības sadalījuma funkcija;

$\Omega$  – parametru  $X$  eksistēšanas robežas;

$\int$  – daudzdimensiju Stiltesa-Lebega integrālis.

Vienkāršots uzdevums rodas formulas (1.3) izmantošanas gadījumā, t. i. peļņas (vai zaudējumu) matemātiskā cerība tiek pieņemta par risku un sistēmas vadības optimizācijas uzdevuma kritēriju. Šī gadījumā optimizācijas uzdevums var būt formulēt šādi [30], [31]:

$$(\Sigma, \Pi)_{opt} = \arg \max E(R(X, \Sigma, \Pi)) \quad (1.4)$$

kur  $(\Sigma, \Pi)_{opt}$  – optimālās maksimizējošās peļņas matemātisko varbūtību struktūras  $\Sigma$  un to parametri  $\Pi$ .

Aplūkotais optimizācijas uzdevuma formulējums no risku vadības problēmas puses sniedz iespēju izmantot vienu kritēriju – peļņas matemātisko cerību. Rezultātā tā lietošana ir izdevīgāka salīdzinājumā ar daudzkritēriāliem uzdevumiem.



Statistisko lēmumu teorija atļauj pamatot risku vadības kritēriju – lietderīguma funkcijas matemātisko cerību [32], [34], kas formulē vadības optimizācijas uzdevumus vienkritēriālā nostādņē, vienlaicīgi ņemot vērā nevēlamo notikumu varbūtību, to sekas un lēmuma pieņemēja vēlmi izvairīties no zaudējumiem, ja tie parādās pat retos gadījumos (energosistēmas sabrukumi).

Būtiskas grūtības ir saistītas ar avāriju (sabrukumu) zaudējumu novērtējumu. *Nepiegādātas enerģijas izmaksas nevar kalpot par vienīgo indikatoru risku vadības uzdevumos.* Zaudējumu novērtējumu definēšanā un pamatošanā var izmantot lēmumu pieņemšanas noteikumus, kas pārbaudīti energoobjektu projektēšanas praksē. Risku novērtējums ir konjugēts ar nopietnām grūtībām, ko izraisa matemātiskie (liels mainīgo skaits, sarežģīta struktūra utt.) un informācijas (nenoteiktu parametru un zaudējumu funkcijas reprezentācijas sarežģītības) aspekti. Risku novērtēšanā jāizmanto varbūtiskie energosistēmas modeļi un Montekarlo metode, lai veiktu izvēlēta algoritma un modeļa verifikāciju. Lai samazinātu aprēķinu apjomus un nepieciešamo aparātresursu izdevumus, var izmantot uzdevuma specifiku un atteikties no mazinformatīvo procesu modelēšanas (piem., normālie režīmi).

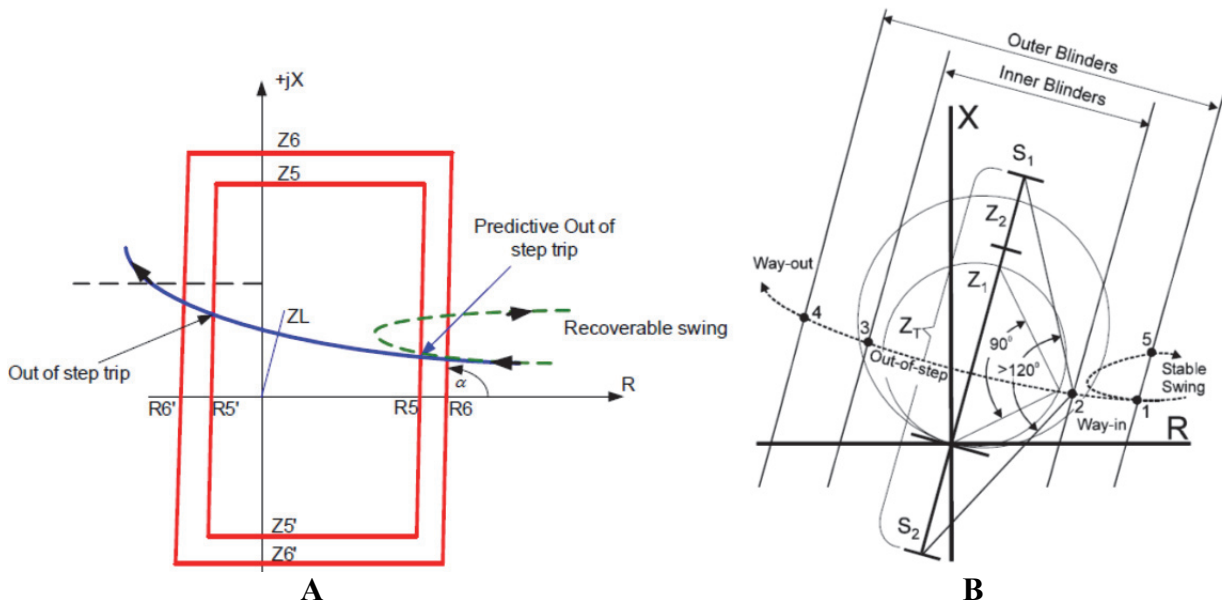
ARNA jānodrošina energosistēmu sadalīšana daļās, lai saglabātu tajā pietiekošu „dzīvotspēju”. Kā arī jāpalielina labvēlīgo avārijas iznākuma varbūtība, samazinot iespējamās sabrukuma sekas, jo eksistē samērā liela varbūtība, ka kaut viena sistēmas daļa paliks darbaspējīga. Ja aplūko šo procesu no risku viedokļa, tad pēc būtības tiek veikta risku sadalīšana. Rezultātā, efektīvi izmantojot automātikas potenciālus, var samazināt kopējo energosistēmas sabrukuma risku. ARNA izmantošana ir komplicēts uzdevums. Tā ierīces instalācija energosistēmās ir saistīta ar optimālas vietas, darbības principa, ieskaitot vadības iedarbi, un iestatījumu izvēli. Parasti, lai veiktu iestatījumu izvēli un pārbaudītu to efektivitāti, ir nepieciešams veikt milzīgu aprēķinu apjomu. Pieņemami risinājumi ir atkarīgi no dažiem energosistēmas režīmu nosacījumiem: no elektropārvades līnijas nozīmīguma, konfigurācijas, režīma ietekmes uz elektrostacijas stabilitāti, ietekmes uz nozīmīgākiem slodzes mezgliem un kopējo energosistēmas režīmo. Aprēķinu algoritma izvēli veic, pamatojoties uz varbūtējām dalīšanas sekām un stabilitātes izjaukšanu.

Visi režīma parametri ir cieši saistīti sava starpā, un, lai noteiktu AR, lieto dažādus parametrus un to kombinācijas. AR identifikācijai lieto sekojošus principus:

1. *Distantprincipis* – tiek aprēķināta pretestība  $Z = R + jX$  un šīs pretestības reālās daļas ātruma izmaiņas  $dR/dt$ . AR vektors  $Z$  ātri pārvietojas kompleksā plaknē ar  $R$  nozīmīgām izmaiņām un ar nenozīmīgām  $X$  pretestības izmaiņām. Aktīvās pretestības izmaiņas ātrums  $dR/dt$  ir atšķirīgs īsslēgumā un AR (svārstībās). Mērot  $dR/dt$  ir iespējams noteikt AR vai sinhrono svārstību eksistenci.
2. *Leņķu princips* – mērot (aprēķinot) leņķa lielumu starp elektriskajiem lielumiem, kas tiek modelēti ierīcē, ir iespējams noteikt leņķu stabilitātes traucējumus. Kontrolējamā leņķa pāreja pāri kritiskam lielumam nozīmē AR vai bīstamas svārstības.
3. *Pārejas procesu parametru pulsācija, kas raksturo AR* – AR pārejas procesu parametri (strāva, spriegums, jauda) periodiski mainās. Var izmantot šo lielumu izmaiņas.
4. *Divu vai vairāku frekvenču esamības noteikšana strāvas līknē ierīces uzstādīšanas vietā* – energosistēmas ģeneratori rotē ar dažādām frekvencēm, radot pārejas procesu nesinusoidālus parametrus. Harmoniskā analīze ļauj noteikt ģenerators rotēšanas frekvenci.

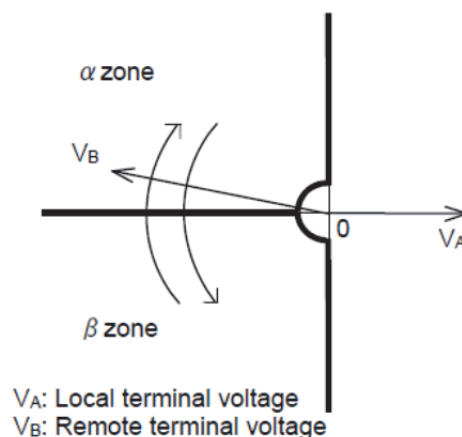
Pašlaik pasaulē tiek ražoti daudzi aizsardzības termināli (*ABB, Toshiba, SEL (Schweitzer Engineering Laboratories), Siemens, Alstom* u. c.). Lai izprastu aizsardzības terminālos realizētos principus, to ierobežojumus un trūkumus, jāveic tirgū piedāvāto iekārtu aizsardzības terminālu analīze. *Alstom P54x* aizsardzības zonas ir parādītas 1.3.(A) attēlā [35].

Jāatzīmē, ka *SEL* un *Siemens* ir līdzīgas aizsardzības zonas. *ABB* termināliem ir riņķveida raksturlīknes (1.3.(B). att.), bet princips ir līdzīgs jau minētajiem ražotājiem [36].



1.3. att. Asinhronā režīma identifikācijas raksturlīknes (zonas): A – Alstom, B – ABB

1980. gadā *Toshiba* izstrādāja un saka ražot pirmo pārvades līniju aizsardzību – strāvas diferenciālas aizsardzības ciparu releju. Pašlaik *Toshiba* ir izveidojusi jaunu releju, kurā ir realizēta ātrdarbīga aizsardzība (parasti 16 ms). Rakstā [37] ir piedāvātas dažāda veida aizsardzības, kuras ir apvienotas viena terminālā. Tajā skaitā ir arī ARNA. Šī aizsardzība darbojas tikai gadījumā, kad elektrisko svārstību centrs (ESC) šķērso aizsargājamo līniju un nodrošina enerģosistēmas sadalīšanu. ARNA algoritmā tiek salīdzinātas tiešās secības spriegumu fāzes lokālam un attālinātam termināliem. Nostrāde notiek, kad difference starp fāzes leņķiem pārsniedz 180 grādus. 1.4. attēlā ir parādīts darbības princips. Aizsardzība identificē AR, kontrolējot vektora  $V_B$  parēju no otrā kvadranta ( $\alpha$  zona) trešajā ( $\beta$  zona) vai otrādi.  $V_A$  vektors tiek izmantots par bāzes vektoru. Vēl viena īpatnība ir saistīta ar to, ka  $V_B$  vektoram jāpaliek kvadrantā (II vai III) 1,5 periodu laikā, lai izslēgtu TV pārejas procesu ietekmi.



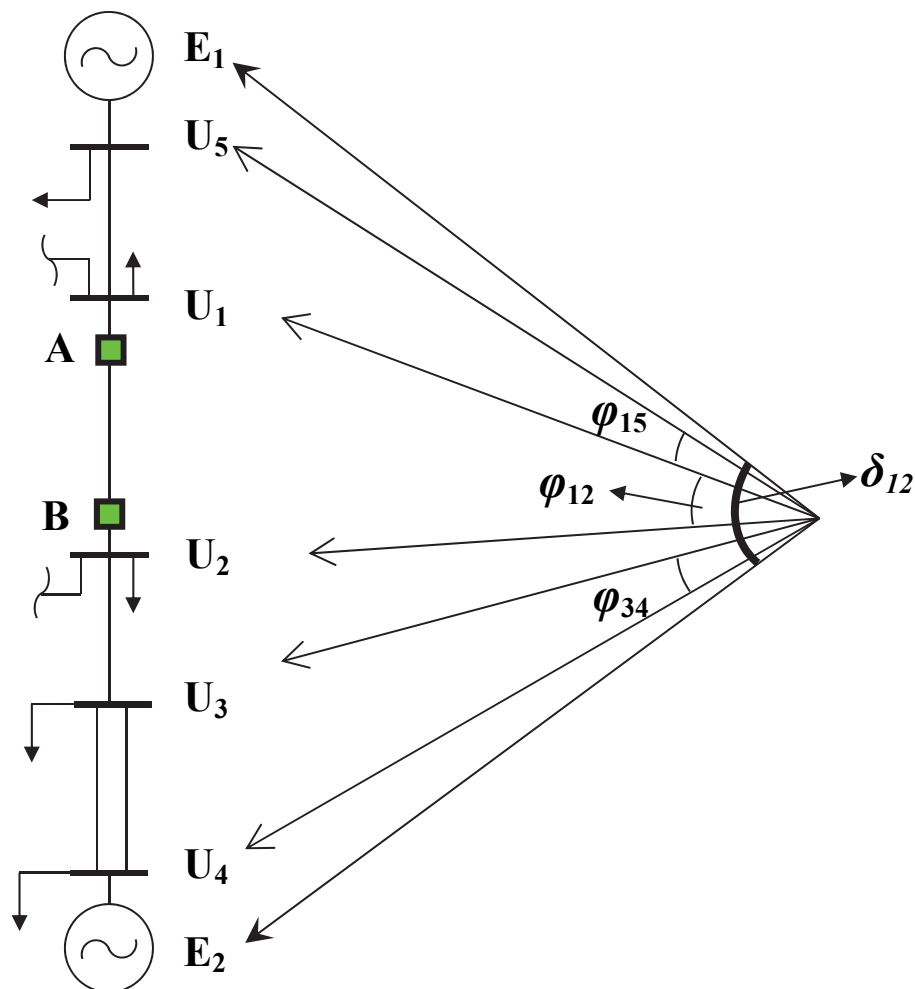
1.4. att. ARN funkcijas darbības princips [38]:

$V_A$  – lokāla termināla spriegums;  $V_B$  – attālināta termināla spriegums

Veicot aplūkoto aizsardzību analīzi, ir konstatēti daži trūkumi. Galvenokārt tie ir saistīti ar iestatījumu izvēli un nostrādes laiku. Iestatījumu izvēle ir komplicēts uzdevums, kas saistīts ar iespējamo režīmu kopas pētīšanu. Protams, releju iestatījumiem jābūt saskaņotiem sava

starpā, lai nodrošinātu selektivitāti. RA un PA darbību saskaņošana ļauj izvairīties no nekontrolējamās sadalīšanas un tā sekām.

Aplūkojot enerģosistēmas aizsardzības terminālu izvietojumu (piemēram, A un B, (1.5. att.)), var secināt, ka pamatā tie aizsargā vienu elementu (līniju, transformatoru utt.). Rezultātā var konstatēt, ka tie kontrolē lokālus parametrus (kopnes spriegumus, līnijas strāvas), un, izmantojot šos mērījumus, tiek pieņemts lēmums par atbilstošās vadības iedarbes realizāciju.



1.5. att. Vienkāršota enerģosistēmas struktūra un režīma parametri

Tāpat ir iespējami gadījumi, kad impedance var mainīties lēcienveidīgi, ja pēkšņi tiek atslēgts kāds elements (mainās topoloģija un jaudas plūsmas). Ir skaidrs, ka lielākā daļa no termināliem „gaida”, kamēr ESC iekļūst aizsargājamā zonā. Vēl noteiktā veida laika aiztures AR identificēšana var nelabvēlīgi ietekmēt avārijas seku izplatīšanos, jo divu frekvences AR var pārvēsties par daudzfrekvenču AR. Tāpat sprieguma pazušanas gadījumā *Toshiba* terminālu kopnes ARN funkcija tiek bloķēta divos terminālos. Vēl viens aspekts ir sakaru kanāla atteices, kuru dēļ termināli gandrīz pilnībā zaudē savu funkcionalitāti.

Atsevišķi izdalīsim vēl vienu, būtībā – galveno problēmu, kas ir saistīta ar kontrolējamajiem leņķiem. Aplūkotā aizsardzība kontrolē lokālo apgabalu (A un B (1.5. att.)), kas parasti aptver vienu līniju. Piemēram, *Toshiba* princips (1.4. att.) kontrolē leņķi  $\varphi_{12}$  starp spriegumiem  $U_1$  un  $U_2$ , un reaģē gadījumā, ja tas pārsniedz 180 grādus [38]. AR var sākt eksistēt pirms tam. Bet ir jāgaida, kamēr tas tiks identificēts un tiks veikta enerģosistēmas sadalīšana. Ir zināms, ka laiks ir viens no kritiskajiem faktoriem, kas var izraisīt katastrofālas sekas, ja AR netiks

savlaicīgi patraukts. Tātad jāpaplašina kontrolējama zona, piemēram, 1.5. attēlā tās varētu būt kopnes  $U_4$  un  $U_5$ .

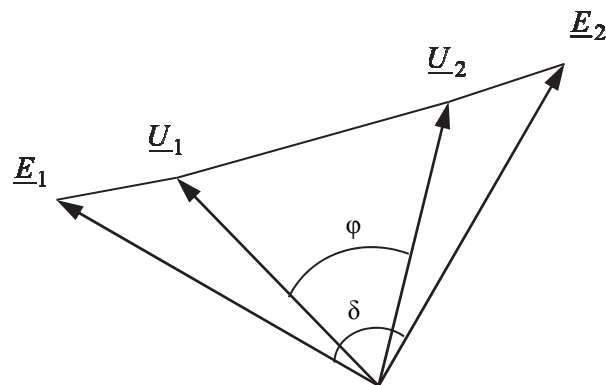
Mūsdienīgas drošuma prasības virza ARNA jomas attīstību. Rezultātā uz mikroprocesoru bāzes ir radītās ierīces, piemēram, „AJIAP-M” [39], [40] un „AGNA” [41], kas ļauj realizēt plašāku kontroles zonu (1.5. att.).

„AJIAP-M” ierīces pašlaik tiek lietotas kā PA elements Krievijas apvienotajā energosistēmā. Ierīce nodrošina kontrolējamo strāvu un spriegumu ieeju un atbilstošo režīmu parametru kontroli. Ierīces darbības princips balstās uz divu ekvivalento ģeneratoru AR identifikācijas algoritmu, kas izmanto spriegumu vektoru kustības raksturu un ESC identifikāciju aizsargājamajā zonā. Aprēķinos izmanto tiešās secības spriegumu, pamata zara tiešās secības strāvas un papildzara fāzes „A” strāvu, kā arī atbilstošās elektropārvades pretestības. Vienlaikus ierīces aprēķina leņķi starp vektoriem un slīdes zīmi starp energosistēmas daļām. Ierīcei selektivitāti nodrošina ESC kontrole aizsardzības zonā.

Ierīcē ir trīs pakāpes, un katra pakāpe nodrošina izejas signālu formēšanu, kas atbilst pārpaliekošajai un deficītajai daļai. Pirmā pakāpe ir ātrdarbīga un nostrādā intervālā, kad notiek pārejas process AR sākumstadijā līdz 180 grādiem. Nākamo pakāpju nostrāde notiek ar laika kavējumu, kas atbilst dažiem asinhroniem apgriezieniem. Pakāpes lieto pēc kārtas, katrā laika momentā darbojās tikai viena pakāpe. Lai samazinātu bojājumu, kas nav AR, kļūdainās nostrādes varbūtību, ir paredzēta bloķēšana. Bloķēšanu realizē, izmantojot maksimāli pieļaujamo leņķa izmaiņas ātrumu, apgrieztās un tiešās secības spriegumu un strāvas (maksimāli pieļaujamas) [40].

Līdzīga tipa automātika ražo arī Latvijā, pateicoties tieši Rīgas Tehniskās universitātes enerģētikas un elektrotehnikas fakultātes darbiniekiem, kuri izstrādāja un patentēja jaunu ierīci – Asinhronas Gaitas Novēršanas Automātu jeb „AGNA” [41]. Šī ierīce jau ir pierādījusi savu konkurētspēju un potenciālu pretavārijas automātikas jomā.

„AGNA” ir paredzēta 110–330 kV līniju kontrolei un slēdžu vadībai ar energosistēmas ARN nolūku. Darbības principa pamatā ir leņķa  $\varphi$  un tā izmaiņas ātruma  $d\varphi/dt$  mērīšana (1.6. att.). Tas ir izmantots „AGNA” ierīcē.



1.6. att. Vektoru diagramma

„AGNA” nosaka spriegumus uz ģeneratora kopnēm pēc formulām (1.7. att.):

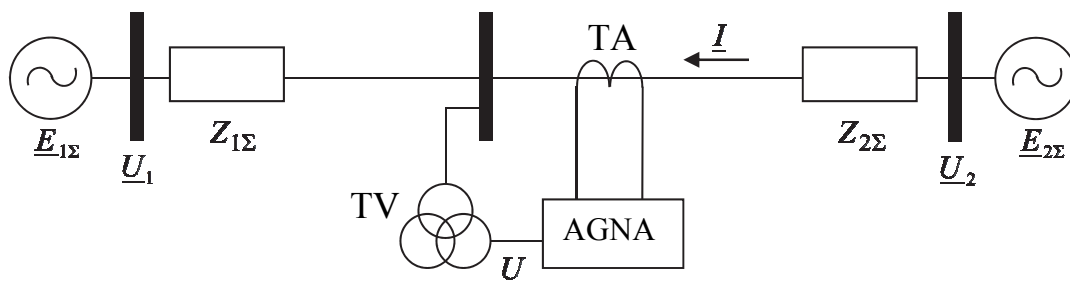
$$\underline{U}_1 = \underline{U} \pm \underline{I} \cdot Z_{K1} \quad (1.5)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{U} - \underline{I} \cdot Z_{K2} \quad (1.6)$$

kur  $\underline{U}$  – fāzes spriegums, V;

$\underline{I}$  – fāzes strāva, A;

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



1.7. att. „AGNA” pieslēgšanas shēma

„AGNA” nostrādes nosacījumus nosaka pēc viena no diviem realizētajiem algoritmiem. Pirmais nostrādes algoritms nepieļauj vektoru pilnu apgriezību. Nostrāde notiek pirmajā ciklā atbilstoši leņķa mērorierīces nostrādes raksturlīknei ar divām pakāpēm pamata zonā un vienu pakāpi rezerves zonā. Otrais algoritms pieļauj dažus svārstību ciklus, to skaits ir atkarīgs no izvēlēta iestatījuma, kas nosaka nostrādes cikla numuru. Šis iestatījums automātiski uzdod ierīces nostrādes algoritmu.

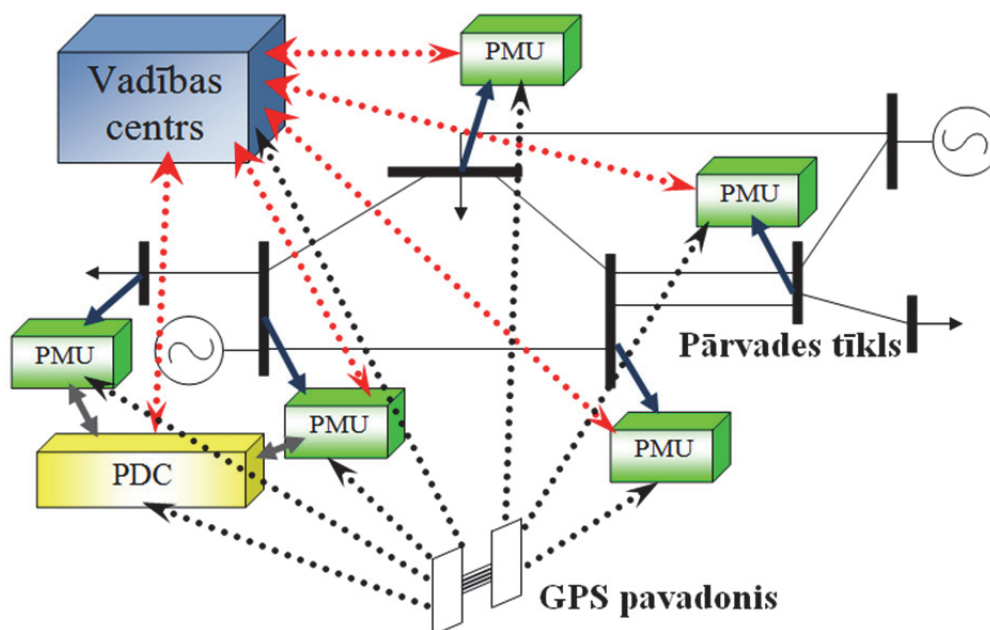
Kad GPS sistēma saka strauji attīstīties, kļūva skaidrs, ka šī sistēma piedāvā visefektīvāko veidu attālināto mērījumu sinhronizācijai. Pašlaik eksistē arī citas sistēmas, kas līdzinās GPS sistēmai (piem., GLONASS, BeiDou jeb DBS, Galileo), kas tika izveidotas citās valstīs līdzīgam nolūkam. Rezultātā ar lielu pārliecībā pakāpi var konstatēt, ka GPS sistēmas tiek un tiks izmantotas kā sinhronizācijas avots.

Tātad jāaplūko GPS sinhronizācijas iespējas energosistēmas jomā. Sekojošos gadījumos ir nepieciešama precīza laika sinhronizācija, ko, protams, var sasniegt, izmantojot GPS iespējas: RA; automātisko frekvences korekciju; slodzes vadību; slodzes kontroli plašā teritorijā; bojājumu vietas identificēšanu [42]. PMU sistēmas izmanto mūsdienīgās energosistēmās kā daļu no teritoriālās uzraudzības sistēmām (WAMS). Datu pārraides ātrums vairs nav kritisks radītājs. Tas nozīmē, ka dati „pienāk” centrā dažādos laikos atkarībā no sakaru kanālu pārraides ātruma.

PMU pārsūta mērījumus, izmantojot sakaru kanālus, augstākajā hierarhijas vadības līmenī. Vietu PMU instalācijai izvēlās atbilstoši nepieciešamībai un mērķiem. Vektoru mērījumu sistēmas hierarhiju var aplūkot 1.8. attēlā. Šīs sistēmas struktūra iekļauj PMU, datu koncentratoru (PDC) un datu centru, kā arī komunikācijas saites un programmatūru. Mērījumus glabā lokālajās datu glabātuvēs diagnostikas un analīzes mērķiem. Vektoru datu koncentratoru funkcija ir datu vākšana no vairākām PMU, tajā laikā veicot bojāto datu raidīšanu, mērījumu komponēšanu atbilstoši laika skalai un datu ierakstīšanu. Ir jāatzīmē arī tas, ka informācijas plūsma eksistē divos virzienos (PMU ierīču iestatīšana un izmaiņas) [43].

Komunikācijas iespējas PMU ir pamats, kas nodrošina datu pārraidi no attālinātām lokācijām vadības centrā. Ir divi būtiski aspekti, kas ietekmē izpildāmos komunikācijas uzdevumus. Pirmais aspekts ir kanāla caurlaides spēja, ko mēra kbps vai Mbps. Otrais ir latentums (*Latency*), kas ir definēts kā laika starpība starp datu izveides laiku un laiku, kad šī informācija ir pieejama lietojumprogrammām.

PMU formē WAMS, kas var veikt adaptīvo atjaunošanas režīmu ar minimāliem zaudējumiem un laiku. Energosistēmas restaurācijas piemērs ir aplūkots [44]. PMU sistēmu lieto arī intelektuālo salu izveidošanas procesā. Energosistēmu sadalīšana salās ir pēdējais pasākums sabrukumu seku samazināšanai. Protams, salā jābūt bilanci starp ģenerāciju un slodzi. Praktiski šis nosacījums ir grūti izpildāms, izmantojot klasiskās vadības pieejas (iepriekš izrēķinātās iestatījuma vērtības), jo režīmi un struktūra ir laikā mainīgi lielumi. Rezultātā precīzai vadībai ir nepieciešama pirmsavārijas informācija par režīma parametriem, ko var nodrošināt PMU sistēma. Atbilstoši šiem datiem var veikt ģenerācijas vai slodzes atslēgšanu, lai nodrošinātu bilanci (parametru uzturēšanu pieļaujamā diapazonā).



1.8. att. Vektoru mērījumu sistēmas hierarhija

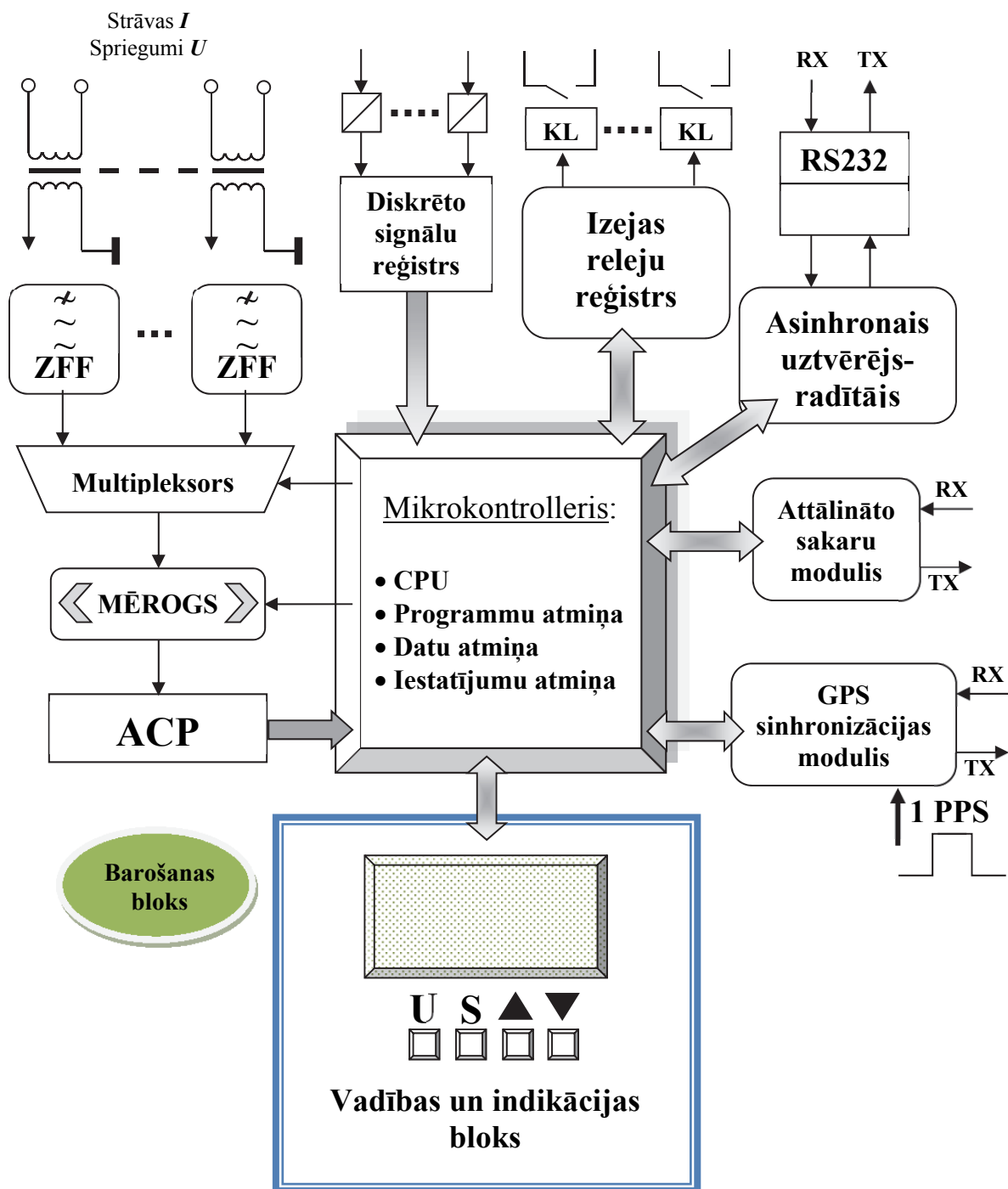
Neapšaubāmi PMU ir daži trūkumi, kas galvenokārt ir saistīti ar laika aizturēm [45], [46] un noteikto vadības algoritmu realizāciju. Tomēr galvenais trūkums skar GPS signāla pazušānu, kad visa sistēma zaudē funkcionalitāti. Tās notiek tādēļ, ka dati, kas nonāk datu koncentratoros un informācijas centros, nevar būt izmantoti režīmu vadībā, jo tiem nav vienotās laika skalas. Rezultātā jāveic tehniski-ekonomiskā analīze, izmantojot riska vadības pamatus un kritērijus, un tikai pēc tam var pieņemt galīgo lēmumu par nepieciešamajām izmaiņām.

Tāpat ir jāatzīmē tas, ka WAMS tiek integrēts EMS sistēmās, lai dispečeru centrā nodrošinātu noteiktā veida signalizāciju par stabilitātes sabrukšanu vai pāreju bīstamo režīmu zonā [45]. PMU sistēmas dati kopā ar SCADA un tīkla konfigurāciju var būt izmantoti, lai identificētu energosistēmas stabilo režīmu robežas.

## 2. ASINHRONĀ REŽĪMA NOVĒRŠANAS AUTOMĀTIKAS IERĪCES REALIZĀCIJA

Ir iespējami dažādi ARNA realizācijas varianti. Šajā nodaļā ir aplūkoti divi varianti: pirmais variants ir ierīces realizācija kā atsevišķā aizsardzība; otrais – kā kombinētais aizsardzību termināls. Ir skaidrs, ka otrais variants ir perspektīvāks, pie nosacījumiem, ja netiek būtiski palielinātas izgatavošanas izmaksas un netiek samazināta funkcionalitāte. Analizējot ierīci „AGNA”, tika nolemts veikt tā modernizāciju. Tāpat ir nepieciešams novērtēt paplašināšanas iespēju izejas releju blokiem, lai ARNA ierīce varētu izpildīt plašu RA un automātikas funkciju spektru (elementu atslēgšana, slodzes samazināšana, ģenerācijas avotu ieslēgšana, signalizācija utt.). Tiek sintezēta šāda ierīces struktūra (2.1. att.).

Kā ieejas signālu devējus var izmantot TA un TV, Holla devējus, optiskos TA un TV. Kontrolējamo signālu frekvenču spektrs parasti satur arī augstākās harmonikas sastāvdaļas (2., 3., 5. utt. harmonikas). Frekvenču spektra ierobežošanai izmanto dažādus filtrus. Tiem izvirzītās prasības (tips, pārvades funkcija utt.) var atšķirties atsevišķām RA un automātikai. Šā tipa automātikā jāizmanto šaurjoslu filtri (piemēram, filtrs *Butterworth*), kas ļauj ierobežot augstfrekvenču ietekmi uz aprēķinu rezultātiem. Tātad signāli tiks filtrēti 50 Hz frekvencei, izmantojot zemfrekvences filtrus (ZFF) (2.1. att.).



2.1. att. Vienkāršota ierīces realizācijas struktūra

Nākamais etaps ir analoģu signālu apstrāde, t. i. tos pārveidošana ciparu signālā. Lai apstrādātu analoģsignālus, ir izvēlēts paņēmiens ar ieejas signālu multipleksēšanu, kas ir efektīvs lielo kontrolējamo lielumu (signālu) skaita gadījumā. Šajā gadījumā jāizmanto daudzkanālu analoģais multipleksors (atbilstoši ieejas signāliem). Piedāvātās struktūras (2.1. att.) izmantošana ļauj kontrolēt 16 analoģsignālus, izmantojot vienu multipleksoru ar 16 kanāliem.

Viens no galvenajiem parametriem, kas raksturo signālu ciparu apstrādes sistēmu, ir nepieciešamās ACP precizitātes nodrošinājums visā ieejas signāla izmaiņas diapazonā. ACP maksimālā precizitāte tiek sasniegta tikai tad, ja ir saskaņots signāla līmenis ar pilno ACP



ieejas diapazonu (tiek definēts ar kvantēšanas pakāpju skaitu). Tātad, veicot mazo ieejas signālu apstrādi (nomināla strāva un samazināti spriegumi), ACP dinamiskais diapazons būtiski samazinās, kas izraisa trokšņu un kļūdu ietekmes palielināšanu ieejas signālam.

Kā vienu no risinājumiem var izmantot iepriekšēju ieejas signālu mērogošanu, t. i. to reducēšanu atbilstoši maksimāli pieļaujamam ACP ieejas diapazonam. Ievērojot aparatstruktūras minimizēšanas nepieciešamību, izvēlēts variants, kurā mērogu izvēlas, izmantojot programmatūras līdzekļus:

- Iepriekšējai ACP signāla lieluma novērtēšanai, lai izvēlētos mēroga koeficientu;
- ACP signālam ar atbilstošo mērogu.

Pārveidotāja precizitāti definē kā visu tā kļūdu maksimālo vērtību. Vairākiem ACP šī vērtība parasti nepārsniedz relatīvo vērtību mazākajai kārtai. Iespēja izmantot mērogu ieejas signālam ļauj samazināt prasības, kas izvirza ACP kārtām un tā ieejas diapazonam. Izmantojot vienu ACP, lai apstrādātu lielu analogo signālu skaitu, parādās laika novirzes faktors dažādu kanālu pārveidojamiem signāliem. Laika aizture lielā mērā ir atkarīga no ACP pārveidošanas laika.

Papildus ierīcei jābūt iespējai kontrolēt diskrētus signālus (releju kontakti utt.). Lai realizētu šo funkciju, tiek izmantots diskrēto signālu bloks (2.1. att.), kas nodrošina optoelektrisko un galvanisko atsaiti kontrolējamajām ķēdēm.

Protams, katrai RA un automātikas ierīcei ir izejas starpreleji. To drošumam izvirza stingras prasības. Ievērojot to, jārealizē kontroles un bloķēšanas iespējas pret releja kļūdaino nostrādi gadījumā, ja parādās neatbilstības starp komandu, ko padot uz releju, un to faktisko stāvokli. Par pieņemamu jāuzskata variants, kas ietver releju izmantošanu hermētiskā korpusā un releja tinumu darbderīguma kontroli. Izejas releju bloks (2.1. att.) nodrošina releju nenostādi gadījumā, ja releja vadības elements (tranzistors) ir bojāts, kā arī ļauj kontrolēt releja spoles stāvokli ar atbilstošu programmatūru. Releju skaits blokā var mainīties no viena līdz deviņiem.

Parasti automātikas ierīcēm ir iestatījumu un konstantu komplekti. Šo datu ticamība un saglabāšana nodrošina ierīces normālo funkcionēšanu. Drošākais informācijas glabāšanas elements ir lasāmatmiņa (*Read Only Memory*). Iestatījumu glabāšana ciparu formā ļauj sasniegt maksimālo iestatījumu precizitāti, kas tiek definēta tikai ar to diskrēto izmaiņu pakāpi. Turklāt, ārējie faktori (barojoša sprieguma svārstības, temperatūra, mitrums, spiediens utt.) neietekmē uz iestatījuma vērtību. Kontrollera bloks ir apgādāts ar iestatījumu glabāšanas atmiņu un nodrošina to glabāšanu dažādos ierīces ekspluatācijas nosacījumos.

Lietotāja interfeisa bloks (2.1. att.) ļauj attēlot, izmantojot indikatoru, un izmainīt iestatījumus. Tāpat ir izmantota virkne risinājumu, kas ļauj bloķēt nesankcionētu piekļuvi un jaunu iestatījumu ievadi.

Ir skaidrs, ka mikroprocesoru ierīču priekšrocība salīdzinājumā ar cita tipa ierīcēm (analogu un elektromehānisku) ir informācijas apmaiņu iespējas ar citu aparāturu vai personālo datoru. Apmaiņai tiek izmantots RS-232 (2.1. att.), kas ļauj veikt lokālu informācijas apmaiņu. Attālinātiem objektiem sakarus nodrošina RS-422 un RS-485 izmantošana, kas ļauj pārraidīt informāciju starp objektiem vai ierīcēm.

Sinhronizāciju samērā veiksmīgi nodrošina, izmantojot GPS sinhronizācijas iespējas. ARNA realizācijas shēmā ir GPS sinhronizācijas modulis, kas sinhronizē mērījumus, izmantojot 1 impulsu sekundē (1 PPS) sinhronizācijai (2.1. att.).

Liela servisa un pamata funkciju skaita izpilde stingri limitētā laika intervālā (reālā laikā) izvirza paaugstinātās prasības centrālā procesora ražotspējai/ātrdarbībai (CPU) (2.1. att.). Daudz procesoru struktūras izmantošana būtiski palielina aparatūras izmaksas, kā arī var ietekmēt kopējo ierīces drošumu. Rezultātā tika izvēlēts procesors ar Harvardas arhitektūru



(TMS320Fxxx), kas izpilda operācijas ar fiksēto punktu un realizē 16 kārtu skaitļu reizināšanu ar vienu komandu [47], [48].

Jāatzīmē tas, ka esošiem moderniem ARNA paņēmieniem ir daži ierobežojumi. Šie ierobežojumi „ienes” sarežģītumus iestatījumu izvēlē un rezultātā var notikt nepietiekoši precīza nostrāde. Tāpat, pēc veiktiem pētījumiem, ir konstatēts, ka eksistē būtiskas problēmas, kas ir saistītas ar dažādu ģeneratoru ekvivalentēšanu.

Veicot (1.5), (1.6) vienādojumiem analīzi, var konstatēt, ka modelētie spriegumi ir pakļauti dažāda veida režīma faktoriem, kas mainās laikā. Kā piemēru var minēt ekvivalentas sistēmas pretestības izmaiņas (struktūras izmaiņas, esošo ģenerācijas avotu atslēgšana minimālas slodzes režīmā utt). Rezultātā aizsargājamās zonas robežas var būtiski mainīties, izraisot liekas nostrādes vai nenostādājot savlaicīgi.

Pirmais risinājums ir piedāvāts **LV 14375 B** patentā [49]. „AJIAP-M” un „AGNA” ierīču trūkums ir tas, ka spriegums  $\underline{U}_1$  un  $\underline{U}_2$  kopnēm tiek modelēts, izmantojot spriegumu un strāvu automātikas uzstādīšanas vietā, kas varētu būt tālu no ģeneratoriem. Precīzai vadībai jāizmanto ģeneratoru EDS  $\underline{E}_1$  un  $\underline{E}_2$  (1.5. att.). Turklāt kopnēm var būt pieslēgtas dažādas slodzes, kas izraisa sprieguma papildkritumu uz ģeneratoru pretestības. Tāpēc šo kopņu spriegumi nepārstāv pietiekami precīzi ekvivalento ģeneratoru leņķus (1.6. att.).

Tāpat **LV 14375 B** patenta modelē leņķi  $\delta$  starp ģeneratoru EDS un tā izmaiņas ātrumu. Ģeneratoru EDS aprēķina pēc formulām [49]:

$$\underline{E}_1 = \underline{U}_{K1} + \underline{I}_{G1} \cdot Z_{G1}, \quad (2.1)$$

$$\underline{E}_2 = \underline{U}_{K1} \mp \underline{I}_L \cdot Z_L + \underline{I}_{G2} \cdot Z_{G2}, \quad (2.2)$$

kur  $\underline{I}_{G1}$ ,  $\underline{I}_{G2}$  – ekvivalento ģeneratoru strāvas,  
 $\underline{I}_L$  – līnijas strāva,  
 $\underline{E}_1$ ,  $\underline{E}_2$  – ekvivalento ģeneratoru EDS,  
 $Z_{G1}$ ,  $Z_{G2}$  – zaru ģenerators-kopne pretestība (iestatījums),  
 $Z_L$  – līniju pretestība (iestatījums),  
 $\underline{U}_{K1}$  – kopnes spriegums.

Ierīcei precīzāka ir ģeneratoru EDS modelēšana, kā rezultātā ir precīzāka nostrāde, jo tiek novērsta kompleksas slodzes mezglu ietekmē, salīdzinot ar „AGNA” un „AJIAP-M”, kuras var izmantot tīklos ar samērā vienkāršu struktūru (maģistrālajās līnijās), kur tās nodrošinās nepieciešamo precizitāti un selektivitāti.

Tomēr energosistēmas struktūras ar katru gadu kļūst sarežģītākās, jo parādās jauni enerģijas avoti, līnijas, patērētāji utt. Praktiski aplūko gadījumus, kad pārvades līnijās ir pieslēgti mezgli, kuriem ir pieslēgta laikā mainīga slodze. Rezultātā [49] ierīces modelēšanas metodes trūkums ir tāds: ja starp kopnēm parādās jaudas patēriņa mezgls(-i) (starpapakšstacija), kas būtiski maina savu slodzes vērtību diennakts laikā, tad tiek izraisīta modelētā EDS  $\underline{E}_2$  vektora leņķa novirze no tā reālās vērtības (2.2). Ir neiespējami to modelēt, ja līnijā parādās jaudas sateces punkts. Sakarā ar to, otrā ekvivalenta ģeneratora EDS  $\underline{E}_2$  nepārstāv pietiekami precīzi ierīces ģeneratora leņķi. Šajā gadījumā, lai paaugstinātu šīs operācijas precizitāti, [50] ierīce modelē pirmā ekvivalenta ģeneratora EDS  $\underline{E}_1$  no kopnes sprieguma  $\underline{U}_{K1}$  un pirmā ģeneratora strāvas  $\underline{I}_{G1}$  (2.3). Tāpat ierīce modelē otrā ekvivalenta ģeneratora EDS  $\underline{E}_2$  (tiek pārsūtīta, izmantojot sakaru kanālu) no kopnes sprieguma  $\underline{U}_{K2}$  un otrā ģeneratora strāvas  $\underline{I}_{G2}$  (2.4). Mērījumu laika starpība tiek novērsta, izmantojot GPS sinhronizācijas impulsus. EDS aprēķina pēc formulām [50]:

$$\underline{E}_1 = \underline{U}_{K1} + \underline{I}_{G1} \cdot \underline{Z}_{G1}, \quad (2.3)$$

$$\underline{E}_2 = \underline{U}_{K2} + \underline{I}_{G2} \cdot \underline{Z}_{G2}, \quad (2.4)$$

kur  $\underline{I}_{G1}, \underline{I}_{G2}$  – ekvivalento ģeneratoru strāva,  
 $\underline{E}_1, \underline{E}_2$  – ekvivalento ģeneratoru EDS,  
 $\underline{Z}_{G1}, \underline{Z}_{G2}$  – zaru ģenerators-kopne pretestība (iestatījums),  
 $\underline{U}_{K1}, \underline{U}_{K2}$  – kopņu spriegumi.

Šis paņēmieni darbojas ievērojami precīzāk, tomēr tagad katras ierīces izvēlētiem iestatījumiem ir būtiska nozīme. Ir jāatzīmē, ka gadījumā, ja vienas ierīces iestatījumi ir izvēlēti nepareizi, tad tiek izraisīta kontrolējamā EDS leņķa novirze no reālās vērtības. Vēl viens jautājums ir saistīts ar elektrostacijas ģeneratoru ekvivalentēšanu, piemēram, HES gadījumā īpašu problēmu nav, jo parasti visi ģeneratori ir vienādi gan pēc jaudas, gan pēc tipa utt. Bet, aplūkojot gadījumu ar TEC, kur ir instalēti dažāda tipa ģeneratori, ekvivalentēšana ir saistītā ar būtiskām kļūdām. Galvenokārt tas ir saistīts ar ģeneratoru inerces konstanti un noslodzes pakāpi, kas dažreiz ietekmē dinamiskā procesa raksturu.

Tātad [50] EDS modelēšanas paņēmiena trūkums ir tāds, ka, modelējot *ekvivalento ģeneratoru* EDS  $\underline{E}_1$  un  $\underline{E}_2$ , izmantojot ekvivalento ģeneratoru strāvas  $\underline{I}_{G1}$  un  $\underline{I}_{G2}$ , pirmās un otrās kopnes spriegumu  $\underline{U}_{K1}$  un  $\underline{U}_{K2}$  (2.3, 2.4), tiek izraisīta *reālo ģeneratoru* EDS vektora leņķa novirzes. Sakarā ar to, [50] patentētā ierīce nevar precīzi modelēt reālo ģeneratoru EDS. ARNA ierīces modelēšanas precizitāte ir atkarīga no stacijas darbā esošā ģeneratoru skaita, tipa, to slēgumu shēmas, noslodzes pakāpes, inerces konstantes utt. [50] paņēmieni nenodrošina pietiekamu ierīces nostrādes precizitāti un selektivitāti.

Minētā mērķa sasniegšanai [51] ierīce modelē *i-to* ģeneratoru EDS  $\underline{E}_i$ , izmantojot pirmās kopnes spriegumu  $\underline{U}_{K1}$  un *i-tā* ģeneratora strāvu  $\underline{I}_i$  reizinātu ar atbilstošo pretestības iestatījumu  $\underline{Z}_i$  (2.5). EDS  $\underline{E}_i$  tiek padots pirmā procesora ieejā. Otrai procesora ieejai ir pieslēgta sakaru kanāla ieeja, kurā *j-to* ģeneratoru EDS  $\underline{E}_j$ , kas modelēti no otrās kopnes sprieguma  $\underline{U}_{K2}$  un *j-tā* ģeneratora strāvas  $\underline{I}_j$ , kas reizināts ar atbilstošo pretestības iestatījumu  $\underline{Z}_j$  (2.6), tiek pārsūtīti no otrās ierīces (indeksi *i* un *j* atbilst pirmajai un otrai ierīcei). Mērījumu laika sinhronizācijai izmanto GPS impulsus (PPS). Nepieciešams atzīmēt to, ka sakaru kanāls kļūst par energosistēmas neatņemamu daļu un tam ir noteiktas prasības (ātrdarbība, augsta drošuma pakāpe utt.), kuras ir jāievēro. Galvenā aplūkotās ierīces priekšrocība ir paaugstināta mērījumu un modelēšanas precizitāte, jo netiek ieviesta kļūda, kas rodas, ekvivalentējot ģeneratorus ar atšķirīgiem tipiem, inerces konstantēm un nevienmērīgām noslodzēm. Mērījumi tiek veikti zaros „ģenerators-kopne”.

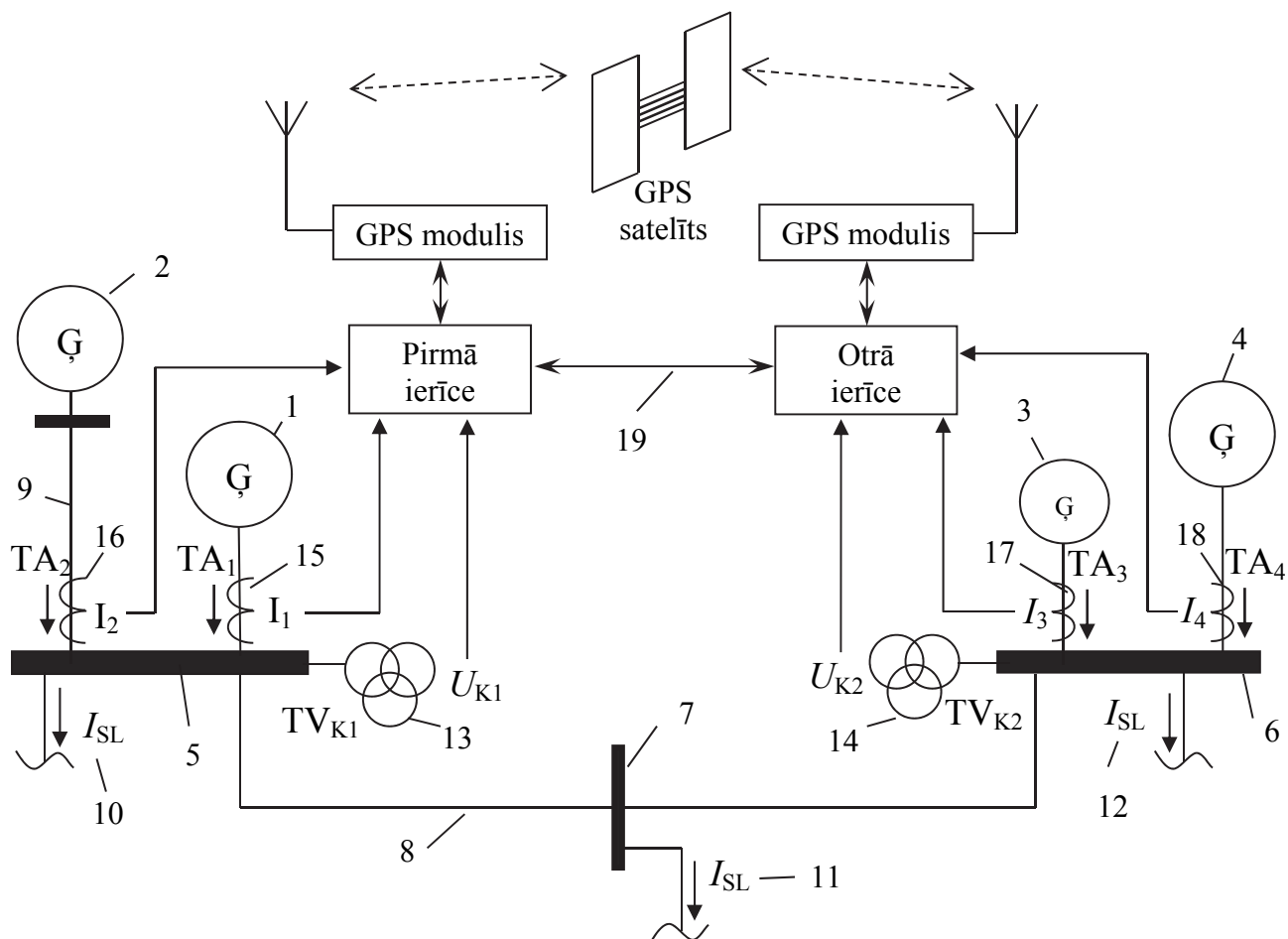
Tātad sakumā ir jāaplūko četru ģeneratoru gadījums, pēc tam vēršot uzmanību vispārinātam gadījumam ar *N* ģeneratoriem. 2.2. attēlā ir parādīts ARNA ierīces realizācijas piemērs **ar četriem ģeneratoriem**. Tātad ARNA ierīce ir pieslēgta kopnēm, kurām ir pieslēgti tīkla elementi (transformatori, kompensācijas iekārtas, slodze u. c. iekārtas).

Ģeneratoru EDS ierīces aprēķina pēc [50] patenta līdzīgām formulām:

$$\underline{E}_i = \underline{U}_{K1} + \underline{I}_i \cdot \underline{Z}_i, \quad \text{kur } i = 1, 2 \quad (2.5)$$

$$\underline{E}_j = \underline{U}_{K2} + \underline{I}_j \cdot \underline{Z}_j, \quad \text{kur } j = 3, 4 \quad (2.6)$$

kur  $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_3, \underline{I}_4$  – ģeneratoru strāvas,  
 $\underline{E}_1, \underline{E}_2, \underline{E}_3, \underline{E}_4$  – ģeneratoru EDS,  
 $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3, \underline{Z}_4$  – zaru ģenerators-kopne pretestība (iestatījums),  
 $\underline{U}_{K1}, \underline{U}_{K2}$  – ierīču pieslēgšanas kopņu spriegumi.



2.2. att. Tīkla shēma ar četriem ģeneratoriem [51]:

1, 2, 3, 4 – dažāda tipa un jaudas ģeneratori; 5, 6 – ierīces pieslēgšanas kopnes;  
 7 – starpkopne (starpapakšstacija), 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

Starp četriem ģeneratoru EDS vektoriem kopumā ir seši atšķirīgi leņķi, tāpēc ir piedāvāts kontrolēt tikai maksimālo leņķi  $\delta_{mxk}$  starp vektoriem, nevis kontrolēt katru leņķi:

$$\delta_{mxk} = \max(\delta_{12}, \delta_{13}, \delta_{14}, \delta_{23}, \delta_{24}, \delta_{34}). \quad (2.7)$$

Protams, datu diskretizācijas pakāpei jābūt pietiekošai, lai varētu novērot energosistēmas straujas režīma izmaiņas, t. i. ātrumu  $d\delta_{ij}/dt$  vērtības un EDS vektoru pagriezienu virzienus. Leņķa  $\delta_{mxk}$  izmaiņas ir saistītās gan ar normāliem pārejas procesiem (lēnas leņķa izmaiņas), gan ar avārijas pārejas procesiem (ātra režīma parametru izmaiņas, piem., īsslēgumu un citu spēcīgo perturbāciju dēļ). Datu atjaunošanas laika intervālam jābūt pietiekošam, lai ierīce vārētu nostrādāt precīzi un selektīvi. Vispārīgā gadījumā, t. i.  $N$  ģeneratoru gadījumā, EDS formulas ir:

$$\underline{E}_i = \underline{U}_{K1} + \underline{I}_i \cdot \underline{Z}_i, \quad (2.8)$$

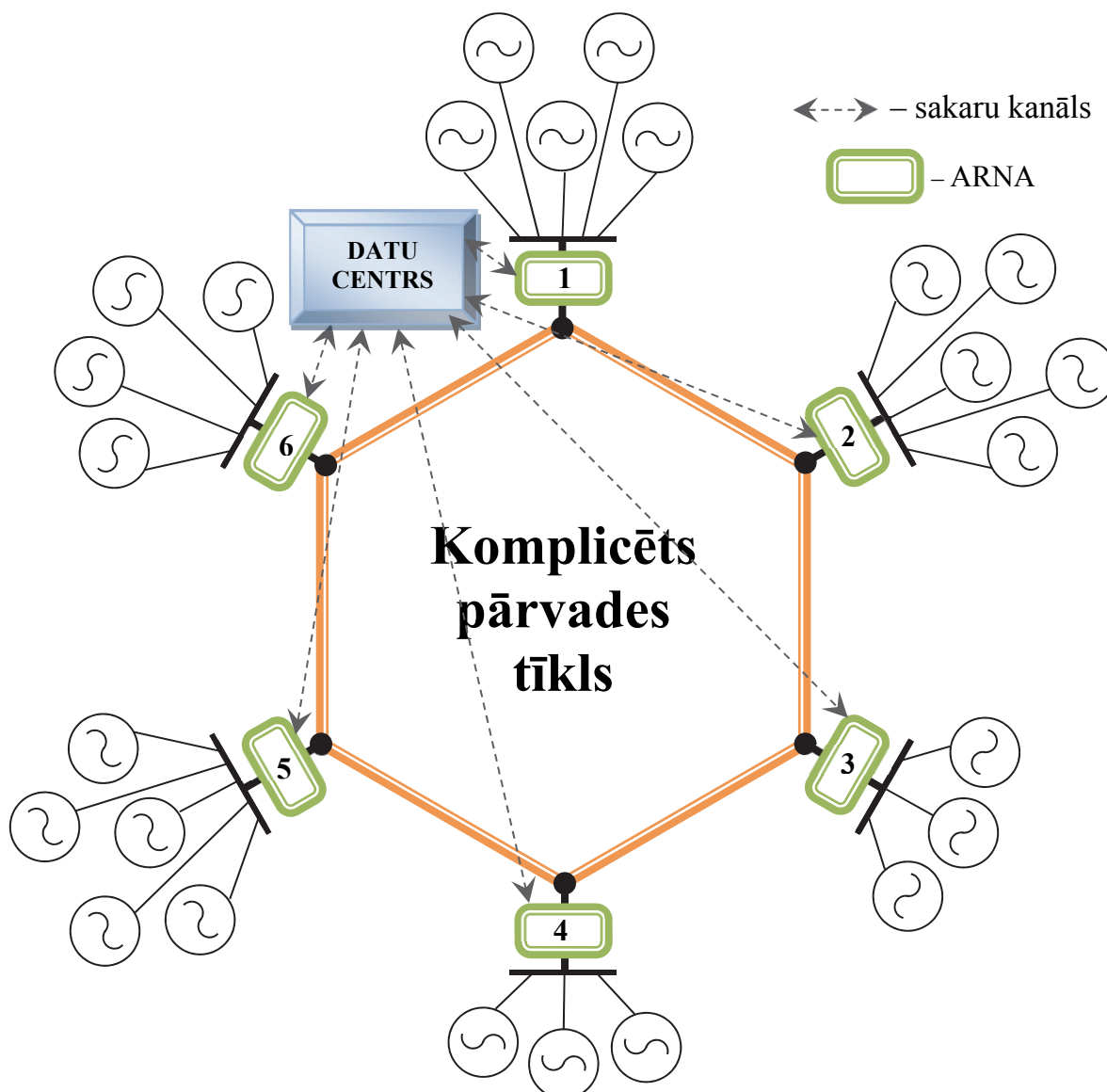
$$\underline{E}_j = \underline{U}_{K2} + \underline{I}_j \cdot \underline{Z}_j, \quad (2.9)$$

kur  $i$  – pirmās ierīces kontrolējamo ģeneratoru skaits,  
 $j$  – otrās ierīces kontrolējamo ģeneratoru skaits,  
 $N$  – kopējais kontrolējamo ģeneratoru skaits ( $N = i + j$ ).

Divas aizsardzības ierīces veic kontrolējamo lielumu (strāvu un spriegumu) nepārtrauktu apstrādi, un GPS moduļa sinhronizācijas impulsa pienākšanas momentā notiek mērījumu laika

nepieciešamās korekcijas. GPS moduļa sinhronizācija notiek ar 1 PPS. Ja informācijas pārraides aizture no pirmās ierīces uz otru (un otrādi) nepārsniedz 1 sekundi, tad minētā laika aizture neiespaido precīzu aizsardzības darbību. Pēdējais ARNA realizācijas variants [51] prasa padziļinātu analīzi iespējamo vadības iedarbju lokā, jo šeit ir iespējamās dažādas vadības iedarbes, lai saglabātu sistēmas stabilitāti.

2.3. attēlā ir redzama principiālā shēma ARNA ar  $N$  ģeneratoriem. Pārvades tīkls ir attēlots shematiski, pie tā ir pieslēgtas dažādas elektrostacijas. Katrā elektrostacijā ir uzstādīti ģeneratori, kuru EDS tiek modelēti ar ARNA. Aplūkotajā gadījumā ir sešas ARNA ierīces, kas ir savienotās ar datu centru, izmantojot sakaru kanālus, notiek informācijas apmaiņa. Katras ierīces uzdevums kontrolēt savu ģeneratoru EDS. u Rezultātā informācijas tīkls aptver energosistēmas elektrostacijas un izveido noteikto informācijas tīklu.

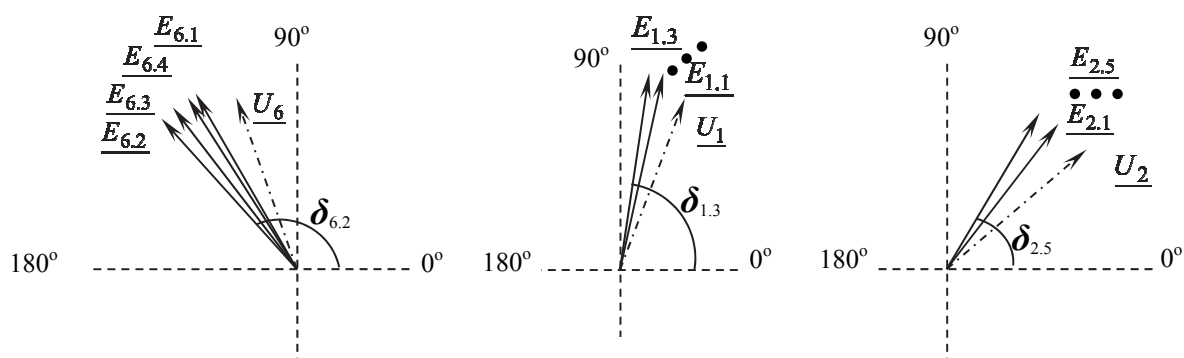


2.3. att. ARNA ar  $N$  ģeneratoriem principiālā shēma

Svarīgi atzīmēt to, ka faktiski automātikas darbībā eksistē viens informācijas līmenis. Protams var izveidot vēl līmeņus citiem nolūkiem, piemēram, izmantot ARNA mērījumus energosistēmas režīma novērošanai un analīze līdzīgi PMU ierīcēm. Tomēr šī darba ietvaros galvenā uzmanība tiek vērsta ARNA algoritmam.

Katrā ARNA modelē visus elektrostacijas darbā esošo ģeneratoru EDS un salīdzina ar citu ARNA modelētiem EDS, izvēloties ģeneratorus ar maksimālo leņķi kontrolei (2.7). Lai paskaidrotu piedāvāto algoritmu, jāaplūko piemērs ar pirmo, otro un sesto ARNA (2.3. att.).

Ir zināms, ka sprieguma vektori katrai kopnei atšķiras un mainās atkarībā no slodzes un ģenerācijas apjomiem (energosistēmas normālie režīmi). Pieņemsim, ka aplūkotajā gadījumā ir novirze starp kopnes leņķiem jeb  $\underline{U}_2$  atpaliel no  $\underline{U}_1$  (leņķis  $\varphi_{12}$ ), kas savukārt atpaliel no  $\underline{U}_6$  (leņķis  $\varphi_{61}$ ). Tālāk jāveic analīze modelētiem ģeneratoru EDS vektoriem katrai stacijai (2.4. att.). 2.4. attēlā ir trīs atsevišķas vektoru diagrammas katrai ARNA ierīcei. Pieņemsim, ka maksimālie leņķi ir sekojoši: sestajai ARNA –  $\delta_{6.2}$ ; pirmajai ARNA –  $\delta_{1.3}$ ; otrajai ARNA –  $\delta_{2.5}$ . Rezultātā, kad ir atrasti maksimālie leņķi katrai ierīcei, var izrēķināt kontrolējamus leņķus  $\delta_{61}$  un  $\delta_{12}$ . Kontrolējot šos leņķus un to izmaiņas ātrumu, var selektīvi atslēgt ģeneratoru(-us), kas sāka nesinhroni darboties, un gadījumā, ja šī iedarbe būs neefektīva, veikt energosistēmas sadalīšanu atbilstoši izvēlētiem algoritmiem.



2.4. att. Ģeneratoru EDS un kopnes spriegumu vektori sestajai, pirmajai un otrajai ARNA

Aplūkotie gadījumi skar ARNA ierīci kā atsevišķu vienību, tomēr jāaplūko arī gadījums, kad ARNA ir kā funkcija aizsardzības terminālā. RTU izstrādāta vēl viena ierīce „LIDA”, kas iekļauj sevī samērā plašu aizsardzības klāstu [52]. Tāpat tā ir izveidota uz mikroprocesoru elementu bāzes un izmanto informācijas apstrādes ciparu principus. Līnijas diferenciālā strāvas aizsardzība sastāv no diviem puskomplektiem, kurus uzstāda līnijas galos, un sakaru kanāla, kas tos savieno savā starpā. Aizsardzība izveidota pēc principa “Master/Master” – divi puskomplekti ir vienlīdzīgi. Aprēķinot diferenciālās strāvas, tiek izmantoti fāzu strāvu vektori līnijas galos. Datu apmaiņai starp termināliem izmanto optisko sakaru kanālu.

Ir zināms, ka „AGNA” modelē spriegumu vektorus  $\underline{U}_1$  un  $\underline{U}_2$  (1.8, 1.9). Modelētie vektori atšķiras no reāliem un lielas atšķirības gadījumā „AGNA” var nenostādīt vai nostādīt ar noteikto laika kavējumu. Atbilstoši darbības principam, „AGNA” jābūt izvietotai tieši tajā energosistēmas daļā, kur tās jāsadala. No tā seko, ka „AGNA” darbības efektivitāte ir atkarīga no uzstādīšanas vietas izvēles – jāveic ekstensīva dažādu energosistēmas režīmu un scenāriju simulācija (modelēšana). Neapšaubāmi precīzāk būtu mērīt spriegumus pēc iespējas tuvāk ģeneratoriem un izskaitļot leņķi starp reālo spriegumu vektoriem. Ja būtu iespēja mērīt spriegumus dažādās energosistēmas vietās, tad varētu izskaitļot leņķi starp jebkuriem diviem spriegumu vektoriem un tālāk realizēt algoritmu līdzīgu „AGNA”, jo tagad tiks mērīts leņķis. Šajā gadījumā, ARNA pārvēršas par izklaidētu sistēmu, kurā mērījumi tiek veikti visos kritiskos energosistēmas punktos.

Aplūkotā varianta realizēšanai ir nepieciešamas:

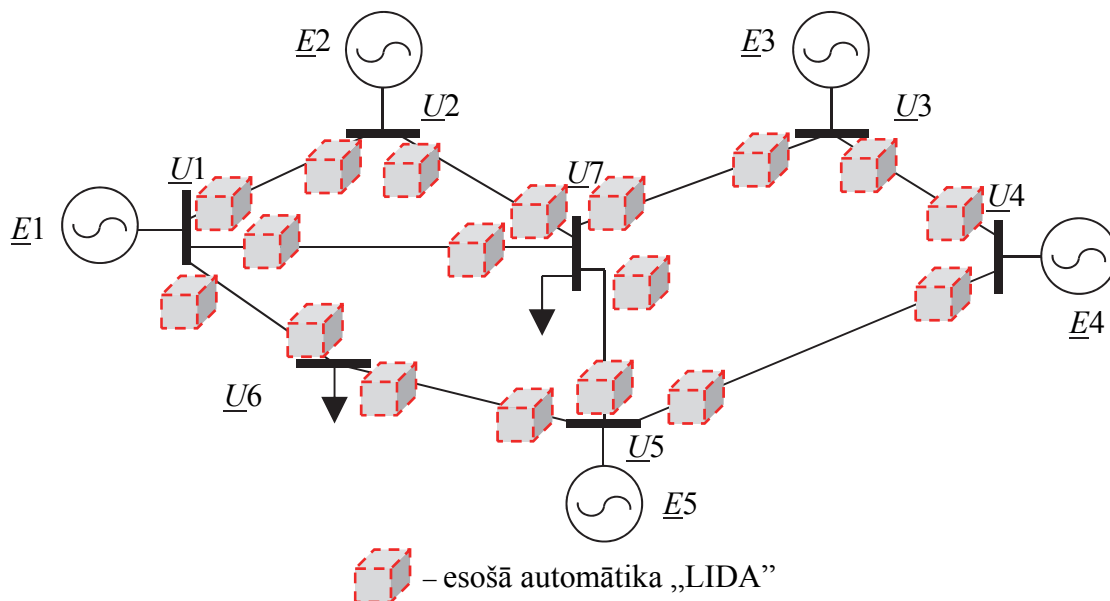
- mērīšanas ierīces, kas mēra sprieguma vektorus uz kopnēm, darbojās reālā laikā, un izvietotas pēc iespējas tuvāk ģeneratoriem;

- ierīcēm jābūt spējīgām pārraidīt mērījumus caur komunikācijas tīklu reālā laikā;
- komunikācijas tīklam jābūt ātrdarbīgam, lai nodrošinātu pārraidi reālā laikā;
- visiem mērījumiem jābūt sinhronizētiem laikā ar precizitāti 10–50  $\mu\text{s}$ ;
- nodrošināt atslēgšanas komandas pārraidi uz jaudas slēdžiem, lai veiktu enerģosistēmu dalīšanu AR rašanās momentā.

Ir piedāvāts variants izmantot augstsprieguma līnijas aizsardzības termināla iespējas, lai realizētu ARNA. Rezultātā šobrīd jau ir mērījumi, kas ir veikti reālā laikā un sinhronizēti; kā arī ātrdarbīgi kanāli, lai pārraidītu mērījumus un komandas (atslēgšanas, bloķēšana utt.). Tā kā aizsardzības termināli ir izvietoti praktiski visu augstsprieguma līniju galos (2.5. att), tas ļauj veikt mērījumus reālā laikā dažādās enerģosistēmas vietās. Tie tiks sinhronizēti, to pārraidei būs izmantoti ātrdarbīgie sakaru kanāli un tiks panākts tas, ka būs iespējams atslēgt jebkuru no kontrolējamā tīkla posmu.

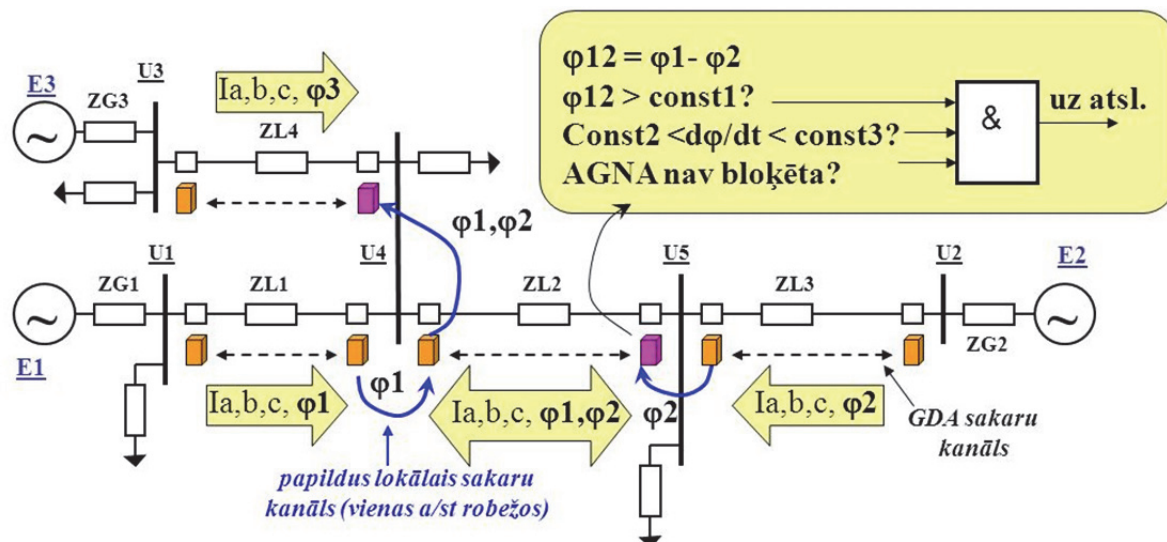
Tomēr papildus jārealizē:

1. Sprieguma leņķa pārraide vienā datu paketē kopā ar strāvām, ko GDA parasti pārraida no viena termināla uz otru. Jāatzīmē tas, ka sakaru kanāla laika aizture būtiski nepalielināsies, jo leņķa vērtības datu apjoms aizņems tikai dažus bitus (leņķis var mainīties diapazonā no 0 līdz 360 grādiem, tātad informācija aizņems 9 bitus). Papildus informācijas apjoms sastāda 4–5 % no kopēja bloka apjoma.
2. Programmas bloks, kas salīdzinās leņķu starpības ar iestatījumiem ( $\varphi_n - \varphi_k > const$ ).
3. ARNA funkcijas bloķēšana pie īsslēgumiem (bloķēšana pie nesimetrijas, lielām strāvām (pārslodzēm), pēc minimālā sprieguma un strāvam sprieguma leņķa izmaiņām ( $d\varphi/dt > const$ )).
4. Iespēja operatīvi (ar iestatījumu/komandu) izvest no darba ARNA funkciju.



2.5. att. Aizsardzības automātikas izvietojums enerģosistēmas tīklā

Jāaplūko gadījums, kad piedāvātā sistēma varētu darboties apvienota sistēmā. Ir enerģosistēma (2.6. att.) ar trim ģenerācijas avotiem, slodzēm un līnijām, kas savieno atsevišķas sistēmas daļas. Līnijas galos ir izvietoti termināli ar GDA un DA aizsardzību.



2.6. att. Energosistēmas aizsardzības konfigurācija un informācijas pārraides tīkls

GDA aizsardzības darbībai tiek izmantoti ātrdarbīgie sakaru kanāli, kas savieno līnijas terminālus. Katrs termināls mēra strāvas līnijā un kopnes spriegumu, un pārsuta strāvu un kopņu sprieguma leņķi uz pretējo galu, izmantojot GDA sakaru kanālu. Tāda konfigurācija ļauj izskaitļot leņķi starp spriegumu vektoriem līnijas galos ( $\varphi_{14}$ ,  $\varphi_{45}$ ,  $\varphi_{52}$ ) (2.6. att.). Bet pēc ARNA darbības principa, jākontrolē leņķu starpība starp spriegumiem tuvākajos ģenerācijas avotos ( $\varphi_{12}$ ,  $\varphi_{13}$ ,  $\varphi_{23}$ ). Lai nodrošinātu šo nosacījumu ir nepieciešams ierīkot papildus lokālus sakaru kanālus (vienas apakšstacijas robežās). Kanālu ierīkošana ļauj pārraidīt informāciju sakaru tīklā un būt pieejamai katram no aizsardzības termināliem. Lokālais kanāls var būt izveidots kā tiešais savienojums starp terminālu komunikācijas interfeisiem.

Pieņemsim, ka AR rašanās gadījumā energosistēmu jāsadala divās vietās: kad AR noteikts starp ( $E_1$ ,  $E_3$ ) un ( $E_2$ ) ģeneratoriem, tad vajag atslēgt līniju ZL2. Gadījumā, kad AR noteikts starp ( $E_1$ ,  $E_2$ ) un ( $E_3$ ) ģeneratoriem, tad vajag atslēgt līniju ZL4. Tad, termināliem, kas aizsargā līnijas ZL2 un ZL4, un apzīmēti ar violeto krāsu ir aktivizēta ARNA funkcija un tie izskaitļo attiecīgi  $\varphi_{12}$  un  $\varphi_{13}$ ,  $\varphi_{23}$  leņķus.

ARNA var būt realizēta kā izkliedēta sistēma, kas ļauj mērīt un salīdzināt spriegumu leņķus kritiskajās energosistēmas vietās. Sistēmas realizēšanas nosacījumi: mērījumu sinhronizācija, ātrdarbīgo datu pārraides kanālu esamība, spriegumu mērīšana un datu pārraide reālajā laikā. Lai realizētu izkliedētu sistēmu, tiek piedāvāts izmantot daudzfunkcionālā līnijas aizsardzības termināla iespējas un GDA sakaru kanālus. Tātad piedāvātais variants ir ekonomiski izdevīgs salīdzinājumā ar citam izkliedētām sistēmām, jo tiek izmantoti jau esošie sakaru kanāli un aizsardzības termināli.

Tomēr jāatzīmē arī jaunās ARNA realizācijas iespējas. Sakaru kanāli un GPS uztvērēji tiek apgādāti ar darbības kontroles sistēmām. Tomēr piedāvātās automātikas struktūra nodrošina iespēju realizēt kontroles papildfunkcijas. Šim mērķim ir iespējams izmantot:

- algoritmus, kas ļauj identificēt kļūdas, kas parādās sakaru kanālos traucējumu dēļ.
- automātisko rekonfigurāciju (zaudējot daļu no lietderīgām īpatnībām) gadījumā, ja tiek konstatēti bojājumi.

Ir iespējami divi varianti:

1. Gadījums, kad tiek identificēta GPS atteice – notiek pāreja uz rezerves algoritma izmantošanu, kas balstās uz mērījumu sinhronizāciju, izmantojot sakaru kanālus (sakaru kanāla pārraides laika aprēķins).

2. Gadījums, kad tiek identificēta sakāru kanāla atteice – tiek nodrošināta pāreja uz klasisko (lokālo) ARNA principu (piem., „AGNA”).

Ir zināms, ka bojājumi, kas notiek sprieguma mērījumu ķēdēs, ir samērā bieži energosistēmas PA un RA sistēmas. Tieši tāpēc ierīces, kas var nostrādāt neselektīvi, tiek apgādātās ar noteiktā veida bloķēšanu. ARNA ierīces pie nepareiziem sprieguma mērījumiem var darboties kļūdaini. Lai izvairīties no tā, ir pietiekoši apgādāt tās ar ātrdarbīgo bloku, kas reaģē uz nesimetrijas rašanu kontrolējamos spriegumos un bloķē automatikas darbību. Turpmāk tiks aplūkots, ka, izmantojot ierobežotības prasības automatikas funkcionēšanai (tikai simetriskie režīmi), var izveidot aizsardzības terminālos, kas būs nejutīgas pret lielāko bojājumu veidu skaitu sprieguma ķēdēs:

1. Sprieguma ķēdes nesimetrijas (palaišanas nosacījums nevis lēmumu pieņemšanas nosacījums kā analogiskās ierīcēs).
2. Strāvas ķēžu nesimetrijas pārbaude. Gadījumā, ja netiek fiksēta nesimetrija strāvas ķēdēs, tiek konstatēts bojājums sprieguma ķēdes.
3. Ja izpildās 2. nosacījums, tad tiek identificēta bojāta fāze.
4. Ja tiek bojāta bāzes fāze (A), tad tā tiek samainīta ar citu fāzi, ko atbilstoši pagriež uz 120 grādiem (B vai C fāze).

### **3. ENERGOSISTĒMAS SABRUKUMU UN ARNA DARBĪBAS MODELĒŠANA**

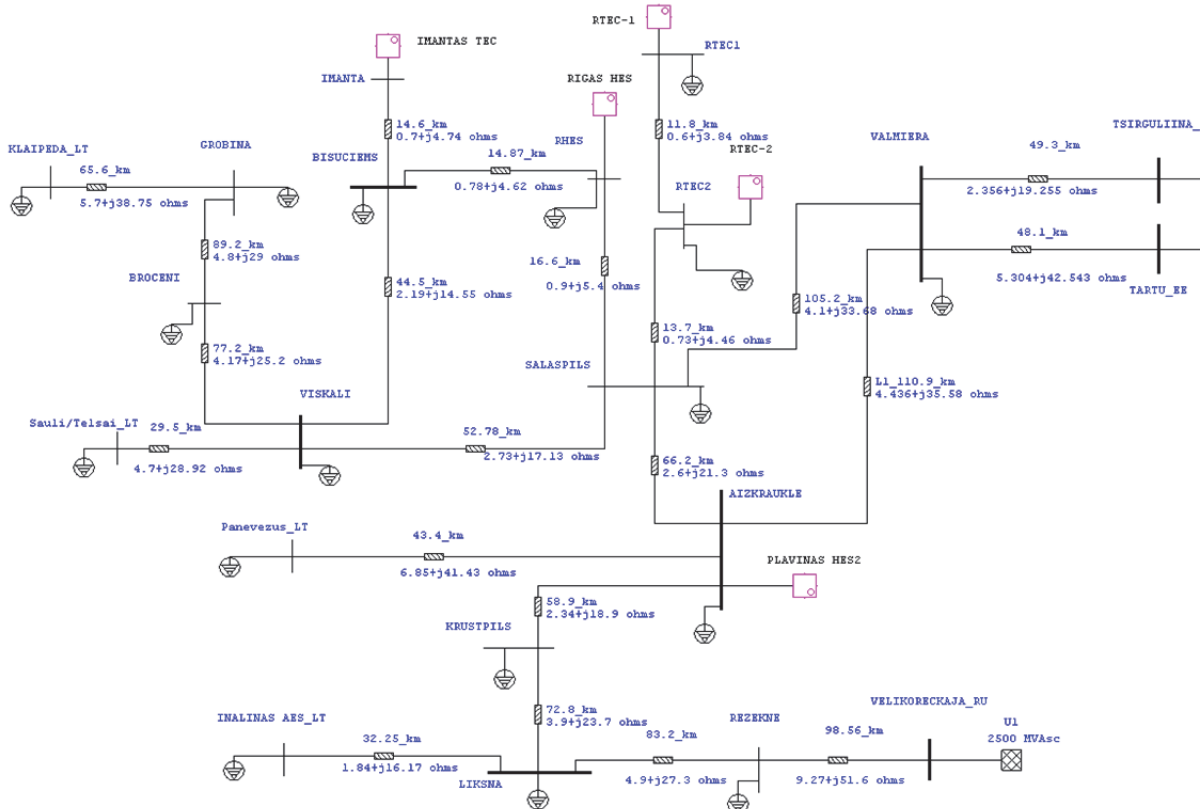
Lai pārbaudītu piedāvāto risinājumu efektivitāti, jāveic energosistēmas režīmu un automatikas darbības modelēšana un analīze. Šim nolūkam tika izvēlēta Latvijas pārvades sistēma (330 kV) kopā ar kaimiņvalstu energosistēmām (Lietuva, Igaunija, Krievija). Galvenais uzdevums ir modelēt dinamiskus pārejas procesus, lai iegūtu nepieciešamus datus energosistēmas ARNA darbību modelēšanas parametru verificācijai.

Šajā promocijas darbā energosistēmas pētīšanai tika izvēlēts Latvijas pārvades tīkls (330 kV) [53] ar galvenajām ģenerācijas stacijām (Pļaviņu HES, Rīgas HES, Rīgas TEC-1 un TEC-2, kā arī Imantas siltumelektrostacija). ARNA pārbaudei tika izvēlēta modernā ETAP 12.5 programmatūra. Latvijas energosistēmai ir saites ar Krieviju (Velikoreckaja) un Igauniju (Tsirguliina un Tartu), kas šajā modelī ir ņemtas vērā ekvivalento ģeneratoru veidā. Saite ar Lietuvu ir modelēta kā četri jaudīgi slodzes mezgli. (Klaipeda, Šauli – Teslai, Paņevēža un Ignalinas AES) (3.1. att.). Par pamatu tika izmantota [53] shēma un tās dati.

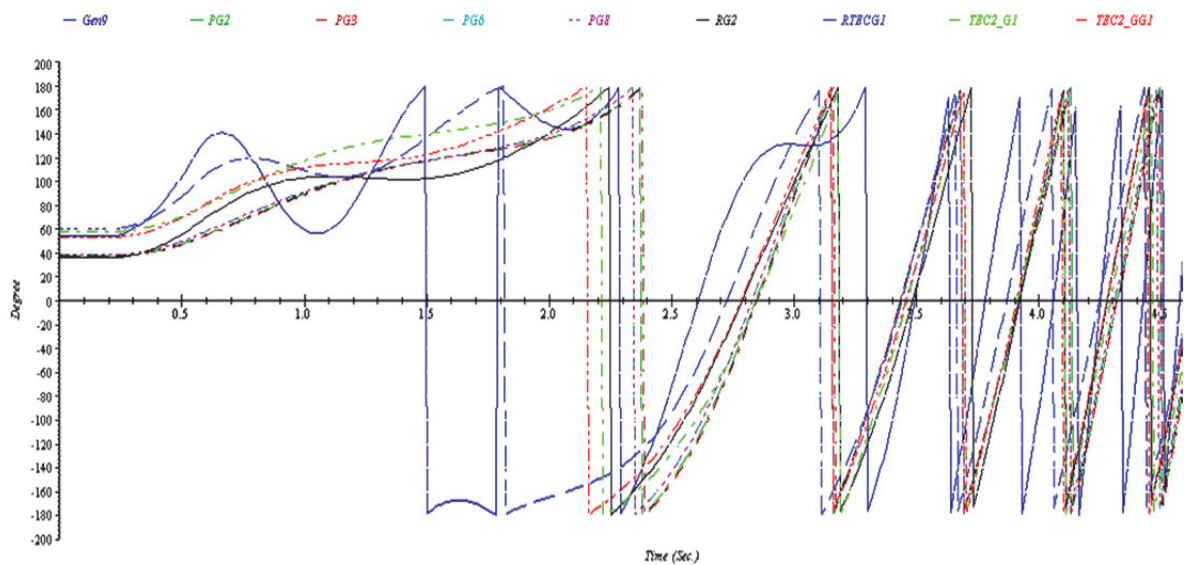
Lai veiktu izvēlētās automatikas struktūras, algoritma un iestatījumu pārbaudi, jāizvēlas raksturīgākie iespējamie konkrētas energosistēmas režīmi. Ir zināms, ka trīsfāzu īsslēgums ir viens no bīstamākajiem bojājumiem. Pieņemsim tādu īsslēgumu par bāzes bojājumu, kurš ir spējīgs izsaukt AR. Pieļausim, ka trīsfāzu īsslēgums notiek pārvades līnijā starp Viskali un Bišuciema kopnēm 95 % attālumā no kopēja līnijas garuma. Īsslēguma ilgums tiek pieņemts 0,53 sekundes. Laiks pieņemts apzināti ilgāks nekā pamata RA nostrādes laiks, jo ir gadījumi, kad pamata aizsardzības nenostādā kaut kādu iemeslu dēļ. Tādējādi šī laika aizture ir iespējama, ja īsslēgums tiks likvidēts, izmantojot rezerves aizsardzības. Tāda pielaide pieņemta, lai tīklā veiktu kaskādes atslēgumu modelēšanu. Bāzes bojājuma rezultātā stabilitātes zaudējuma procesi var būt novēroti visā tīklā, t. i. visi darbā esošie ģeneratori pakāpeniski zaudē stabilitāti un sāk darboties nesinhroni (plaša mēroga asinhronais režīms). Jāatzīmē arī papildsarežģījums, kas ir saistīts ar to, ka stabilitātes sabrukšana notiek gan starp Latvijas un kaimiņvalstu energosistēmām, gan pašā Latvijas energosistēmā. Tāpat tiek formētas dažas asinhronās ģeneratoru grupas. Turpmākā analīze ir saistīta ar Latvijas energosistēmas pētīšanu šajos komplicētos apstākļos, pamatā koncentrējot uzmanību uz Latvijas un Krievijas savienojumu. Šī perturbācija ir izvēlēta kā pamats atbilstošo iestatījumu



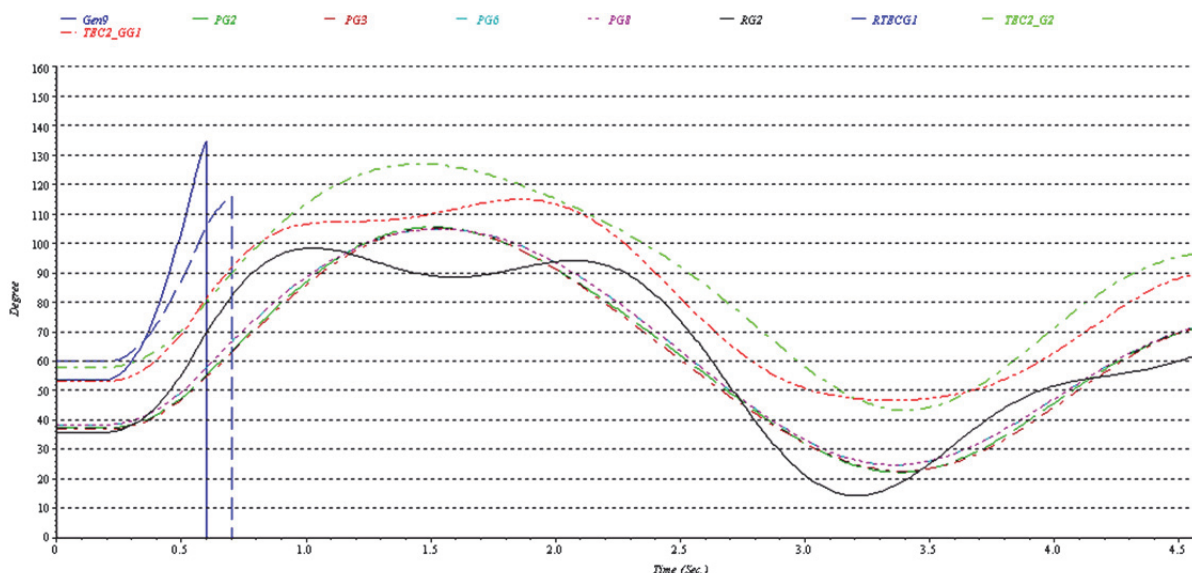
izvēlei augšminētai automātikai („AGNA” un ARNA [50]). Tomēr sākumā ir jāpārbauda iespējamo iedarbju efektivitāte, ko var izdarīt, samazinot bojājuma eksistences laiku. Eksperimentāli panākts režīms (samazinot bojājuma laiku līdz 0,35 s), kad var definēt ģeneratoru, kurš pirmais pāriet AR. Atspoguļotā režīmā visi pārējie ģeneratori joprojām „pāriet” AR (3.2. att.). Bet, izmantojot definēto visbīstamāko ģeneratoru, var to selektīvi atslēgt [51] (aplūkotojā gadījumā Imantas ģenerators Gen9). Ģenerators atslēgšana notiek pēc īsslēguma atslēgšanas ar laika aizturi 0,05 s, bet rezultātā AR tomēr parādās, kaut ar ilgāku laika aizturi. Ir skaidri redzams, ka eksistē vēl potenciāli bīstams ģenerators, kas jāatslēdz (TEC1 ģenerators G1) (3.3. att.).



3.1. att. Latvijas tīkla shēmas modelis ETAP vidē



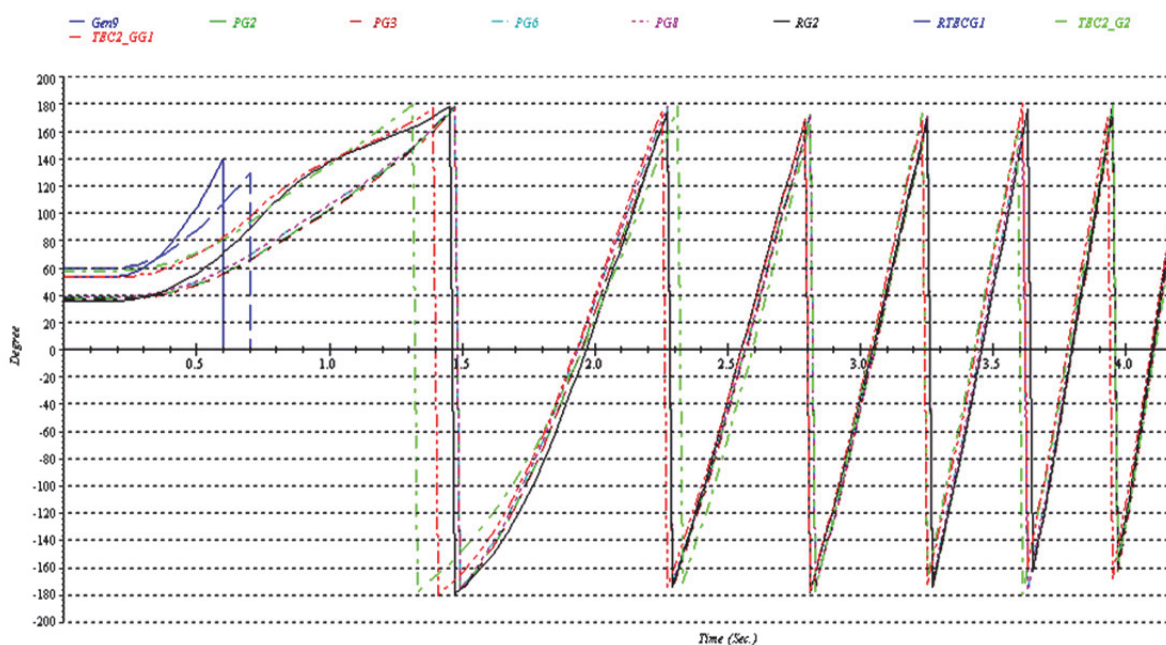
3.2. att. Latvijas enerģosistēmas ģeneratoru plašā mēroga AR



3.3. att. Dinamiskais process ar divu „bīstamo” ģeneratoru atslēgšanu

Salīdzinot 3.2. attēlu ar 3.3. attēlu ir redzams, ka paliekošie ģeneratori „nepārgāja” AR. Tas liecina par veikto korektīvo pasākumu efektivitāti un savlaicīgumu, kas rezultātā ļāva izvairīties no nevēlamām sekām (energosistēmas sabrukuma).

Atgriežoties pie bāzes gadījuma un veicot bīstamo ģeneratoru atslēgšanu, redzams, ka tāda iedarbe diemžēl nerada būtiskās ietekmes, jo visi ģeneratori pāriet AR (3.4. att.). Šāda veida procesu var paskaidrot ar to, kā perturbācijas ietekme bija pārāk spēcīga un esošās rezerves bija pārāk mazas. Aplūkotie rezultāti ļauj realizēt automātiku, kurai ir dažas iedarbju pakāpes – sākot no visbīstamāko ģeneratoru atslēgšanas un līdz gadījumiem, kad bīstamais process turpina veikt sistēmas dalīšanu.

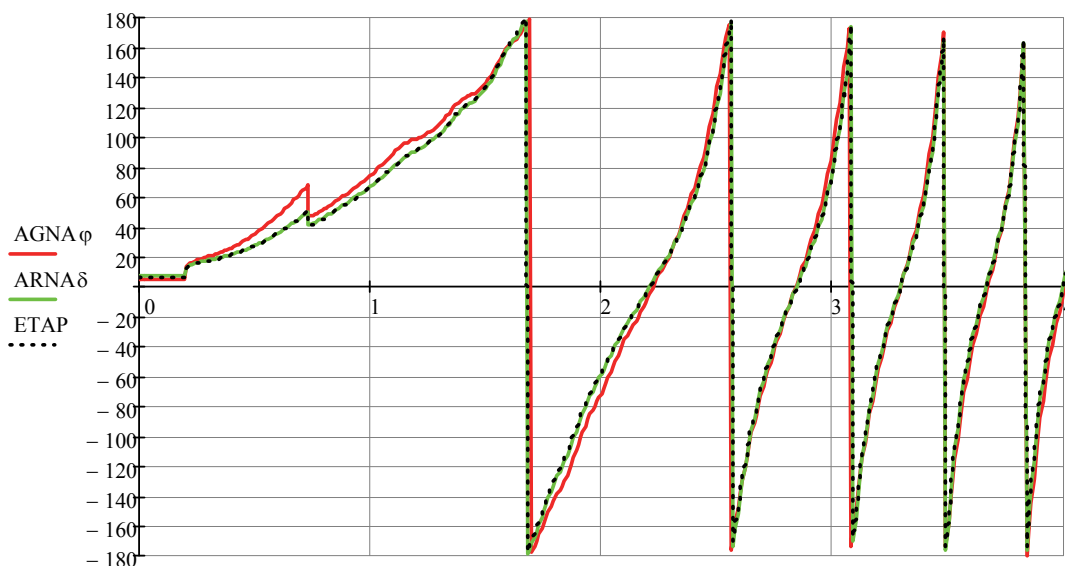


3.4. att. Ģeneratoru neefektīva atslēgšana

Automātiku darbības salīdzinājumam ir jāizvēlas aizsardzības instalācijas vietas. Atbilstoši augstāk izklāstītai analīzei var apgalvot, ka viens no bīstamākajiem Latvijas enerģosistēmas šķērsgrīzumumiem atrodas zonā starp Latviju un Krieviju. Tieši tāpēc tika

izvēlēta Pļaviņu HES ģeneratoru un Krievijas energosistēmas kopne kā kontrolējama zona (3.1. att.). „AGNA” ir pieslēgta kopnei „Liksna”, kur mēra spriegumu un mēra strāvu atbilstošajās līnijās. „AGNA” kontrolē leņķi starp augšminētajām kopnēm. Divu ierīču shēmas gadījumā pirmā ierīce instalēta līnijā „Aizkraukle – Krustpils”, mērot summāro strāvu no Pļaviņu HES ģeneratoriem; otrā – tajā pašā vietā, kur tiek instalēta „AGNA”. Aplūkojamā energosistēmas daļa iekļauj dažas slodzes un koncentrēto slodzes mezglu (Aizkraukle).

Analizējot aprēķinātus AR procesus un atbilstošus grafikus, ir iespējams novērtēt ARNA ierīču iestatījumu pareizību, salīdzinot vērtības, kas tiek aprēķinātās ETAP vidē (3.5. att.).



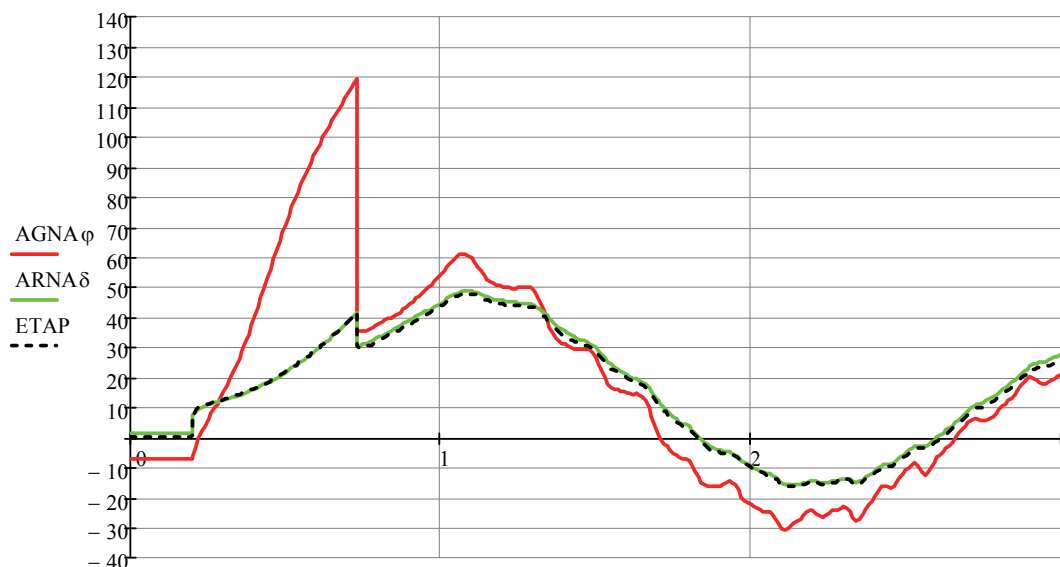
3.5. att. „AGNA” un ARNA modelēto leņķu salīdzinājums ar ETAP leņķi starp PHES un Velikoreckaja kopnēm (bāzes gadījums) [54]

Aplūkosim gadījumu, kas skar režīmu ar samazinātu slodzi un samazināto ģeneratoru skaitu (PHES darbībā ir tikai divi ģeneratori). Atbilstoši režīmam pretestības iestatījumi tika koriģēti (impedance, kas ievēro stacijas ekvivalento pretestību tika palielināta 4 reizes salīdzinājumā ar bāzes gadījumu (bāzes gadījumā darbā ir 8 ģeneratori)). Šajā gadījumā tika konstatēta būtiska „AGNA” leņķu modelēšanas rezultātu atšķirība no teorētiskām vērtībām (ETAP dati). Tas nozīmē, ka „AGNA” var nostrādāt kļūdaini, kas rezultātā izraisīs bīstamas sekas (zaudējumus). Vienlaicīgi, veicot ARNA ierīču darbības analīzi, ir iespējams secināt par izvēlēto iestatījumu precizitāti un modelēšanas algoritma atbilstību režīma datiem (3.6. att.).

Visi aprēķini un modelēšana tika veikti, izmantojot speciālā simulatora („Analog-Digital Power System Simulator”) ar attālinātas piekļuves iespēju. Tas bija ļoti noderīgi, jo visa programmatūra ir viena vietā un pieejama jebkurā laikā.

Energosistēmas topoloģijas un struktūras izmaiņas izraisa bīstama sekas, kas galvenokārt ir saistītās ar aizsargājamās zonas robežu izmaiņām. Šīs izmaiņas neizbēgami ietekmē „AGNA” režīmu „atpazīšanu” un atbilstošo vadības iedarbi. Veicot analīzi un modelēšanu, konstatēti trūkumi un nepilnības „AGNA” ierīcē: kļūdaina darbības iestatījumu izvēle sarežģītumu dēļ (ja mainās energosistēmas struktūra), augstā atkarība no jaudas plūsmas virzieniem, īpaši ja plūsma mainās dažos aizsargājamās zonas posmos. ARNA [50] shēmā nav tāda veida trūkumu, jo energosistēmas struktūras izmaiņām nav būtiskās ietekmes uz to korektu darbību, piemēram, kontrolējot lokālo situāciju (stacijas shēma), kurā ir samērā vienkārši ievērot visus iespējamus variantus. Tāpat pretestības iestatījumi netiek ietekmēti režīmu vai topoloģijas izmaiņu dēļ kā „AGNA”. Moderno programmatūru izmantošana ļāva veikt jaunās automatikas algoritmu pārbaudi. Tāpat veiktā analīze pierādīja tās efektivitāti un „dzīvotspēju” dažādos režīmos. Ir lietderīgi veikt „AGNA” nomaiņu uz jaunās paaudzes

automātiku ARNA, īpaši sarežģītas energosistēmas struktūras gadījumos, kad ir gandrīz neiespējami ievērot visus iespējamus režīmus un atbilstoši tiem – iestatījumus.



3.6. att. „AGNA” un ARNA modelēto leņķu salīdzinājums ar ETAP datiem (minimālas slodzes režīms – nakts režīms) [54]

#### 4. ASINHRONAIS REŽĪMA NOVĒRŠANAS AUTOMĀTIKAS TESTĒŠANA

Jau ilgus gadus pastāv iestatījumu izvēles problēma. Šajā laikā ir izveidotas dažas iestatījumu izvēles un aprēķināšanas metodikas, kas pašlaik tiek izmantotas energosistēmas PA jomā [39]. Tomēr ir ļoti sarežģīti novērtēt šo iestatījumu izvēles precizitāti, jo, attīstoties energosistēmas struktūrai, parādās jauni elementi (enerģijas avoti, līnijas), mainās topoloģija utt. Mūsdienīgu energosistēmu struktūra ir komplicēta un pakļauta līdzīga tipa bojājumiem un perturbācijām. Destabilizējošo iedarbju ietekme arī „evolucionē”, izraisot grūti prognozējamas un kontrolējamas sekas.

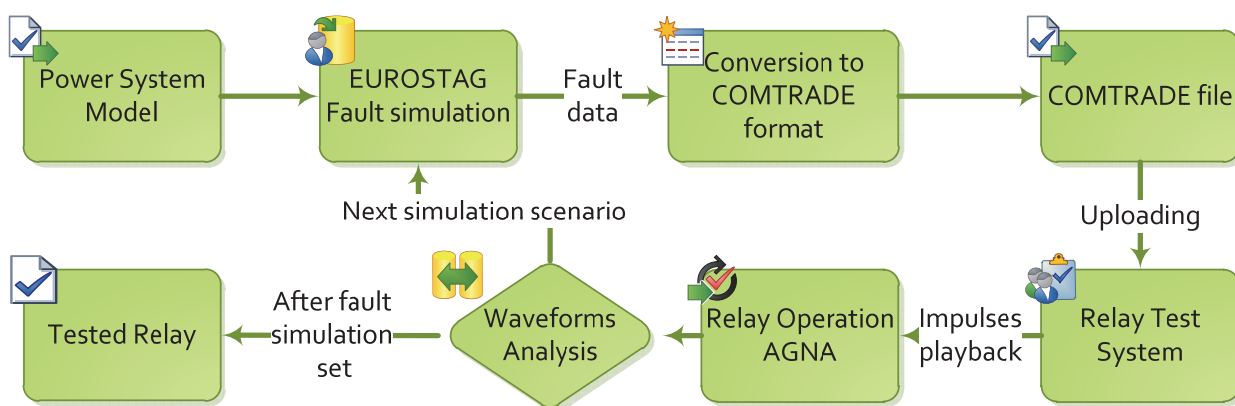
Vēl viens aspekts, kas tieši skar RA un PA iestatījumus, ir verifikācija jeb atbilstības pārbaude. Jāsaprot, ka izvēlētos iestatījumus aizsardzības ierīcēm nevar pārbaudīt reālos režīmos. Tādā veida problēma prasa efektīvu un precīzu risinājumu, lai nodrošinātu energosistēmas režīmu drošumu un atbilstību.

Lai modelētu avārijas procesus, var izmantot dažādus sākuma datu avotus, tomēr šajā darbā tiek izmantota EUROSTAG programmatūra, kas aprēķina signālus kā signāla efektīvās vērtības un fāzes leņķi. Tomēr nav iespējams izmantot šos rezultātus uzreiz, jo reālas RA ierīču darbības pārbaudei nepieciešami dati COMTRADE formātā [55]. Lai varētu izmantot šos datus tika izveidota speciāla tipa programmatūra, kas nodrošināja modelēto signālu konvertāciju COMTRADE formātā. Pēc konvertācijas signāli tika transformēti reālo strāvu un spriegumu vērtībās, kuras, savukārt, izmanto ierīču pārbaudēm.

Jāaplūko piedāvātā koncepta realizācijas piemērs. EUROSTAG programmatūrā ir realizēts energosistēmas modelis, kas sastāv no divām ģenerācijas zonām, savienotām ar augstsprieguma līnijām (110 kV un 330 kV) [56]. Energosistēma var kļūt nestabila 330 kV līnijas īsslēguma dēļ ar sekojošo veiksmīgu AAI. Mainot īsslēguma atslēgšanas laiku, slodzi, īsslēguma veidu un vietu, var modelēt dažādus scenārijus, kurus analizējot ir iespējams iegūt nepieciešamo informāciju par sistēmas uzvedību. Atkarībā no izvēlēta scenārija, iespējami gadījumi no sinhronām svārstībām līdz sinhronisma izjukšanai, kā arī AR var būt modelēti.



„AGNA” ierīce tiek izmantota, lai pasargātu energosistēmu no AR ietekmes. AR identifikācija ir balstīta uz leņķa kontroli. EUROSTAG programmatūra nodrošina jebkuru energosistēmas dinamiskas procesu modelēšanas signālu eksportu ASCII formātā. Tāad trīsfāžu strāvas un spriegumi var būt saglabāti ārējā failā un izmantoti pēc konvertēšanas reālo ierīču verificācijai. Releju testēšanas sistēma (RTS) (ISA DRTS) tiek izmantota, lai atskaņotu modelētus signālus. Lai konvertētu EUROSTAG izejas datus COMTRADE formātā tika izveidots speciāls konvektors [57]. Tā kā COMTRADE datu fails var būt izmantots ar jebkuru mūsdienīgu releju testēšanas iekārtu, kurai ir signālu atskaņošanas iespēja. Pēc simulācijas ir nepieciešams analizēt verificētā releja reakciju. Šim nolūkam tika speciāli izstrādāta programmatūra SMOKY2 [58]. SMOKY2 ļauj attēlot analogus un ciparu signālus, konstruēt vektoru diagrammas (dinamiskos un statiskos pētījumos), palielināt signāla attēlošanas precizitāti, atrast digitālo signālu izmaiņu, kā arī dažas citas iespējas. Īsi un kodolīgi metodoloģijas būtība ir apkopota 4.1. attēlā. [59].

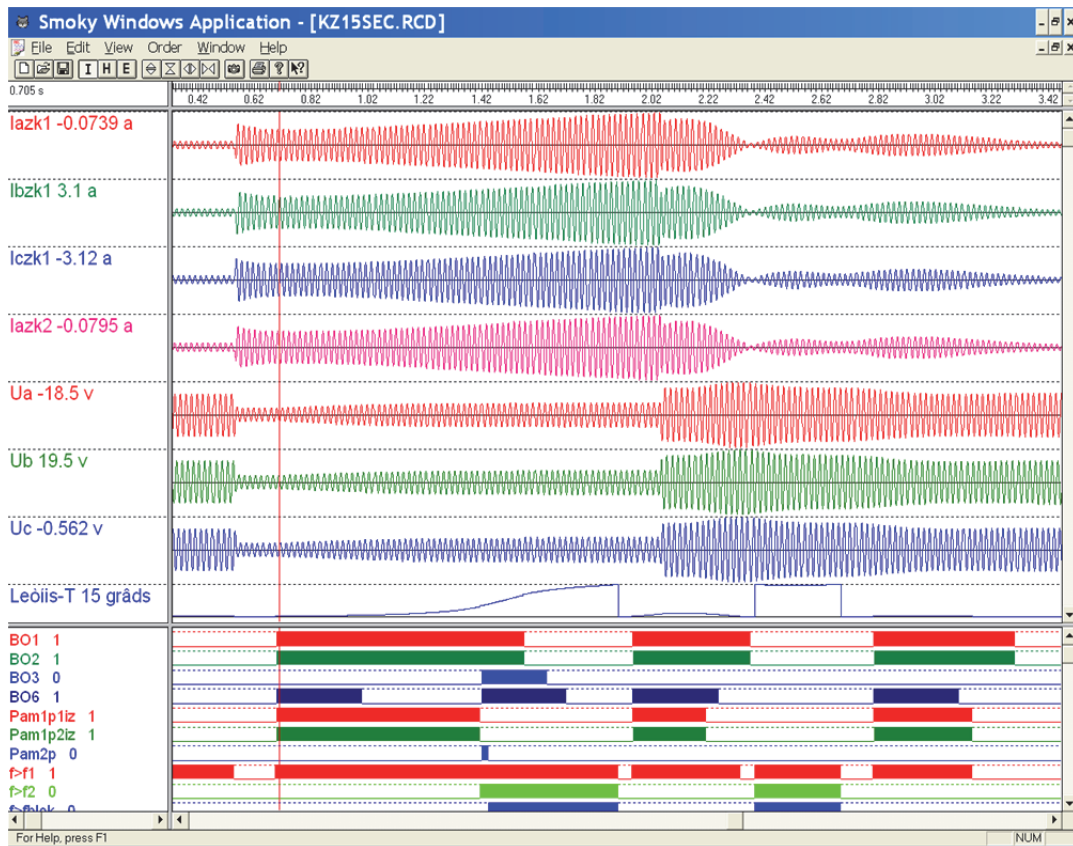


4.1. att. AR modelēšana un novēršanas terminālu darbību pārbaude [59]

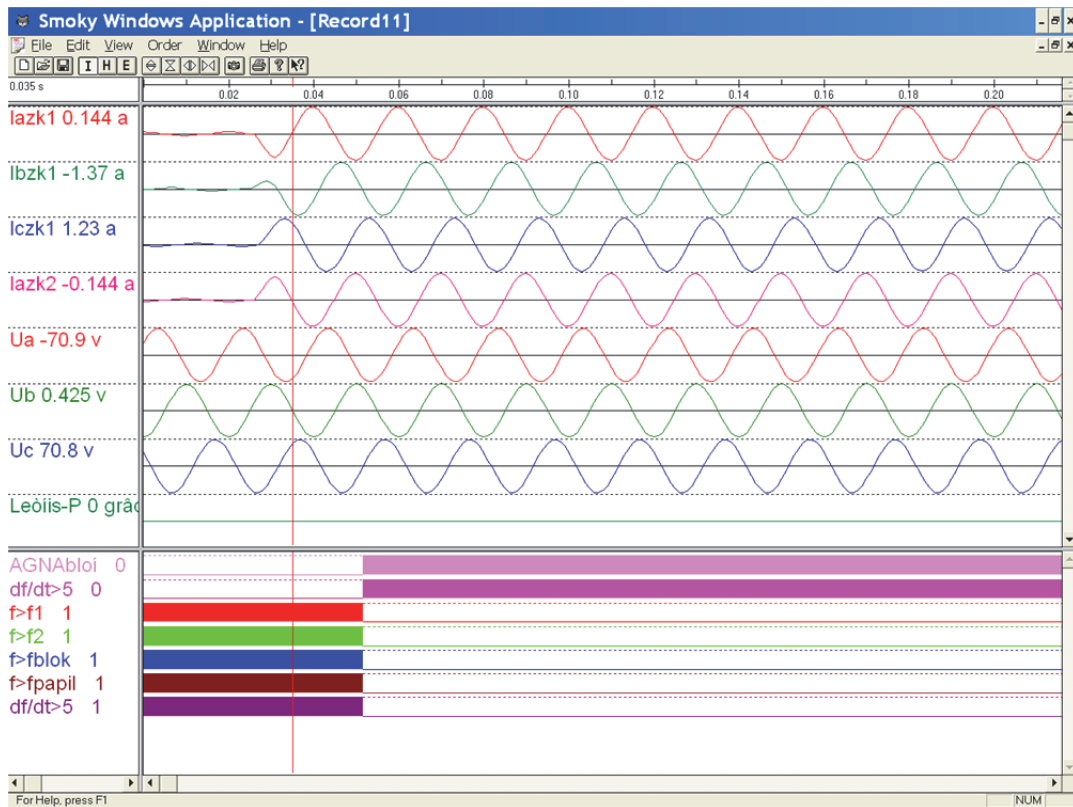
Protams „AGNA” ierīces realizācija ir saistīta ar vienkāršāko algoritmu salīdzinājumā ar jaunā tipa automātiku [49]–[51]. Lai veiktu ARNA ierīces darbības funkcionālo pārbaudi, tiek izmantota testēšanas metodika, kura aplūkota iepriekš. Šajā variantā papildus jāievēro divu ARNA ierīču iestatījumi, sakaru kanāla un GPS darbība. Tālāk tiks analizēti daži gadījumi, izmantojot oscilogrammas un lietojumprogrammu SMOKY. 4.2. attēlā ir AR oscilogramma, kas iestājas energosistēmā pēc ilgstoša trīsfāžu īsslēguma atslēgšanas. Leņķis starp modelētiem EDS un leņķa izmaiņas ātrums pārsniedza pirmās pakāpes pamatzonas nostrādes iestatījumus 1. un 2. izejai. Šo izeju darbība ir attēlota oscilogrammā ar diskrētiem signāliem “Pam1p1iz” un “Pam1p2iz” (4.2. att.). Tāpat ierīces izejas releju nostrāde, t. i. diskrētiem signāli BO1, BO2, BO6, izraisīja režīma izmaiņu energosistēmā, tomēr AR turpināja attīstīties. Rezultātā nostrādes nosacījumi saglabājas, ierīces pirmās pakāpes pamatzonas izejas releji nostrādāja atkārtoti.

Viena no galvenajām prasībām, kas ir izvirzīta ARNA ierīces darbībai, ir nepareizas nostrādes neiespējamība, t. i. liekas nostrādes īsslēgumu gadījumā energosistēmā. Ierīces tiek bloķētas strāvu un spriegumu nesimetriju gadījumā. Tomēr trīsfāžu īsslēguma gadījumos tiek aktivizēta papildbloķēšana, jo bloķēšana pēc nesimetrijas ir nepietiekoši jutīga. Ir zināms, ka trīsfāžu īsslēguma gadījumā nesimetrija ir īslaicīga, un ja tā netiek fiksēta, tad ierīce tiek bloķēta pamatojoties uz nosacījumiem:  $d\delta/dt > d\delta/dt_{max}$  un  $I1 > I_{blok3}$  vai  $U1 > U_{blok3}$ . Tāds gadījums ir attēlots oscilogrammā (4.3. att.). Trīsfāžu īsslēguma gadījumā strāvas un spriegumi, ko izmanto modelēto EDS aprēķinam, mainās lēcienveidīgi un leņķis starp tiem arī mainās līdzīgi. Šis nosacījums tiek fiksēts ar ierīci, jo izpildās nosacījums  $d\delta/dt > d\delta/dt_{max}$ . Un vienlaicīgi ar to, ja spriegums samazināsies mazāk par iestatījumu  $U_{blok3}$  vai strāva

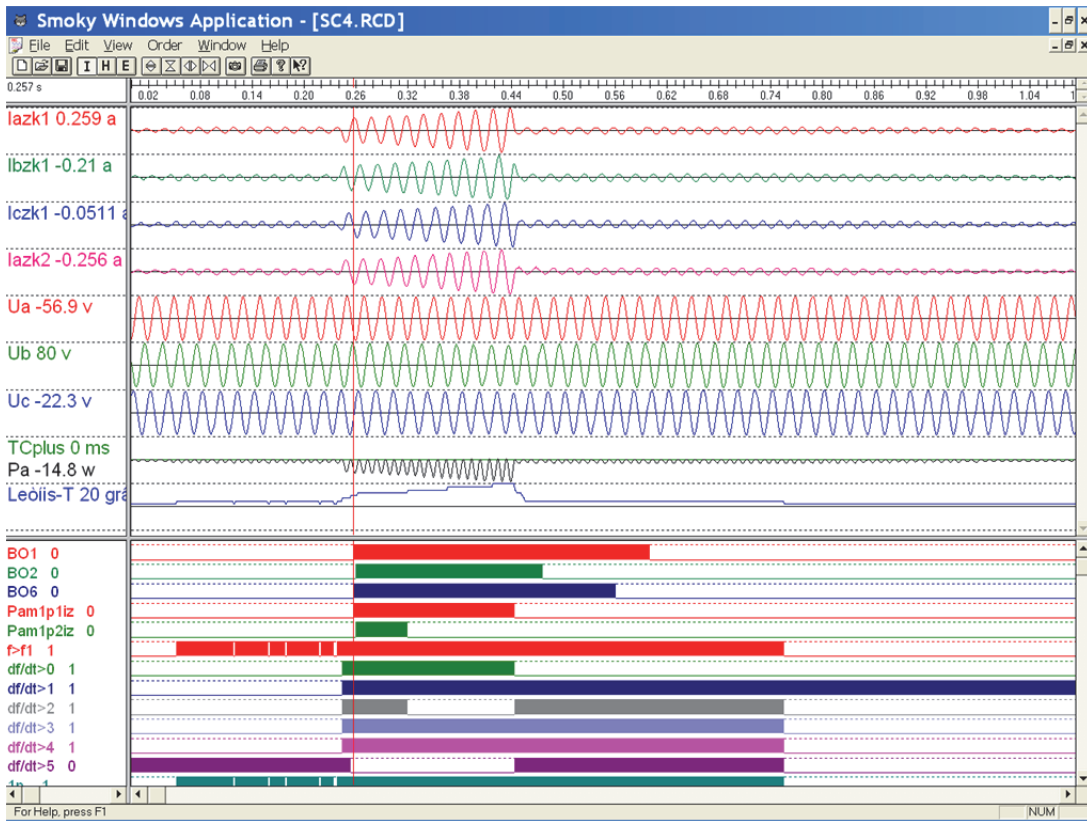
palielināsies virs  $I_{\text{blok3}}$  iestatījuma vērtības, tad ierīce tiek bloķēta, t. i. leņķa aprēķināšana apturēta un darbība tiks atjaunota gadījumā, kad spriegums un strāva būs normas robežās.



4.2. att. AR oscilogramma pēc ilgstoša trīsfāžu īsslēguma



4.3. att. Ierīces bloķēšana trīsfāžu īsslēguma gadījumā



4.4. att. Ierīces nekorektās darbības gadījums

Šī bloķēšana ir parādīta oscilogrammā kā diskrēts signāls “ $d\varphi/dt > 5$ ” (jaunā algoritmā  $\varphi$  jānomaina uz  $\delta$ ) (4.3. att.). Vienlaicīgi tiek padots ierīces bloķēšanas signāls “AGNAblok” (4.3. att.). 4.4. attēlā ir attēlota oscilogramma, kur parādīts gadījums, kad ierīce nekorekti nostrādā. Šajā gadījumā bloķēšana (pēc trīsfāžu īsslēguma esības fakta) ir neaktīva. Neskatoties uz to, ka nesimetrijas bloķēšanas nosacījumi bija aktīvi, īslaicīga trīsfāžu īsslēguma nesimetrija bija pārāk maza, kas rezultātā netika fiksēta un neizraisīja bloķēšanas nosacījumus pēc apgriezta secības strāvas un sprieguma. Tātad ierīce nostrādāja nekorekti, identificējot īsslēguma režīmu kā AR, kas ir absolūti nepieļaujams. Tas liecina par to, ka ARNA bloķēšanas iestatījumu izvēlei jāpievērš īpaša uzmanība.

## SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS TURPMĀKAM DARBAM

- ❖ Jebkurā energosistēmā var notikt AR, kas var izraisīt pilnu sistēmas sabrukumu, elektrostaciju apturēšanu un ilgstošu elektroapgādes pārtraukumu. Sabrukumu (avāriju) statistika pierada šo apgalvojumu.
- ❖ „N-1” kritērijs nespēj novērtēt energosistēmu un pretavāriju automātikas uzvedību stabilitātes izjaukšanas gadījumos, kā arī tas neievēro elementu atteices varbūtību, laika apstākļu ietekmi, slodzes pēkšņas izmaiņas un vēl dažus stohastiskus faktorus, kuriem kopumā ir noteicošā loma energosistēmas vadībā.
- ❖ Veikta iespējamo riska novērtēšanas pieeju analīze un salīdzinājums, pamatota stohastiskā pieeja ar drošuma un statistisko lēmumu teorijas paņēmieni un Montekarlo metodes izmantošanu.
- ❖ Lielo energosistēmu dinamiskas stabilitātes zuduma modelēšanas nolūkos pamatoti vienkāršotie varbūtiskie RA un PA darbības algoritmi un izstrādāta to verifikācijas metodika.
- ❖ Izmantojot GPS un optiskos sakaru kanālus, sintezēta jauna ARNA struktūra.
- ❖ Sintezēti jauni automātikas algoritmi un pierādīta to efektivitāte.
- ❖ Pierādīta ETAP 12.5 programmatūras izmantošanas iespēja energosistēmas režīmu modelēšanai automātikas terminālu pārbaudes nolūkos.
- ❖ Jāveic jaunās ARNA praktiskā realizācija un vadības ietekmes izpēte.
- ❖ Jāizvērtē jaunākas automātikas integrācijas iespējas WAMS un nepieciešamās modifikācijas.
- ❖ Energosistēmas topoloģijas un struktūras izmaiņas izraisa bīstamas sekas, kas galvenokārt ir saistītas ar aizsargājamās zonas robežu izmaiņām. Šīs izmaiņas neizbēgami ietekmē „AGNA” režīmu „atpazīšanu” un atbilstošas vadības iedarbes.
- ❖ Konstatēti trūkumi un nepilnības „AGNA” ierīcē, veicot analīzi un modelēšanu: kļūdaina darbības iestatījumu izvēle sarežģītumu dēļ (ja mainās energosistēmas struktūra), augsta atkarība no jaudas plūsmas virzieniem, īpaši, ja plūsma mainās dažos aizsargājamās zonas posmos. ARNA shēmā nav tāda veida trūkumu, jo energosistēmas struktūras izmaiņām nav būtiskas ietekmes uz to korektu darbību, jo kontrolējot lokālo situāciju (stacijas shēma) ir samērā vienkārši ievērot visus iespējamus variantus. Tātad pretestības iestatījumi netiek ietekmēti režīmu vai topoloģijas izmaiņu dēļ kā „AGNA” gadījumā.
- ❖ Izmantojot modernu programmatūru, ir iespējams veikt jaunās automātikas algoritmu pārbaudi. Tāpat veiktā analīze pierada tās efektivitāti un „dzīvotspēju” dažādos režīmos. Ir lietderīgi veikt „AGNA” nomaiņu uz jaunās paaudzes automātiku ARNA, īpaši sarežģītās energosistēmas struktūras gadījumos, kad ir gandrīz neiespējami ievērot visus iespējamus režīmus un atbilstoši tiem iestatījumus.
- ❖ ARNA efektīva funkcionēšana ir iespējama gadījumā, ja izpildās divi nosacījumi: ātrdarbīgo un drošo sakaru kanālu un GPS sinhronizācijas esamība.
- ❖ Jauno ARNA iespējamo iedarbju loks aptver samērā plašu diapazonu, kas savukārt ļauj realizēt komplicētu vadības iedarbju loku („bīstamo” ģeneratoru atslēgšana, saišu patraukšana, patērētāju atslēgšana utt.), lai nodrošinātu energosistēmas stabilitāti.



## IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] IEEE PSRC WG D6, "Power Swing and Out-of-Step Considerations on Transmission Lines" Final draft, June 2005, 59 p.
- [2] D. Tziouvaras and D. Hou, "Out-of-Step Protection Fundamentals and Advancements" Proceedings of the 30<sup>th</sup> Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 21–23, 2003, 282–307 pp.
- [3] U. N. Khan, L. Yan, Power Swing Phenomena and its Detection and Prevention, Faculty of Electrical Engineering, Wroclaw University of Technology, 2008, 4 p.
- [4] Sabrukumu saraksts: [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_major\\_power\\_outages](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_major_power_outages)
- [5] M. Bruch, V. Münch, M. Aichinger, M. Kuhn, M. Weymann, G. Schmid, Power Blackout Risks, Risk Management Options Emerging Risk Initiative, CRO Forum Position Paper, November 2011, 32 p.
- [6] Brazīlijas sabrukums: <http://www.bbc.com/news/world-latin-america-12369421>
- [7] Indijas sabrukums: <http://www.ndtv.com/article/cheat-sheet/northern-power-grid-completely-restored-after-worst-blackout-in-11-years-248943>
- [8] Blackout 2003: Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations, 238 p.
- [9] I. Castano, Spain reeling after blackouts, Utility Week;12/3/2004, Vol. 22 Issue 20, pN.PAG PUB. DATE, December, 2004. 24 p.
- [10] ASV un Kanādas sabrukums 2003:  
[http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/Attachment\\_1\\_Nextgen\\_Energy\\_Council\\_Lights\\_Out\\_Study.pdf.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/Attachment_1_Nextgen_Energy_Council_Lights_Out_Study.pdf.pdf)
- [11] J. Landstedt, P. Holmström, Electric Power Systems Blackouts and the Rescue Services: the Case of Finland, CIVPRO Working Paper, Allduplo, Stockholm, Sweden, 2007, 48 p.
- [12] UCTE Operation Handbook, v2.2, 24.06.2004, 144 p.:  
<https://www.entsoe.eu/publications/system-operations-reports/operation-handbook/>
- [13] Основные положения технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 г, ОАО ПАО «ЕЭС России», 2008 г., – 91 стр.
- [14] European Commission Directorate-General for Energy and Transport Study on the Technical Security Rules of the European Electricity Network, Final Report, February 2006, 147 p.
- [15] Tīkla kodekss, Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas padomes lēmums Nr. 1/4, Rīgā 2013. gada 26. jūnijā (prot. Nr. 24, 2. p.).
- [16] Blackout 2003: The August 14, 2003 Blackout One Year Later: Actions Taken in the United States and Canada To Reduce Blackout Risk, 18 p.
- [17] Wenyuan Li, Risk Assessment Of Power Systems: Models, Methods, and Applications. John Wiley&Sons, IEEE Press, 2005, 325 p.
- [18] Latvijas Zinātņu akadēmijas Terminoloģijas komisijas Informācijas tehnoloģijas, telekomunikācijas un elektronikas terminoloģijas apakškomisija: LZA TK informācijas tehnoloģijas un telekomunikācijas termini, Tilde 2009.
- [19] ISO Guide 73:2009, Risk management – Vocabulary, Switzerland, Geneva, 2009, 23 p.
- [20] B. Treimanis, V. Skujiņa, J. Liedskalniņa, D. Birznieks. — Rīga: Kamene, 1998. – 223 lpp.
- [21] Standartos lietotie informācijas tehnoloģijas termini, Latvijas Zinātņu akadēmijas Terminoloģijas komisijas Informācijas tehnoloģijas, telekomunikācijas un elektronikas terminoloģijas apakškomisija: <http://termini.lza.lv/>

- [22] Ulrich Hauptmanns, Wolfgang Werner, Engineering Risks: Evaluation and Valuation, Springer, 1<sup>st</sup> ed. 1991, XIII, 246 p.
- [23] On-line skaidrojošā vārdnīca: <http://www.merriam-webster.com/dictionary/risk>
- [24] Riska vadības vārdnīca (ISO 31000, 2009): <http://www.praxiom.com/iso-31000-terms.htm>
- [25] A structured approach to Enterprise Risk Management and the requirements of ISO 31000, AIRMIC, Alarm, IRM: 2010, 20 p.
- [26] International Standard Risk management – Risk assessment techniques, ISO-IEC 31010, IEC/ISO, 2009, 90 p.
- [27] SCADA sistēmu apskats:  
[http://www.icpdas.com/products/PAC/i-7188\\_7186/whatisscada.htm#top](http://www.icpdas.com/products/PAC/i-7188_7186/whatisscada.htm#top)
- [28] Reliability and Data Security Considerations for SCADA Systems Dan Ehrenreich, Motorola Inc., ENTELEC 2004, San Antonio, Texas, April 14–16, 2004, 9 p.
- [29] R. Kalapatapu, Scada Protocols and Communication Trends, The Instrumentation, Systems and Automation Society, ISA 2004, Houston, Texas, 5–7 October 2004, 11 p.
- [30] U. Häger, C. Rehtanz, N. Voropai (Eds.), Monitoring, Control and Protection of Interconnected Power Systems (Chapter 14), Springer 2014, 391 p.
- [31] A. Sauhats, D. Antonovs, A. Dolgicers, R. Petričenko, J. Kucajevs, Dynamic Security Assessment and Risk Estimation. Riga Technical University 54<sup>th</sup> International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga: RTU Press, (2013), 56–58 pp.
- [32] Вентцель Е. С., Теория вероятностей. 4-е изд., – М.: Физматгиз, 1969, – 576 стр.
- [33] Корн Г., Корн Т., Справочник по математике (для научных работников и инженеров), – М.: Наука, 4-е издание, 1977, – 831 стр.
- [34] Инженерные методы исследования надежности радиоэлектронных систем: пер. с англ. / ред.: А. М. Половко, А. Г. Варжапетян. – М.: Сов. радио, 1968. – 336 стр.
- [35] Alstom MiCOM tipa termināls: [=ftp://tdefftp\\_public:fWHsaKLx@ftp.alstom.com/Alstom\\_Manuals/P54x\\_EN\\_M\\_K74.pdf](ftp://tdefftp_public:fWHsaKLx@ftp.alstom.com/Alstom_Manuals/P54x_EN_M_K74.pdf)
- [36] REL 512 Numerical Transmission Line Protection System, ABB Inc., Substation Automation and Protection Division, Coral Springs, FL, Allentown, PA, 2011, 8 p.
- [37] 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.
- [38] Numerical Relay GRL100 Line Differential Protection, Toshiba Corporation, Industrial and Power System&Service Company, Shibaura, Manato-Ku, Tokyo, Japan, 2008, 34 p.
- [39] Наровлянский В. Г. Современные методы и средства предотвращения асинхронного режима электроэнергетической системы. М.: Энергоатомиздат. 2004. – 360 стр.
- [40] AR novēršanas automātika „АЛІАР-М”: <http://regimov.net/content.php/67-alar-m>
- [41] AGNA apraksts: [http://remi.eef.rtu.lv/docs/AGNA\\_eng\\_2008\\_lil.pdf](http://remi.eef.rtu.lv/docs/AGNA_eng_2008_lil.pdf)
- [42] C. Carter, Principles of GPS: A Brief Primer on the Operation of the Global Positioning System, Allen Osborne Associates, February, 1997, 44 p.
- [43] Phadke, A. G., Thorp, J. S., Synchronized Phasor Measurements and Their Applications, Power Electronics and Power Systems, Springer Science+Business Media, 2008, 254 p.
- [44] Bretas, A. S. and Phadke, A. G., “Artificial neural networks in power system restoration”, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 18, No. 4, October 2003, 1181–1186 pp.

- [45] Real-Time Application of Synchrophasors for Improving Reliability, North American Electric Reliability Corporation, October 2010, 77 p.
- [46] E. Schweitzer III, D. Whitehead, G. Zweigle, K. G. Ravikumar, Synchrophasor-Based Power System Protection and Control Applications, Texas A&M Conference for Protective Relay Engineers, 2010, 10 p.
- [47] TMS320F/C24x DSP Controllers, Reference Guide CPU and Instruction Set, Texas Instruments Incorporated, 1999, 389 p.
- [48] TMS320F sērijas procesori: <http://www.datasheetarchive.com/TMS320F-datasheet.html>
- [49] A. Sauhats, D. Antonovs, A. Svalovs, J. Kucajevs, Patents LV 14375 B, 12.05.2011., Nesinhronas gaitas automātikas ierīce.
- [50] D. Antonovs, A. Sauhats, A. Utāns, E. Biēla, Patents LV 14832 B, 05.07.2013., Asinhronās gaitas novēršanas automātikas ierīce un paņēmieni.
- [51] D. Antonovs, A. Sauhats, A. Utāns, E. Biēla-Dailidoviča, Patents LV 14912 B, 27.06.2014., Asinhronā režīma novēršanas automātikas ierīce un paņēmieni.
- [52] „LIDA” aizsardzības tehniskais apraksts: [www.eef.rtu.lv/doc/studiju\\_materiali/004.pdf](http://www.eef.rtu.lv/doc/studiju_materiali/004.pdf)
- [53] Latvijas tīkla kodekss: <http://likumi.lv/doc.php?id=257943>
- [54] Antonovs, D., Sauhats, A., Utāns, A., Svalovs, A., Bockarjova, G. Protection Scheme against Out-of-Step Condition Based on Synchronized Measurements, 18<sup>th</sup> Power System Computation Conference (PSCC 2014), Poland, Wroclaw, 18.–22. August, 2014, 8 p.
- [55] 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.
- [56] Sauhats, A., Silarajs, M., Kucajevs, J., Pašņins, G., Antonovs, D., Biēla, E. Testing of Protection and Automation Devices Using Dynamical Simulation Processes of Power System // Electrical and Control Technologies. – 6. (2011), 184–189 pp.
- [57] Sauhats, A., Utāns, A., Kucajevs, J., Pašņins, G., Antonovs D., Biēla, 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.
- [58] Lietojumprogramma “Smoky2”: <http://remi.eef.rtu.lv/>
- [59] A. Sauhats, A. Utans, M. Silarajs, J. Kucajevs, D. Antonovs, E. Biela, I. Moshkin. Power System Dynamical Simulation Application for Out-of-Step Relay Testing. Journal of Energy and Power Engineering Volume 6 Number 8, August 2012, 1343–1348 pp.