

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Sergejs KOVALENKO

Doktora studiju programmas „Enerģētika un elektrotehnika” doktorants

**ELEKTROENERĢĒTISKO SISTĒMU STATISKĀS STABILITĀTES
NOVĒRTĒŠANAS METODES, KRITĒRIJI UN ALGORITMI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
Dr. sc. ing., profesore
I. ZICMANE

Zinātniskais konsultants
Dr. sc. ing.
G. GEORGIEVS

Rīga 2014

Kovaļenko S. Elektroenerģētisko sistēmu statistiskās stabilitātes novērtēšanas metodes, kritēriji un algoritmi. Promocijas darba kopsavilkums.– R.: RTU, 2014.– 39 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Promocijas padomes P-05 (Enerģētika) 2014. gada 20. oktobra lēmumu Nr. 14/14



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

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

Šis darbs ir tapis ar Eiropas Sociālā fonda (ESF) līdzfinansēta projekta „Energosistēmu stratēģiskās attīstības un vadības tehniski – ekonomisko problēmu izpēte un risināšana” vienošanās Nr. 2013/0011/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/028, RTU PVS ID 1763 atbalstu

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2014. gadā 27. novembrī Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un Elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 306. kabinetā, plkst. 14:00.

OFICIĀLIE OPONENTI

Profesors, *Dr. habil. sc. ing.* **Antanas Saulus Sauhatas**
Rīgas Tehniskā universitāte, Enerģētikas institūta direktors

Dr. sc. ing. **Aleksandrs Ļvovs**
Režīmu un plānošanas dienesta inženieris, AS „Augstsprieguma tīkls”

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.

Sergejs Kovaļenko (paraksts)

Datums

Promocijas darbs uzrakstīts angļu valodā, tas satur ievadu, 5 nodaļas un literatūras sarakstu. Darba kopējais apjoms ir 141 datorsalikuma lappuses, kurās ietverti 47 attēli un 29 tabulas. Literatūras sarakstā norādītas atsauces uz 98 izmantotās literatūras avotiem.

SATURS

PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE	5
PROMOCIJAS DARBA MĒRĶI UN UZDEVUMI	9
PĒTĪJUMA METODES UN LĪDZEKĻI.....	9
PROMOCIJAS DARBA ZINĀTNISKĀ NOZĪME	9
PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME	10
PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA	10
PUBLIKĀCIJAS	11
PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS	13
1. SAREŽĢĪTO ELEKTROENERĢĒTISKO SISTĒMU (EES) STATISKĀS STABILITĀTES ANALĪZES GALVENIE ASPEKTI	14
2. MŪSDIENĪGO PIEEJU APSKATE, KURAS PIELIETO SAREŽĢĪTO EES STATISKĀS STABILITĀTES ANALĪZEI.....	15
3. JAUNĀ ALGORITMA SINTĒZE RAKSTURĪGĀ POLINOMA (RP) SAKŅU NOVĒRTĒŠANAI.....	17
4. MODIFICĒTĀ ROTĀCIJAS METODE EES STATISKĀS STABILITĀTES ANALĪZEI.....	24
5. SARĒŽĢĪTO EES STATISKĀS STABILITĀTES ANALĪZE	29
SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS TURPMĀKAJAM DARBAM	33
IZMANTOTO INFORMĀCIJAS AVOTU SARAKSTS.....	36

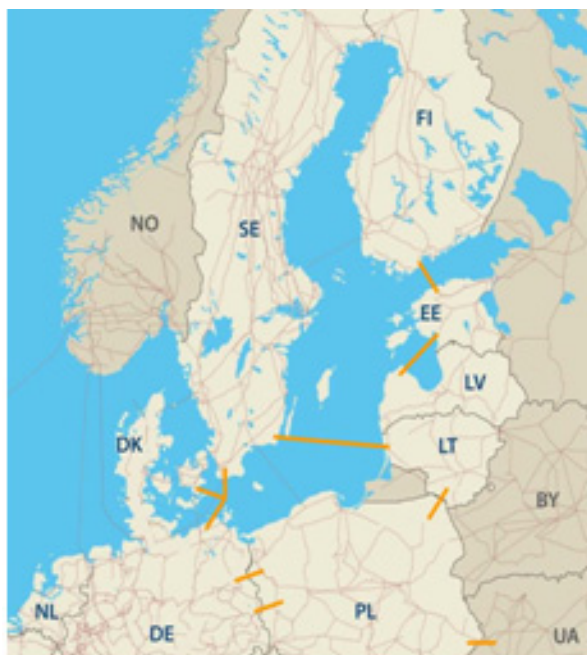
PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE

Energosistēmu statiskā stabilitāte ir bijusi un turpina būt svarīga problēma sistēmu darbībā. Mūsdienu elektroapgādes sistēmas ir ļoti sarežģītas, jo palielinās starpsavienojumu skaits, tiek uzstādītas lielas ražošanas vienības, virsaugstsprieguma savienošanas līnijas utt. Statiskā stabilitāte attiecas uz enerģosistēmas spēju atgūt sinhronismu pēc tāda neliela un lēna traucējuma, kā, piemēram, pakāpeniskas jaudas izmaiņas.

Ekonomiskie un ekspluatācijas faktori liek enerģosistēmām izmantot vislielāko procentuālo daļu no to pārvades jaudas un līdz ar to darboties tuvu stabilitātes robežai ar nelielu rezervi. Šādā vidē sprieguma nestabilitāte ir kļuvusi par galveno draudu enerģosistēmas drošībai. Pašlaik lielākā daļa elektroenerģētikas uzņēmumu izmanto ātrās reaģēšanas ierosmes sistēmas, ātrākus relejus un stabilizēšanas ierīces, lai uzlabotu sistēmas drošības rezervi. Enerģosistēmām visā pasaulē sprieguma stabilitātes un sprieguma lavīnas problēmas ir kļuvušas aizvien aktuālākas. Elektroenerģētikas uzņēmumi ir piedzīvojuši vairākas lielākās sprieguma lavīnas parādības, kuru rezultāts bija elektroenerģijas padeves pārtraukumi. Neskatoties uz sprieguma nestabilitātes dinamisko raksturu, statiskās metodes izmanto tā analīzei, pamatojoties uz to, ka sistēmas dinamika, kas ietekmē sprieguma stabilitāti, ir parasti lēna.

Bojājums var notikt dažādās enerģosistēmas vietās, piemēram, pie ģeneratora kopnēm, elektropārvades līnijas vidū vai pie bezgalīgās kopnes utt. Lai atrisinātu statiskās stabilitātes problēmas, izmanto ļoti vienkāršu ģeneratora modeli, kas uzskata ģeneratoru par nemainīga sprieguma avotu. Statiskās stabilitātes problēmu risinājumu tehnoloģija ietver sistēmas stabilitātes pārbaudi pie inkrementālām variācijām ap līdzsvara punktu. Lineārās analīzes metodes var izmantot, lai noteiktu, vai sistēma paliks sinhronizēta pēc nelielām izmaiņām no darba punkta, vai ne. Parocīgi pieņemt, ka traucējumi, kas izraisa izmaiņas, izzūd. Sistēmas kustība ir brīva; stabilitāte tiek nodrošināta, ja sistēma atgriežas sākotnējā stāvoklī. Šādu rīcību var noteikt lineārā sistēmā, pārbaudot sistēmas raksturīgo vienādojumu.

Visos stabilitātes pētījumos principiālais mērķis ir noteikt, vai mašīnu rotoru perturbācijas laikā atgriežas pie konstanta ātruma darbības, vai ne. Acīmredzot tas nozīmē, ka rotoru ātrumiem vismaz uz laiku jānovirzās no sinhronā ātruma. Pēdējo trīs desmitgažu laikā tiek plaši izmantoti enerģosistēmas stabilizatori (ESS), lai palielinātu sistēmas zemas frekvences svārstību slāpēšanu. Visā pasaulē enerģētikas uzņēmumi pašlaik īsteno ESS kā efektīvus ierosmes kontrollerus, lai uzlabotu sistēmas stabilitāti dažādos bojājumu apstākļos.



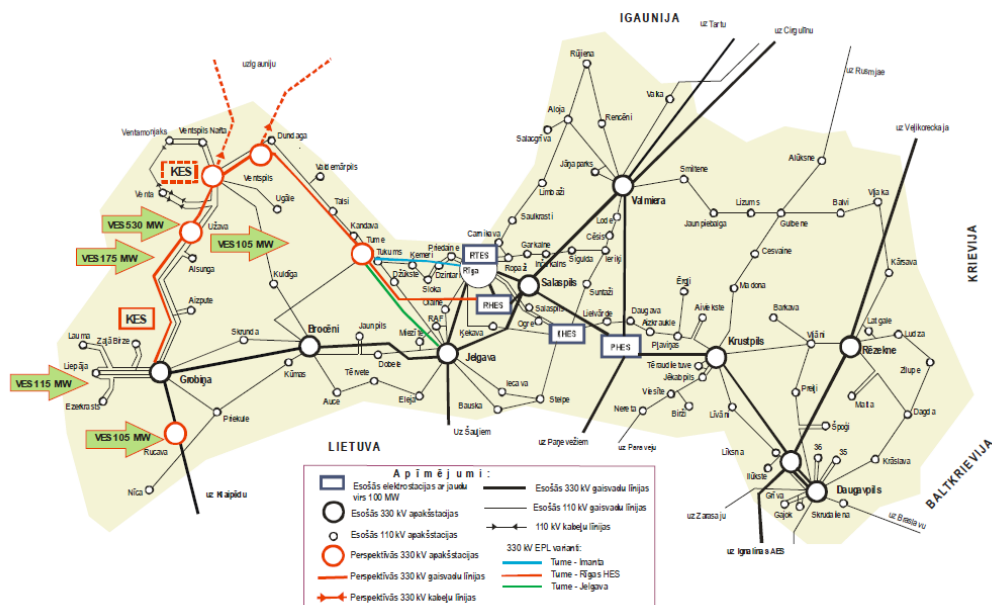
1.1. att. BEMIP BEMIP [55]

2009. gada 17. jūnijā astoņas Baltijas jūras reģiona dalībvalstis (Dānija, Vācija, Igaunija, Latvija, Lietuva, Polija, Somija un Zviedrija) parakstīja Saprašanās memorandu par Baltijas enerģētikas tirgus starpsavienojumu plānu (BEMIP). BEMIP ir deviņu mēnešu darba rezultāts pēc Eiropas Komisijas (EK) iniciatīvas apskatīt konkrētus pasākumus, lai labākā veidā savienotu Lietuvu, Latviju un Igauniju ar plašākiem ES elektroapgādes tīkliem (1.1. att.).

Nepieciešamība izstrādāt Latvijas Rietumu reģiona pārvades tīkla novērtējumu rodas vairāku apsvērumu dēļ, no kuriem vissvarīgākais ir elektroapgādes drošība. Tuvākajos gados paredzētas būtiskas izmaiņas ģenerējošās jaudas pievienošanā šī reģiona pārvades tīklam, kā arī jaunu starpsistēmu savienojumu izveide (1.2. att.). Rietumu piekrastē paredzēts izbūvēt Kurzemes KES un vēja elektrostaciju, kā arī plānots būvēt jaunus starpsistēmu savienojumus no Baltijas līdz Zviedrijai un Somijai. Šīs izmaiņas rada nepieciešamību pārbaudīt pārvades tīkla caurlaides spējas pietiekamību un noteikt veicamos tehniskos pasākumus [34].

Tirgus ekonomika diktē pasaules enerģētisko sistēmu apvienošanas nosacījumus, kas veicina starpsistēmu saišu skaita izmaiņu, pārraidītās jaudas palielinājumu, rezultātā rodas nepieciešamība pārkonfigurēt tīklus un, attiecīgi, to normālo režīmu pārrēķinu, kā arī ir nepieciešama statistiskās stabilitātes projekta novērtēšana Stabilitāte ir būtisks ierobežojums energosistēmas darbībā un kontrolē. Ar energosistēmas stabilitāti saprot spēju atgūt līdzsvara stāvokli pēc tam, kad tā bijusi pakļauta fiziskam traucējumam. Galvenā statistiskās stabilitātes

analīzes metode ir sistēmas stabilitātes noteikšana, aplūkojot īpašvērtības stacionārajā režīmā. Tas nodrošina atbilstošu stratēģiju, lai varētu ātri pieņemt lēmumu par sistēmas statisko režīmu.



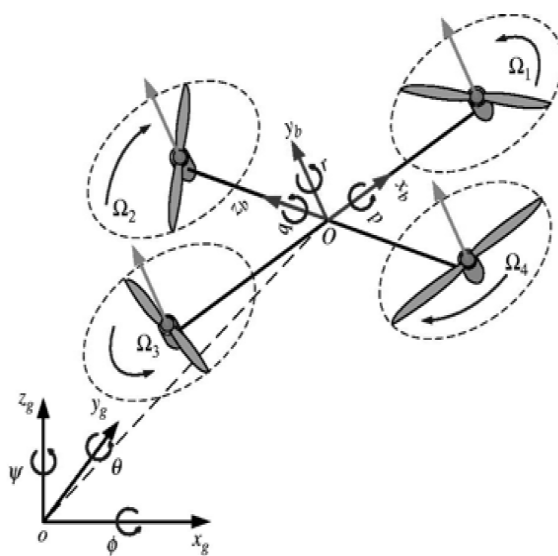
1.2. att. Kurzemes 330 kV elektropārvades līniju loka varianti uz 2018. gadu

Energosistēmas stabilitāte ir atzīta par svarīgu problēmu drošības sistēmas darbībā kopš 1920. gada. Daudzi lielākie elektroapgādes pārtraukumi, ko izraisīja elektroenerģijas sistēmas nestabilitāte, ir pierādījuši šīs parādības nozīmīgumu. Vēsturiski, pārejoša nestabilitāte ir bijusi dominējošā stabilitātes problēma lielākajā daļā sistēmu, kā arī bijusi uzmanības centrā daudzās nozarēs attiecībā uz sistēmas stabilitāti. Sakarā ar to, ka elektroenerģijas sistēmas ir attīstījušās, turpinot pieaugt starpsavienojumiem, jauno tehnoloģiju izmantošana un kontrole, kā arī pieaugošās operācijas liela stresa apstākļos ir parādījušās dažādas sistēmas nestabilitātes formas. Piemēram, sprieguma stabilitāte, frekvences stabilitāte un starpzonu svārstības ir kļuvušas par lielākām bažām, nekā agrāk. Tas radīja nepieciešamību pārskatīt elektroenerģijas sistēmas stabilitātes definīciju un klasifikāciju. Skaidra izpratne par dažāda veida nestabilitāti un kā tas ir savstarpēji saistīts ir būtiska apmierinošu elektroenerģijas sistēmu projektēšanai un ekspluatācijai [33].

Stabilitātes pārbaudei ir visaugstākā vērtība, pārbaudot sistēmas automātisku kontroli, ar kuru ir aprīkota lielākā daļa industriālo objektu un transports [36].

Pārsvārā lidmašīnas lidojuma laikā kontrolē automātiskās ierīces – autopilots. Jūrā kuģus vada automātiskie stūrmaņi, tehnoloģisko procesu raksturojumu pastāvīgumu lielākajā

daļā rūpnīcu nodrošina automātiskie regulētāji. Piemēram, stabilitātes teorija tiek plaši pielietota arī aviācijā helihoptera dzinēju drošai funkcionēšanai. Ir daudz lietojumprogrammu bezpilota lidaparātiem (BPLA) aizsardzības un civilajā jomās monitoringam, attālinātai izpētei, uzraudzībai, bīstamai videi utt. Kvadrokopters ir topošā lidaparāta koncepcija BPLA, kas sastāv no četriem rotoriem, ar diviem pretrotācijas pāriem, fiksētiem lāpstiņu soļiem, kas ir izvietoti lidaparāta četros stūros. Kvadrokopters ir dinamisks transportlīdzeklis ar četriem ievades spēkiem, sešiem izejas koordinātoriem, ar stipri saistītām un nestabilām dinamikām (1.3. att.). Šīs sistēmas stabilizācijai izmanto stabilitātes teoriju (Lapunova teorija) [43].



1.3. att. Kvadrokoptera shēma [43]

Vadības sistēmās mainīgie $x_1; x_2; \dots; x_n$ parasti ir procesa raksturojumu novirzes no vēlamā lieluma. Ja automātiskās vadības sistēmas matemātiskais modelis ir diferenciālo vienādojumu sistēma ar nestabiliem risinājumiem, tad šīs novirzes ātri pieaugs un normāla sistēmas darbība kļūs neiespējama. Tāpēc vēl projektēšanas gaitā visās projektēšanas un konstruktoru organizācijās vienmēr pārbauda, vai projektētā sistēma būs stabila vai nē. Tikai sistēmu, kas saskaņā ar pārbaudes aprēķinu ir stabila, pielaiž „īstenošanai metālā”. Pieņemsim, ka pieļaujot kļūdu aprēķinā, nestabilu vadības sistēmu aprēķina laikā atzina par stabilu. Tas ir nepatīkami, bet nav bīstami. Izmēģinājumu laikā sistēmas nestabilitāte tiks atklāta uzreiz, pateicoties ātri pieaugošām vadāmā procesa reālās plūsmas novirzēm no reālām un sistēmu norakstīs kā brāķi ar attiecīgu zaudējumu norakstīšanu. Daudz bīstamāka ir kļūda, kas skar stabilitātes saglabāšanas jautājumu parametru variāciju ietvaros [36].

Līdz ar to, stabilitātes teorija ir pamatlicēja daudzās zinātnes nozarēs un tiek plaši pielietota drošai un kvalitatīvai dažādu inženieru sistēmu funkcionēšanai.

PROMOCIJAS DARBA MĒRĶI UN UZDEVUMI

Promocijas darba mērķis ir energosistēmas statistiskās stabilitātes līmeņa paaugstināšana.

Uzdevumi saskaņā ar tēmas aktualitāti ir:

1. Mūsdienīgo energosistēmas (EES) statistiskās stabilitātes novērtēšanas metožu apskats.
2. Principiāli jaunā statistiskās stabilitātes novērtēšanas algoritma meklēšana.
3. Klasiskās pieejas izpēte statistiskās stabilitātes analīzei ar RP palīdzību un jaunu ideju ieviešana tā pielietojumam mazajām EES.
4. Statiskās stabilitātes novērtēšanas kritērija izstrāde lielajām EES, pamatojoties uz modificēto rotācijas metodi.
5. Grafiskā moduļa algoritma izstrāde datorprogrammai statistiskās stabilitātes novērtēšanai. Šim algoritmam uzskatāmi jāatspoguļo elektrotīkla konfigurācijas izmaiņas.

PĒTĪJUMA METODES UN LĪDZEKĻI

Darba rezultāti tika iegūti, pielietojot sekojošas datorprogrammas un metodes:

1. Diferenciālvienādojumu teorija, matricu algebra un grafu teorija;
2. EES modelēšana MATHCAD, EUROSTAG vidē;
3. RP analīze, izmantojot datorprogrammas MAPLE un MATHCAD;
4. Rezultātu apstrāde un grafiskā attēlošana – MS EXCEL, MATHCAD.

PROMOCIJAS DARBA ZINĀTNISKĀ NOZĪME

Zinātnisko novitāti raksturo sekojoši aspekti:

1. Sintēzēta jauna energosistēmu statistiskās stabilitātes novērtēšanas metode, kuru var pielietot:
 - 1.1. Mazo EES analīzei. Tiek izmantots raksturīgais polinoms un modificētā Ņūtona metode, sakņu grafiskā lokalizācija;
 - 1.2. Lielo EES analīzei. Tiek izmantotas modificētās rotācijas metodes un dekompozīcijas metodes, pateicoties kurām dati par katru to struktūru apakšsistēmu saglabā konfidencialitāti un paliek slēgti citas apakšsistēmas īpašniekam.
2. Ir izstrādāts unificētas datorprogrammas grafiskā moduļa algoritms EES statistiskās stabilitātes novērtēšanai.

PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

Tirgus ekonomika diktē pasaules enerģētisko sistēmu apvienošanas nosacījumus, kas veicina starpsistēmu saišu skaita izmaiņu, pārraidītās jaudas palielinājumu, rezultātā rodas nepieciešamība pārkonfigurēt tīklus un, attiecīgi, to normālo režīmu pārrēķinu, kā arī ir nepieciešama statistiskās stabilitātes projekta novērtēšana. Tāpēc promocijas darba rezultāti var kalpot par pamatu turpmākiem pētījumiem sarežģīto EES statistiskās stabilitātes jomā, kā arī veidojot moduli specializētai datorprogrammai statistiskās stabilitātes novērtēšanai.

PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

Darba rezultāti tika ziņoti un apspriesti 10 starptautiskajās konferencēs:

1. G. Georgiev, I. Zicmane, **S. Kovalenko**, E. Antonovs. **AN ALGORITHM OF AUTOMATIC PLOTTING OF ELECTRICITY SUPPLY NETWORK CIRCUIT**. The 5th International Conference “ELECTRICAL AND CONTROL TECHNOLOGIES ECT – 2010”, 2010. gads, 6.–7. maijā, Kauņa, Lietuva, ISSN 1822-5934
2. Г. Д. Георгиев, И. А. Зицмане, Э. С. Антонов, **С. А. Коваленко**. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ РАЦИОНАЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ В СЕТЯХ ВЫСОКОГО И СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ. XI Международная Научно-техническая конференция. „ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ-2010”, 2010. gads, 31. maijā – 4. jūnijā, Kijevas, Ukraina.
3. G. Georgiev, I. Zicmane, **S. Kovalenko**, E. Antonovs. **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВОЛНОВОГО АЛГОРИТМА ЛИ**. „THE INTERNATIONAL ENERGY FORUM 2010”, 2010. gads, 23.–26. jūnijā, Varna, Bulgārija.
4. G. Georgiev, I. Zicmane, **S. Kovalenko**, E. Antonov. THE PRINCIPLE OF CREATING A GRAPHICAL EDITOR FOR AUTOMATIZATION PROCESS TRACING ELECTRICAL CIRCUITS. The 51st Annual International Scientific Conference of Riga Technical University, 2010. gads, 14. oktobrī, Rīga, Latvija, ISBN 978-9934-10-054-3
5. G. Georgiev, I. Zicmane, E. Antonov, **S. Kovalenko**. EXPRESS ESTIMATION OF INFLUENCE OF COMPENSATORY REACTIVE POWER ON THE ACTIVE LOSSES IN THE HIGH VOLTAGE NETWORKS. International Scientific and Technical Conference

“Electrical Power Engineering 2010”, 2010. gads, 14.–16. oktobrī, Varna, Bulgārija, ISBN 978-954-20-0497-4

6. G. Georgiev, I. Zicmane, E. Antonov, **S. Kovalenko**. AN AGGREGATE ANALYTICAL LOAD MODEL WITH VOLTAGE DEPENDANT CHARACTERISTICS. The 6th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2011., 2011. gads, 5.–6. maijā, Kauņa, Lietuva, ISSN 1822-5934

7. G. Georgiev, I. Zicmane, **S. Kovalenko**. HIGH ORDER CHARACTERISTIC POLYNOMIAL ROOTS’ LOCATION ANALYSIS (ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ КОРНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО ПОЛИНОМА ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ) ELEKTROENERGETIKA 2011 The Sixth International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering., 2011. gads, 21.–23. septembrī, Augstie Tatri, Slovākija, ISBN 978-80-553-0724-4

8. G. Georgiev, I. Zicmane, **S. Kovalenko**. STATIC STABILITY ANALYSIS OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS BY MEANS OF ROOT LOCATION OF A CHARACTERISTIC POLYNOMIAL. The International Scientific Conference ELECTRIC POWER ENGINEERING 2012., 2012. gads, 23.–25. maijā, Brno, Čehija, ISBN 978-80-214-4514-7

9. G. Georgiev, I. Zicmane, **S. Kovalenko**. A STUDY OF THE CHANGE IN ASSESSING THE STABILITY OF THE INTERCONNECTED SYSTEM WHEN CONNECTING A LINK (LINE) BETWEEN ITS TWO SUBSYSTEMS 12. International Conference on Environment and Electrical Engineering., 2013. gads, 5.–8. maijā, Vroclava, Polija, ISBN 978-1-4673-3058-9

10. G. Georgiev, I. Zicmane, **S. Kovalenko**. NEW APPROACHES OF STATIC STABILITY RESEARCH OF UNIFIED ELECTRIC POWER SYSTEMS POWERTECH 2013, 2013. gads, 16.–20. jūnijā, Grenobļa, Frāncija, ISBN978146735595

PUBLIKĀCIJAS

Darba rezultāti tika publicēti 15 starptautiskajās konferenču rakstu krājumos:

1. G. Georgiev, I. Zicmane, **S. Kovalenko**, E. Antonovs. AN ALGORITHM OF AUTOMATIC PLOTTING OF ELECTRICITY SUPPLY NETWORK CIRCUIT. The 5th International Conference “ELECTRICAL AND CONTROL TECHNOLOGIES ECT – 2010”, 2010. gads, 6.–7. maijā, Kauņa, Lietuva, ISSN 1822-5934

2. Г. Д. Георгиев, И. А. Зицмане, Э. С. Антонов, **С. А. Коваленко**. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ РАЦИОНАЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ В СЕТЯХ ВЫСОКОГО И СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ. XI Международная Научно-техническая конференция. „ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ-2010”, 2010. gads, 31. maijā – 4. jūnijā, Kijeва, Ukraina.
3. G. Georgiev, I. Zicmane, **S. Kovalenko**, E. Antonovs. **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВОЛНОВОГО АЛГОРИТМА ЛИ**. „THE INTERNATIONAL ENERGY FORUM 2010”, 2010. gads, 23.–26. jūnijā, Varna, Bulgārija.
4. G. Georgiev, I. Zicmane, E. Antonov, **S. Kovalenko**. EXPRESS ESTIMATION OF INFLUENCE OF COMPENSATORY REACTIVE POWER ON THE ACTIVE LOSSES IN THE HIGH VOLTAGE NETWORKS. International Scientific and Technical Conference “Electrical Power Engineering 2010”, 2010. gads, 14.–16. oktobrī, Varna, Bulgārija, ISBN 978-954-20-0497-4
5. G. Georgiev, I. Zicmane, **S. Kovalenko**, E. Antonov. THE PRINCIPLE OF CREATING A GRAPHICAL EDITOR FOR AUTOMATIZATION PROCESS TRACING ELECTRICAL CIRCUITS. The 51st Annual International Scientific Conference of Riga Technical University, 2010. gads, 14. oktobrī, Rīga, Latvija, ISBN 978-9934-10-054-3
6. G. Georgiev, I. Zicmane, E. Antonov, **S. Kovalenko**. AN AGGREGATE ANALYTICAL LOAD MODEL WITH VOLTAGE DEPENDANT CHARACTERISTICS. The 6th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2011., 2011. gads, 5.–6. maijā, Kauņa, Lietuva, ISSN 1822-5934
7. G. Georgiev, I. Zicmane, E. Antonov, **S. Kovalenko**. ELIMINATION OF NODES WITH VOLTAGE DEPENDENT LOAD CHARACTERISTICS IN ELECTRICAL NETWORK MODELS. 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)., 2011. gads, 8.–11. maijās, Roma, Itālija, ISBN 978-1-4244-8781-3
8. Zinātniskais raksts: G. Georgiev, I. Zicmane, E. Antonovs, **S. Kovalenko**. OPERATIONAL REDUCTION OF ACTIVE LOSSES IN HIGH-VOLTAGE NETWORKS VIA REACTIVE POWERS. Scientific Proceedings Of Riga Technical University, Power And Electrical Engineering, 4th series. Riga: RTU, 2011, sērija 4, sējums 28, ISSN 1407-7345
9. G. Georgiev, I. Zicmane, **S. Kovalenko**. HIGH ORDER CHARACTERISTIC POLYNOMIAL ROOTS’ LOCATION ANALYSIS (ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ КОРНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО ПОЛИНОМА ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ) ELEKTROENERGETIKA

2011 The Sixth International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering., 2011. gads, 21.–23. septembrī, Augstie Tatri, Slovākija, ISBN 978-80-553-0724-4

10. G. Georgiev, I. Zicmane, **S. Kovalenko**. STABILITY ANALYSIS OF ELECTRICAL POWER SYSTEM THROUGH CHARACTERISTIC POLYNOMIAL ROOTS LOCALITY. The 7th International Conference on Electrical and Control Technologies, ECT-2012., 2012. gads, 3.–4. maijā, Kauņa, Lietuva, ISSN 1822-5934

11. G. Georgiev, I. Zicmane, **S. Kovalenko**. STATIC STABILITY ANALYSIS OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS BY MEANS OF ROOT LOCATION OF A CHARACTERISTIC POLYNOMIAL. The International Scientific Conference ELECTRIC POWER ENGINEERING 2012., 2012. gads, 23.–25. maijā, Brno, Čehija, ISBN 978-80-214-4514-7

12. G. Georgiev, I. Zicmane, **S. Kovalenko**. LOAD CHARACTERISTICS AND THEIR INFLUENCE OVER THE ESTIMATES OF STABILITY AND TRANSIENT PROCESSES IN ELECTRICAL SYSTEMS IV НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ ЕФ 2012., 2012. gads, 28. septembrī – 1. oktobrī, Sofija, Bulgārija.

13. G. Georgiev, I. Zicmane, **S. Kovalenko**. A STUDY OF THE CHANGE IN ASSESSING THE STABILITY OF THE INTERCONNECTED SYSTEM WHEN CONNECTING A LINK (LINE) BETWEEN ITS TWO SUBSYSTEMS 12. International Conference on Environment and Electrical Engineering., 2013. gads, 5.–8. maijā, Vroclava, Polija, ISBN 978-1-4673-3058-9

14. G. Georgiev, I. Zicmane, **S. Kovalenko**. NEW APPROACHES OF STATIC STABILITY RESEARCH OF UNIFIED ELECTRIC POWER SYSTEMS POWERTECH 2013, 2013. gads, 16.–20. jūnijā, Grenobļa, Frāncija, ISBN 978146735595

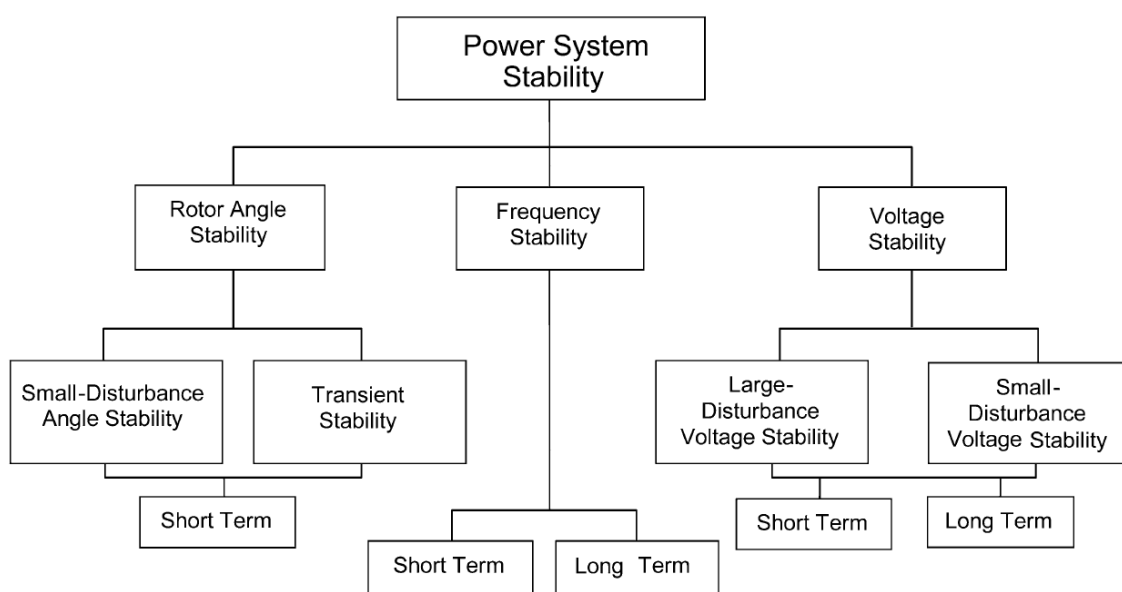
15. G. Georgiev, I. Zicmane, **S. Kovalenko**. EXPRESS ESTIMATION OF THE SYSTEM STABILITY AFTER SWITCHING ON A CROSS-BORDER LINE. INTERNATIONAL SCIENTIFIC SYMPOSIUM ELEKTROENERGETIKA EE2013, 2013. gads, 18.–20. septembrī, Augstie Tatri, Slovākija, ISBN 9788055314419

PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS

Promocijas darbs uzrakstīts angļu valodā, tas satur ievadu, 5 nodaļas un literatūras sarakstu. Darba kopējais apjoms ir 141 datorsalikuma lappuses, kurās ietverti 47 attēli un 29 tabulas. Literatūras sarakstā norādītas atsauces uz 98 izmantotās literatūras avotiem.

1. SAREŽĢĪTO ELEKTROENERĢĒTISKO SISTĒMU (EES) STATISKĀS STABILITĀTES ANALĪZES GALVENIE ASPEKTI)

Energosistēmu stabilitātes nodrošināšana ir viens no svarīgākiem uzdevumiem to projektēšanas un ekspluatēšanas laikā. Tā, ģeneratoru paralēlā darba stabilitātes traucējums var novest pie lielā elektroenerģijas patērētāju skaita elektroapgādes traucējumiem vai pat pie pilnīgās energosistēmas izjukšanai. Savukārt, EES apvienība un to jaudas pieaugums padara stabilitātes nodrošināšanas problēmu arvien akūtāku.



1.4. att. Energosistēmas statiskās stabilitātes klasifikācija [33]

EES stabilitātes novērtēšana ir kompleksa, tā ietver sevī daudzus aspektus, saskaņā ar ko šis uzdevums jāsadala trīs sastāvdaļās (1.4. att.):

1. Stabilitātes aprēķins *īstermiņa plānošanas* režīmam, kur par pamatu tiek ņemti rezultāti, kurus ieguva ilgtermiņa plānošanas laikā. Tie, pirmkārt, ir eksperimentālie, prognozes un aprēķina dati, kas ļauj sastādīt minimālā apjoma aizvietošanas shēmu, diezgan precīzi atspoguļojot slodzes, regulējošo iekārtu un automātikas iekārtu īpašības. Stabilitātes aprēķinus īstermiņa plānošanas laikā ir paredzēts veikt remonta pieteikumu atļaujas pieļaujamības pārbaudei un tam nepieciešamajai režīma izmaiņu un automātikas iestatījumu noteikšanai, kā arī stabilitātes ierobežojumu precizēšanai režīma optimizācijas laikā [3, 24, 35, 37, 38].

2. Energosistēmu stabilitātes aprēķini *operatīvās darbības laikā* sniedz iespēju noteikt nepieciešamās režīma un pretavārijas automātikas izmaiņas, atrisinot avārijas pieteikumus, un precizēt stabilitātes ierobežojumus režīma optimizācijas laikā. Turklāt, automātiskā informācijas ievade ir obligāta, bet uzdevuma risināšanai ir atvēlēts maz laika, līdz ar to ir nepieciešamas īpašas metodes un algoritmi. Stabilitātes uzdevumu risināšanas automātiskās darbības laikā mērķis ir paaugstināt pretavārijas automātikas adaptivitāti, t. i. atbrīvot personālu no atbildīgām, sarežģītām un biežām operācijām to iestatījumu mainīšanai [3, 24, 35, 37, 38].

3. Energosistēmu stabilitātes novērtēšana to attīstības *projektēšanas posmā*, kas ir laikā nepārtraukts process. Te ir būtiski ne tikai ieviestu jaunu objektu apgāde ar automātiskiem regulatoriem, bet arī iespējamie tīkla topoloģijas izmaiņas varianti ar veco EPL rekonstrukciju un/vai jauno elektropārvades līniju būvniecību [3, 24, 35, 37, 38].

1. nodaļas secinājumi

1. Tirgus ekonomika diktē pasaules enerģētisko sistēmu apvienošanas nosacījumus, kas veicina starpsistēmu saišu skaita izmaiņu, pārraidītās jaudas palielinājumu, rezultātā rodas nepieciešamība pārkonfigurēt tīklus.

2. Tirgus ekonomikas apstākļos ir nepieciešama statistiskās stabilitātes projekta novērtēšana.

3. Kopš Ļapunova laikiem un līdz mūsu dienām teorija par diferenciālo vienādojumu stabilitātes risinājumu krietni attīstījusies un to plaši pielieto enerģētikā (automātiskā regulēšana, sarežģīto EES statistiskās stabilitātes analīze).

2. MŪSDIENĪGO PIEEJU APSKATE SAREŽĢĪTO EES STATISKĀS STABILITĀTES ANALĪZEI

Pirmkārt, jāatzīmē, ka informācijas un skaitļošanas tehnoloģijas attīstība atstāja savu pēdu un izraisīja statistiskās stabilitātes izpētes klasisko pieeju revīziju. Automātiskās regulēšanas un automātisko iekārtu ieviešanas attīstības sākumā plaši tika pielietota raksturīgā polinoma (RP) iegūšana, bet gadījumā, kad bija grūti noteikt tā saknes, pielietoja algebras vai frekvenču stabilitātes kritērijus (Rausa, Gurvica, Mihailova, Naikvista u. c. kritēriji). Ar turpmāko uzdevumu dimensijas pieaugumu ir parādījušies divi šīs pieejas trūkumi:

1. pieaugošā raksturīgā vienādojuma iegūšanas sarežģītība uz sākuma operatora apraksta bāzes, pat ja tas ir dots normālformā koeficientu matricas veidā, jo jāatrod tās determinants ar vēl nezināmu operatoru;
2. pieaugošās grūtības, pielietojot stabilitātes kritērijus, jo bija nepieciešami darbietilpīgi aprēķini.

Skaitļošanas tehnikas attīstība neradīja pie būtisku progresu šajā ceļā, jo šo pieeju ir grūti formalizēt un efektīvi algoritmizēt. Turklāt, raksturīgā vienādojuma koeficientu aprēķins noveda pie lielās skaitļošanas neprecizitātes uzkrāšanās, kas, kā izrādījies, bieži izpaužas nederīgās īpašvērtībās (ĪV) un pretējos pēc nozīmes stabilitātes rezultātos. Tagad vislielāko interesi izraisa īpašvērtību atrašana, izmantojot tiešākās metodes – skaitļošanas iekārtu atmiņa un ātrums jau ļāva iegūt īpašvērtības tieši no koeficientu matricas relatīvi vienkāršās algoritmēšanas laikā, ieskaitot arī sākotnējo matricas konstruēšanu normālformā. Atgādināsim, ka lineārajai diferenciālo vienādojumu sistēmai ir normālforma tad, kad tajā piedalās tikai pirmās kārtas atvasinājumi. Gadījumā, kad pastāv augstākās kārtas atvasinājumi, sistēmu var viegli normalizēt, ieviešot jaunus vienādojumus un papildu mainīgos augstāko kārtu atvasinājumu vietā (piemēram, X'' vietā jāraksta Y un jāpievieno vēl viens vienādojumu sistēmai: $X' = Y$, ieskaitot jaunā mainīgā Y ievadi).

Mūsdienu EES apvienība pieprasīja turpmāku uzdevumu dimensijas pieaugumu ar nosacījumu, ka pastāv spēcīga datorvide. Pats par sevi risinājums vairs neizraisīja grūtības, bet pētnieku pūliņi bija vērsti uz ātrdarbības (efektivitātes) un realizējamo datormodeļu atbilstības paaugstināšanu. Šajā ziņā var izdalīt 6 patstāvīgus virzienus (pieejas) EES statiskās stabilitātes izpētē [3, 5, 21, 26, 46]:

Mūsdienu tendences un pieejas EES statiskās stabilitātes izpētē:

1. D-sadalījuma jaunie aspekti;
2. Energosistēmu statiskās stabilitātes analīzes problēmu risināšana, pamatojoties uz mākslīgo neironu tīklu (MNT);
3. Gramianu aprēķināšanas metode un tās izmantošana lielo lineāru sistēmu stabilitātes analīzei;
4. Pseido-spektrālā analīze statiskās stabilitātes lielām EES;
5. Ekspres metode EES stabilitātes novērtēšanai;
6. Signum funkcijas metode

2. nodaļas secinājumi

1. Neskatoties uz plašu aprakstīto pieeju daudzveidību, EES statiskās stabilitātes analīzes metožu kopa, kas ir definēta algebriski diferenciālā veidā, ir būtiski neliela. Tā ietver spektrālās metodes (īpašvērtību vispārinātas problēmas metode) un iterāciju metodes (metodes uz dažādu iterācijas procedūru bāzes). Visas šīs metodes, neskatoties uz mūsdienīgajām datortehnoloģijām, ir diezgan masīvas. Attiecīgi, pastāv akūta nepieciešamība absolūti jaunajā ekspress metodē EES statiskās stabilitātes novērtēšanai.

2. Neskatoties uz mūsdienīgu datornodrošinājuma daudzveidību enerģētikas jomā, nevienai datorprogrammai nav īpašmoduļa, kas varētu novērtēt tieši ESS statisko stabilitāti. Tikai programmu kompleksa izmantošana var nodrošināt labu rezultātu, kas savā būtībā nav racionāli. Līdz ar to, paliek aktuāls jautājums par jaunas EES statiskās stabilitātes novērtēšanas programmas izveidi, kas tiktu balstīta uz jaunu algoritmu.

3. JAUNĀ ALGORITMA SINTĒZE RAKSTURĪGĀ POLINOMA (RP) SAKŅU NOVĒRTĒŠANAI

Elektrisko sistēmu statiskās stabilitātes izpētes jomā pastāv divi pamatvirzieni:

1) Sistēmas raksturīgā vienādojuma iegūšana un izpēte n -tās pakāpes polinoma veidā ar reāliem koeficientiem a_i ($i = 0, 1, \dots, n$) un $a_n > 0$:

$$a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + a_{n-2} z^{n-2} + \dots + a_1 z_1 + a_0 = 0, \quad (3.1)$$

kur z_i - n sakņu skaits, ņemot vērā to dalāmību. Ja to vidū ir kompleksie lielumi, tad pēdējie vienmēr seko saistītos pāros, jo raksturīgā polinoma koeficienti (RP) ir reālie skaitļi. Lai secinātu par stabilitātes saglabāšanu, pietiek, lai visas polinoma saknes atrastos kompleksā apgabala kreisajā pusplaknē, kaut gan pats stabilitātes saglabāšanas fakts nav atkarīgs no sakņu konkrētiem lielumiem, kuri ietekmē tikai jau iepriekš nodzisušo svārstību raksturu – neperiodisks jeb svārstību [13, 14, 15, 37]. Saskaņā ar nepieciešamo, bet nepietiekošo stabilitātes nosacījumu, RP koeficientiem vienmēr jābūt pozitīviem lielumiem: ja vismaz viens

no koeficientiem – negatīvs skaitlis, tad sistēma ir nestabila, jo pastāvot pozitīviem koeficientiem, nevar iegūt reālās saknes labajā pusplaknē un, attiecīgi, neperiodisks stabilitātes traucējums nevar notikt. Kaut gan pa labi no iemāgināras ass var atrasties saistītas saknes ar pozitīvo reālo daļu, kas, savukārt, izraisīs pie svārstību stabilitātes traucējumu.

Plaši pazīstami Rausa, Gurvica, Naikvīsta-Mihailova kritēriji, kas norāda uz stabilitātes saglabāšanas pietiekamiem nosacījumiem, ir orientēti uz manuālu skaitīšanas metodi, kas nav *samērā vienkāršs uzdevums lielām sistēmām, bet to formalizācija programmas realizācijai ir diezgan darbietilpīga* [14, 15, 16, 39].

2) Lineāri diferenciālo vienādojumu sistēmas koeficientu matricas īpašvērtību iegūšana, kas ir atspoguļota normālformā.

No sākuma apraksta ar diferenciālajiem vienādojumiem var pāriet uz pierakstu normālformā, *pazeminot atvasinājumu kārtu, ievadot jaunās nezināmas funkcijas*. Kaut gan pēdējā laikā saistībā ar strauju skaitļošanas ierīču attīstību lielāku pielietojumu gūst statistiskās stabilitātes pētījumi ar *īpašvērtību* palīdzību. Pateicoties datortehnikai, ir iespējams *konstruēt RP, izejot tieši no sistēmas apraksta, nepārvedot to normālformā, kas savukārt, var novest pie metožu revīzijas un papildus attīstības, kas ir saistītas ar RP sakņu izpēti*.

Mūsdienās pastāv dažādi algoritmi un datorlīdzekļi pašu skaitļu atrašanai (4.1. tab.), galvenais no kuriem ir *rotācijas metode*, kuras galvenā ideja ir sekojoša: īpašvērtības sakrīt ar RP saknēm un, secīgi, stabilitātes saglabāšanas gadījumā to vidū nevar atrasties īpašvērtības no labās pusplaknes. Diemžēl, esošie teorijas paņēmieni pārejai no matricas uz raksturīgo vienādojumu un atpakaļ neguva plašu praktisku pielietojumu augstākās kārtas matricas noteicēja aprēķina darbietilpīguma dēļ [14, 15, 16, 39].

Tālāk par pamatu paņemsim raksturīgā vienādojuma (3.1) sakņu analīzi ar komplekso mainīgo polārformā $z = Re^{j\varphi}$ pēc tās sadalīšanās reālajā y_1 un imaginārajā y_2 daļās:

$$y_1 = R^n a_n \cos(n\varphi) + \dots + Ra_1 \cos\varphi + a_0 = 0; \quad (3.2)$$

$$y_2 = R^n a_n \sin(n\varphi) + \dots + Ra_1 \sin\varphi = 0, \quad (3.3)$$

kur nezināmi ir n moduļi R_i un to fāzes φ_i , kas atbilst sistēmai (3.2, 3.3).

Piemērotu sākotnējo nosacījumu izvēle Ņūtona iteratīvajam procesam (3.5) tika veikta ar gradienta minimizēšanas palīdzību pozitīvi pret noteiktu nesakrišanas (neprecizitātes) funkciju:

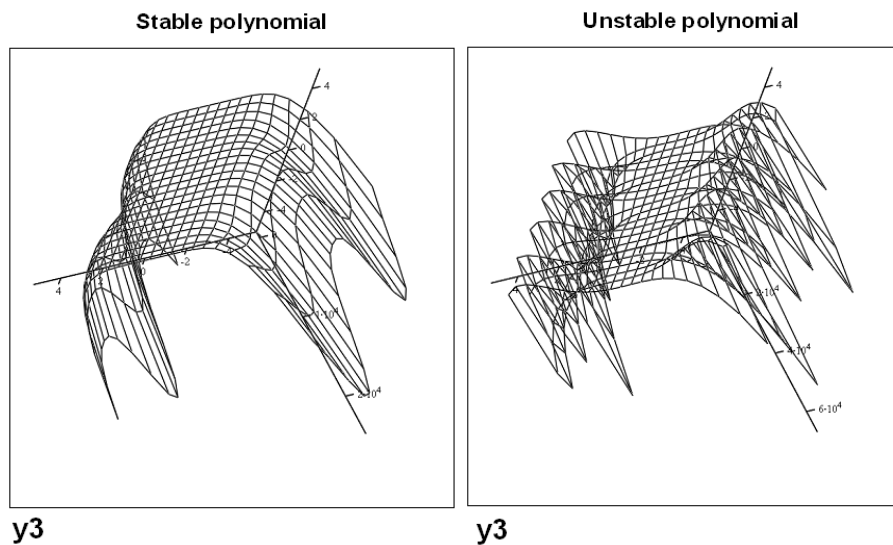
$$y_3(R, \varphi) = y_1(R, \varphi)^2 + y_2(R, \varphi)^2 \quad (3.4)$$

$$\begin{pmatrix} \varphi' \\ R' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi \\ R \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial \varphi} & \frac{\partial y_1}{\partial R} \\ \frac{\partial y_2}{\partial \varphi} & \frac{\partial y_2}{\partial R} \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Lai to izdarītu, sākumā bija jāizpēta funkcijas antigradients $y_3(R, \varphi)$ pirmajā kvadrantā diezgan nelielā apgabalā no koordinātu sākuma virzienā uz pirmo kvadrantu. Funkcijas (3.4) samazināšanās liecina par to, ka šajā apgabalā var atrast meklēto sakni, t. i. ar lielu precizitāti var definēt sākuma tuvinājumu iteratīvajam procesam, pabīdot sākumpunktu virzienā uz antigradientu [14, 15, 16, 39].

3.1. attēlā atspoguļotas izolīnijas ar dažādām brīvā locekļa vērtībām un fāzes, funkciju rādiuss $y_1(R, \varphi)$, $y_2(R, \varphi)$, $y_3(R, \varphi)$, kā arī funkcijas antigradients $y_3(R, \varphi)$ polinomam ar veidu $Y(z) = z^3 + z^2 + z + a_0$. Palielinot brīvo locekli koordinātu sākuma apgabalā, antigradients $-\nabla y_3(R, \varphi)$ tiek samazināts. Ja $R = 0$, $\varphi = 90^\circ$ - $\nabla y_3(R, \varphi) = 0$. Ja rādiusa vērtība ir $R > 0$, tad antigradients palielinās.

Saskaņā ar iegūtajiem rezultātiem, mēs varam secināt, ka stabila polinoma gadījumā, $y_3(R, \varphi)$ funkcijas kontūras ir gludas līknes, kas ir nedaudz vertikāli izliektas, jo vairāk nestabils ir polinoms, jo spēcīgāk ir izteikta perturbāciju forma, kas iegūst kontūras formu (3.2. att.) [14, 15, 16, 39].



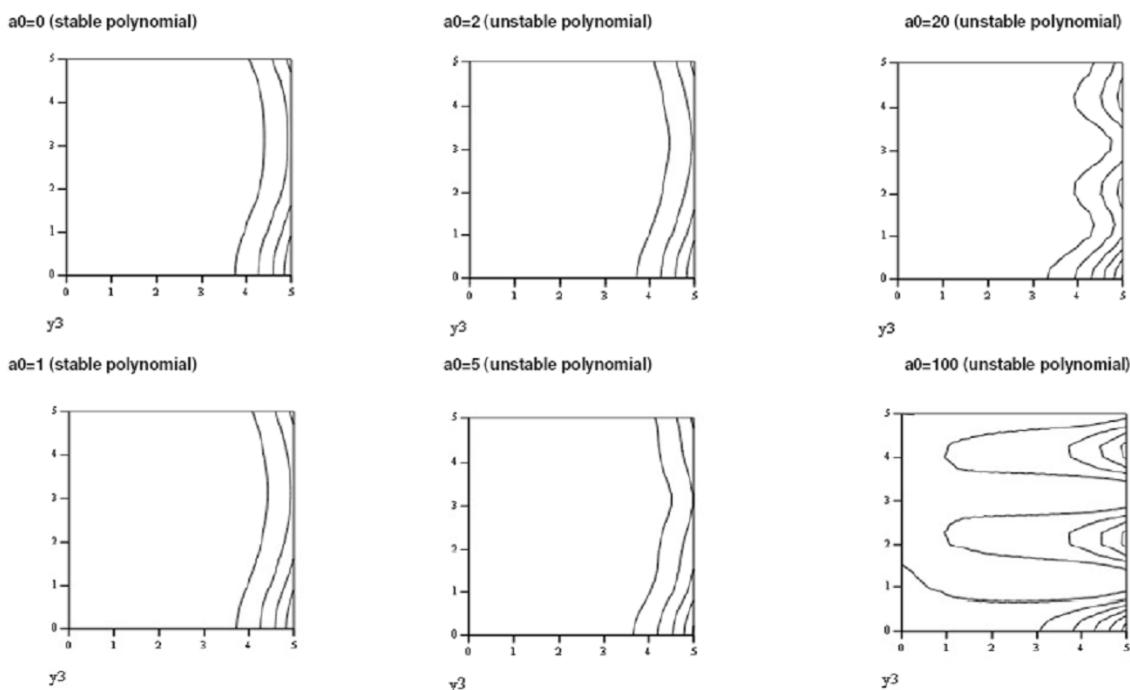
$$y_3(R, \varphi) = y_1(R, \varphi)^2 + y_2(R, \varphi)^2$$

$$a_3 z^3 + a_2 z^2 + a_1 z + a_0$$

$$a_0 = 0 \longrightarrow a_0 = 100$$

3.1. att. Stabila un nestabila palīgfunkciju virsmas $y_3(R, \varphi)$ polinomam

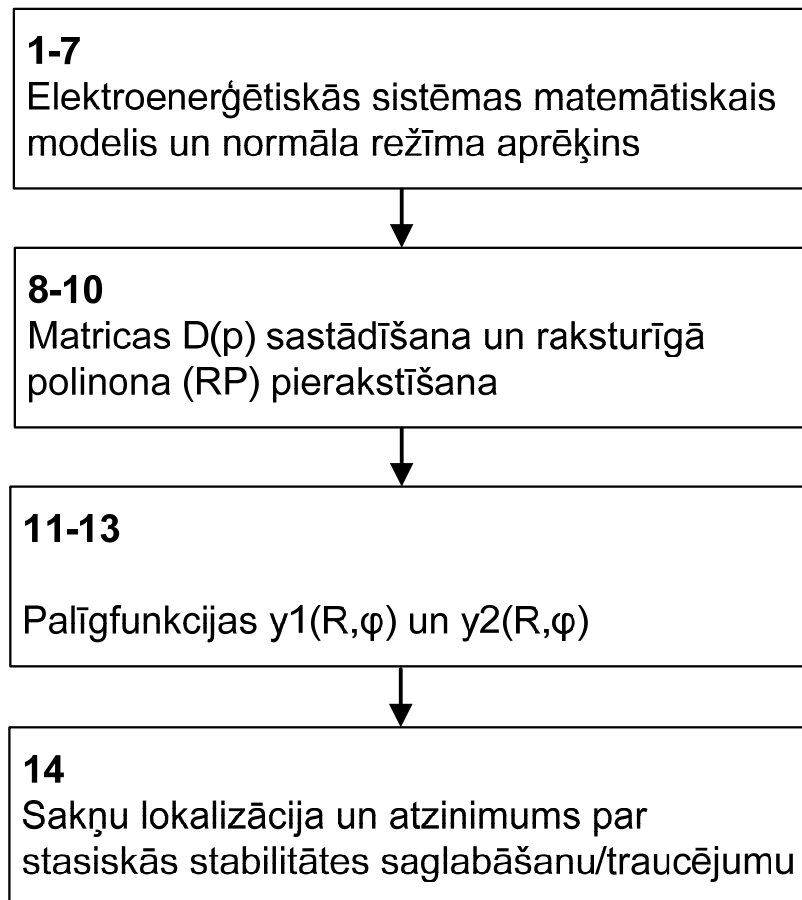
$$\text{veidā } Y(z) = z^3 + z^2 + z + a_0.$$



3.2. att. Funkciju $y_3(R, \varphi)$ izolīnijas polinomam

$$\text{veidā } Y(z) = z^3 + z^2 + z + a_0 \text{ ar dažādām brīvā locekļa vērtībām}$$

Atspoguļosim vispārinātā algoritma ideju sarežģīto energosistēmu statistiskās stabilitātes novērtējumā. Algoritms ir secīgs un sastāv no sekojošiem bāzes soļiem (3.3. att.):



3.3. att. EPS statistiskās stabilitātes aprēķina vispārinātais algoritms

1. *Topoloģijas un energosistēmas datu ievade* - ģeneratori, transformatori, slodzes, līnijas u. c. parametri;
2. *Energosistēmas parametru pielīdzināšana* vienotai sprieguma klasei vai pāreja uz relatīvo vienību sistēmu;
3. *Elektrotīkla stacionārā režīma aprēķins*;
4. *Ģeneratoru statoru ķēžu režīma aprēķins*, lai noteiktu elektrodzinējspēka kompleksās vērtības, pamatojoties uz stacionāro mezglu 3. punktā atrastajiem spriegumiem.
5. *Slodzes mezglu izslēgšana* no sistēmas ar Žordana metodes palīdzību, lai iegūtu apkopotās kompleksās vadītspējas starp ģeneratoru atzarojumiem;
6. *Izteiksmju sastādīšana mezglu jaudu aprēķinam*;

7. Regulatoru uzskaitē matemātiskajā modelī;

8. Frekvences atvasinājumu noteikšana pēc elektrodzinējspēka leņķiem un vērtībām;

9. Matricas sastādīšana $D(p)$ (3.5), kas sastāv no 4 apakšmatricēm:

$$D_0(p) = \begin{vmatrix} \Delta_{ik} T_{jk} p^2 + C_{ik} & B_{ik} \\ E_{ik} & D_{ik} \end{vmatrix} \quad (3.5)$$

$$C_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_k}; \quad B_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial E_k};$$

$$E_{ik} = \tau_{doi} p \frac{\partial E'_{qi}}{\partial \delta_k} + \frac{\partial E_{qi}}{\partial \delta_k} - \sum_j \frac{\partial \Pi_{qi}}{\partial \delta_k} W_{\Pi_{ij}}(p);$$

$$D_{ik} = \tau_{doi} p \frac{\partial E'_{qi}}{\partial E_k} + \frac{\partial E_{qi}}{\partial E_k} - \sum_j \frac{\partial \Pi_{qi}}{\partial E_k} W_{\Pi_{ij}}(p),$$

kur T_{jk} – pastāvīgo inerču diagonālā matrica (ar izmēru $N \times N$);

C, B, E, D – kvadrātmatricas ar izmēru $N \times N$;

P_i , – i -tās mašīnas elektromagnētiskā jauda;

E_i, E_k – sinhrono mašīnu elektrodzinējspēks;

τ_{doi} – ierosmes tinuma laika konstante;

E_{qi}, E'_{qi}, E_{qei} – sinhronais, pārejas un piespiedu elektrodzinējspēks;

$W_{\Pi_{ij}}(p)$ – ierosmes regulatora pārvades funkcija, kas ietver pārejas procesu uzskaiti i -ntās sinhronās mašīnas automātiskajā ierosmes regulatorā (laika konstante τ_p) un ierosinātājā (laika konstante τ_e) saskaņā ar j -to regulēšanas parametru Π_{ij} . Summēšana saskaņā ar j -tiem parametriem Π_{ij} ir nepieciešama tajos izplatītajos gadījumos, kad regulēšana tiek īstenota pēc vairākiem režīma parametriem (piemēram, pēc strāvas un sprieguma, frekvences un sprieguma utt.);

Δ_{ik} – Kronekera simbols. Ja $i = k$, $\Delta_{ik} = 1$. Ja $i \neq k$, $\Delta_{ik} = 0$;

10. Raksturīgā polinoma iegūšana un matricas $D(p)$ determinanta meklēšana;

11. Raksturīgā polinoma pieraksts (3.1) vienādojumu sistēmas formā (3.2) un (3.3);

12. Sākotnējo apstākļu izvēle φ_0 un $R_0 = R_c/2$;

13. *Sakņu ϕ un R_i meklēšana saskaņā ar Ņūtona iterāciju metodi (3.13)* katrai sākotnējo apstākļu kopai;

14. *Atzinums par statistiskās stabilitātes saglabāšanu/traucējumu:* gadījumam, kad ne visas ϕ saknes ir ārpus diapazona $-90\div 90$ grād., tad Ņūtona iterāciju process diverģē, kas liecina par stabilitātes traucējumu.

Ir iespējams izveidot unificēto programmu statistiskās stabilitātes novērtēšanai mācību nolūkos. Idejas pamatā ir divu bloku-moduļu izveide. *Pirmais bloks ir mācību.* Pamatalgoritms – RP iegūšana un to sakņu izpēte uz nelielās EES piemēra (līdz 10 mezgliem). *Otrais bloks ir aprēķinu,* piemērots lielām sistēmām. Pamats – matricas koeficientu analīze $D(p)$, t. i. parciālo atvasinājumu analīze (modificētā rotācijas metode, sk. 4. nodaļu). Tāpat šai programmai varētu būt grafiskais modulis – vienkāršots, kas būtu noderīgs tieši studentiem mācību nolūkos [46, 52, 53, 54].

3. nodaļas secinājumi

1. Tika atspoguļots, kādā veidā var parādīties RP saistītās saknes ar pozitīviem koeficientiem labajā kompleksajā pusplaknē. Šim mērķim piedāvāts aplūkot polinoma sadalīšanu reālajā y_1 un imaginārajā y_2 daļās ar pāreju uz polāro kompleksā argumenta pieraksta formu un nosacījumu atklāšanu, saskaņā ar kuriem abas daļas vienlaicīgi tiek nullētas. Pateicoties grafiskai izejai, viegli noteikt augšējo un apakšējo sakņu moduļu robežas labajā pusplaknē atkarībā no brīvā locekļa.

2. Piedāvāta jauna sakņu lokalizēšanas grafiskā metode (hodogrāfs) labajā pusplaknē ar kustību pa centrālapļa kontūru sektorā $0\div 90$ grād. atgriešanās pa ordinātu līdz koordinātu sākumpunktam. Pietiekošs stabilitātes nosacījums – simetriskā funkciju y_1 un y_2 nulļu mainīšanās. Hodogrāfa konstruēšanai nepieciešams relatīvi neliels punktu skaits.

3. Piedāvāta vienkārša sakņu aprēķināšanas metode pirmajā kvadrantā pēc Ņūtona metodes, kas balstās uz funkciju y_1 un y_2 atvasinājumiem pēc fāzes un moduļa.

4. Jebkurām iterāciju metodēm (3.5) ir nepieciešami diezgan labi sākotnējie tuvinājumi. Sākotnējo tuvinājumu noteikšanas jautājums prasa dziļāku izpēti. Būtībā piedāvātais algoritms ir vispārīgs plāns lielo energosistēmu statistiskās stabilitātes novērtēšanai. Grūtības tā realizācijā rodas tad, kad jāatrod polinoms (sk. 10. punktu), jo tās ir saistītas ar lielu daudzumu aprēķinu, kurus grūti realizēt, pat izmantojot mūsdienīgu datortehniku.

5. Rodas papildu uzdevums – polinoma sakņu jutīguma noteikšanas nepieciešamība, t. i. tā izmaiņas novērtējums koeficientu nelielas perturbācijas laikā.
6. Piedāvātā algoritma būtisks pozitīvs moments ir – sk. 11. punktu: matricai šajā blokā vienmēr ir izmērs 2×2 , neatkarīgi no pašas energosistēmas izmēra! Jāatzīmē, ka sākotnēji šo ideju var pielietot ne pārāk lielu energosistēmu (daļēji ekvivalento) stabilitātes analīzei, bet lielu energosistēmu aprēķinam nepieciešams izmantot nevis pašu polinomu (sk. 10. punktu), bet matricu $D(p)$ (sk. 11. punktu).
7. Tika ieviesta palīgfunkcija y_3 , tās antigradients un izolīnijas, kas, dziļāk izpētot, var kalpot precīzākai sākotnējo nosacījumu izvēlei iterāciju procesā (6).
8. Grafiskā attēla pielietošana ļauj viegli noteikt sakņu moduļu augšējās un apakšējās robežas, kas atrodas labajā pusplaknē un ir atkarīgas no brīvā locekļa lieluma. Pietiekošs energosistēmas statiskās stabilitātes saglabāšanas nosacījums ir simetriskā funkciju y_1 un y_2 nulļu mainīšanās.
9. Tika piedāvāta grafiskā moduļa izveides ideja unificētai programmai statiskās stabilitātes analīzei, kuru varētu izmantot mācību nolūkos. Algoritms piedāvā vairāk nekā pieņemamus rezultātus un tā īpašības ir pārākās par citiem algoritmiem, kurus mēs testējam. Iznākuma koordinātes X un Y var viegli transponēt grafiskajā redaktorā turpmākai iegūto aprēķina rezultātu rasēšanai.
10. Sadales un pārvades tīklu rasēšanu var veikt daudzkrāsu slāņos, kurus nosaka ar sprieguma slāņiem – pirmais 400 kV ķēdei, tad 330 kV ķēdei, ņemot fiksētos mezglus no iepriekšējiem slāņiem un tā tālāk.

4. MODIFICĒTĀ ROTĀCIJAS METODE EES STATISKĀS STABILITĀTES ANALĪZEI

Lielo elektrisko sistēmu statiskās stabilitātes novērtējums ir saistīts ar dažiem grūti pārvaramiem uzdevumiem, kuri jārisina uz lielo EES shēmu modeļiem, kurus realizē programmu paketēs. Līdz ar to rodas virkne jautājumu, piemēram:

- 1) Kādā veidā noteikt to lielās sistēmas daļu, kuru var loģiski nodalīt un modelēt patstāvīgi, bet tā, lai iegūtu pietiekami precīzu rezultātu sinhrono ģeneratoru statiskās stabilitātes novērtēšanai?

2) Cik detalizēti jāapraksta svārstību elektromehāniskais process, t. i. vai var iztikt bez elektromagnētisko procesu uzskaites sinhronās mašīnas rotorā un statorā, un ja var, tad kādās tieši mašīnās?

Skaidri redzams, ka šī jautājuma risinājums ir saistīts ar uzdevuma nostādni: t. i. kāds tieši stabilitātes tips jāizpēta. Piemēram, ja runa ir tikai par neperiodisku stabilitātes traucējumu, modeļa konstruēšanas laikā var iztikt tikai ar elektromehānisko rotoru kustības izteiksmju uzskaiti.

3) Kāds būs risinājuma jutīgums atkarībā no sākumdatu precizitātes?

Iespējams, ka pat vismazākās neprecizitātes tīkla elektrisko vai mehānisko parametru uzskaites (izvēles) laikā, tādi kā ģeneratoru vārpstu inerces momenti kopā ar sākotnējiem dzinējiem, novedīs pie pretējā pēc nozīmes atzinuma, un reālā statistiski stabila sistēma modelēšanas laikā izrādīsies nestabila.

4) Kā ņemt vērā slodzes nelineāro raksturu, kuru definē ar tās statistiskiem raksturojumiem (SSR), un vai var izslēgt tādas slodzes mezglus, pārejot uz ekvivalento tīkla modeli, kas sastāv tikai no ģeneratoru mezgliem?

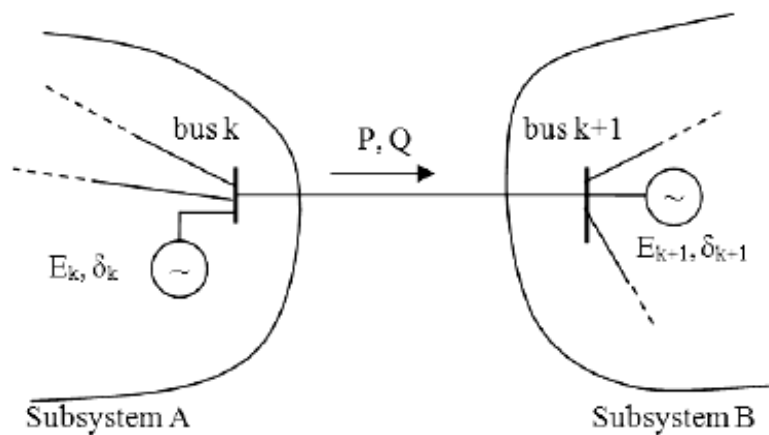
Šis uzdevums tika veiksmīgi atrisināts vispārīgā gadījumā [18, 19, 20] brīvpieejas nelineāriem aktīvās P un reaktīvās Q jaudas SSR atkarībā no sprieguma U kā:

$$P = P_0 (U/U_0)^\alpha ; \quad Q = Q_0 (U/U_0)^\beta, \quad (4.1)$$

kur P_0 , Q_0 un U_0 - stacionārā režīma bāzes parametri.

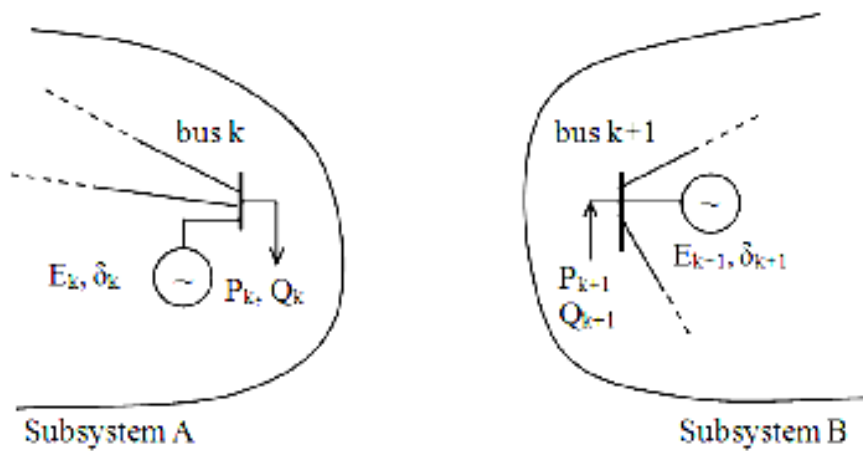
5) Kāda statistiskās stabilitātes novērtējuma metode jāpiemēro, lai minimizētu skaitļošanas neprecizitātes uzkrāšanos?

Lai atrisinātu jautājumus, promicijas darbā apskatīta sistēma, kas sastāv no divām savā starpā savienotajām ar atsevišķu līniju apakšsistēmām:



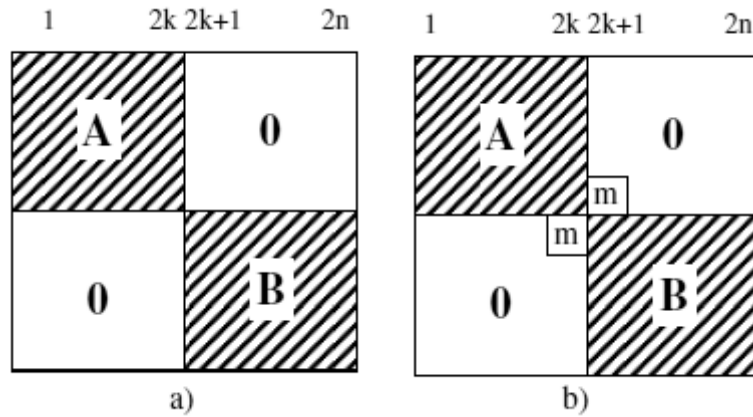
4.1. att. Elektriskā sistēma, kas sastāv no divām savā starpā savienotajām apakšsistēmām.

Divu apakšsistēmu modeļi sastāv no sinhronajiem ģeneratoriem un ekvivalentām līnijām starp tiem un iedomāsimies, ka tiem visiem jau ir zināmi to paškaitļi izolētajā stāvoklī, bet iekšējo stacionāro režīmu saglabāšanas gadījumā tas tiek panākts, pievienojot ekvivalento slodzi ģenerāciju mezglos k un $k + 1$ attiecīgi (4.2. att.):



4.2. att. Elektriskā sistēma, kas sastāv no divām atsevišķām apakšsistēmām.

Šajā gadījumā koeficientu matrica sastāvēs no diviem abpusēji diagonālajiem blokiem (4.3. a att.):



4.3. att. Koeficientu matricas struktūra: a) divām atsevišķām apakšsistēmām;
b) pēc apakšsistēmu apvienošanas, kur m – pievienotie elementi.

Apzīmēsim bloka A (4.3.a att.) īpašvērtības, kas atbilst apakšsistēmai A, ar $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{2k}$, bet bloka B īpašvērtības, kas atbilst apakšsistēmai B, ar $\lambda_{2k+1}, \lambda_{2k+2}, \dots, \lambda_{2n}$. Redzams, ka to iegūšanu var veikt atsevišķi katram blokam saskaņā ar jebkuru no zināmām metodēm, jo šai matricai piemīt dabīgā bloka dekompozīcija.

Apvienojot apakšsistēmas A un B (4.1. att.), šī matrica tiks papildināta ar vēl diviem elementiem un iegūs tādu struktūru, kāda ir atspoguļota 4.3. b att. Šie elementi ir aktīvās jaudas pārteces P parciālās atvasinātās pa savienojuma līnijas leņķiem $\partial P / \partial \delta_k$ un $\partial P / \partial \delta_{k+1}$ attiecīgi. Tātad pieņemsim, ka sākotnējais apraksts sastāv tikai no elektromehāniskajiem vienādojumiem, kurus definē operatoru veidā:

$$T_i p \omega_i + P_{di} \omega + \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j} = 0, \quad j \neq i \quad (4.2)$$

$$\omega_i - p \delta_i = 0, \quad (4.3)$$

kur T_{ji} – i -tās mašīnas rotora inerces laika konstante;

ω_i – leņķa ātrums;

P_{di} – slāpēšanas koeficients.

Pieraksts ir dots relatīvās vienībās, turklāt bloka A stabiņu sakārtošanas ērtībai bloks A iet sekojošā kārtībā: $\omega_1, \delta_1, \omega_2, \delta_2, \dots$, bet blokā B jau $\delta_{k+1}, \omega_{k+1}, \delta_{k+2}, \dots, \omega_{k+2}, \dots, \omega_{2n}$ [18, 19, 20].

4.1.tab. Uzdevumu risināšanas algoritma izvēle īpašvērtībām

Algoritma nosaukums	Kam izmanto	Rezultāts	Ieteicams, lai atrastu savas īpašvērtības			Piezīmes
			Lielākais vai mazākais	Visi ≤ 6	Visi $>= 6$	
Determinants (atkārtošana)	Vispārējā matrica	Īpašvērtības		*		Nepieciešams atrast vispārējās formas saknes
Atkārtošana (atkārtošana)	Vispārējā matrica	Īpašvērtības un īpašvektori	*	*	*	Nodrošina vislabāko precizitāti lielākām un mazākām īpašvērtībām
Jakobi metode (transformācija)	Simetriskās matricas	Matricas diagonālā forma		*	*	Teorētiski prasa bezgalīgi daudz soļu
Givensa metode (transformācija)	Simetriskās matricas	Matricas trīsdiagonālu forma		*	*	Nepieciešamas zināšanas par vienkāršām polinoma saknēm
	Nesimetriskās matricas	Hesenberga forma		*	*	Nepieciešams izmantot papildu metodi
Householdera metode (transformācija)	Simetriskās matricas	Matricas trīsdiagonālu forma		*	*	Nepieciešamas zināšanas par vienkāršām polinoma saknēm
	Nesimetriskās matricas	Hesenberga forma		*	*	Nepieciešams izmantot papildu metodi
LR metode (transformācija)	Vispārējā matrica	Matricas četrdiagonālu forma		*	*	Dažreiz nestabils
QR metode (transformācija)	Vispārējā matrica	Tas pats		*	*	Labākā metode, kurai piemīt vislielākais vispārīgums

Piemērotā algoritma izvēle kāda uzdevuma risināšanai ar īpašvērtībām (ĪV) tiek noteikta ar pašvērtību tipu, matricas tipu un meklējamo īpašvērtību skaitu. Jo sarežģītāks uzdevums, jo mazāks algoritmu skaits, no kura var izvēlēties. 4.1. tabula ļauj šo izvēli atvieglot. Parasti ESD matemātiskā nodrošinājuma paketes ietver apakšprogrammas, kurās izmanto visus šos algoritmus vai dažus no tiem. Viena no efektīvākām metodēm izmantot esošo matemātisko nodrošinājumu ir vienlaicīgs divu apakšprogrammu pielietojums, kas ļauj apvienot to labākās īpašības. Piemēram, ja ir vispārīgā izskata matrica, tad ar Householdera metodes palīdzību to var reducēt līdz Hesenbergā formai, tad ar algoritma QR palīdzību atrast īpašvērtības. Turklāt tiks nodrošināts gan algoritma QR ātrums, pateicoties Householdera metodei, gan universālums [18, 19, 20, 45, 50, 51].

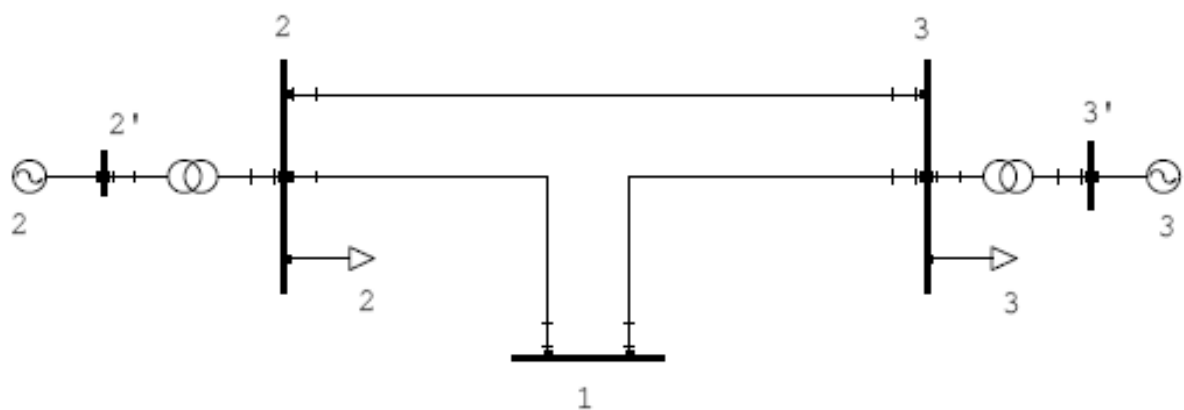
4. nodaļas secinājumi

1. Ir piedāvāts dekompozīcijas algoritms stabilitātes novērtējumam gadījumā, kad divas apakšsistēmas tiek savienotas savā starpā enerģijas pārvadei (tirdzniecībai). Tas balstās uz iekšējiem stabilitātes novērtējumiem katrai apakšsistēmai līdz apvienošanai, ņemot vērā robežlīnijas parametrus un tās režīmu.
2. Algoritma realizācijai ir piedāvāta rotācijas metodes modifikācija, kuru izmanto matricas īpašvērtību atrašanai.
3. Pateicoties piedāvātajam algoritmam, dati par katras apakšsistēmas struktūru saglabā savu konfidencialitāti un paliek slēgti citas apakšsistēmas īpašniekam.
4. Algoritmam piemīt dabiskais paralelisms. Nepieciešamās operācijas var veikt vienlaicīgi katrā apakšsistēmā un neatkarīgi viena no otras.
5. Piedāvātā iespēja var tikt aplūkota gadījumu izskatīšanai, ja ir iesaistīts sarežģītāku apakšsistēmu sakarīgums.

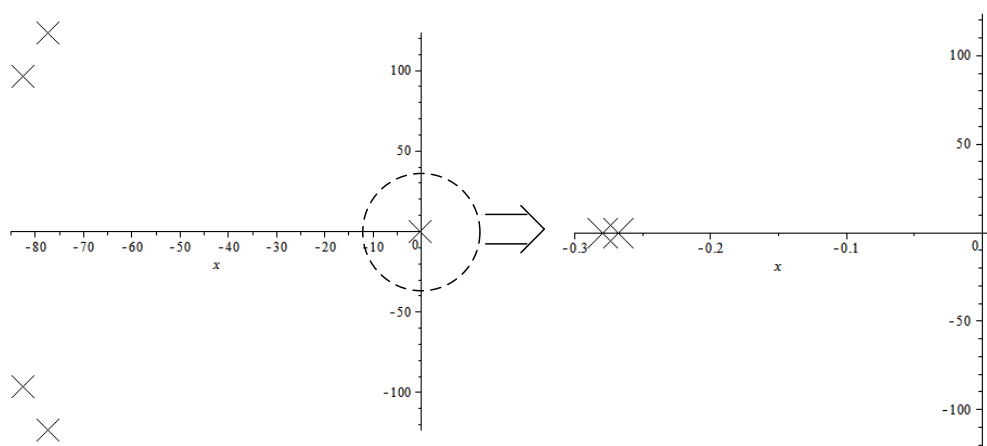
5. SARĒŽĢĪTO EES STATISKĀS STABILITĀTES ANALĪZE

5. nodaļa sastāv no 3 aprēķiniem:

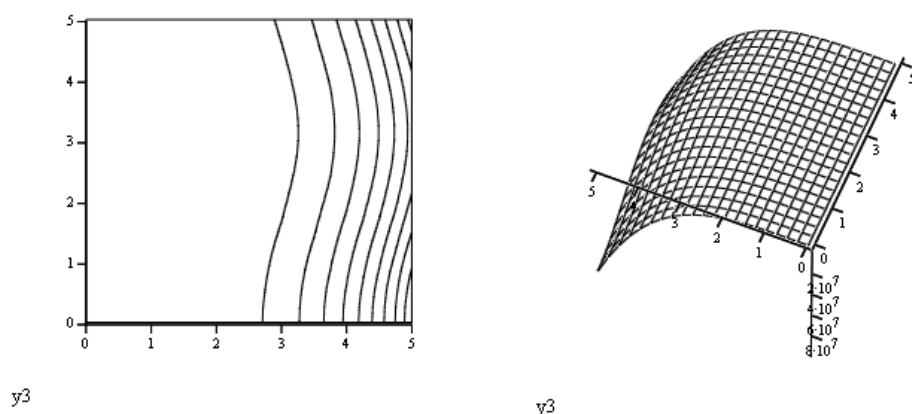
1. Ir aprēķināta trīsmašīnu sistēmas statiskā stabilitāte, pielietojot raksturīga polinoma sakņu lokalizācijas metodi (5.1. att.) y_3 palīgfunkcija rāda, ka sistēma ir stabila (5.2. att., 5.3. att.)



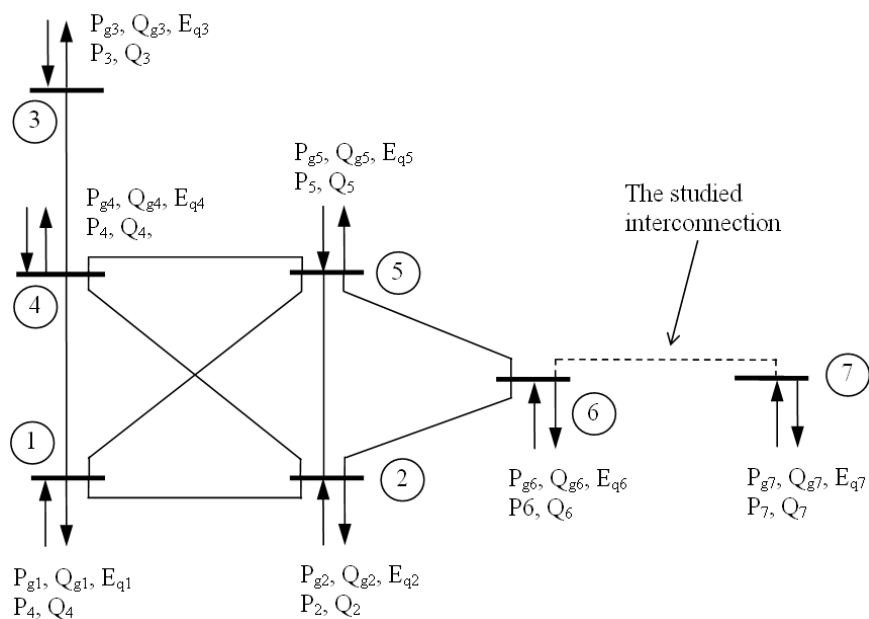
5.1. att. Shēma sastāv no diviem ģeneratoriem un bezgalīgas jaudas kopnes



5.2. att. RP sakņu izvietojums kompleksajā plaknē



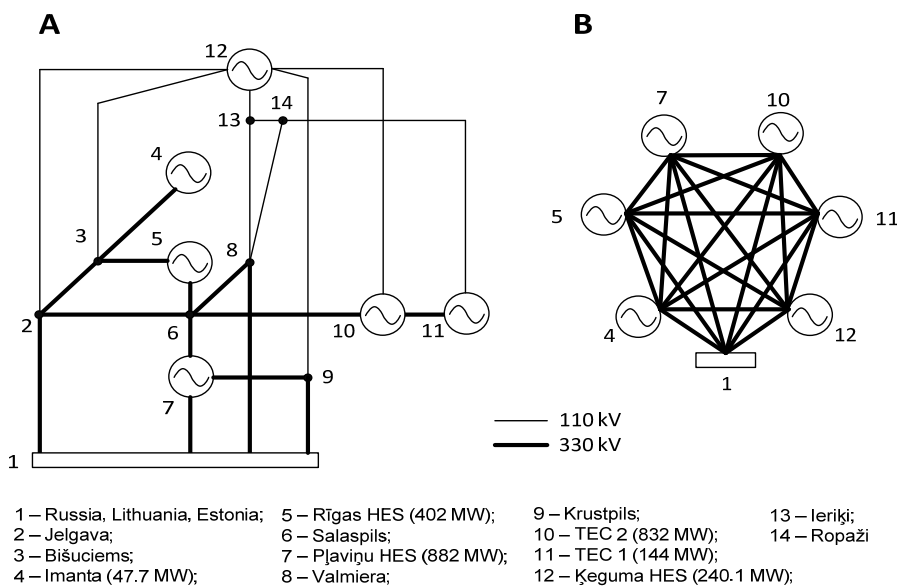
5.3. att. y_3 funkcijas kontūru līnijas un virsma $D(p)$ polinomam



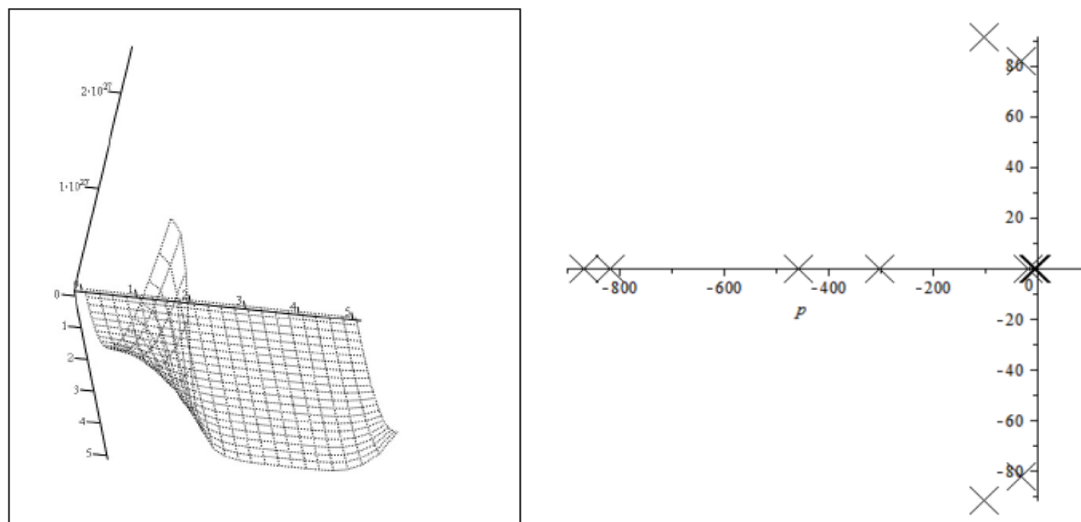
5.4. att. Aptuvenās elektriskās sistēmas ekvivalenta ķēde ar noteiktu mezglu aktīvajam (P_{gi}) un reaktīvajam (Q_{gi}) turbo ģeneratoru enerģētiskajām jaudām, aprēķināts elektrodzinējspēks ģeneratoru statoriem (E_{qi}) un slodzēm (P_2, Q_2). Līnija 6–7 ir savienota ar šo sistēmu.

2. Ar modificētās rotācijas metodes palīdzību ir izpētīta tranzītas līnijas (ģenerators pieslēgšana) ietekme uz enerģosistēmas statisko stabilitāti (5.4. att.).

3. Ir aprēķināta latvijas enerģosistēmas statistiskā stabilitāte un demonstrēts, ka sistēma ir stabila (5.5. att., 5.6. att.)



5.5. att. A. Latvijas enerģosistēma un tās galvenās stacijas un apakšstacijas;
B. Vienkāršota shēma pēc Žordana metodes pielietojuma



5.6. att. Latvijas energosistēmas īpašvērtības un $y_3(R, \varphi)$ palīgfunkcijas virsma

5. nodaļas secinājumi

Sarežģīto EES statistiskās stabilitātes analīzi ir lietderīgāk veikt, izdalot no visas sistēmas trīsmašīnu apakšsistēmas, bet vēlāk katrai no tām ar klasiskās metodes palīdzību (RP) novērtēt statistisko stabilitāti. Piedāvāto RP palīgfunkciju priekšrocība ir **viegli realizējama iespēja lokalizēt tā saknes kompleksajā plaknē**. Pašu sakņu nepieciešamības atrašanas gadījumā to var izdarīt ar palīgfunkciju y_1 un y_2 palīdzību. Turklāt, statistisko stabilitāti var noskaidrot arī pēc palīgfunkcijas y_3 izolīnijas formas.

Jāatzīmē, ka RP sestās pakāpes trīsmašīnu apakšsistēmai sakņu atrašana nav sevišķi grūta. Vēlāk, pārveidojot matricu ar Givensa metodes palīdzību un pievienojot pēc kārtas ģeneratorus (vai pakāpeniski apvienojot 3-mašīnu apakšsistēmas), diezgan vienkārši var atrast jau paplašinātās matricas īpašvērtību, kā arī secināt, kā mainīsies statistiskā stabilitāte pēc apvienošanas, t. i., veikt jau lielās EES statistiskās stabilitātes analīzi. Galvenā metodikas priekšrocība – salīdzinoši vienkāršāka vienādojumu pieraksta forma statistiskās stabilitātes pētīšanai salīdzinājumā ar visas sistēmas modeli kopumā.

Šī sarežģīto EES aprēķina metodika ļauj praksē uzzināt, kādi ģeneratori jāņem vērā, bet kādi nē, vēl **apakšsistēmu analīzes līmenī**. Tā, piemēram, ja ir nepieciešams konfigurēt n-tās stacijas regulatoru un jānosaka tā pastiprinājuma **koeficienti**, būs pietiekami modelēt tikai nelielu sistēmas blakus daļu. Saskaņā ar piedāvāto metodiku, Givensa rotācijas procesā pēc pēdējās rindas dalības un diagonālo elementu salīdzināšanas (tie, kuri nav mainījušies), bet vēlāk arī apakšsistēmu apvienošanas procesā pēc pēdējās rindas ir iespējams noteikt, kādas stacijas var tikt izslēgtas no analīzes, jo tās nevar ietekmēt sistēmas statistiskās stabilitātes novērtējumu kopumā. Šai pieejai ir arī būtiska praktiskā nozīme, jo perturbāciju veikšanai ar

mērķi pārbaudīt regulatoru iestatījumus reālās situācijās pietiek izdalīt nelielu sistēmas daļu, kas ir daudz vienkāršāk, un ar minimālu risku var organizēt un īstenot no dispečera viedokļa, ietekmējot pārējās sistēmas daļas darbību. Piedāvāta pieeja ir spēkā arī detalizētas elektromagnētisko pārejas procesu uzskaites ietvaros, kas veicina dimensijas palielinājumu vēl joprojām nelielai matricu apakšsistēmai. Šo metodiku ilustrēja neliels piemērs.

Var izdalīt turpmākus pētniecības virzienus uz pētnieciskā darba bāzes:

1. **Praktisko iterācijas procesa konverģences kritērijs** funkciju y_1 un y_2 **sakņu atrašanai** (RP nestabilitātes pazīmes).

2. **Parocīgu** sākuma tuvinājumu izvēles metodes izstrāde mainīgajiem R un γ , kas nodrošina konverģenci sakņu noteikšanai, kuri atrodas kreisajā pusplaknē.

3. Funkcijas y_3 izolīniju formas matemātiskais pamatojums (**izolīniju gluduma pakāpe kā RP stabilitātes kritērijs**).

4. **Atrasto jauno kritēriju datorrealizācija ar parocīgu interaktīvo sistēmas kvalitātes vizualizēšanu, ar kuras palīdzību pēta statisko stabilitāti.**

SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS TURPMĀKAJAM DARBAM

Šajā promocijas darbā bija izpētīta elektroenerģētisko sistēmu (EES) statiskā stabilitāte, veikts stabilitātes teorijas apskats kopš Ļapunova laikiem līdz mūsu dienām (Gramianu pielietojums, matricas signum funkcija).

Tirgus ekonomika diktē pasaules enerģētisko sistēmu apvienošanas nosacījumus, kas veicina starpsistēmu saišu skaita izmaiņu, pārraidītās jaudas palielinājumu, rezultātā rodas nepieciešamība pārkonfigurēt tīklus un, attiecīgi, to normālo režīmu pārrēķinu, kā arī ir nepieciešama statiskās stabilitātes projekta novērtēšana.

Neskatoties uz plašu aprakstīto pieeju daudzveidību, EES statiskās stabilitātes analīzes metožu kopa, kas ir definēta algebriski diferenciālā veidā, ir būtiski neliela. Tā ietver spektrālās metodes (īpašvērtību vispārinātas problēmas metode) un iterāciju metodes (metodes uz dažādu iterācijas procedūru bāzes). Visas šīs metodes, neskatoties uz mūsdienīgajām datortehnoloģijām, ir diezgan masīvas. Attiecīgi, pastāv akūta nepieciešamība absolūti jaunajā ekspress metodē EES statiskās stabilitātes novērtēšanai.

Salīdzinot 5 datorprogrammas, secinājām, ka jāizveido unificēta programma EES statiskās stabilitātes analīzei.

Pieņemot, ka pastāv mazas un lielas EES, statistiskās stabilitātes pētījumu var sadalīt divos virzienos:

1. *Klasiskā pieeja*, izmantojot RP mazajām EES. Bija veikts detalizēts neregulējamas trīsmašīnu sistēmas aprēķins un izanalizēta stabilitāte. Tika piedāvāts sekojošais:

- 1.1 RP sadalīšana divās palīgfunkcijās y_1, y_2 ;
- 1.2 Sakņu grafiskās lokalizācijas metode pirmajā kvadrantā;
- 1.3 Palīgfunkcijas y_3 ieviešana itarācijas sākumnosacījumu precizēšanai (funkcijas y_3 antigradienta izmantošana);
- 1.4 palīgfunkcijas y_3 kontūru analīze (viļņainība, gludums);
- 1.5 Grafiskā moduļa ideja programmas izveidei, kas analizētu statisko stabilitāti.

Piedāvāto RP palīgfunkciju priekšrocība ir *viegli realizējama iespēja lokalizēt tā saknes kompleksajā plaknē*. Pašu sakņu nepieciešamības atrašanas gadījumā to var izdarīt ar palīgfunkciju y_1 un y_2 palīdzību. Turklāt, statisko stabilitāti var noskaidrot arī pēc palīgfunkcijas y_3 izolīnijas formas.

Arī aprēķināta latvijas energosistēmas statistiska stabilitāte, izmantojot RP sakņu lokalizāciju.

2. *Alternatīvā pieeja*, izmantojot piedāvāto rotācijas metodes modifikāciju īpašvērtību atrašanai turpmākai lielu EES statistiskās stabilitātes analīzei:

- 2.1 Modificētā rotācijas metode;
- 2.2 Dekompozīcijas algoritms.

Ir piedāvāts dekompozīcijas algoritms stabilitātes novērtējumam gadījumā, kad divas apakšsistēmas tiek savienotas savā starpā enerģijas pārvadei (tirdzniecībai). Tas balstās uz iekšējiem stabilitātes novērtējumiem katrai apakšsistēmai līdz apvienošanai, ņemot vērā robežlīnijas parametrus un tās režīmu. Algoritma realizācijai ir piedāvāta rotācijas metodes modifikācija, kuru izmanto matricas īpašvērtību atrašanai. Pateicoties piedāvātajam algoritmam, dati par katras apakšsistēmas struktūru saglabā savu konfidencialitāti un paliek slēgti citas apakšsistēmas īpašniekam. Algoritmam piemīt dabiskais paralelisms. Nepieciešamās operācijas var veikt vienlaicīgi katrā apakšsistēmā un neatkarīgi viena no otras. Piedāvātā iespēja var tikt aplūkota gadījumu izskatīšanai, ja ir iesaistīts sarežģītāku apakšsistēmu sakarīgums.

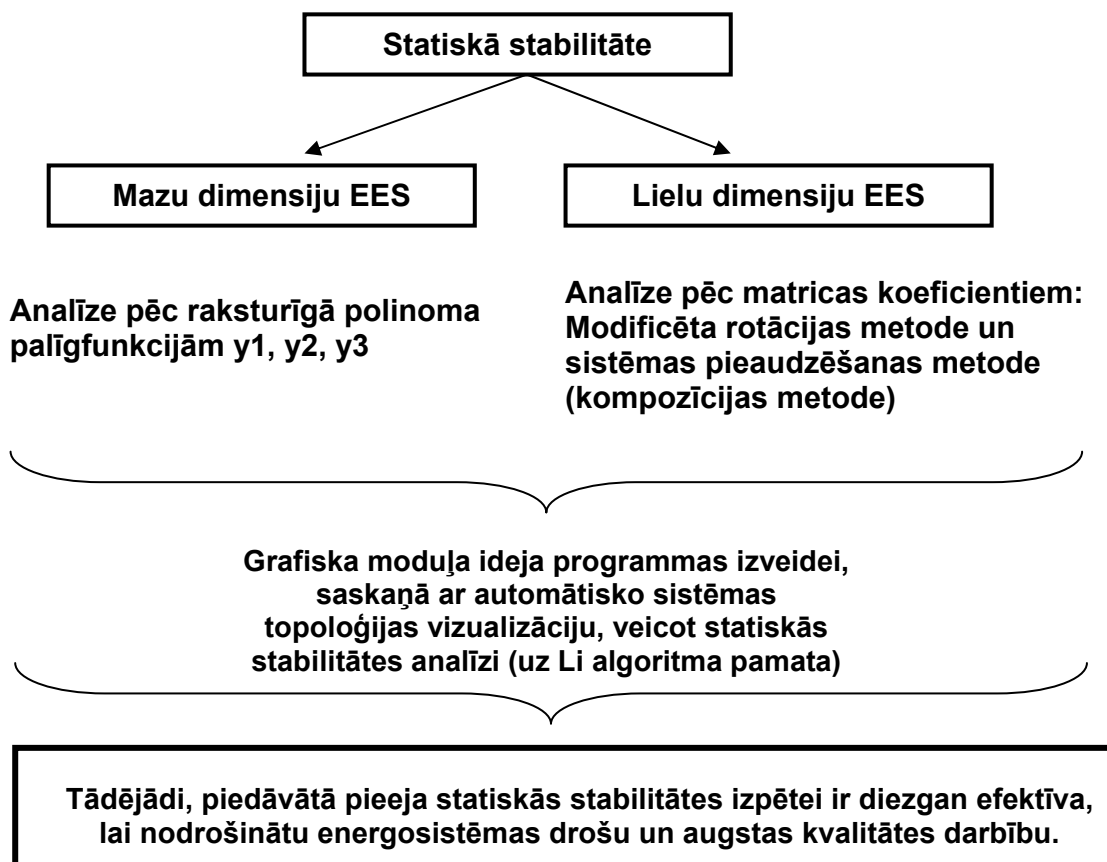
Līdz ar to, darbā ir ieguldītas ievērojamas pūles EES statistiskās stabilitātes izpētei. Šis jautājums ir ļoti aktuāls tirgus ekonomikas un elektrotīklu tehniskā aprīkojuma modernizēšanas un attīstības ietvaros (6. tab.).

Var izdalīt turpmākus pētniecības virzienus uz pētnieciskā darba bāzes:

1. Praktisko iterācijas procesa konverģences kritērijs funkciju y_1 un y_2 sakņu atrašanai (RP nestabilitātes pazīmes).
2. Parocīgu sākuma tuvinājumu izvēles metodes izstrāde mainīgajiem R un γ , kas nodrošina konverģenci sakņu noteikšanai, kuri atrodas kreisajā pusplaknē.
3. Funkcijas y_3 izolīniju formas matemātiskais pamatojums (izolīniju gluduma pakāpe kā RP stabilitātes kritērijs).
4. Atrasto jauno kritēriju datorrealizācija ar parocīgu interaktīvo sistēmas kvalitātes vizualizēšanu, ar kuras palīdzību pēta statisko stabilitāti.
5. Aprēķināt Baltijas energosistēmu statisko stabilitāti saskaņā ar metodikām, kuras ir piedāvātas šajā promocijas darbā.

6. tab. Promocijas darba zinātniskā novitāte

Promocijas darba zinātniskā novitāte



IZMANTOTO INFORMĀCIJAS AVOTU SARAKSTS

- [1] Абраменкова Н. А., Воропай Н. И., Заславская Т. Б. Структурный анализ электроэнергетических систем.– Новосибирск: Наука, 1990.– 224 с.– ISBN 5-02-029657-0
- [2] Antonovs E. Arvienotās energosistēmas stabilitātes novērtēšanas modeļi ar reālo slodzes raksturlīkņu ietekmes ievērošanu. Promocijas darbs.– Rīga: RTU, 2013.– 176 lpp.
- [3] Бердник Е. Г. Разработка алгоритмов для исследования статической устойчивости электроэнергетических систем большой размерности. Диссертация.– М.: МЭИ, 1998.– 132 с.
- [4] Das J. C. Transients in electrical systems: analysis, recognition, and mitigation.– McGraw-Hill, 2010.– 737 p.– ISBN 978-0-07-162248-6
- [5] Эльсгольц Л. Э. Дифференциальные уравнения.– М.: ЛКИ, 2008.– 320 с.– ISBN 978-5-382-00638-3
- [6] Georgiev G., Zicmane I., Kovalenko S., Antonovs E. AN ALGORITHM OF AUTOMATIC PLOTTING OF ELECTRICITY SUPPLY NETWORK CIRCUIT. The 5th International Conference “ELECTRICAL AND CONTROL TECHNOLOGIES ECT – 2010”, 2010, 6–7 May, Kaunas, Lithuania (ISSN 1822-5934)
- [7] Георгиев Г. Д., Зицмане И. А., Антонов Э. С., Коваленко С. А. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ РАЦИОНАЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ В СЕТЯХ ВЫСОКОГО И СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ. XI Международная Научно-техническая конференция. „ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ-2010”, 2010, 31 May – 4 June, Kyiv, Ukraine.
- [8] Georgiev G., Zicmane I., Kovalenko S., Antonovs E. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВОЛНОВОГО АЛГОРИТМА ЛИ. „THE INTERNATIONAL ENERGY FORUM 2010”, 2010, 23–26 June, Varna, Bulgaria.
- [9] Georgiev G., Zicmane I., Kovalenko S., Antonovs E. EXPRESS ESTIMATION OF INFLUENCE OF COMPENSATORY REACTIVE POWER ON THE ACTIVE LOSSES IN THE HIGH VOLTAGE NETWORKS. International Scientific and Technical Conference “Electrical Power Engineering 2010”, 2010, 14–16 October, Varna, Bulgaria (ISBN 978-954-20-0497-4)
- [10] Georgiev G., Zicmane I., Kovalenko S., Antonovs E. THE PRINCIPLE OF CREATING A GRAPHICAL EDITOR FOR AUTOMATIZATION PROCESS TRACING ELECTRICAL CIRCUITS. The 51st Annual International Scientific Conference of Riga Technical University, 2010. gads, 14. October, Riga, Latvia. (ISBN 978-9934-10-054-3)
- [11] Georgiev G., Zicmane I., Kovalenko S., Antonovs E. AN AGGREGATE ANALYTICAL LOAD MODEL WITH VOLTAGE DEPENDANT CHARACTERISTICS. The 6th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2011., 2011, 5–6 May, Kaunas, Lithuania (ISSN 1822-5934)
- [12] Georgiev G., Zicmane I., Kovalenko S., Antonovs E. ELIMINATION OF NODES WITH VOLTAGE DEPENDENT LOAD CHARACTERISTICS IN ELECTRICAL NETWORK MODELS. 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). 2011, 8–11 May, Rome, Italy (ISBN 978-1-4244-8781-3)
- [13] In scientific journal: Georgiev G., Zicmane I., Kovalenko S., Antonovs E. OPERATIONAL REDUCTION OF ACTIVE LOSSES IN HIGH-VOLTAGE NETWORKS VIA REACTIVE POWERS. Scientific Proceedings Of Riga Technical University, Power And Electrical Engineering, 4th series. Riga: RTU, 2011, sērija 4, vol. 28 (ISSN 1407-7345)
- [14] Georgiev G., Zicmane I., Kovalenko S. HIGH ORDER CHARACTERISTIC POLYNOMIAL ROOTS' LOCATION ANALYSIS (ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ

КОРНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО ПОЛИНОМА ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ). ELEKTROENERGETIKA 2011 The Sixth International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. 2011, 21–23 September, High Tatras, Slovakia (ISBN 978-80-553-0724-4)

[15] Georgiev G., Zicmane I., Kovalenko S. STABILITY ANALYSIS OF ELECTRICAL POWER SYSTEM THROUGH CHARACTERISTIC POLYNOMIAL ROOTS LOCALITY. The 7th International Conference on Electrical and Control Technologies, ECT-2012. 2012, 3–4 May, Kaunas, Lithuania (ISSN 1822-5934)

[16] Georgiev G., Zicmane I., Kovalenko S. STATIC STABILITY ANALYSIS OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS BY MEANS OF ROOT LOCATION OF A CHARACTERISTIC POLYNOMIAL. The International Scientific Conference ELECTRIC POWER ENGINEERING 2012. 2012, 23–25 May, Brno, Czech (ISBN 978-80-214-4514-7)

[17] Georgiev G., Zicmane I., Kovalenko S. LOAD CHARACTERISTICS AND THEIR INFLUENCE OVER THE ESTIMATES OF STABILITY AND TRANSIENT PROCESSES IN ELECTRICAL SYSTEMS IV НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ ЕФ 2012., 2012, 28 September – 1 October, Sofia, Bulgaria.

[18] Georgiev G., Zicmane I., Kovalenko S. A STUDY OF THE CHANGE IN ASSESSING THE STABILITY OF THE INTERCONNECTED SYSTEM WHEN CONNECTING A LINK (LINE) BETWEEN ITS TWO SUBSYSTEMS 12. International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2013, 5–8 May, Wroclaw, Poland. (ISBN 978-1-4673-3058-9)

[19] Georgiev G., Zicmane I., Kovalenko S. NEW APPROACHES OF STATIC STABILITY RESEARCH OF UNIFIED ELECTRIC POWER SYSTEMS POWERTECH 2013, 2013, 16–20 June, Grenoble, France. (ISBN 9781467356695)

[20] Georgiev G., Zicmane I., Kovalenko S. EXPRESS ESTIMATION OF THE SYSTEM STABILITY AFTER SWITCHING ON A CROSS-BORDER LINE. INTERNATIONAL SCIENTIFIC SYMPOSIUM ELEKTROENERGETIKA EE2013, 2013, 18–20 September, High Tatras, Slovakia (ISBN 9788055314419)

[21] Gerasimov K. K. Mathematical description of electromechanical oscillations in electric power systems and some algorithms for investigation of its stability at small signal disturbances. Summary of doctoral thesis.– Varna, Bulgaria: TUV, 2005.– 80 p.

[22] Gerhards J., Mahņitko A., Papkovs B. Energosistēmas vadība, optimizācija un riski. - Rīga: RTU, 2011.– 308 lpp.– ISBN 978-9934-10-193-9

[23] Гантмахер Ф. Р. Теория матриц.– М.: Наука, 1988.– 552 с.– ISBN 5-02-013722-7

[24] Hemmingsson M. Power system oscillations: detection estimation & control. Doctoral dissertation.– Sweden: Lund University, 2003.– 158 p.– ISBN 91-88934-27-6

[25] Хрущев Ю. В. Методы расчёта устойчивости энергосистем.– Томск: Томский политехнический университет, 2004.– 178 с.– ISBN 5-93629-182-0

[26] Ivanov C. K. Assessment of the electromechanical oscillations in the unified electric power systems and power system stabilizers tuning. Summary of doctoral thesis.– Varna, Bulgaria: TUV, 2006.– 45 p.

[27] Ядыкин И. Б., Галяев А. А., Рубинович Е. Я. О методах вычисления грамианов и использовании их в анализе устойчивости больших линейных систем.– слайды семинара ИПУ РАН, 24 мая 2011 года.

[28] Клиот-Дашинский М. И. Алгебра матриц и векторов.– СПб.: Лань, 2001.– 160 с. ISBN 5-8114-0429-8

[29] Kolcun M., Muhlbacher J. Electric power system operation control.

[30] Kovaļenko S. Energosistēmas stabilitātes uzlabošanas pasākumu izpēte. Maģistra darbs – Rīga: RTU, 2006, 70 pp.

- [31] Крон Г. Исследование сложных систем по частям (диакоптика).– М.: Наука, 1972.– 544 с.
- [32] Kundur P. Power System Stability and Control.– Peru, Electric Power Research Institute, 1993.– 979 p.
- [33] Kundur P., Paserba J., Ajarapu V., Andersson G., Bose A., Canizares C., Hatziargyriou N., Hill D., Stankovic A., Taylor C., Van Cutsem T., Vittal V. Definition and Classification of Power System Stability.– IEEE Transactions on power systems, vol. 19, NO. 2, May 2004, pp. 1387-1401
- [34] Latvijas Rietumu reģiona pārvades elektrotīkla attīstība saistībā ar RTEC-2 rekonstrukciju, Kurzemes KES un kabeļa līnijas uz Zviedriju iespējamo būvniecību.– 2009.
- [35] Методические указания по определению устойчивости энергосистем.– М.: Энергосетьпроект, 1977.– 100 с.
- [36] Петров Ю. П., Петров Л. Ю. Непредвиденное в математике и его связь с авариями и катастрофами. 4-е издание.– СПб.: БВХ-Петербург, 2012.– 240 с.– ISBN 978-5-94157-543-5
- [37] Pivnyak G., Vinoslavskiy V., Rybalka A., Nesen L., Prokopenko V. Transients in electric power supply systems.– Dnipropetrovsk: National Mining University, 2009.– 408 с.– ISBN 978-966-350-122-2
- [38] Портной М. Г., Рабинович Р. С. Управление энергосистемами для обеспечения устойчивости.– М.: Энергия, 1978.– 352 с.
- [39] Постников М. М. Устойчивые многочлены.– М.: Едиториал УРСС, 2004.– 176 с.– ISBN 5-354-00637-6
- [40] Пуго В. И. Электромеханические переходные процессы в электрических системах.– Рига, РТУ, 1 часть, 1979.– 54 с., 2 часть, 1981.– 80 с., 3 часть, 1983.– 54 с., 4 часть, 1987.– 54 с.
- [41] Строев В. А. Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях.– М.: Знак, 1996.– 224 с.– ISBN 5-87789-016-6
- [42] Суханов О. А., Шаров Ю. В. Иерархические модели в анализе и управлении режимами электроэнергетических систем.– М.: МЭИ, 2007.– 312 с.– ISBN 978-5-383-00123-3
- [43] A. Swarup, Sudhir Comparison of Quadrotor Performance Using Backstepping and Sliding Mode Control – Proceedings of the 2014 International Conference on Circuits, Systems and Control, Interlaken, Switzerland February 22–24, 2014
- [44] Штридбек У. Уроки, извлеченные из либерализации рынков электроэнергии. – Париж: ОЭСР/МЭА, 2005.– 274 с.
- [45] Uwamusi S. E., Otunta F. O. Computation of eigenvalues of hermittian matrix via Givens plane rotations.– Nigeria: Nigerian Journal of Applied Science. Vol. 20, 2002.– 101–106 pp. [46] под редакцией Веникова В. А. Методика расчётов устойчивости автоматизированных электрических систем.– М.: Высш. шк., 1966.– 250 с.
- [47] Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах.– М.: Высш. шк., 1985.– 536 с.
- [48] I. Zicmane Elektromehāniskie pārejas procesi elektriskajās sistēmās.– Rīga: RTU, 2012.– 404 lpp.– ISBN 978-9934-10-309-4
- [49] Жданов П. С. Вопросы устойчивости электрических систем.– М.: Энергия, 1979.– 456 с.
- [50] QR-разложение. Вращения Гивенса. http://it6-1605.narod.ru/#Givens_rotations
- [51] МАТЕМАТИЧЕСКАЯ СЕТЬ СКАЙНЕТ Сетевые технологии верстки физико-математической литературы с исполняемыми алгоритмами (математическая сеть имени Леонарда Эйлера) <http://mathscinet.ru/main/index.php>
- [52] Polynomial Root finder <http://www.hvks.com/Numerical/websolver.php>

- [53] Локализация корней полинома http://pmpu.ru/vf4/polynomial/zero_local
- [54] Погрешность значения полинома. Лаборатория полиномов „PolyLab” 16
<http://rudocs.exdat.com/docs/index-538819.html?page=8>
- [55] Baltic Energy Market Interconnection Plan (BEMIP)
http://ec.europa.eu/energy/infrastructure/bemip_en.htm