

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte

Elektroenerģētikas institūts

Aleksejs Soboļevskis

Doktora studiju programmas “Enerģētika un elektrotehnika” doktorants

VISVĀJĀKO TĪKLA ELEMENTU NOTEIKŠANA ENERGOSISTĒMĀS

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
profesore *Dr. sc. ing.*
INGA ZICMANE

RTU Izdevniecība

Rīga 2020

Soboļevskis, A. Visvājāko tīkla elementu noteikšana energosistēmās. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU izdevniecība, 2020. 41 lpp.

Iespiests saskaņā ar "RTU P-05" 2020. gada 5. maija lēmumu Nr. 70/20.

ISBN 978-9934-22-441-6 (print)

ISBN 978-9934-22-442-3 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora grāda (*Ph. D.*) iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2020. gada 29. jūnijā plkst. 13.00 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1, 306. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asoc. profesore *Dr. sc. ing.* Anna Mutule,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Režīmu un plānošanas dienesta projektu vadītājs *Dr. sc. ing.* Aleksandrs Ļvovs,
AS "Augstsprieguma tīkls", Latvija

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

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora grāda (*Ph. D.*) iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Aleksejs Soboļevskis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi un literatūras saraksts. Darba kopējais apjoms ir 140 lappuse (ieskaitot divus pielikumus), 68 attēli, 16 tabulu. Literatūras saraksts ietver 180 informācijas avotu.

SATURS

IEVADS	5
Promocijas darba aktualitāte	5
Darba hipotēze, mērķi un uzdevumi	6
Izmantotās metodes un rīki	7
Promocijas darba zinātniskā novitāte	7
Promocijas darba praktiskā nozīme.....	7
Autora personīgais ieguldījums.....	7
Promocijas darba aprobācija	7
Autora publikācijas	8
Promocijas darba struktūra un apjoms	9
1. EES JUTĪGUMA UN NEVIENDABĪGUMA IZPĒTES PIEEJU APSKATS	10
2. APGRIEZTĀS JAKOBI MATRICAS UN Z MATRICAS IZMANTOŠANA.....	11
3. JUTĪGO ELEMENTU ATRAŠANĀS VIETU NOTEIKŠANA EES MODELIM	13
3.1. Jutīgo elementu atrašanās vietu noteikšana EES modelim (1. scenārijs).....	13
3.2. Jutīguma aprēķināšana EES modelim 5. scenārijā.....	21
SECINĀJUMI	31
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	33
PIELIKUMI	35

IEVADS

Promocijas darba aktualitāte

Elektroenerģijas tirgum attīstoties, energosistēmas darba režīmu aprēķināšana, analīze un prognozēšana no elektroenerģijas tirgus stabilitātes nodrošināšanas viedokļa kļūst īpaši svarīga. Energosistēmas darba režīmu stabilitātes nodrošināšana ir viens no svarīgākajiem operacionālās vadības uzdevumiem.

Saistībā ar gaidāmajām reformām, kā arī ņemot vērā nepieciešamību ievērot Eiropas Savienības stratēģijas prioritātes, par primāriem var nosaukt šādus aspektus:

- energoefektivitātes paaugstināšana;
- elektroenerģijas tirgus attīstīšana;
- piegādes drošības paaugstināšana;
- atjaunojamo energoresursu maksimāla izmantošana, paaugstinot šādas enerģijas cenas konkurētspēju;
- vides saglabāšana, vienlaikus ražojot, pārvadot un sadalot dažādus enerģijas veidus.

Elektroenerģijas sistēma (EES) ir komplekss objekts, kura ekspluatācija prasa ar darba režīmu drošību, kvalitāti un ekonomiju saistītu prasību izpildi. Šīs prasības jāizpilda visiem subjektiem, kas veido elektrības tirgus tehnoloģisko bāzi.

Jebkuras energosistēmas stabila darbība ir atkarīga no iespējas nodrošināt pastāvīgu ģenerētās un patērētās jaudas balansu, kā arī elektroenerģijas kvalitātes līmeni. Lai novērtētu energosistēmas stabilitāti un modelētu dažādus energosistēmas darba režīmus, izmanto dažādas datorprogrammas. Jau tuvā nākotnē radīsies nepieciešamība pēc precīzām prognozēšanas un stabilitātes novērtēšanas metodēm [1], ņemot vērā atjaunojamo energoresursu īpatsvara gaidāmo pieaugumu.

Mūsdienu elektroenerģijas sistēmām ir raksturīgi lieli izmēri. Matemātiskos modeļus, kas ļauj prognozēt un minimizēt tehnisko prasību pārkāpumu skaitu, izmanto, lai analizētu energosistēmu darba režīmus. Tas ļauj arī celt elektroenerģijas sistēmas darba režīmu stabilitāti un kvalitāti, tajā skaitā – noteikt režīma parametru pieļaujamību normālos un ārkārtas apstākļos, paaugstināt vadītspēju un apmierināt augošo pieprasījumu pēc elektroenerģijas.

Energosistēmu matemātisko modeļu veidošana dod iespēju kontrolēt EES darba režīmus, prognozēt EES reakciju uz noteiktu EES daļu izņemšanu no ekspluatācijas remonta veikšanai, kā arī identificēt EES vājas vietas. Projektēšanas posmā iegūtā informācija ļauj izveidot vienādi stabila tīkla projektu, kā arī novērst bīstamas un nevēlamas situācijas. Ekspluatācijas gaitā tā ļauj veikt aizsardzības pasākumus, lai minimizētu kaitējumu energosistēmām un ekonomikai iespējamo ārkārtas situāciju dēļ.

Šajā darbā tiek analizēti un salīdzināti pieci energosistēmas modeļu scenāriji. EES modeļi (1., 2., 3., 4. un 5. scenārijs). Darba autors pēta EES modeļus apstākļos, kas līdzinās reālās pasaules apstākļiem. Šie modeļi daļēji atspoguļo situāciju Baltijas valstu EES, kaut gan tiem ir tikai vispārēja līdzība. Esošais (saskaņā ar 1. scenāriju) un plānotais (saskaņā ar 4. scenāriju) ar gaidāmo modernizāciju un jauniem elektropārvades līniju savienojumiem, bet

cits – saskaņā ar situāciju 5. scenārijā – ar gaidāmo modernizāciju un jauniem elektropārvades līniju savienojumiem un jaunu vēja parku būvniecība. Jūtīguma indikatoru metodes izmantošanas efektivitāte elektroenerģijas tīklu darba režīmu analīzes un kontroles problēmu risināšanā liecina par to, ka izstrādātajai metodei ir plašas lietojuma iespējas.

Darba hipotēze, mērķi un uzdevumi

Pašreizējo posmu pasaules enerģijas attīstībā raksturo spēcīgu teritoriāli vienotu enerģijas sistēmu izveide. Brīvā tirgus apstākļos dažādu valstu enerģētikas tirgi pakāpeniski apvienojas: mainās tīklu konfigurācija, tiek veidoti jauni savienojumi, enerģētikas uzņēmumi un arodbiedrības, kā arī arvien aktuālāka kļūst jaunu metožu un algoritmu meklēšana sarežģītāku EES aprēķinu veikšanai. Jo īpaši tas attiecas uz EES statistiskās stabilitātes problēmu risināšanu, kas paredz energosistēmu galveno elementu detalizētu aplūkošanu.

Jāatzīmē, ka atjaunojamās enerģijas aktīvai ieviešanai ir trīs galvenie iemesli:

- vides problēmas, kas saistītas ar tradicionālo energoresursu ieguvu un apstrādi;
- ierobežots tradicionālo energoresursu daudzums un neierobežoti atjaunojamās enerģijas resursi;
- viena no efektīvākajām alternatīvām ir vēja enerģija.

Promocijas darba galvenais mērķis ir piedāvāt metodi, kas ļauj noteikt pret ārējām ietekmēm jutīgākos tīkla parametrus un to attiecības ar EES parametriem. Šo informāciju var izmantot, lai uzlabotu EES darba raksturojumus (uzticamību un vadāmību), nosakot EES jutīgākos elementus (mezglus un līnijas). Lai atrisinātu šo uzdevumu, tiek izmantotas Jakobi matricas un mezglu vadītspējas singulārās analīzes metodes. Tas neprasa veikt statistiskos testus un aplūkot daudzus ārējo iedarbību scenārijus. Tādējādi novērtēšanas process kļūst daudz vienkāršāks.

Hipotēze: vājo vietu klātbūtni elektroenerģijas sistēmā nosaka tās strukturālās īpašības (tīkla topoloģija, ģeneratoru un slodzes mezglu esamība un izvietojums), kā arī sistēmas elementu parametri (savienojumu pretestība, slodzes parametri un ģeneratori utt.). Elektroenerģijas sistēmas vājo vietu savlaicīga un kvalificēta noteikšana ļauj veikt pasākumus sistēmas stiprināšanai, mainot tīkla shēmu, ģeneratoru jaudas struktūru un ģeneratoru atrašanās vietu, reaktoru un kompensācijas ierīces, uzstādīt kompensācijas iekārtas, izvēlēties avārijas automātiku utt. Ir skaidrs, ka šo darbību galvenais mērķis ir nodrošināt optimālu ražošanas jaudu struktūru, ieskaitot nepieciešamo regulēšanas diapazonu un dinamiku. Tāpat kā jebkurai kompleksai sistēmai, EES piemīt neviendabīgums un nevienmērīgums. Jo īpaši tas izpaužas tajā, ka perturbācijas dažādās EES vietās izraisa būtiskas reakcijas vienos un tajos pašos režīmu parametros, t. i., pat mainoties perturbāciju vietai, sprieguma moduļi visvairāk mainās vienos un tajos pašos mezglos. Tādējādi, lai paaugstinātu EES stabilitāti un novērstu avārijas situācijas, ir nepieciešama iepriekš minēto mezglu un savienojumu savlaicīga atklāšana (lokalizēšana).

Izmantotās metodes un rīki

Darba rezultāti tika iegūti, izmantojot šādas datorprogrammas un metodes:

- 1) aprēķini, kuru pamatā ir apgrieztās Jakoba matricas un Z matricas izmantošanas metode;
- 2) EES modelēšana: *AutoDESK, AutoCAD; MathCAD, Regus*;
- 3) EES analīze, izmantojot *MathCAD, Regus, Microsoft EXCEL* datorprogrammas;
- 4) Rezultātu apstrāde un grafiskais attēlojums *Microsoft EXCEL, AutoDESK AutoCAD*.

Promocijas darba zinātniskā novitāte

Enerģētikas sektora attīstības pareizos virzienus var izvēlēties, balstoties uz detalizētiem EES stacionāro un pārejas režīmu pētījumiem, ieskaitot statisko stabilitāti. Tajā pašā laikā jāņem vērā elektroenerģijas sistēmas faktoru kopums, struktūra un iespējamais stāvoklis. Sākumpunkts ir noteiktas prasības energosistēmai un, attiecīgi, aprīkojumam un vadības sistēmām.

Šis pētījums ir veltīts elektroenerģijas tīklu vājāko punktu noteikšanai, kā arī liela mēroga vēja staciju integrācijas ietekmei uz energosistēmas stabilitāti.

Promocijas darba praktiskā nozīme

Promocijas darba mērķis ir piedāvāt metodi, kas ļautu noteikt visneaizsargātākos tīkla parametrus, kuri ir jutīgi pret sprieguma kritumu un ārējām ietekmēm, un to attiecības ar EES parametriem, kā arī mēģināt izmantot šo informāciju EES īpašību uzlabošanai. Tādējādi informācija par jutīgām vietām ļauj noteikt un kontrolēt mezglus un līnijas, kur sistēmas traucējumu dēļ tiek novērotas visbūtiskākās ekspluatācijas parametru svārstības.

Autora personīgais ieguldījums

1. Izveidoti EES modeļi 330 kV tīklam (1., 2., 3., 4. un 5. scenārijs) ar mērķi noteikt energosistēmas visjutīgākās vietas.
2. Veikti aprēķini aplūkotajiem EES scenārijiem visjutīgāko vietu noteikšanai.
3. Pamatojoties uz iegūtajiem rezultātiem, veikta analīze un izdarīti attiecīgie secinājumi.

Promocijas darba aprobācija

Rezultāti tika ziņoti un apspriesti šādās starptautiskās konferencēs.

1. “Assessment of Static Stability of Power System of the Baltic States in View of the Planned Synchronization with Networks of Western Europe to 2030”, 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Itālija, Palermo, 12.–15. jūnijs, 2018.

2. "Prediction of Latvian Electrical Power System for Reliability Evaluation Including Wind Energy", 2017 IEEE 17th International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Italy, Milan, June 6–9, 2017.
3. "Wind Power Plant Influence on the Latvian EES Stability", SEEP 2017: 10th International Conference on Sustainable Energy & Environmental Protection, Slovenia, Bled, June 27–30, 2017.
4. "Latvian Electrical Power System Stability's Analysis Taking into Account New Development Strategy until 2025", 11th International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN 2017): Proceedings, Moldova, Chisinau, October 12–13, 2017.
5. "Analysis of Vulnerability of the Latvian Electrical Power System", 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Italy, Florence, June 7–10, 2016.
6. "Assessing the Impact of Registering of Weak Points Calculating the Power System Operating Modes", 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2016) Latvia, Riga, October 13–14, 2016.
7. "Vulnerability Assessment of Electric Power System for the Case of Latvian EES", 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON): Proceedings, Latvia, Riga, October 14, 2015.
8. "Localization of the Roots of the Characteristic Polynomial (CP) and Isolines to Analyze Static Stability", 2014 55th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON): Proceedings, Latvia, Riga, October 14, 2014.

Autora publikācijas

Rezultāti tika ziņoti un apspriesti astoņās starptautiskās konferencēs.

1. I. Zicmane, K. Bērziņa, **A. Sobolevskis**, S Kovaļenko, Assessment of Static Stability of Power System of the Baltic States in View of the Planned Synchronization with Networks of Western Europe to 2030. No: 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Itālija, Palermo, 12.–15. jūnijs, 2018.
2. **A. Sobolevskis**, I. Zicmane. Prediction of Latvian Electrical Power System for Reliability Evaluation Including Wind Energy // 2017 IEEE 17th International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Italy, Milan, June 6–9, 2017.

3. K. Berzina, I. Zicmane, **A. Sobolevskis**, S. Kovalenko. Power system stability, Wind energy integration, Power system modelling // SEEP 2017: 10th International Conference on Sustainable Energy & Environmental Protection, Slovenia, Bled, June 27–30, 2017.
4. I. Zicmane, K. Berziņa, **A. Sobolevskis**, S. Kovalenko. Latvian Electrical Power System Stability's Analysis Taking into Account New Development Strategy until 2025 // 11th International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN 2017): Proceedings, Moldova, Chisinau, October 12–13, 2017.
5. **A. Sobolevskis**, I. Zicmane. Analysis of Vulnerability of the Latvian Electrical Power System // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Italy, Florence, June 7–10, 2016.
6. **A. Sobolevskis**, I. Zicmane Assessing the Impact of Registering of Weak Points Calculating the Power System Operating Modes. // 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2016), Latvia, Riga, October 13–14, 2016.
7. **A. Sobolevskis**, V. Murac, I. Zicmane. Vulnerability Assessment of Electric Power System for the Case of Latvian EES // 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2015), Latvia, Riga, October 14, 2015.
8. I. Zicmane, S. Kovalenko, **A. Sobolevskis**, A. Sauhats. Localization of the Roots of the Characteristic Polynomial (CP) and Isolines to Analyze Static Stability // 2014 55th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2014), Latvia, Riga, October 14, 2014.

Promocijas darba struktūra un apjoms

Promocijas darbā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi un literatūras saraksts ar 180 avotiem. Kopējais darba apjoms ir 140 lpp., darbā ir 16 tabulu un 68 attēli.

Ievadā pamatota temata aktualitāte, definēts promocijas darba mērķis un uzdevumi, kā arī ietverts zinātniskās novitātes pamatojums. Autors aprakstījis personīgo ieguldījumu un uzskaitījis konferences un publikācijas.

- Pirmajā nodaļā ir aprakstītas pašreizējas EES analīzes metodes un pieejas.
- Otrā nodaļa ietver piedāvātās metodes teorētisko pamatojumu.
- Trešajā nodaļā autors analizē EES, izmantojot teorētiskajā nodaļā aprakstīto pieeju.
- Secinājumi par piedāvāto metodi.

1. EES JUTĪGUMA UN NEVIENDABĪGUMA IZPĒTES PIEEJU APSKATS

Elektroenerģijas sistēma (EES) ir komplekss objekts, kura ekspluatācija prasa ar darbības režīmu drošību, kvalitāti un ekonomiju saistītu prasību izpildi. Šīs prasības attiecas uz visiem subjektiem, kas veido elektrības tirgus tehnoloģisko bāzi.

EES jutīgums stacionārajos režīmos vispirms tika pētīts, analizējot sākotnējo datu kļūdu ietekmi. No EES modelēšanas viedokļa sākotnējo datu kļūdu ietekme ir diezgan līdzīga reālu traucējumu ietekmei uz režīma parametru vērtībām.

Tieši tāpēc kļūdu izpētes rezultāti ir interesanti arī no vājo punktu problēmas viedokļa. Tādēļ [4] uzmanība tika pievērsta Jakobi matricas nosacītības skaitļa nozīmei aprēķinu rezultātu kļūdas novērtēšanā un tika pierādīts, ka galvenais iemesls sliktajai nosacītībai ir elektropārvades līniju pretestību atšķirība.

Energosistēmas vājāko punktu sarakstu parasti iegūst, simulējot vienu vai vairākas atteices pilnajā vai matemātiskajā EES modelī, pamatojoties uz ekspertu novērtējumiem un heuristiku.

Piemēram, EES ievainojamību var novērtēt, pamatojoties uz vispārīgo komplekso sistēmu teoriju [5]. Rezultātā 34 mezglu shēmā tika tiek atrasta tikai viena vāja vieta (līnija) (pēc pārslodzes līmeņa, salīdzinot ar citām līnijām), kuras pazušana izraisa visa tīkla darbināspējas un vispārējās efektivitātes relatīvu samazināšanos.

Otra pieeja [6] piedāvā formālu metodi, kas ļauj analizēt kaskādes avārijas procesus un pietiekami adekvāti atspoguļot faktiskos notikumus, EES stāvokļus un procesus, kas parādās kaskādes avārijas attīstības procesā, taču tā neļauj analizēt ārkārtas situācijas pirms to rašanās.

Trešajā pieejā [7] vājo punktu noteikšanai tiek piedāvāts meklēt statiskās stabilitātes ziņā vājas vietas, balstoties uz vienkāršotiem modeļiem. Šīs pieejas trūkums ir tajā, ka daudzu aprēķinu rezultātu analīze un sistematizācija prasa daudz laika un resursu.

Vairāku daļas pieeju trūkums ir nepieciešamība veikt daudzus aprēķinus. Vienlaikus galvenās grūtības, pirmkārt, ir saistītas nevis ar situācijas modelēšanu un aprēķinu izpildi, bet ar iegūto rezultātu analīzi un sistematizāciju. Jāatzīmē, ka sakņu aprēķināšana ir ļoti vienkārša pirmās un otrās pakāpes raksturīgajiem vienādojumiem. Pastāv trešās un ceturtais pakāpes vienādojumu sakņu vispārīgā izteiksme, bet šīs izteiksmes ir sarežģītas un maz noderīgas. Augstākas pakāpes vienādojumiem vispār nav iespējams uzrakstīt vispārīgā izteiksme. Līdz ar to stabilitātes aprēķinos raksturīgā vienādojuma tiešais risinājums līdz šim nav plaši izmantots.

Aprēķins, kas balstās uz mezglu vadītspējas matricu un Jakobi matricu, nodrošina mazu īpašvērtību precīzāku noteikšanu, salīdzinot ar pārējiem algoritmiem. Lai noteiktu jutīgumu, balstoties uz Jakobi matricu un mezglu vadītspējas matricu, ir nepieciešams mazāks operāciju skaits, savukārt normālo režīmu jutīguma analīze prasa mazāk resursu, vienlaikus nodrošinot aprēķinu rezultātu precizitāti. Apgrieztās Jakobi matricas izmantošanas priekšrocība ir tajā, ka tā neprasa risināt lineāro vienādojumu sistēmu. Tomēr Jakobi matricas izmantošanai ir savas priekšrocības, kas tiks aplūkotas tālāk tekstā.

2. APGRIEZTĀS JAKOBI MATRICAS UN Z MATRICAS IZMANTOŠANA

Mezglu vadītspējas matrica Y un Jakobi matrica J apvieno režīma primāros un sekundāros parametrus. Šīs matricas ļauj iegūt pilnīgu energosistēmas pašreizējo režīmu un tīkla īpašību raksturojumu. Promocijas darbā aplūkoti augstsprieguma tīkla elementu jutīguma indikatori.

Elektroenerģijas sistēmas neviendabīguma izpētē svarīga loma ir diviem jēdzieniem, tad - jutīgumam un koherencei.

Jutīgums ir režīma parametra reakcijas pakāpe uz vienu traucējumu. To var noskaidrot ar skaitlisku eksperimentu vai dažu netiešu rādītāju palīdzību, piemēram, ar tālāk tekstā minētajiem rādītājiem, kas saistīti ar jutīguma matricu singulārajām un īpašvērtībām. Režīma parametrus un atbilstošos EES elementus, kuru jutīgums, salīdzinot ar citiem elementiem, ir ievērojami augstāks, sauc par jutīgiem.

Visinteresantākais EES jutīguma izpētes kontekstā ir shēmas līniju, kuru parametru izmaiņas visvairāk ietekmē jutīgumu, lokalizācija. Kā zināms, reālo matricu $A^T A$ un $A A^T$ kopīgo īpašvērtību λ kvadrātsakņu aritmētiskas vērtības sauc par matricas A singulārajām vērtībām.

$$\sigma_i(A) = \sqrt{\lambda_i(A^T A)} = \sqrt{\lambda_i(A A^T)}, \quad (2.1.)$$

ja $i = 1, \dots, k$, un jutīguma pieauguma indikators ir Jakobi matricas minimālās singulārās vērtības σ_1 samazinājums [8], [9].

Lai novērtētu shēmas parametru un darbības parametru ietekmi uz tās elementu jutīgumu, tiek pētīta matrica, kas iegūta no aplūkotās shēmas Jakobi līniju vadītspējas matricas y_{ij} .

Jutīgu elementu esamība un atrašanās vieta tika noskaidrota, izmantojot EES shēmas un tās parametru skaitlisko un analītisko izpētes metodi [8], [9], t. i., Jakobi matricas (2.2. vienādojums) un mezglu vadītspējas matricas (2.3. vienādojums), kā arī vispārināto vājuma indikatoru (2.4. vienādojums) un singulāro analīzi (2.5. vienādojums).

$$J = W \sum V^T = \sum_{i=1}^k w_i \sigma_i v_i^T, \quad (2.2.)$$

$$Y = W_Y \sum_Y V_Y^T = \sum_{i=1}^k w_{Yi} \sigma_{Yi} v_{Yi}^T, \quad (2.3.)$$

kur $\sum = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_k)$ un $\sum_Y = \text{diag}(\sigma_{Y1}, \dots, \sigma_{Yk})$ – singulāro vērtību diagonālās matricas; $W = (w_1, \dots, w_k)$, $V = (v_1, \dots, v_k)$, – ir taisnleņķa matricas $k \times k$ izmērs, to i -tās kolonnas ir, respektīvi, attiecīgo matricu i -tais kreisais un i -tais labais singulārais vektors, un tām ir patiesi šādi nosacījumi: $w_i^T w_i = v_i^T v_i = 1$, $w_i^T w_j = v_i^T v_j = 0$, ja $i \neq j$.

Indikatori $\chi_{J\sigma}$ [8], [9] un $\chi_{Y\sigma}$ tika izmantoti kā vispārināti rādītāji, lai izceltu vājas līnijas, balstoties uz singulāro analīzi:

$$\chi_{J\sigma} = \frac{\partial \sigma_1}{\partial y_{ij}} = w_{1\delta}^T \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \delta \partial y_{ij}} \right) v_{1\delta} + w_{1\delta}^T \left(\frac{\partial^2 P}{\partial U \partial y_{ij}} \right) v_{1U} + w_{1U}^T \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial \delta \partial y_{ij}} \right) v_{1\delta} + w_{1U}^T \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial U \partial y_{ij}} \right) v_{1U}, \quad (2.4.)$$

$$\chi_{Y\sigma} = (w_{Yp1} - w_{Yq1}) (v_{Yp1} - v_{Yq1}), \quad (2.5.)$$

kur $(\partial^2 P)/(\partial \delta \partial y_{ij})$, $(\partial^2 P)/(\partial U \partial y_{ij})$, $(\partial^2 Q)/(\partial \delta \partial y_{ij})$, $(\partial^2 Q)/(\partial U \partial y_{ij})$ – atvasinājumi no Jakobi līniju vadītspējas matricas y_{ij} ; w_1 , v_1 – Jakobi matricas 1. kreisais un 1. labais singulārais vektors; w_{Y1} , v_{Y1} – mezglu vadītspējas matricas 1. kreisais un 1. labais singulārais vektors.

Piedāvātā pieeja ļauj veikt energosistēmas analīzi: noteikt vājos punktus, prognozēt sistēmas līdzsvarotību/nelīdzsvarotību elektroenerģijas deficīta un pārpalikuma apstākļos, lai veiktu turpmākus pasākumus un nodrošinātu normālu un līdzsvarotu darba režīmu.

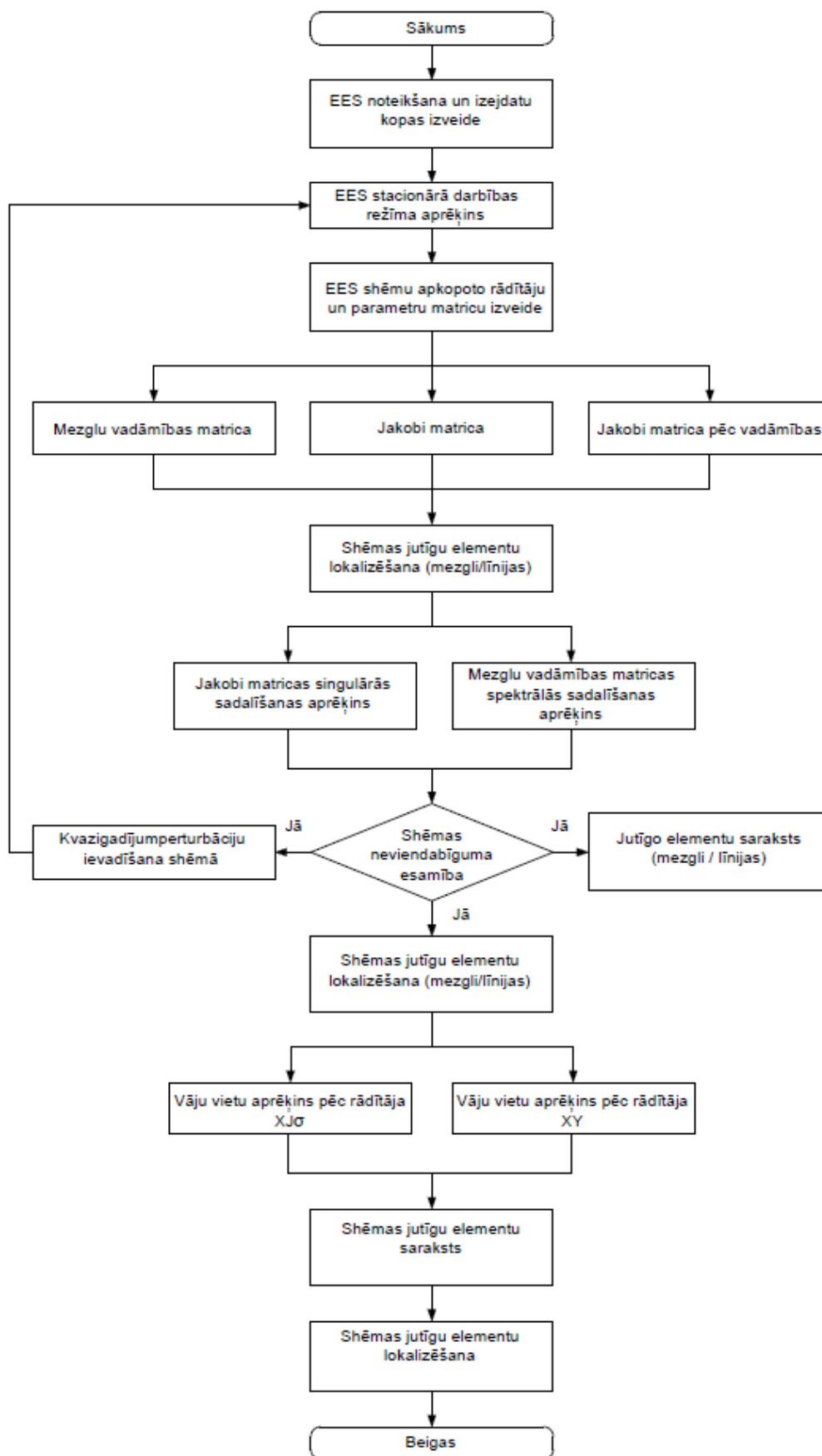
Jutīgo elementu novērtējumu, kas iegūti ar Jakobi matricas un mezglu vadītspējas matricas singulāro analīzi, salīdzinājums liecina, ka praktiski vieni un tie paši komponenti un līnijas ir jutīgi pret sprieguma moduļu izmaiņām. Rezultātu atšķirība ir saistīta ar to, ka dažu EES elementu jutīgums ir atkarīgs no shēmas topoloģijas parametriem, bet citu – arī no ekspluatācijas parametriem.

3. JUTĪGO ELEMENTU ATRAŠANĀS VIETU NOTEIKŠANA EES MODELIM

3.1. Jutīgo elementu atrašanās vietu noteikšana EES modelim (1. scenārijs)

Vissvarīgākais EES ievainojamību analīzē ir izpētīt ārējās iedarbības scenārijus, kas izraisa EES avārijas. Ja tīklā ir salīdzinoši maz elementu, šādu scenāriju skaits būs neliels, taču to skaits strauji pieaugs, tīkla shēmas konfigurācijai kļūstot sarežģītākai. Šajā darbā piedāvātā metode ļauj noteikt energosistēmas vājākās daļas, iedarbība uz kurām var izraisīt EES avārijas, atrodot tā sauktos jutīgos punktus (mezglus, līnijas), kas neprasa statistisko testu veikšanu un daudzu ārējās ietekmes scenāriju aplūkošanu. Aprēķinos tiek izmantoti šādi parametri: EES stacionārā režīma parametri (mezglu spriegums, jauda, slodze un ģenerācija, leņķi un moduļi), tīkla parametri (iekšējo un ārējo komunikāciju kopums jaudas pārvadīšanai, līniju pretestība). Lai nodrošinātu darba režīma konverģenci (balansu starp ģenerāciju un patēriņu), aplūkotajā modelī balansa mezgls un reaktīva jauda tika izvēlēti nejauši, kas vairāk atbilst EES modeļu reāliem apstākļiem. Attiecīgo režīmu aprēķins ir aptuvens un neļauj novērtēt aktīvās un reaktīvās jaudas plūsmu ar augstu uzticamības pakāpi.

EES neviendabīgumu analīze paredz izmantot EES elementu vispārināto vērtību matricu un informāciju par perturbāciju vietām, lai meklētu un noteiktu EES vājos punktus. Stacionārajos darba režīmos vispārinātas vērtības tiek izteiktas, izmantojot mezglu vadītspējas matricu un stacionārā režīma vienādojumu Jakobi matricu, kas ir galvenie informācijas avoti par EES jutīgumu un neviendabīgumu stacionārajos režīmos. Jutīgie elementi un to atrašanās vieta tiks noteikti ar EES shēmas un parametru skaitliskajām un analītiskajām izpētes metodēm. Šīs metodes izmantošanas piemērs (izmantojot mezglu vadītspējas matricas un Jakobi matricas) un jutīgo vietu noteikšanas aprēķina process ir parādīts 1. pielikumā. EES stacionāro parametru aprēķināšanas algoritms ir parādīts blokshēmā (3.1. att.).



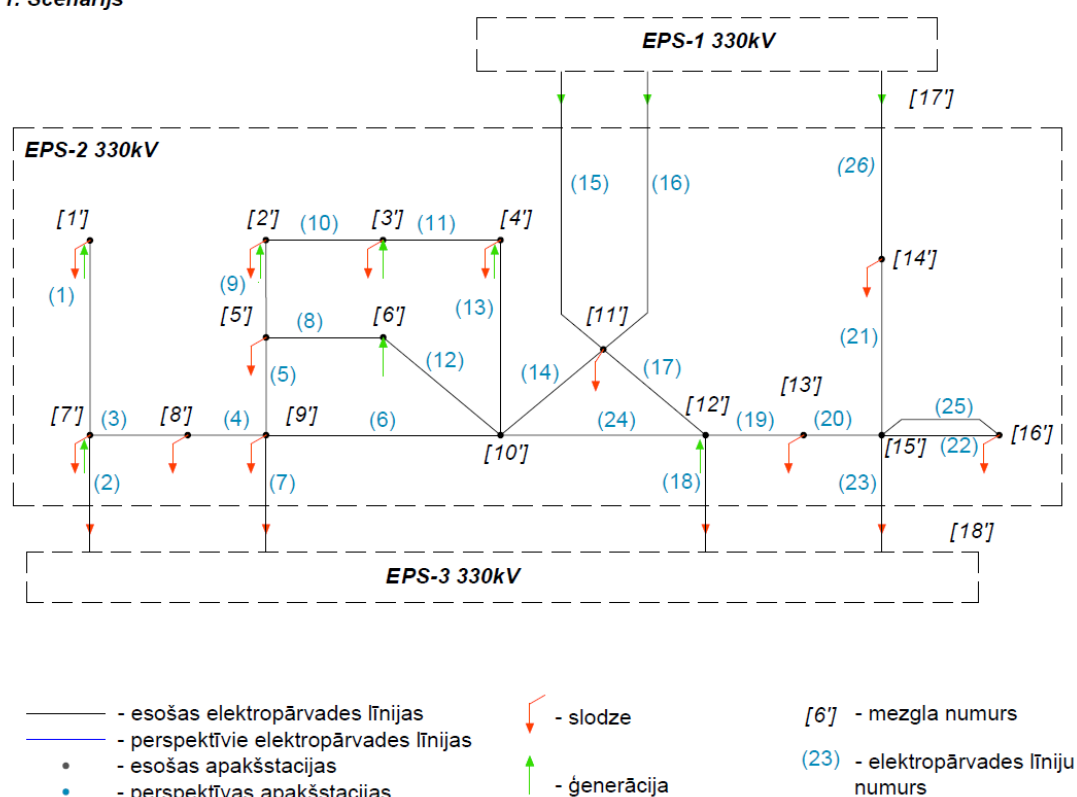
3.1. att. Algoritma shēma EES stacionāro parametru aprēķināšanai.

Šajā darbā tiek analizēti un salīdzināti pieci EES modeļu scenāriji. Šie EES modeļi ir pietuvināti reālās pasaules nosacījumiem un daļēji atspoguļo situāciju Baltijas valstu EES (ņemot vērā attīstības stratēģiju, 1. pielikums), kaut gan tiem ir tikai vispārēja līdzība.

Iegūtie EES ievainojamību lokalizācijas rezultāti ļauj uzbūvēt vienādi stabilu tīklu, tādējādi novēršot bīstamas vai nevēlamas situācijas, kā arī izstrādāt aizsardzības pasākumus, lai minimizētu iespējamo ārējās ietekmes kaitējumu elektroenerģijas sistēmai.

Lai izpētītu izvēlēto pieeju/metodi, tika aplūkots energosistēmas modelis (1. scenārijs). Shēma 3.2. attēlā ietver 18 mezglus un 26 līnijas. Mezgli 1–16 ir elektrostacijas un apakšstacijas. Mezgls 17' pieder pie EES-1, mezgls 18' pieder pie EES-3 [34].

1. Scenārijs



3.2. att. 330 kV EES modelis (1. scenārijs).

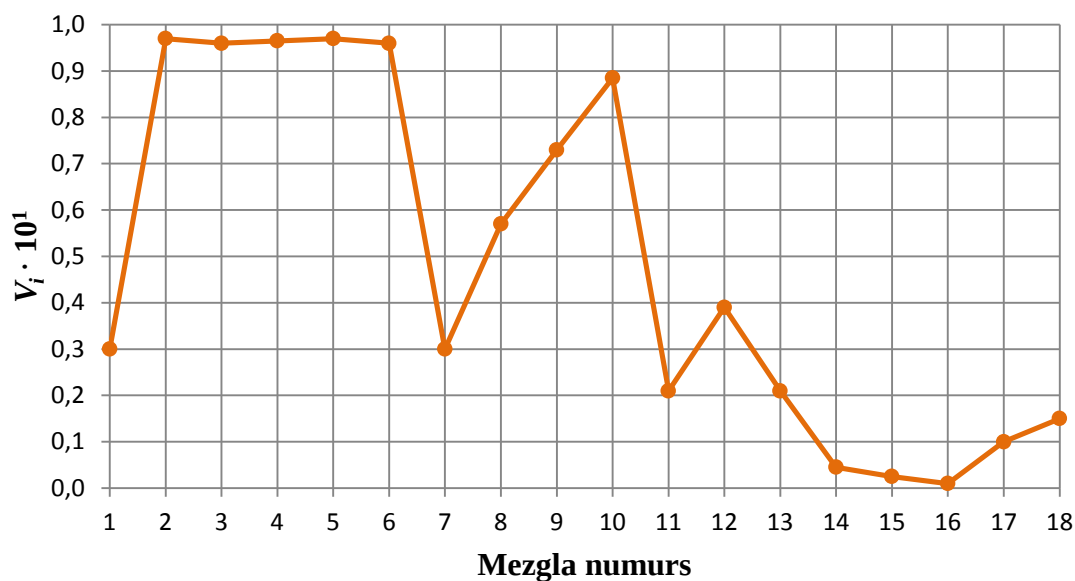
Matemātiskais modelis ietver 330 kV elektropārvades līniju garumus, patērētājus un ģenerāciju (3.1. tabula). Par sākotnējo tiek uzskatīts aplūkotā EES modeļa normāli līdzsvarotais darba režīms. Aprēķināšanai tiek izmantoti šādi parametri: EES stacionārā režīma parametri (mezglu spriegums, jauda, slodze un ģenerācija, leņķi un sprieguma moduļi), tīkla parametri (iekšējo un ārējo komunikāciju kopums jaudas pārvadei, līniju pretestība).

Slodzes un ģenerācijas mezgli (1. scenārijam)

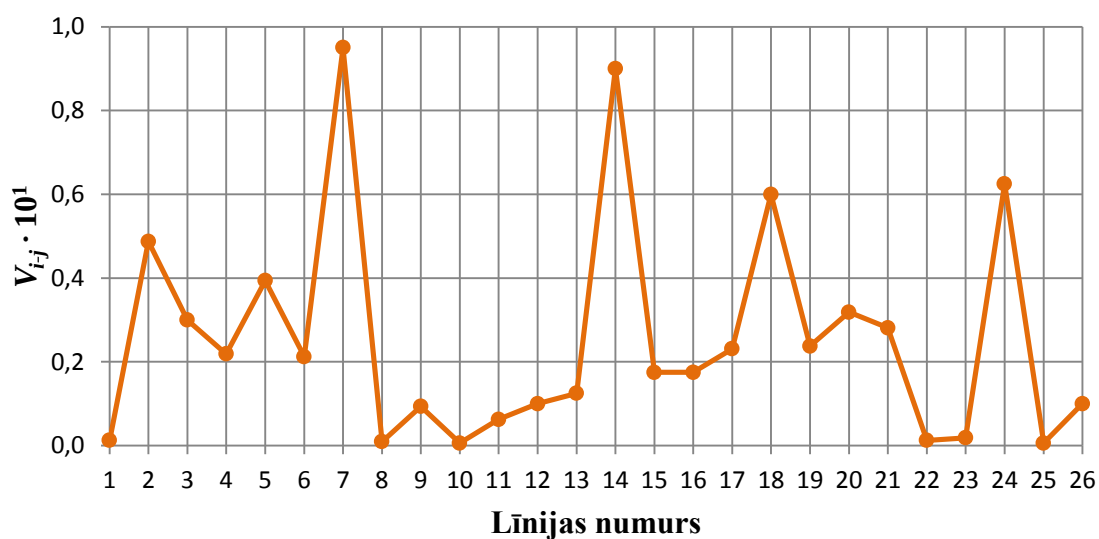
Mezгла Nr.	Slodze <i>P</i> , MW	Ģenerācija <i>P</i> , MW
[1']	34	4
[2']	143	13
[3']	143	46
[4']	143	270
[5']	143	0
[6']	0	96
[7']	59	8
[8']	17	0
[9']	42	0
[10']	0	0
[11']	17	0
[12']	0	192
[13']	17	0
[14']	25	0
[15']	0	0
[16']	59	0
[17']	0	600
[18']	387	0
Balanss:		1229 1229

Aplūkotajā tīklā, kas sastāv no 18 mezgliem un 26 līnijām (3.2. att.), iespējamo iedarbības scenāriju skaits, atslēdzot vienu no līnijām vai divu līdz piecu līniju kopu, ir 83 681 [34].

Analizējot Jakobi matricu un mezglu vadītspējas matricu 3.2. attēlā redzamajai shēmai, tika noskaidrots, ka mezgli 2', 3', 4', 5', 6', 10' (3.3. a att.) ir jutīgi pēc labā singulārā vektora V_1 , kas atbilst Jakobi matricas minimālajai singulārajai vērtībai $\sigma_{\min}$, maksimālajiem komponentiem. Līnijas 2, 7, 14, 18, 24 (3.3. b att.) ir jutīgas pret sprieguma zudumu.



a)

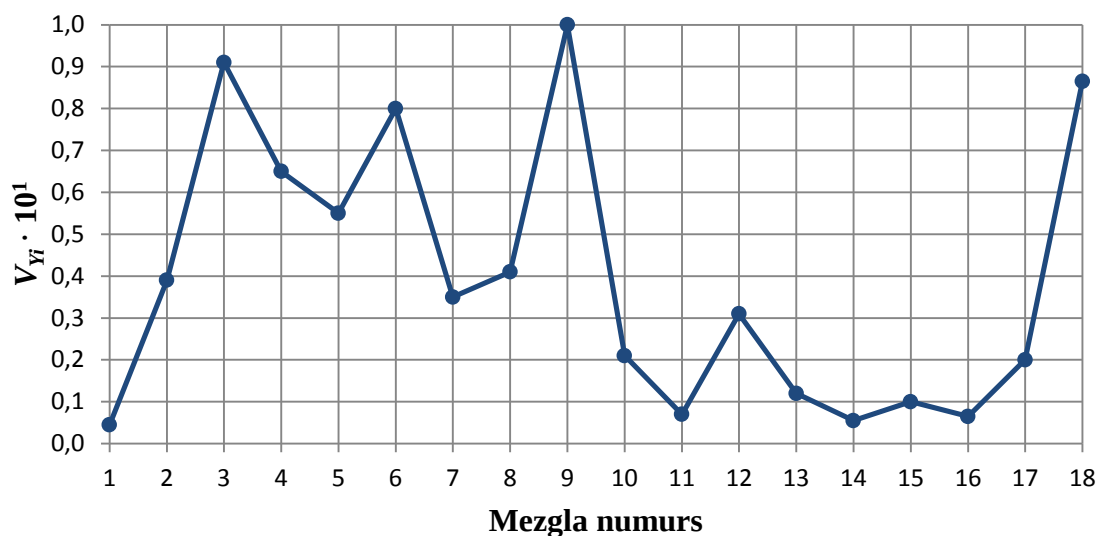


b)

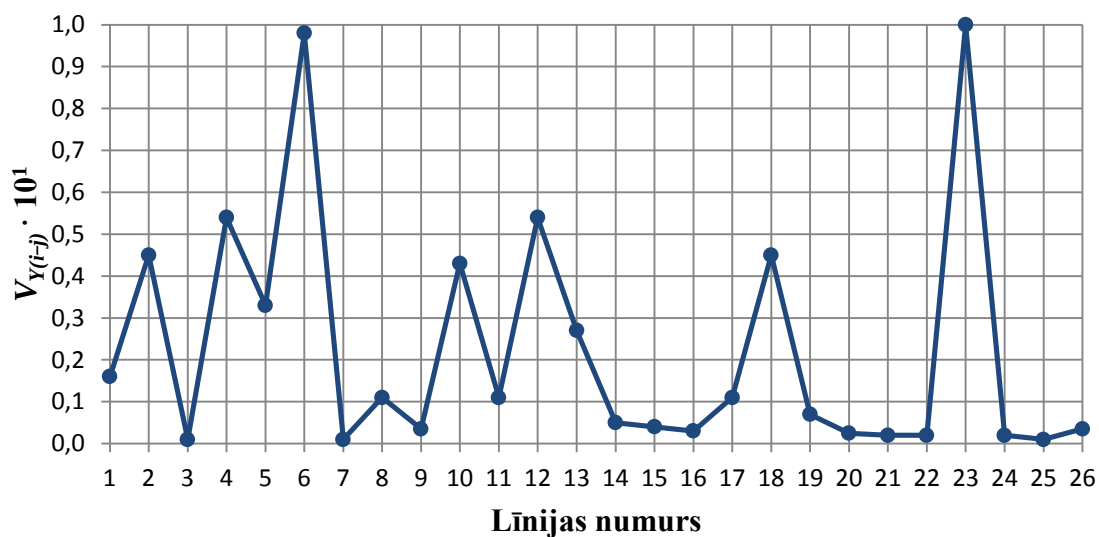
3.3. att. Aplūkotās shēmas mezglu un līniju jutīguma aprēķināšanas rezultāti, kas iegūti, izmantojot Jakobi matricas singulāro analīzi: a) mezglu jutīgums pret spriegumu, b) līniju jutīgums pret sprieguma zudumu.

Matricas Y pirmā labā singulārā vektora V_1 komponentu mezgli un līnijas ar maksimālajām aprēķinātajām vērtībām norāda, ka mezgli 3', 4', 5', 6', 9', 18' ir jutīgi pret spriegumu (3.4. a att.).

Novērtējot atšķirības, kas atbilst mezgliem uz matricas Y pirmā labā singulārā vektora komponentu līniju galiem, var noteikt pret sprieguma zudumu jutīgās līnijas: 2, 4, 6, 10, 12, 18, 23 (3.4. b att.).



a)



b)

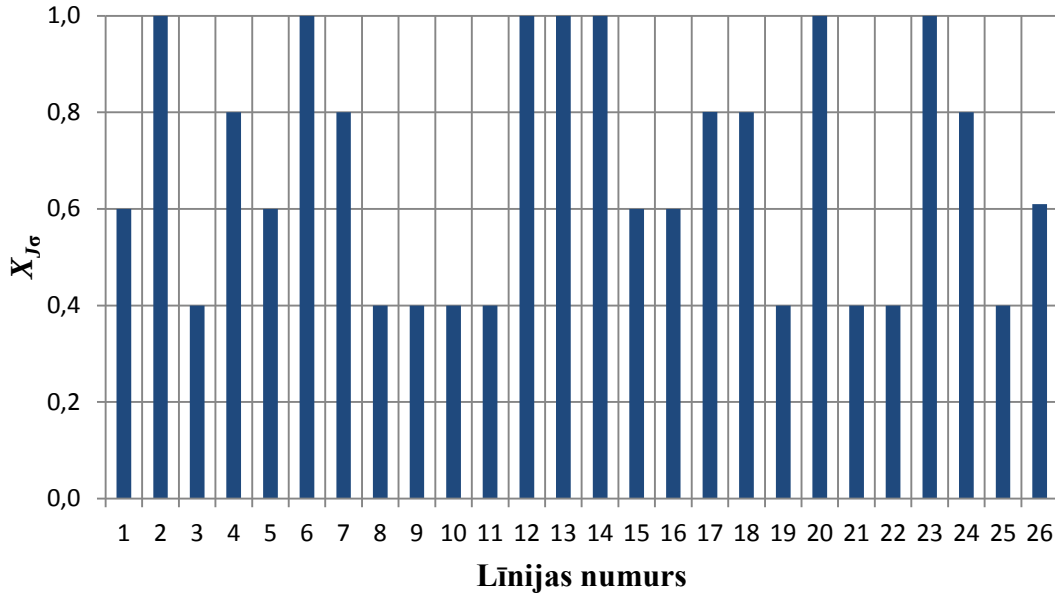
3.4. att. Aplūkotās shēmas mezglu un līniju jutīguma aprēķināšanas rezultāti, kas iegūti, izmantojot mezglu vadītspējas matricas Y singulāro analīzi: a) mezglu jutīgums pret spriegumu, b) līniju jutīgums pret sprieguma zudumu.

Salīdzinot jutīguma novērtējuma rezultātus, kas iegūti ar Jakobi matricas (3.3. att.) un mezglu vadītspējas matricas (3.4. att.) singulāro analīzi, kļūst redzams, ka praktiski visi un tie paši komponenti un līnijas ir jutīgi pret sprieguma moduļu izmaiņām. Atšķirība rezultātos ir izskaidrojama ar to, ka dažu EES elementu jutīgums ir atkarīgs no shēmas topoloģiskajiem parametriem, bet citu – arī no ekspluatācijas parametriem. [34]

Izmantojot izteiksmi

$$\chi_{J\sigma} = \frac{\partial \sigma_1}{\partial y_{ij}} = w_{18}^T \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \delta \partial y_{ij}} \right) v_{18} + w_{18}^T \left(\frac{\partial^2 P}{\partial U \partial y_{ij}} \right) v_{1U} + w_{1U}^T \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial \delta \partial y_{ij}} \right) v_{18} + w_{1U}^T \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial U \partial y_{ij}} \right) v_{1U} \quad (3.1.)$$

aplūkotajai shēmai, līnijas 2, 6, 12, 13, 14, 20, 23 tika identificētas kā vājas (3.5. att.).



3.5. att. Shēmas līniju ranžēšana pēc vājuma indikatora $\chi_{J\sigma}$, kas iegūts, izmantojot Jakobi matricas singulāro analīzi.

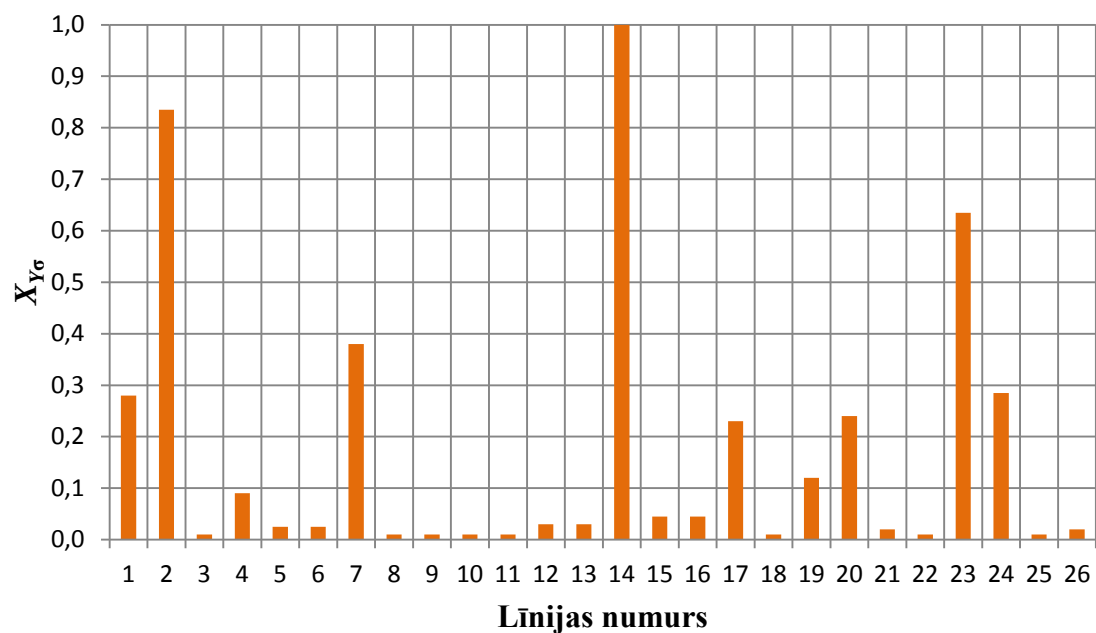
3.6. attēlā parādīts līniju vājuma indikatora $\chi_{Y\sigma}$ aprēķins, izmantojot 3.2. vienādojumu.

$$\chi_{Y\sigma} = (w_{Yp1} - w_{Yq1})(v_{Yp1} - v_{q1}). \quad (3.2.)$$

Iegūto rezultātu analīze parāda, ka līnijas 2, 7, 14, 23, kuru komponenti ir maksimāli, ir vājas. Kā atceramies, līnijas 2, 4, 6, 7, 10, 12, 14, 18, 23, 24 tika iepriekš identificētas kā jutīgas (3.3. b un 3.4. b att.), un līnijas 2, 6, 12, 13, 14, 20, 23 – kā vājas pēc indikatora $\chi_{J\sigma}$ (3.5. att.). Atšķirība vājo zaru ranžēšanas rezultātos ir izskaidrojama ar to, ka matricas singulārā analīze neņem vērā ekspluatācijas parametrus, vienīgi konstatē EES struktūras nevienādīgumu.

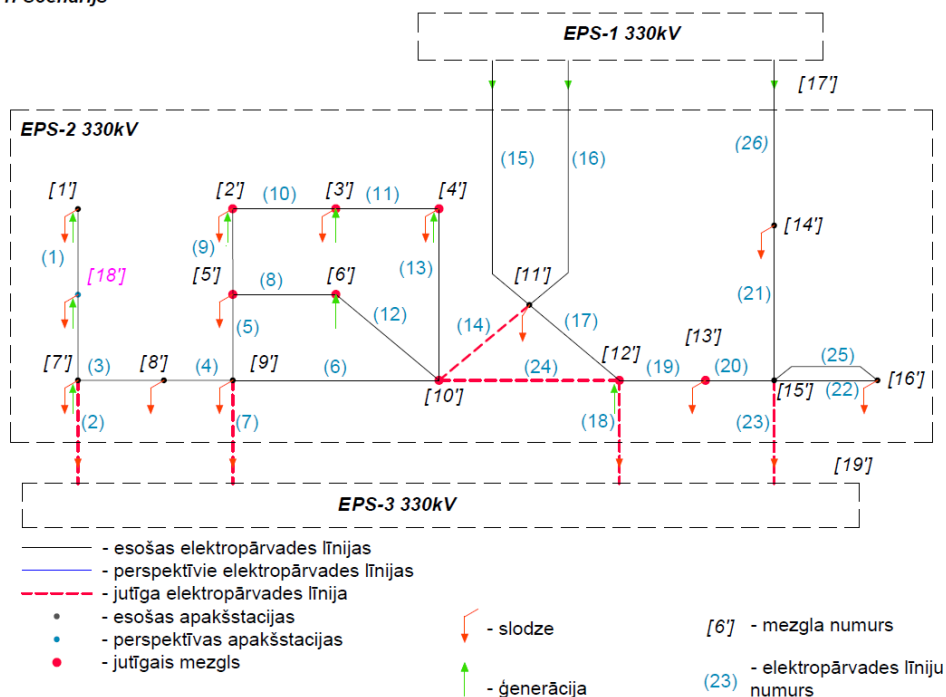
Apkopojot informāciju par aplūkotās shēmas jutīgajiem elementiem, var apgalvot, ka mezgli 3', 4', 5', 6' un līnijas 2, 6, 7, 12, 14, 18, 23 ir visvairāk jutīgas pret spriegumu. Situācijas turpmākas analīzes nolūkos jutīgie mezgli un līnijas energosistēmas modeļa shēmās 1. scenārijā tiks izceltas ar sarkano krāsu (3.7. att.).

Tādējādi atrasto vājo vietu kopums nosaka no EES ievainojamības viedokļa bīstamāko perturbāciju scenāriju kopu. Šādi scenāriju, kad viena līnija vai divu līdz piecu līniju kopa tiek atvienota no sistēmas, ir 1585, kas ir 50 reizes mazāk, salīdzinot ar iedarbības scenārijiem, kas konstruēti, neņemot vērā informāciju par vājajiem punktiem.



3.6. att. Shēmas zaru ranžēšana pēc shēmas zaru vājuma indikatora $\chi_{Y\sigma}$, kas iegūts, izmantojot mezglu vadītspējas matricas singulāro analīzi.

1. Scenārijs



3.7. att. Aplūkotā 330 kV shēma ar identificētiem vājiem mezgliem un līnijām (1. scenārijs).

3.2. Jūtīguma aprēķināšana EES modelim 5. scenārijā

Pašreizējo posmu pasaules enerģētikas nozares attīstībā raksturo spēcīgu teritoriāli vienotu enerģijas sistēmu izveide. Brīvā tirgus apstākļos dažādu valstu enerģētikas tirgi pakāpeniski apvienojas: mainās tīklu konfigurācijas, tiek veidoti jauni savienojumi, kā arī rodas jauni enerģētikas uzņēmumi un arodbiedrības. 5. scenārijā tiek aplūkota apvienota EES, kur EES-1 un EES-3 ir pievienoti iepriekš aplūkotajai EES-2 un tāpēc ietekmē cita citu. Šajā darbā aplūkoti EES modeļi apstākļos, kas ir tuvu reālās pasaules apstākļiem, un šie modeļi zināmā mērā līdzinās esošajām Baltijas valstu EES.

5. scenārija izejas dati redzami 3.2. tabulā. Shēma 3.8. attēlā ietver 51 mezglu un 79 līnijas.

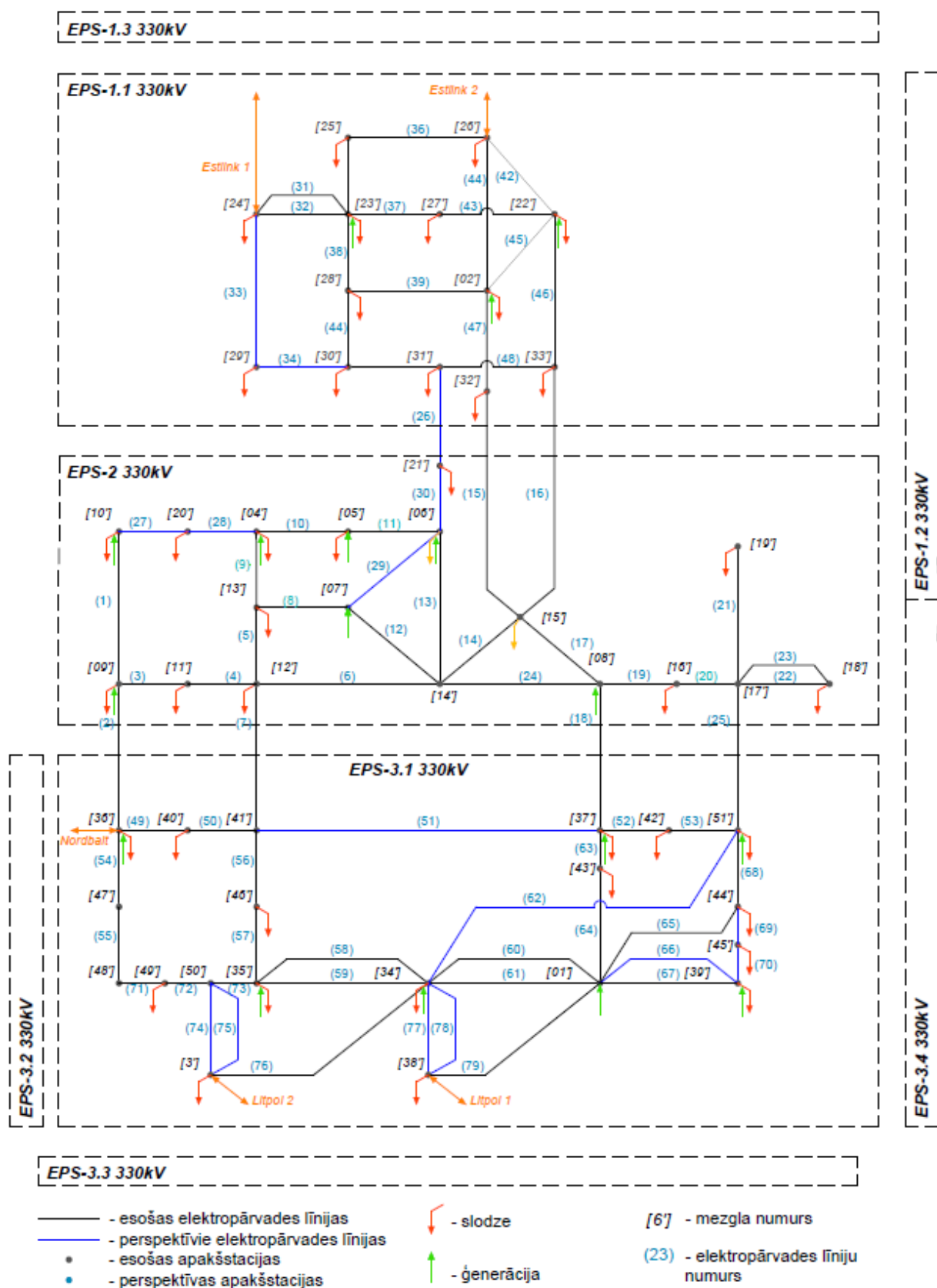
3.2. tabula

EES modeļa 5. scenārija izejas dati

Mezglis Nr.	EES	Slodze <i>P</i> , MW	Ģenerācija <i>P</i> , MW
[1']	EES-3.1	0	130
[2']	EES-1.1	55	1218
[3']	EES-3.1	39	148
[4']	EES-2	172	22
[5']		172	63
[6']		172	387
[7']		0	177
[8']		9	393
[9']		76	9
[10']		39	26
[11']		13	0
[12']		62	0
[13']		172	0
[14']		0	0
[15']		25	0
[16']		25	0
[17']		0	0
[18']		93	0
[19']		34	0
[20']		1	0
[21']		0	0
[22']	EES-1.1	55	419
[23']		290	0
[24']		290	148
[25']		31	0

EES modeļa 5. scenārija izejas dati

Mezglis Nr.	EES	Slodze <i>P</i> , MW	Ģenerācija <i>P</i> , MW
[26']	EES-1.1	2	148
[27']		290	0
[28']		16	0
[29']		3	0
[30']		8	0
[31']		4	0
[32']		1	0
[33']		181	0
[34']		0	112
[35']	EES-3.1	315	27
[36']		171	201
[37']		103	0
[38']		59	148
[39']		197	45
[40']		32	0
[41']		0	0
[42']		31	0
[43']		37	0
[44']		197	0
[45']		197	0
[46']		117	0
[47']		0	0
[48']		0	0
[49']		14	0
[50']		0	0
[51']		21	0



3.8. att. Aplūkots 330 kV EES modelis (5. scenārijs).

Aprēķinos tika izmantoti šādi parametri: EES stacionārā režīma parametri (mezglu spriegums, jauda, slodze un ģenerācija, leņķi un sprieguma moduļi), tīkla parametri (iekšējo un ārējo komunikāciju kopums jaudas pārvadīšanai, līniju pretestība). Par sākotnējo tiek uzskatīts aplūkotā EES modeļa normāli līdzsvarotais darba režīms (skat. 3.8. att.).

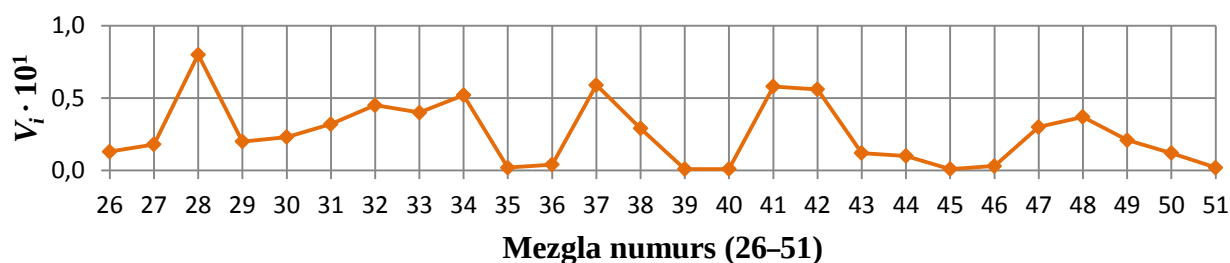
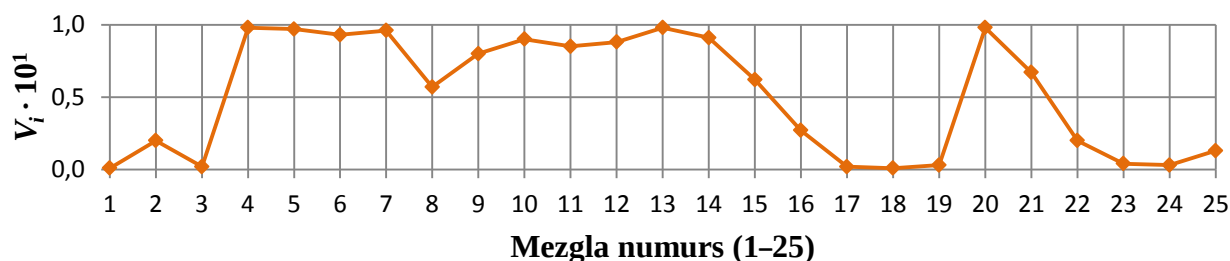
3.9. attēlā parādīti aprēķinu rezultāti, kas iegūti ar Jakobi matricas un mezglu vadītspējas matricas singulāro analīzi 5. scenārijā. Tātad labā singulārā vektora maksimālie komponenti, kas atbilst Jakobi matricas minimālajai singulārajai vērtībai, ir mezgli 4', 5', 6', 7', 8', 9', 10', 11', 12', 13', 14', 15', 20', 21', 36', 40', 41' (3.9. a att.). Līnijas 2, 7, 14, 18, 19, 20, 24, 30, 46, 47, 51, 57 ir jutīgas pret sprieguma zudumu (3.9. b att.).

Mezgli un līnijas ar maksimālām aprēķinātām matricas Y labā singulārā vektora V_l komponentu vērtībām ir jutīgi pret sprieguma zudumu. Mezgli 8', 9', 15', 16', 30', 33', 36', 37', 48', 49', 51' (3.10. a att.) ir jutīgi pret sprieguma zudumu.

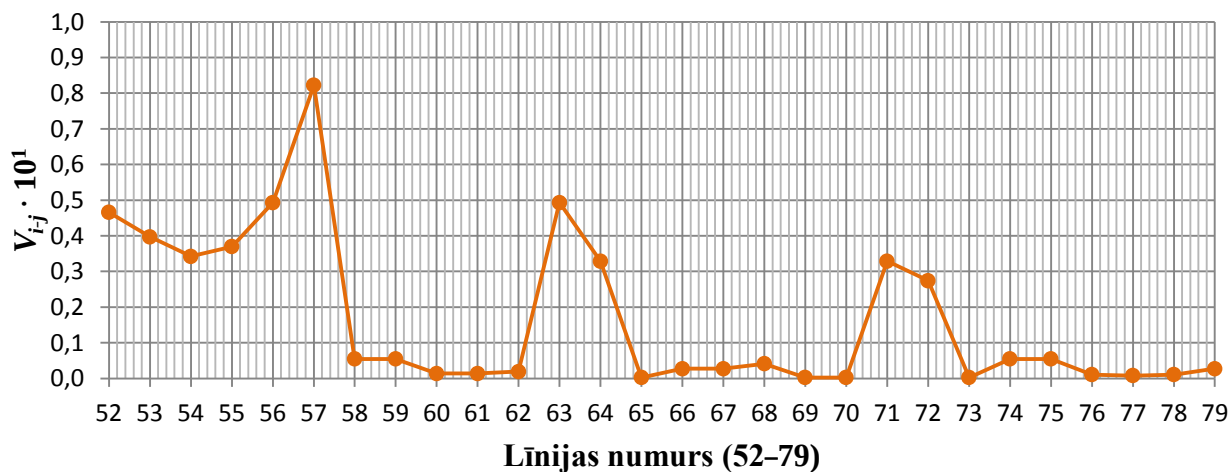
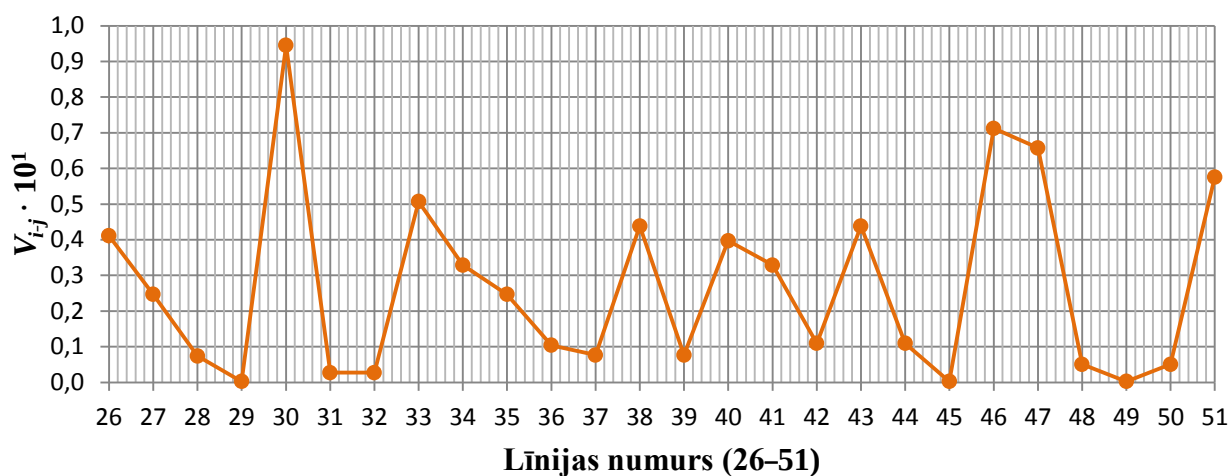
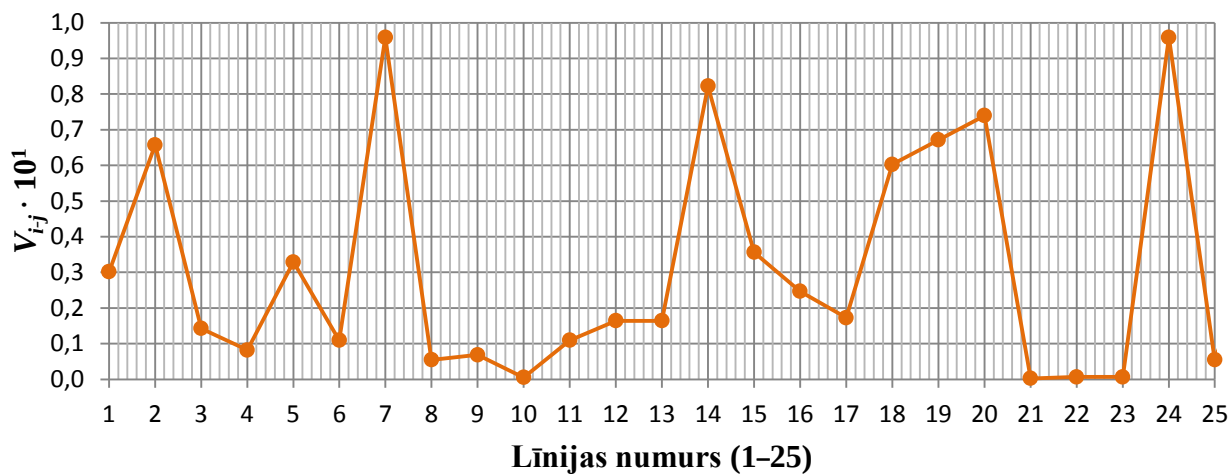
Novērtējot atšķirību starp mezgliem, kas atrodas uz matricas pirmā labā singulārā vektora komponentu līniju galiem, var noteikt pret sprieguma zudumu jutīgas līnijas. Tās ir: 14, 20, 24, 46, 48, 49, 54, 63 (3.10. b att.).

Kā var redzēt 3.9. un 3.10. att., ja salīdzinām jutīguma novērtējumus, kas iegūti ar divām dažādām metodēm, t. i., Jakobi matricas (3.9. att.) un mezglu vadītspējas matricas (3.10. att.) singulāro analīzi, izrādās, ka praktiski vieni un tie paši mezgli un līnijas ir jutīgi. Iegūto rezultātu analīze rāda, ka līnijas 14, 20, 24, 46, kuru komponenti ir maksimāli, ir vājas.

Atšķirību rezultātos, kas iegūti, izmantojot abas metodes, var izskaidrot ar to, ka dažu EES elementu jutīgums ir atkarīgs tikai no tīkla topoloģiskajiem parametriem, bet citu – arī no darba režīma parametriem.



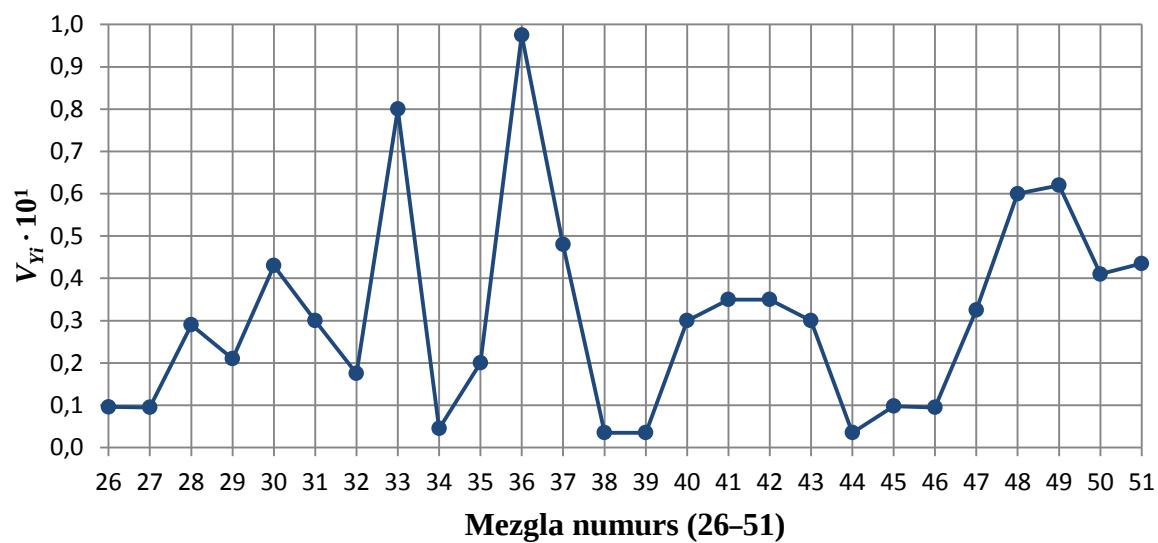
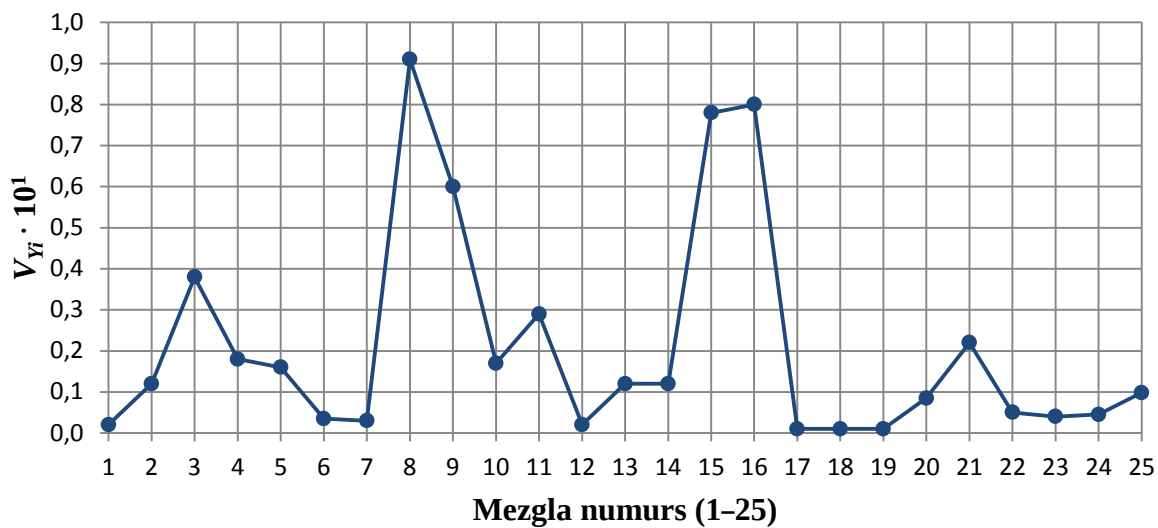
a)



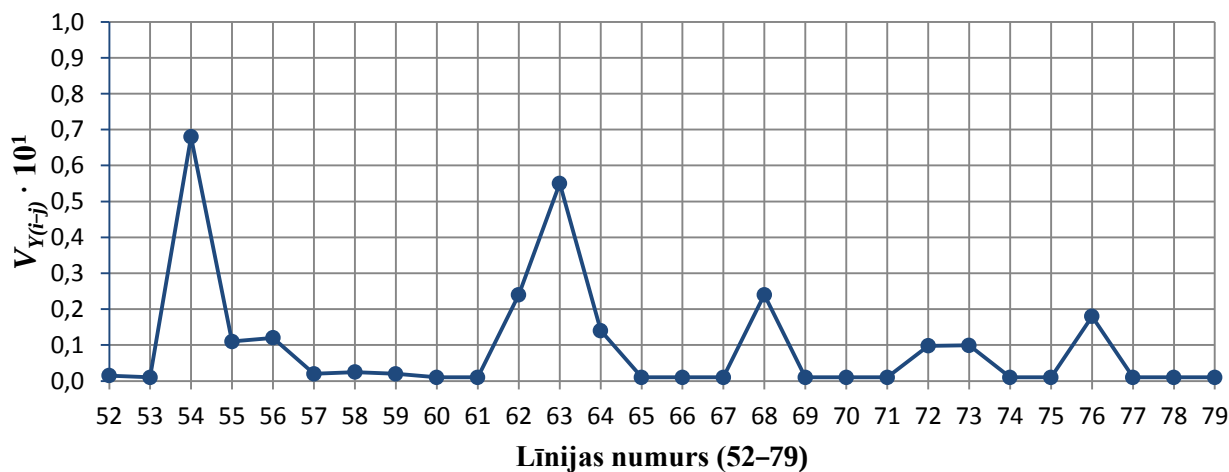
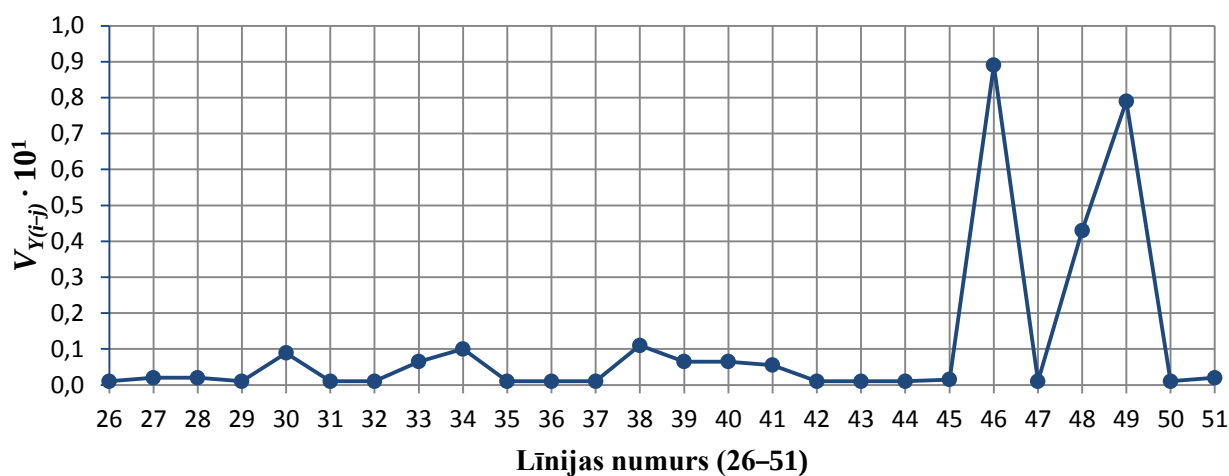
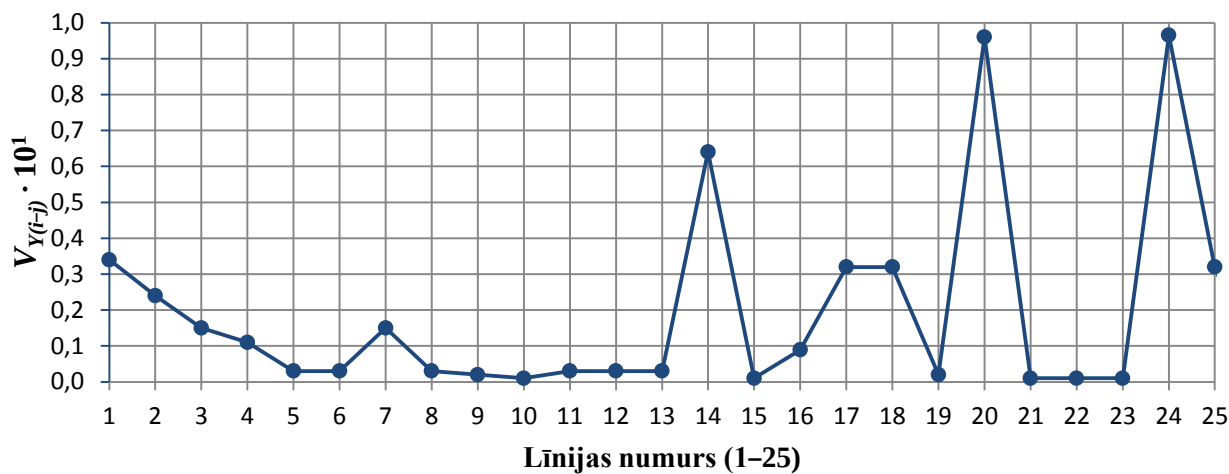
b)

3.9. att. Aplūkotā tīkla shēmas mezglu un līniju jutīguma aprēķināšanas rezultāti (5. scenārijam), kas iegūts, izmantojot Jakobi matricas singulāro analīzi: a) mezglu jutīgums pret spriegumu (1–25 un 26–51), b) līniju jutīgums pret sprieguma zudumu.

Izmantojot līniju vājuma indikatoru $\chi_{J\sigma}$ (kas iegūts, izmantojot Jakobi matricas singulāro analīzi), tika noskaidrots, ka 3.8. att. redzamās shēmas līnijas (5. scenārijs) 20, 21, 58, 59, 60, 61, 64, 76, 79 ir vājas (3.11. att.).



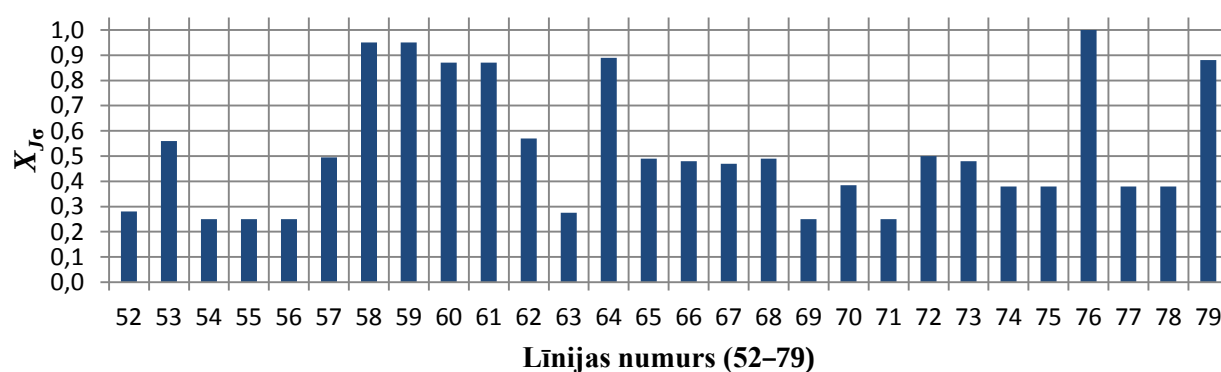
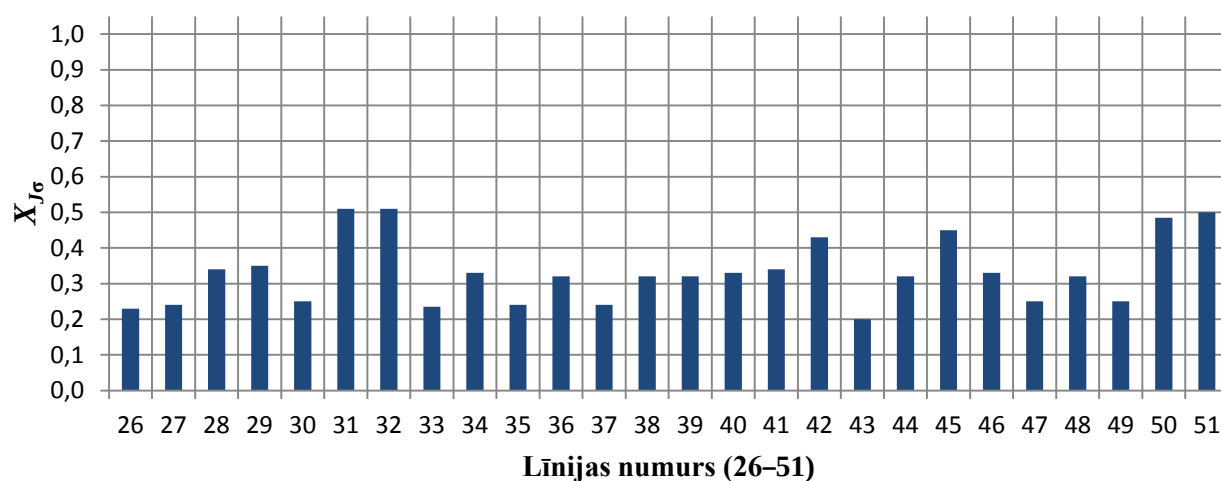
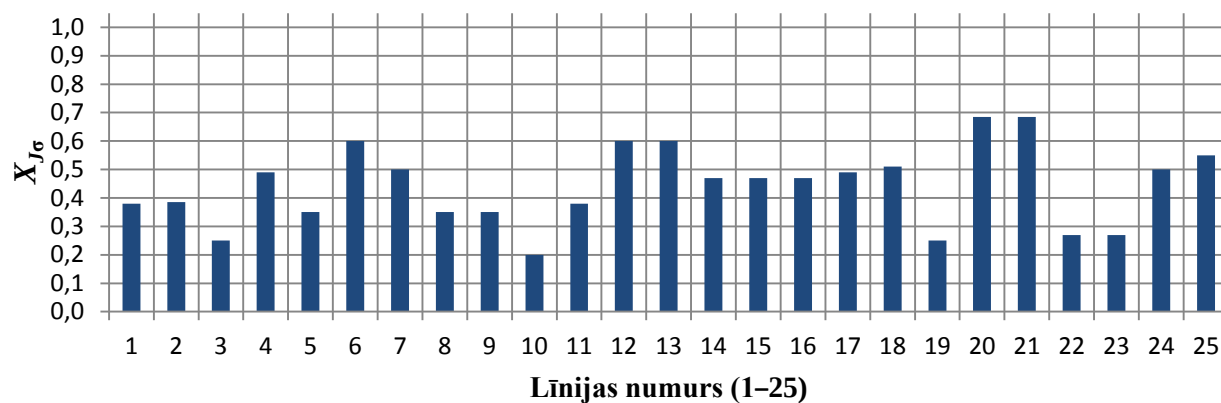
a)



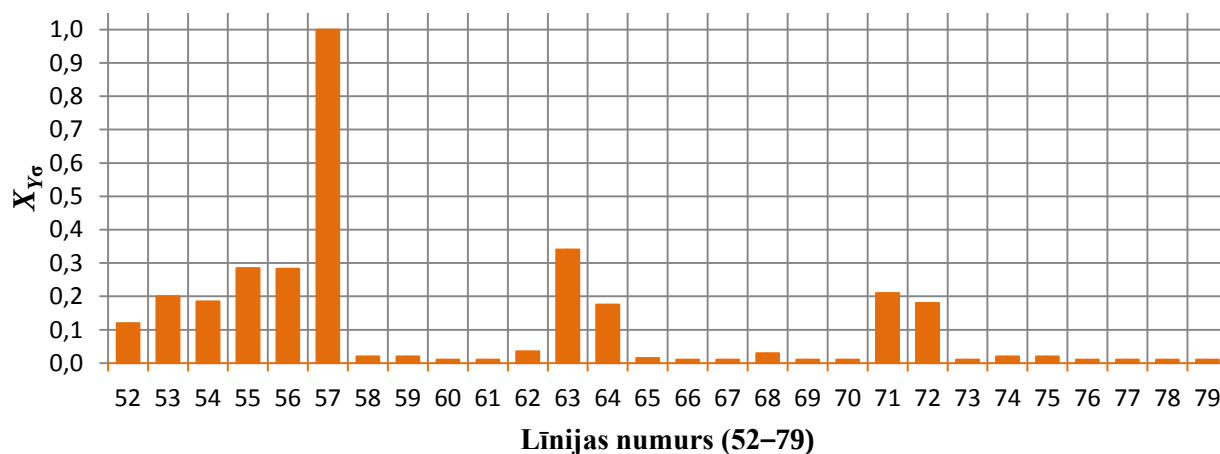
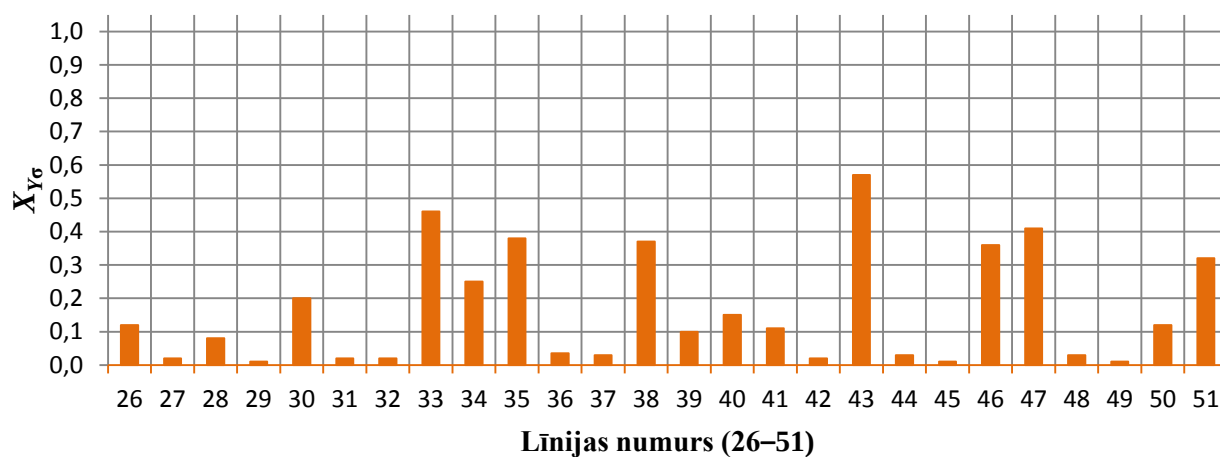
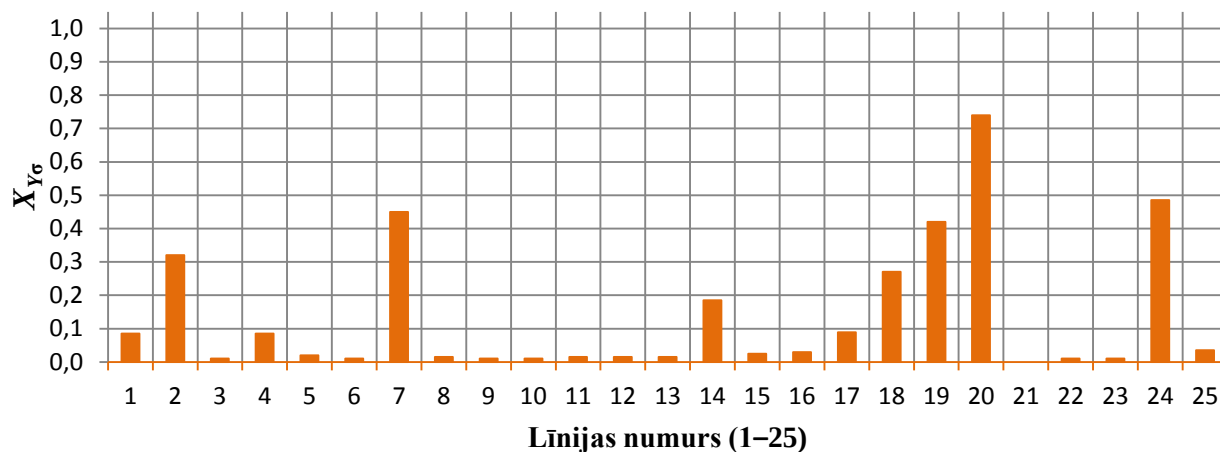
b)

3.10. att. Aplūkotās tīkla shēmas mezglu un līniju jutīguma aprēķināšanas rezultāti (5. scenārijs), kas iegūts, izmantojot mezglu vadītspējas matricas Y singulāro analīzi: a) mezglu jutīgums pret spriegumu, b) līniju jutīgums pret sprieguma zudumu.

3.12. attēlā parādīts līniju vājuma indikatora $\chi_{J\sigma}$ aprēķins, kas balstās uz mezglu vadītspējas matricas singulāro analīzi. Iegūto rezultātu analīze parāda, ka līnijas 7, 19, 20, 24, 33, 35, 43, 47, 57, kuru komponenti ir maksimāli, ir vājas.



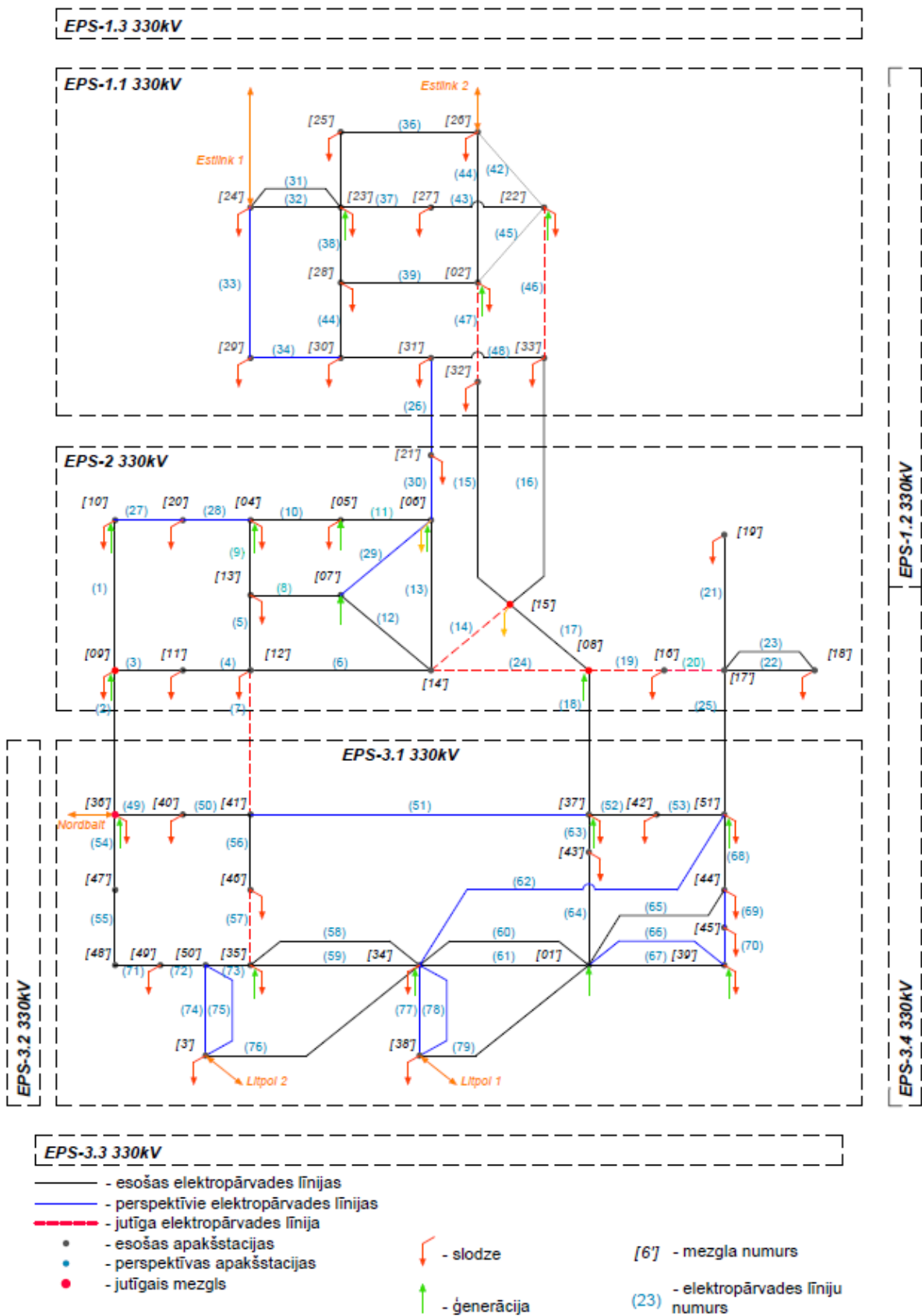
3.11. att. Shēmas līniju ranžēšana (5. scenārijs) pēc shēmas līniju vājuma indikatora $\chi_{J\sigma}$, kas iegūts, izmantojot Jakobi matricas singulāro analīzi.



3.12. att. Shēmas līniju ranžēšana (5. scenārijā) pēc shēmas līniju vājuma indikatora χ_{Y6} , kas iegūts, izmantojot mezglu vadītspējas matricu.

Apkopojot informāciju par aplūkotās shēmas jutīgajiem punktiem, var apgalvot, ka visvairāk jutīgi pret sprieguma zudumiem ir mezgli 8', 9', 15', 36' un līnijas 7, 14, 19, 20, 24, 46, 47, 57.

Situācijas turpmākas analīzes nolūkos jutīgie mezgli un līnijas energosistēmas modeļa shēmās tiks atzīmēti ar sarkanu krāsu (3.13. att.).



3.13. att. Aplūkotā 330 kV shēma ar identificētiem vājiem mezgliem un līnijām (5. scenārijs).

SECINĀJUMI

1. Vairāku pieeju trūkums ir nepieciešamība veikt apjomīgus aprēķinus. Vienlaikus galvenās grūtības ir saistītas ne tikai ar situācijas modelēšanu un aprēķinu veikšanu, bet arī ar iegūto rezultātu analīzi un sistematizāciju. Šī darba mērķis ir piedāvāt metodi, kas ļauj noteikt pret ārējām ietekmēm visjutīgākos tīkla parametrus, kā arī to mijiedarbību ar EES parametriem. Šī metode neprasa veikt statistiskos testus un aplūkot lielu scenāriju skaitu.
2. Lai noteiktu jutīgas vietas, izmantojot Jakobi matricu un mezglu vadītspējas matricu, jāveic mazāks darbību skaits, savukārt jutīguma analīze normālos režīmos prasa mazāk resursu. Lai noteiktu iespējamās stabilitātes problēmas, ir nepieciešams minimāls datu kopums. Parasti šos datus sniedz aplūkotās sistēmas modelis. Jebkuru energosistēmu var attēlot kā modeli, kas ietver vairākus ģeneratorus (spēkstacijas) un slodzes (jaudas sadales centrus), kas savienoti ar elektropārvades līniju tīklu. Tādējādi tīkla modelis ietver mezglus, līnijas, ģeneratorus un slodzes.
3. Piedāvātā pieeja ļauj veikt energosistēmas analīzi: noteikt sistēmas vājas vietas un veikt turpmākos pasākumus, lai nodrošinātu darba režīma stabilitāti.
4. EES modeļa scenāriju aprēķināšana dod iespēju redzēt izmaiņas EES jutīgajos elementos. Aplūkojot vairākus EES modeļa attīstības scenārijus, kļūst redzams, ka attiecīgo vietu jutīgums ir samazinājies. Tādējādi rodas iespēja palielināt tranzītplūsmu, integrēt jaunas spēkstacijas, kā arī paaugstināt EES stabilitāti kopumā.
5. Saskaņā ar plānotajām lielajām izmaiņām EES modeļa konfigurācijā, kas saistītas ar elektropārvades līniju modernizāciju un jauniem savienojumiem, kā arī jaunu lielu vēja parku būvniecību, nepieciešams novērtēt energosistēmas modeļa statisko stabilitāti, ņemot par pamatu metodi, kas ļauj noteikt pret ārējām ietekmēm jutīgākos tīkla parametrus, ņemot vērā nepieciešamību identificēt šādus elektriskā tīkla mezglus, kuru paaugstinātais jutīgums veicina būtisku traucējumu rašanos.
6. Jāatzīmē, ka jebkurā energosistēmā ir vājas vietas, taču to jutīgumu ir iespējams samazināt. Piemēram, vājo vietu atrašana un ievainojamības novērtēšana projektēšanas posmā ļauj paredzēt turpmākos pasākumus, lai paaugstinātu EES statisko stabilitāti (šajā gadījumā būs nepieciešams detalizētāks darbs ar vājajiem mezgliem un līnijām).
7. Analizējot iegūtos rezultātus, ir iespējams novērot šādu likumsakarību: jo vairāk ir elektrisko pārvades līniju starp elektroenerģijas sistēmas mezgliem, jo mazāk jutīgu elementu ir EES mezglos.
8. Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem shēmas modelim 5. scenārijā, visjutīgākās vietas pārsvarā atrodas EES centrā (EES-2). Tādējādi energosistēma EES-2 kļūst par ievainojamāko sektoru no EES modeļa stabilitātes viedokļa, ko apstiprina modelēšanas rezultāti, kas iegūti mezglu un līniju aprēķināšanas gaitā. Tas nozīmē, ka EES-2 ir nepieciešami sprieguma un frekvences regulatori, lai turpmāk varētu paaugstināt EES statisko stabilitāti kopumā.

9. Aprēķinos tika izmantoti šādi parametri: EES stacionārā režīma parametri (mezglu spriegums, jauda, slodze un ģenerācija, leņķi un sprieguma moduļi), tīkla parametri (iekšējo un ārējo komunikāciju kopums jaudas pārvadīšanai, līniju pretestība).

Lai nodrošinātu darba režīma konverģenci (balansu starp ģenerāciju un patēriņu), aplūkotajā modelī balansa un reaktīvas jaudas mezgli tika izvēlēti nejauši saskaņā ar aplūkoto modeli, kas vairāk atbilst EES modeļu reāliem apstākļiem. Atbilstošo režīmu aprēķins ir aptuvens un neļauj novērtēt aktīvās un reaktīvās jaudas plūsmu ar augstu uzticamības pakāpi.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] Ordinance of the Cabinet of Ministers No.129 Energy Development guidelines 2016–2020 (Latvian).
- [2] <http://www.inforse.org/europe/VisionLA.htm>.
- [3] Zicmane, I., Berzina, K., Sobolevskis, A., Kovalenko, S. Evaluation of Latvian Electrical Power System Static Stability according the New Development Strategy until 2025, Journal Energy.
- [4] Идельчик В.к. К вопросу о влиянии погрешностей исходных данных на результат расчета стационарного режима энергосистем. Энергетика и транспорт. 1968, pp. 9–15.
- [5] Sobolevskis A., Zicmane I., Murach V. “Vulnerability assessment of electric power system for the case of Latvian EES”, 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, Riga, 2015.
- [6] Воропай, Н. И. Анализ механизмов развития системных аварий в ЭЭС / Н. И. Воропай, Д. Н. Ефимов, В. И. Решетов // Электричество. 2008. № 10. С. 12–24.
- [7] Wasley, R. G. Identification and ranking of critical contingencies in dependent variable scale / R. G. Wasley, M. Danesdoost // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. 1983. Vol. 102, No. 4, pp. 881–892.
- [8] Анализ неоднородностей электроэнергетических систем/О. Н. Войтов [и др.]. – Новосибирск: Наука; Сиб. отд-ние РАН, 1999. – 256 с.
- [9] Гамм, А. 3. Сенсоры и слабые места в электроэнергетических системах / А. 3. Гамм, И. И. Голуб. – Иркутск: Наука; Сиб. отд-ние РАН, 1996. 99 с.
- [10] Elektroenerģijas pārvades sistēmas attīstības plāns, AST, Rīga. 2016, 21–30. lpp.
- [11] Ordinance of the Cabinet of Ministers No.129 Energy Development guidelines 2016–2020 (Latvian).
- [12] <http://www.litgrid.eu/index.php/news-events-/news/baltic-tsos-launch-a-common-baltic-balancing-market-from-2018/3760>.
- [13] <https://cyberleninka.ru/article/n/matematiceskaya-model-energositemy-kaliningradskoy-oblasti-i-otsenka-na-ney-elementov-glavnoy-shemy-tes-pregolskaya>.
- [14] Criteria and Countermeasures for Voltage Collapse. CIGRE TF 38.02.12. Final report // Electra. 1991. No. 124, pp. 118–132.
- [15] Approaches to the Security Analysis of Power Systems: Defence Strategies Against Malicious Threats / E. Bompard [et al.] // Office for Official Publications of the European Communities. 2007. 51 p.
- [16] Latvijas tīkla kodekss: <http://likumi.lv/doc.php?id=257943>.
- [17] Kundur P., Paserba J., Ajjarapu 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.
- [18] Nepomnyaschiy, V., Gerhards, J., Mahņitko, A., Lomane, T. Reliability of Latvian Power System's 330 kV Substations. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2014, Vol. 51, Iss. 3, pp. 15–23. ISSN 0868-8257. Available from: doi:10.2478/lpts-2014-0016.
- [19] Utans, A., Sauhats, A., Bieļa-Dailidoviča, E. Wide-Area Measurements-Based Out-Of-Step Protection System. In 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTU-CON): Proceedings, Latvia, Riga, 14–14 October, 2015. Riga: Riga Technical University, 2015, pp. 11–15.
- [20] Sauhats, A., Utans, A., Svalova, I., Svalovs, A., Antonovs, D., Bochkarijova, G. Two-Terminal Out-of-Step Protection for Multi-Machine Grids Using Synchronised Measurements. PowerTech, Netherlands, Eindhoven, 2015.
- [21] Sauhats, A., Utans, A., Antonovs, D., Svalovs, A. Multi-Terminal Out-of-Step Protection System. In 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, 2016.
- [22] Sauhats, A., Utans, A., Antonovs, D., and Svalovs, A. Angle Control-Based Multi-Terminal Out-of-Step Protection System. Energies, Vol. 10, 2017, 308 p.
- [23] “Electromechanical transition processes in electric systems” under edition of I. Zicmane. Published/Created Riga: RTU Izd., 2012. – 402 p.

- [24] B. Papkovs, I. Zicmane "Electromagnetic transition processes in electric systems", Published/Created Riga: RTU Izd., 2007. 306 p. Library of Congress.
- [25] Ersen Akdeniz, Mustafa Bagriyanik "A knowledge based decision support algorithm for power transmission system vulnerability impact reduction" *Electrical Power and Energy Systems* 78 (2016), pp. 436–444, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.041>.
- [26] Nima Amjadaya, Masoud Esmailib. "Improving voltage security assessment and ranking vulnerable buses with consideration of power system limits" *Electrical Power and Energy Systems* 25 (2003) pp. 705–715. doi: 10.1016/S0142-0615(03)00020-6.
- [27] Cepeda, J. C., Colome, D. G.. Vulnerability assessment of elektroenerģijas sistēmas through identification and ranking of vulnerable areas. *Int J Emerg Electr Power Syst*, 2011.
- [28] Jun Yang, Kai Jiang "The sensitive line identification in resilient power system based on fault chain model" *Electrical Power and Energy Systems* 92 (2017), pp. 212–220, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.05.004>.
- [29] Sobolevskis, A., Zicmane, I., Murach, V. "Vulnerability assessment of electric power system for the case of Latvian EES", 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, Riga, 2015.
- [30] Sobolevskis A., Zicmane I., "Analysis of vulnerability of the Latvian electrical power system" 2016 16 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, La Palazzina de' Servi, Florence, Italy, 2016.
- [31] Sobolevskis A., Zicmane I., "Assessing the Impact of Registering of Weak Points Calculating the Power System Operating Modes", 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, Riga, 2016.
- [32] Sobolevskis A., Zicmane I., "Prediction Of Latvian Electrical Power System For Reliability Evaluation Including Wind Energy" 17th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, Milan, Italy, 2017.
- [33] Zicmane, I., Berzina, K., Sobolevskis, A., Kovalenko, S. Latvian Electrical Power System Stability's Analysis Taking into Account New Development Strategy until 2025. In: 11th International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN 2017): Proceedings, Moldova, Chisinau, 12–13 October, 2017. Chisinau: 2017, pp. 1–6.
- [34] Zicmane I., Sobolevskis A., Murac V., Vulnerability Assessment of Electric Power System for the Case of Latvian EES // 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2015), Latvija, Riga, October 14–14, 2015.
- [35] <http://www.ast.lv>.
- [36] <http://www.let.lv>.

PIELIKUMI

ESS jutīgo elementu noteikšana: piemērs (ESS modeļa jutīguma aprēķināšana 2. scenārijā)

EES neviendabīgumu analīze paredz EES elementu vispārinātu vērtību matricas un informācijas par perturbāciju vietām izmantošanu, lai meklētu un atrastu EES vājos punktus. Stacionārajos darba režīmos vispārinātas vērtības tiek izteiktas ar mezglu vadītspējas matricas un stacionāro režīmu vienādojumu Jakobi matricas parametriem, kas ir galvenie informācijas avoti par EES jutīgumu un neviendabīgumu stacionārajos režīmos. Jutīgas vietas tiks noteiktas ar EES shēmas un parametru skaitliskajām un analītiskajām izpētes metodēm.

Aprēķinos tika izmantoti šādi parametri: EES stacionārā režīma parametri (mezglu spriegums, jauda, slodze un ģenerācija, leņķi un sprieguma moduļi), tīkla parametri (iekšējo un ārējo komunikāciju kopums jaudas pārvadīšanai, līniju pretestība). Lai nodrošinātu darba režīma konvergenci (balansu starp ģenerāciju un patēriņu), aplūkotajā modelī balansa un reaktīvas jaudas mezgli tika izvēlēti nejauši saskaņā ar aplūkoto modeli, kas vairāk atbilst EES modeļu reāliem apstākļiem. Attiecīgo režīmu aprēķins ir aptuvens un neļauj novērtēt aktīvās un reaktīvās jaudas plūsmu ar augstu uzticamības pakāpi.

Metodes izmantošanas piemērs (ar mezglu vadītspējas matricām un Jakobi matricām) un jutīgo punktu noteikšanas process

CALCULATION OF THE MAIN VALUES FOR ANALYSING THE EPS's SENSITIVE ELEMENTS

Units of measurement

```

ORIGIN:= 1
kvolt=1000·volt      kamp=1000·amp      grad=°
MVA=kvolt·kamp      Mvar=MVA      Mwatt=MVA

```

INITIAL DATA

The network's steadystate 330 kV.

Number of nodes in the scheme: Number of nodes without the basic node: Number of branches in the scheme:

```

n:=20      i:=1.. n      k:=1.. (n-1)      nv:=29
ny:=1.. (n-1)·2

```

Initial continuous form of the "nodes-branches" incidence matrix:

$$\frac{1}{\Delta W} = \begin{pmatrix} 1 & 7 & 7 & 8 & 9 & 9 & 9 & 5 & 5 & 2 & 3 & 6 & 4 & 10 & 11 & 11 & 11 & 12 & 12 & 13 & 15 & 15 & 15 & 10 & 15 & 14 & 1 & 18 & 19 \\ 19 & 20 & 8 & 9 & 5 & 10 & 20 & 6 & 2 & 3 & 4 & 10 & 10 & 11 & 17 & 17 & 12 & 20 & 13 & 15 & 14 & 16 & 20 & 12 & 16 & 17 & 18 & 2 & 7 \end{pmatrix}$$



Incidence matrix "nodes-branches":

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
M	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Multitude of indexes of the branches adjacent to node i:

		nodes																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
s _i	1	19	5	2	3	9	5	20	7	8	9	10	11	12	15	13	15	11	1	1
	2	18	3	4	10	6	10	8	9	5	6	17	20	15	17	14	15	11	2	7
	3	0	18	0	0	2	0	19	0	10	4	17	13	0	0	16	0	14	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	20	11	12	10	0	0	20	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	16	0	0	0	...

numbers of
nodes
adjacent
to them

1. pielikuma turpinājums

13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	1	0	1	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1
19	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
20	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0

Resistances and conductances of the branches

```
l_km:=( 57 120 89 77 46 53 90 15 15 14 12 17 14 105 132 60 110 127 60 73 83 13 50 66 12 156 130 65 60 )
k_tr:=( 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 )
```

```
R_1:= for i∈1.. 29
```

$$\begin{aligned} \text{RR}_{1,i} &\leftarrow 1_{\text{km}_{1,i}} \cdot k_{\text{tr}_{1,i}} \cdot 0.08 \quad \text{if } k_{\text{tr}_{1,i}} = 9 \\ \text{RR}_{1,i} &\leftarrow 1_{\text{km}_{1,i}} \cdot k_{\text{tr}_{1,i}} \cdot 0.07 \quad \text{if } k_{\text{tr}_{1,i}} = 1 \\ \text{RR} \end{aligned}$$

$R_{-1} =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
	1	3.99	8.4	6.23	5.39	3.22	3.71	6.3	1.05	1.05	0.98	0.84	1.19	0.98	7.35	9.24	4.2	7.7	8.89	4.2	5.11	5.81	0.91	3.5	4.62	0.84	10.92	9.1	4.55	4.2

```
x_1 := for i ∈ 1.. 29
```

$$\begin{aligned} \text{RR}_{1,i} &\leftarrow 1_{\text{km}_{1,i}} \cdot k_{\text{tr}_{1,i}} \cdot 0.42 \quad \text{if } k_{\text{tr}_{1,i}} = 9 \\ \text{RR}_{1,i} &\leftarrow 1_{\text{km}_{1,i}} \cdot k_{\text{tr}_{1,i}} \cdot 0.33 \quad \text{if } k_{\text{tr}_{1,i}} = 1 \\ \text{RR} & \end{aligned}$$

X_{-1}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
	1	10.81	39.6	29.37	25.41	15.18	17.49	29.7	4.95	4.95	4.62	3.96	5.61	4.62	34.65	43.56	19.8	36.3	41.91	19.8	24.09	27.39	4.29	16.5	21.78	3.96	...

Branch resistance:

$$R_V := R_{-1}^T \cdot \text{ohm} \qquad X_V := X_{-1}^T \cdot \text{ohm}$$

Capacity conductance of the branches i-j (shunts):

[illegible]

Conduccance of the shunts connected in the node i:

[illegible]

$$Z_V(R_V, X_V) := R_V - X_V \quad Z_V(R_V, X_V) = \begin{matrix} & 1 \\ 1 & 3.99-10.81j \\ 2 & 8.4-39.6j \\ 3 & 6.23-29.37j \\ 4 & 5.39-25.41j \\ 5 & 3.22-15.18j \\ 6 & 3.71-17.49j \\ 7 & \dots \end{matrix} \quad \text{ohm}$$

$$\begin{aligned} \text{last}(R_v) &= 29 \\ \text{last}(X_v) &= 29 \\ \text{last}(Y_{iijc}) &= 29 \\ \text{last}(Y_{sh}) &= 29 \end{aligned}$$

Load and generation powers

$$P_{H1} := (27 \quad 151 \quad 151 \quad 151 \quad 151 \quad 0 \quad 53 \quad 9 \quad 45 \quad 0 \quad 18 \quad 0 \quad 18 \quad 27 \quad 0 \quad 62 \quad 0 \quad 18 \quad 0 \quad 414)^T \cdot \text{Mwatt}$$
$$\text{last}(P_{Hi}) = 20$$
[illegible]
$$\text{last}(Q_{Hi}) = 20$$
$$P_{G1} = (45 \ 3 \ 9 \ 55 \ 0 \ 112 \ 178 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 223 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 634 \ 0 \ 45 \ 0)^T \cdot \text{Mwatt}$$
$$\text{last}(P_{Gi}) = 20$$
[illegible]
$$\text{last}(Q_{Gi}) = 20$$

Nodal voltage module and phase

Nominal nodal voltage phase and module:

[illegible]
$$\text{last}(U_V) = 20$$
[illegible]
$$\text{last}(\delta_v) = 20$$

1. pielikuma turpinājums

Voltage module and phase in the steady state:

$$xU_y := \begin{pmatrix} 346.83 \\ 344.27 \\ 344.26 \\ 344.6 \\ 344.57 \\ 345.09 \\ 347.63 \\ 346.35 \\ 345.41 \\ 345.3 \\ 349.3 \\ 347.71 \\ 347.22 \\ 348.04 \\ 346.95 \\ 346.87 \\ 352.58 \\ 344.94 \\ 347.48 \\ 347 \end{pmatrix} \cdot \text{kvolt} \quad x\delta_y := \begin{pmatrix} -1.38 \\ -0.02 \\ -0.08 \\ -0.4 \\ -0.23 \\ -0.73 \\ -1.55 \\ -0.89 \\ -0.43 \\ -0.99 \\ -5.37 \\ -2.71 \\ -1.98 \\ -3.48 \\ -1.3 \\ -1.24 \\ -8.16 \\ -0.35 \\ -1.67 \\ 0 \end{pmatrix} \text{grad}$$

last(xU_y) = 20 last(xδ_y) = 20

BUILDING THE MATRIX OF OWN AND MUTUAL NODAL CONDUCTANCES

$$Y(R_V, X_V) = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.0155+0.0732j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0944+0.4451j & -0.0439-0.2071j & 0 & -0.041-0.1933j \\ 0 & -0.0439-0.2071j & 0.0952+0.4488j & -0.0513-0.2417j & 0 \\ 0 & 0 & -0.0513-0.2417j & 0.0952+0.4488j & 0 \\ 0 & -0.041-0.1933j & 0 & 0 & 0.0954+0.4497j \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.041-0.1933j \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \cdot \text{siemens}$$

LOCALIZATION OF THE EPS's SENSITIVE POINTS USING SINGULAR VALUE DECOMPOSITION OF THE JACOBIAN MATRIX

Rectangular system of coordinates:

$$J := \begin{pmatrix} \frac{dW_p}{dU_a} & \frac{dW_p}{dU_r} \\ \frac{dW_q}{dU_a} & \frac{dW_q}{dU_r} \end{pmatrix}$$

Polar system of coordinates:

$$J := \begin{pmatrix} \frac{dW_p}{dU} & \frac{dW_p}{d\delta} \\ \frac{dW_q}{dU} & \frac{dW_q}{d\delta} \end{pmatrix}$$

Analysis Jacobian matrices

$$MJ^{-1} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -0.0231 & -0.0061 & -0.0056 & -0.0051 & -0.0054 & -0.005 & -0.0098 & -0.007 & -0.0045 & -0.0045 \\ -0.0061 & -0.01 & -0.009 & -0.008 & -0.0085 & -0.0077 & -0.0038 & -0.0049 & -0.0058 & -0.0069 \\ -0.0055 & -0.009 & -0.0102 & -0.0088 & -0.0079 & -0.0075 & -0.0035 & -0.0047 & -0.0057 & -0.0071 \\ -0.005 & -0.008 & -0.0088 & -0.0094 & -0.0074 & -0.0073 & -0.0033 & -0.0045 & -0.0055 & -0.0073 \\ -0.0054 & -0.0085 & -0.0079 & -0.0074 & -0.0093 & -0.0081 & -0.0036 & -0.0049 & -0.0061 & ... \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$MJ = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -5.4063 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -32.4925 & 15.1239 & 0 & 14.1126 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 15.1235 & -32.7687 & 17.6344 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 17.6519 & -32.8337 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15.1104 \\ 0 & 14.1249 & 0 & 0 & -32.8763 & 14.1105 & 0 & 0 & 4.6032 & ... \end{bmatrix} \end{matrix}$$

1. pielikuma turpinājums

ANALYSIS OF SINGULAR VALUE DECOMPOSITION OF THE FULL JAKOBIAN MATRIX

Singular value decomposition of the Jacobian matrix:

$$J_{svd} (MJ) =$$

	1	2	3	4	5
1	3.2222·10 ⁻¹⁰	-0.0006	0.0015	-0.0007	4.6544·10 ⁻⁶
2	6.4013·10 ⁻⁷	-0.3782	0.508	-0.2313	0.001
3	-1.9779·10 ⁻⁶	0.4715	-0.0177	0.5259	-0.0005
4	7.9568·10 ⁻⁶	-0.4874	-0.4191	-0.2049	-0.0007
5	-1.3311·10 ⁻⁶	0.3111	-0.5501	-0.3412	0.0001
6	5.9479·10 ⁻⁶	-0.2666	0.0954	0.5204	-0.001
7	1.0636·10 ⁻⁹	-0.0001	0.0001	0.0004	-9.4145·10 ⁻⁷
8	-4.4332·10 ⁻⁸	0.0031	-0.0013	-0.0069	0
9	1.6527·10 ⁻⁶	-0.0639	0.0206	0.1022	-0.0002
10	-0	0.4252	0.4552	-0.4299	0.0009
11	-0	-0.0172	-0.026	0.0262	-0.0012
12	0.0008	-0.0257	-0.0378	0.0379	0.0073
13	-0.0214	0.0016	0.0033	-0.0035	...

i-th left singular vectors of the Jacobian matrix

$$W (MJ) =$$

	1	2	3	4	5
1	3.2222·10 ⁻¹⁰	-0.0006	0.0015	-0.0007	4.6544·10 ⁻⁶
2	6.4013·10 ⁻⁷	-0.3782	0.508	-0.2313	0.001
3	-1.9779·10 ⁻⁶	0.4715	-0.0177	0.5259	-0.0005
4	7.9568·10 ⁻⁶	-0.4874	-0.4191	-0.2049	-0.0007
5	-1.3311·10 ⁻⁶	0.3111	-0.5501	-0.3412	0.0001
6	5.9479·10 ⁻⁶	-0.2666	0.0954	0.5204	-0.001
7	1.0636·10 ⁻⁹	-0.0001	0.0001	0.0004	-9.4145·10 ⁻⁷
8	-4.4332·10 ⁻⁸	0.0031	-0.0013	-0.0069	0
9	1.6527·10 ⁻⁶	-0.0639	0.0206	0.1022	-0.0002
10	-0	0.4252	0.4552	-0.4299	0.0009
11	-0	-0.0172	-0.026	0.0262	-0.0012
12	0.0008	-0.0257	-0.0378	0.0379	0.0073
13	-0.0214	0.0016	0.0033	-0.0035	...

Diagonal matrix of singular values of the Jakopian matrix:

$$\Sigma (MJ) =$$

	1	2	3
1	180407.8135	0	0
2	0	104825.3293	0
3	0	0	80623.3279
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	...

Vector of singular values:

$$\sigma (MJ) \cdot 10^0 =$$

	1
1	180407.8135
2	104825.3293
3	80623.3279
4	76854.1288
5	65089.148
6	34300.4128
7	31638.4599
8	28425.1142
9	21787.4159
10	20603.8003
11	20399.0776
12	13244.0726
13	...

i-th right singular vectors of the Jacobian matrix:

$$V (MJ) =$$

	1	2	3	4	5
1	0	-4.4679·10 ⁻¹⁰	8.5783·10 ⁻¹⁰	-4.1454·10 ⁻¹⁰	2.0221·10 ⁻¹²
2	-2.2481·10 ⁻¹³	1.0776·10 ⁻⁷	-1.4922·10 ⁻⁷	1.7447·10 ⁻⁸	-1.6914·10 ⁻¹⁰
3	1.2389·10 ⁻¹²	-1.9399·10 ⁻⁷	-9.5384·10 ⁻⁸	-1.807·10 ⁻⁷	-5.8428·10 ⁻¹¹
4	-1.2·10 ⁻¹¹	4.274·10 ⁻⁷	5.8454·10 ⁻⁷	2.8104·10 ⁻⁸	1.0258·10 ⁻⁹
5	9.9637·10 ⁻¹³	-1.9201·10 ⁻⁷	3.5968·10 ⁻⁷	3.8769·10 ⁻⁷	-4.6403·10 ⁻¹⁰
6	-8.665·10 ⁻¹²	2.5294·10 ⁻⁷	2.6058·10 ⁻⁹	-7.3689·10 ⁻⁷	1.5024·10 ⁻⁹
7	0	-3.6213·10 ⁻¹¹	-3.6033·10 ⁻¹²	1.1475·10 ⁻¹¹	1.082·10 ⁻¹³
8	7.0471·10 ⁻¹⁵	-4.9158·10 ⁻¹¹	-1.6616·10 ⁻⁹	6.7346·10 ⁻¹⁰	-3.8356·10 ⁻¹²
9	-2.3736·10 ⁻¹²	3.2974·10 ⁻⁸	1.8759·10 ⁻⁸	-8.0541·10 ⁻⁸	8.8893·10 ⁻¹¹
10	7.5198·10 ⁻¹¹	-7.7712·10 ⁻⁷	-1.1993·10 ⁻⁶	1.2595·10 ⁻⁶	-1.7047·10 ⁻⁹
11	2.3482·10 ⁻¹¹	1.5575·10 ⁻⁸	6.6642·10 ⁻⁸	-7.9144·10 ⁻⁸	7.682·10 ⁻⁹
12	2.2166·10 ⁻¹⁰	-4.5863·10 ⁻⁹	1.1905·10 ⁻⁸	-1.9743·10 ⁻⁸	-1.0815·10 ⁻⁸
13	-4.3212·10 ⁻⁹	-1.2192·10 ⁻¹⁰	-1.1641·10 ⁻⁹	1.4449·10 ⁻⁹	...

Values of the components of the first right V singular vector corresponding to nodal voltage modules (maximal components correspond to nodes sensitive to voltage loss):

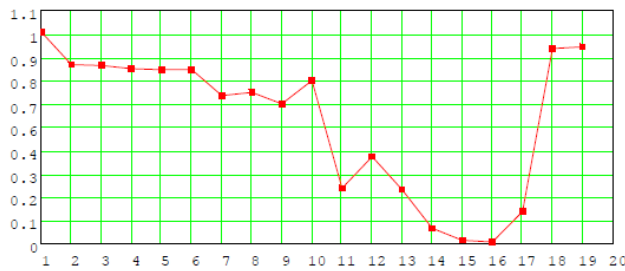


Fig.2a

Values of differences related to nodal voltage modules of the ith and jth component of the right singular vector of the full Jakopian matrix (branches sensitive to voltage loss):

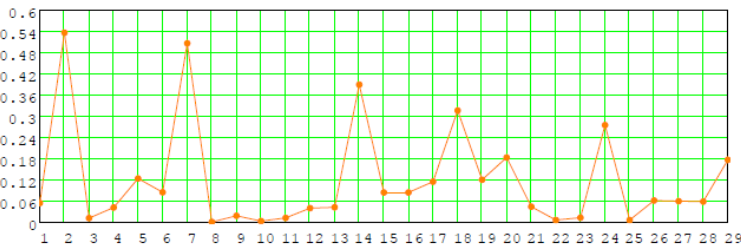


Fig.2b

LOCALIZATION OF THE EPS's SENSITIVE POINTS USING SINGULAR DECOMPOSITION OF THE MATRIX Y

Evaluation of sensitivity of links by the difference of the corresponding nodes at the ends of the branches of the first rightsingular vector of the matrix Ygb (are sensitive to voltage loss)

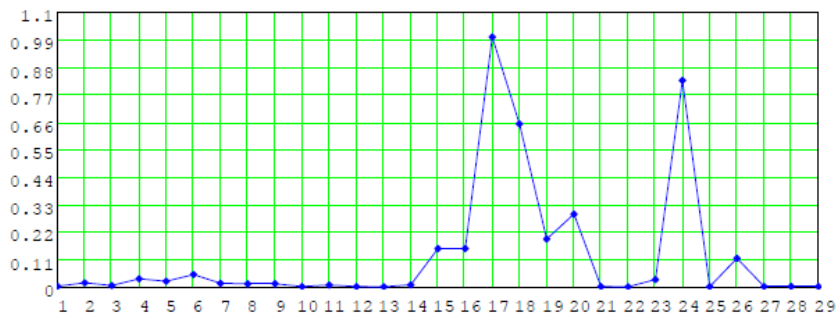


Fig.3b

 $\bar{f}_{V_{Yij}_{\sigma a}}$

Estimation of sensitivity of branches by components of the first right singular vector of the matrix Ygb:

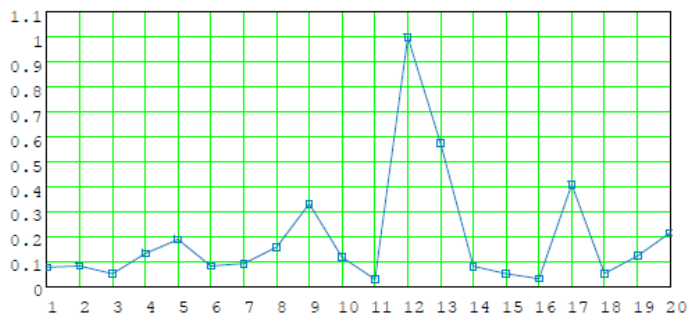


Fig.3a

 $\bar{f}_{V_{Yv}_{\sigma a}}$