



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Rytis Šauklis

**AVARINIŲ REŽIMŲ MAŽO PRAL AidUMO TOPOLOGIJOS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOJE ANALIZĖ**

Magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Vytautas Šiožinys

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**AVARINIŲ REŽIMŲ MAŽO PRAL AidUMO TOPOLOGIJOS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOJE ANALIZĖ**

Magistro projektas
Elektros energetikos inžinerija (M3016L21)

Vadovas

Doc. dr. Vytautas Šiožinys

2015-05

Recenzentas

Doc. dr.

2015-06

Projektą atliko

Rytis Šauklys

2015-05

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

(Fakultetas)

(Studento vardas, pavardė)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Avarinių režimų mažo pralaidumo elektros energetikos sistemoje analizė“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Ryčio Šauklio** baigiamasis projektas tema „Avarinių režimų mažo pralaidumo elektros energetikos sistemoje analizė“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Šauklys, R. Avarinių režimų mažo pralaidumo elektros energetikos sistemoje analizė: Elektros energetikos inžinerijos magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. V. Šiožinys; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2015, 51 p.

SANTRAUKA

Šio darbo tikslas yra sudaryti ir iširti standartinį būklės vertinimo uždavinį, esant specifinei elektros sistemos topologijai. Sudarytam algoritmui atlikti savybių tyrimą, esant įvairioms neapibrėžtims. Taip pat atlikti sutrikusių matavimų analizę ir pažiūrėti, kokią įtaką tai turės algoritmo skaičiavimo paklaidai. Pasiūlyti naujų algoritmų būklės vertinimo uždaviniui spręsti, kurie būtų mažiau jautriūs įvairioms neapibrėžtims ir leistų lengviau įvertinti tinklo būklę.

Darbe aprašyta standartinio būklės vertinimo uždavinio teorija reikalinga sudarinėjant algoritmą. Taip pat trumpai aprašyta teorija, kurios pagrindu buvo ieškoma naujų sprendimų, kuriant naują būklės vertinimo algoritmą.

Tiriamajame darbe nagrinėta tinklo varžų ir tinklo matavimų neapibrėžtumo įtaka skaičiavimo rezultatams, panaudojant Monte Carlo metodą. Taip pat atlikta sutrikusių matavimų analizė. Sudarytas naujas būklės vertinimo uždavinio algoritmas, paremtas entropijos lygtimis. Naujam algoritmui atlikta sutrikusių matavimų analizė ir palyginti rezultatai su standartiniu būklės vertinimo uždaviniu. Taip pat būklės vertinimo uždaviniui, paremtam entropijos lygtimis, atlikta skersinių laidžių įtakos analizė skaičiavimo rezultatams.

Šauklys R., Contingency analysis of power system with bottleneck network topology”: Master’s Thesis in Electrical Power Engineering / Supervisor doc. dr. V. Šiožinys; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electrical Power Systems.

Kaunas, 2015. 51 p.

SUMMARY

The main point of this project is to create the specific network topology state estimation and research its features. The algorithm features is researched under various uncertainties. The algorithm is tested with impaired measurements and shown its impact to calculation results. Some new considerations and suggestion, were made, to create new algorithm, which could be less sensitive in all kind of uncertainties.

This project consist of a basic theory which is needed to create standard state estimation algorithm. Also this paper describes the theory which based the new algorithm creations and implementation.

The research consist of a network impedance and measurements uncertainties analysis using Monte Carlo method and impaired measurements analysis. The new state estimation algorithm based entropy was made. The comparison in impaired measurements analysis between standard and new state estimation algorithm, was also made. Moreover the new state estimation based entropy was tested in various b_{sh} and shown its impact to calculation results.

TURINYS

ĮVADAS.....	7
1. BŪKLĖS VERTINIMO UŽDAVINYS	8
1.1. Gauso Niutono metodas	8
1.2. Niutono – Rafsono metodas	9
1.3. Matavimų funkcijų matrica $h(x)$	10
1.4. Jacobian matrica $H(x)$	12
2. ENTROPIJA.....	15
2.1. Lagranžo neapibrėžtųjų daugiklių metodas.....	17
2.1.1. Lagranžo funkcija ir uždavinio su apribojimais stacionarieji taškai.....	17
2.1.2. Lagranžo funkcija nelygybinių apribojimų atveju.....	19
3. BŪKLĖS VERTINIMO UŽDAVINYS NAUDOJANT ENTROPIJOS LYGTIS.....	21
3.1. Nuolatinės srovės tinklo būklės vertinimo uždavinys naudojant entropijos lygtis.....	21
3.2. Kintamosios srovės tinklo būklės vertinimo uždavinys panaudojant entropijos lygtis	22
4. TIRIAMASIS DARBAS	23
4.1. Tinklo varžų ir matavimų neapibrėžtumo įtaką skaičiavimo rezultatams	24
4.1.1. Tinklo varžų neapibrėžtumo įtaka skaičiavimo rezultatams	24
4.1.2. Matavimų vektoriaus neapibrėžtumo įtaka skaičiavimo rezultatams	26
4.1.3. Matavimų ir tinklo varžų įtaka skaičiavimo rezultatams.....	28
4.2. Sutrikusių matavimų analizė.....	29
4.2.1. Sutriko įtampos matavimai.....	29
4.2.2. Sutriko aktyviosios galios srauto matavimai	29
4.2.3. Sutriko reaktyviosios galios srauto matavimai	29
4.3. Nuolatinės srovės būklės vertinimo uždavinio paremto entropijos lygtimis palyginimas su įprastu būklės vertinimo uždaviniu	30
4.4. Kintamos srovės būklės vertinimo uždavinio paremto entropijos lygtimis palyginimas su įprastu būklės vertinimo uždaviniu.	31
4.4.1. Sutrikusių matavimų analizė būklės vertinimo uždavinio paremto entropijos lygtimis.	33
4.4.2. Skersinių talpių b_{sh} įtaka būklės vertinimo uždaviniui paremtui entropijos lygtimis analizė	34
IŠVADOS.....	36
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	37
PRIEDAI	38
Priedas nr. 1. Būklės vertinimo algoritmas Gauso-Niutono metodu, įvairūs neapibrėžtumai	38
Priedas nr. 2. Nuolatinės srovės būklės vertinimo uždavinys mažiausių kvadratų metodu.	46
Priedas nr. 3. Būklės vertinimo uždavinys paremtas entropinėmis lygtimis DC tinkle.	47
Priedas nr. 4. Būklės vertinimo uždavinys paremtas entropinėmis lygtimis kintamos srovės tinkle.	48

IVADAS

Elektros sistemos yra sudarytos iš generatorių, perdavimo tinklų ir skirstymo tinklų. Perdavimo sistemas sudaro didelis skaičius pastočių kurios sujungtos daugybe perdavimo linijų, transformatorių, ir kitų sistemų užtikrinančių sistemos valdymą ir saugumą. [1].

Elektros sistemos būklė duotuoju laiko momentu gali būti nustatyta jeigu žinome tinklo topologiją, šakų sroves, galios srautus, bei mazgų įtampas. Kol įtampos pilnai apibrėžia sistemos darbą galima laikyti, kad sistemos būklė statinė. Tačiau sistema gali pereiti į vieną iš trijų galimų būvių: normalaus darbo, avarinį ir po avarinį. Elektros sistemą reikia valdyti taip, kad ji visą laiką išbūtų normalaus darbo būvyje, palaikant pastovų sistemos dažnį ir neperkraunant sistemos elementų.[1].

Sistemos būklė gali pasikeisti labai greitai atsitikus netikėtam įvykiui, kuris gali sukelti totalinę avariją. Tokioje situacijoje sistemą reikia valdyti greitai ir teisingai, kad sugrąžinti ją į normalaus darbo būvį. [1]. Sistemos valdymas įmanomas tik žinant sistemos būklę. Nustačius sistemos būklę sudaromos prielaidos keisti sistemos topologiją, darbo režimus. Būklės vertinimo uždavinys suteikia galimybę pažiūrėti sistemos reakciją į atliktus veiksmus prieš juos atliekant, t.y. imituoti skaitiniuose sistemos modeliuose. Atliekant sistemos būklės vertinimą, svarbi matematinio modelio reakciją į sistemos parametrų, matavimų neapibrėžtumus bei matavimų sutrikimus.

Darbo tikslas: Ištirti būklės vertinimo uždavinio savybes esant specifiniai elektros tinklo struktūrai.

Darbo uždaviniai:

- Sudaryti specifinės struktūros tiriamąjį elektros tinklą programa PSS/E;
- Sudaryti būklės vertinimo uždavinio algoritmą, kuris įvertintų tiriamojo tinklo būklę;
- Atlikti būklės vertinimo algoritmo savybių tyrimą esant įvairioms neapibrėžtims;

Ieškoti naujų sprendimo algoritmų, mažiau jautrių neapibrėžtims ir padedančių lengviau vertinti tinklo būklę.

1. BŪKLĖS VERTINIMO UŽDAVINYS

Šiai analizei atlikti naudojamas netiesinių sistemų būklės vertinimo uždavinys. Netiesinis matavimo modelis gali būti išreikštas:

$$\mathbf{m} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{e} \quad (1.1)$$

kur \mathbf{m} yra matavimų vektorius dydžio i , x yra tikrasis būklės vektorius dydžio j (kur $j < i$), $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ yra netiesinė vektorinė funkcija siejanti matavimus su būkle (i vektoriumi) ir \mathbf{e} yra matavimų paklaidų vektorius. Elementai \mathbf{e} yra išdėstyti diagonale matricoje ir ši matrica žymima R_m .

Būklės vertinimo uždavinys gali būti suformuotas kaip funkcijos $J(\mathbf{x})$ minimizavimas:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} (\mathbf{m} - \mathbf{h}(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}_m^{-1} (\mathbf{m} - \mathbf{h}(\mathbf{x})) \quad (1.2)$$

Mažiausių kvadratų metodas remiasi paklaidos minimizavimu:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \min_{\mathbf{x}} ((\mathbf{m} - \mathbf{h}(\mathbf{x}))^T \cdot (\mathbf{m} - \mathbf{h}(\mathbf{x}))) \quad (1.3)$$

Būklės vertinimo vektorius \mathbf{x} apskaičiuojamas iteraciniu skaičiavimu:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}(\mathbf{x}^n) \Delta \mathbf{x}^n &= -\mathbf{g}(\mathbf{x}^n) \\ \mathbf{x}^{n+1} &= \mathbf{x}^n + \Delta \mathbf{x}^n \end{aligned} \quad (1.4)$$

kur $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ yra gradientas funkcijos $\mathbf{J}(\mathbf{x})$, ir $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ yra stiprinimo matrica, kurios išraiška priklauso nuo metodo, kurį pasirinksim spręsti minimizavimo uždavinį. Tai gali būti Gauso – Niutono, Niutono – Rafsono ar kitas metodas. [2].

1.1. Gauso Niutono metodas

Naudojant Gauso Niutono metodą Teiloro keitinyse suteikia galimybę aproksimuoti netiesinę funkciją $\mathbf{h}(\mathbf{x})$:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) \cong \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{H}(\mathbf{x}) \Delta \mathbf{x} \quad (1.5)$$

Minimizacijos uždavinys gali būti perrašytas sekančiai:

$$\mathbf{J}(\Delta \mathbf{x}) = (\Delta \mathbf{m} - \mathbf{H}(\mathbf{x}) \Delta \mathbf{x})^T \mathbf{R}_m^{-1} (\Delta \mathbf{m} - \mathbf{H}(\mathbf{x}) \Delta \mathbf{x}) \quad (1.6)$$

kur $\Delta \mathbf{m} = \mathbf{m} - \mathbf{h}(\mathbf{x})$ ir $\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \partial \mathbf{h}(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{x}$ (Jacobian matrica). Pirmojo laipsnio sprendinys yra:

$$\frac{\partial \mathbf{J}(\Delta \mathbf{x})}{\partial \Delta \mathbf{x}} = -\mathbf{H}^T(\mathbf{x}) \mathbf{R}_m^{-1} (\Delta \mathbf{m} - \mathbf{H}(\mathbf{x}) \Delta \mathbf{x}) = 0 \quad (1.7)$$

Tuomet sprendinys gali būti išreikštas kaip:

$$\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{H}^T(\mathbf{x}) \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{H}(\mathbf{x}))^{-1} \mathbf{H}^T(\mathbf{x}) \mathbf{R}_m^{-1} \Delta \mathbf{m}(\mathbf{x}) \quad (1.8)$$

Iteracinis skaičiavimas užbaigiamas kada būklės vektoriaus \mathbf{x} reikšmės konverguoja. Būklės matricos vektorių dažniausiai sudaro mazgų įtampos ir įtampų kampai, nes jie geriausiai nusako kitus elektros sistemos parametrus tokius kaip aktyviosios ir reaktyviosios galios srautas, mazgų aktyvioji ir reaktyvioji galia bei srovės. Būklės kintamojo išraiška (1.9). [2]

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta_i \\ U_i \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

1.2. Niutono – Rafsono metodas

Gauso Niutono metodo išvedimas susijęs su tradicinio minimizacijos uždavinio transformacija į tiesinį mažiausių kvadratų uždavinį, bandant ištiesinti funkciją $\mathbf{h}(\mathbf{x})$. Niutono Rafsono metode optimaliausia sąlyga gaunama tiesiogiai pertvarkius funkcija $\mathbf{J}(\mathbf{x})$:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \left(\frac{z_j - h_j(\mathbf{x})}{\sigma_j} \right)^2 \quad (1.10)$$

kur σ_j yra matavimų paklaidų matricos $R_Z(j,j)$ elementas.

Pirmojo laipsnio optimalus sprendinys šiai lygčiai yra:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{J}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = -\sum_{j=1}^m \left(\frac{z_j - h_j(\mathbf{x})}{\sigma_j} \right) \frac{\partial h_j(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = 0 \quad (1.11)$$

kur $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ yra funkcijos $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ gradientas. Pagrindinis netiesinės lygtis $\mathbf{g}(\mathbf{x})=0$ gali būti išspręsta naudojant Niutono Rafsono metodą. Teiloro keitinys aproksimuoja gradiento funkciją:

$$g(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) \cong \mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x}) \Delta \mathbf{x} \quad (1.12)$$

kur $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ yra funkcijos $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ Jacobian matrica arba Hessian matrica funkcijos $\mathbf{J}(\mathbf{x})$:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \frac{\partial^2 \mathbf{J}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} = \sum_{j=1}^m \sigma_j^{-1} \frac{\partial h_j(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \left(\frac{\partial h_j(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right)' - \sum_{j=1}^m \sigma_j^{-1} \Delta \mathbf{z} \frac{\partial^2 h_j(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} \quad (1.13)$$

Tuomet mažiausių kvadratų sprendinys gali būti užrašytas kaip:

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{G}(\mathbf{x})^{-1} \mathbf{H}^T(\mathbf{x}) \mathbf{R}_Z^{-1} \Delta \mathbf{z}(\mathbf{x}) \quad (1.14)$$

kur

$$\sum_{j=1}^m \sigma_j^{-1} \frac{\partial h_j(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \left(\frac{\partial h_j(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right)^T = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}) \mathbf{R}_Z^{-1} \mathbf{H}(\mathbf{x}) \quad (1.15)$$

Būklės matricą gali būti perrašyta sekančiai:

$$\Delta \mathbf{x} = \left(\mathbf{H}^T(\mathbf{x}) \mathbf{R}_Z^{-1} \mathbf{H}(\mathbf{x}) - \sum_{j=1}^m \sigma_j^{-1} \Delta \mathbf{z}_j \frac{\partial^2 h_j(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} \right)^{-1} \mathbf{H}^T(\mathbf{x}) \mathbf{R}_Z^{-1} \Delta \mathbf{z}(\mathbf{x}) \quad (1.16)$$

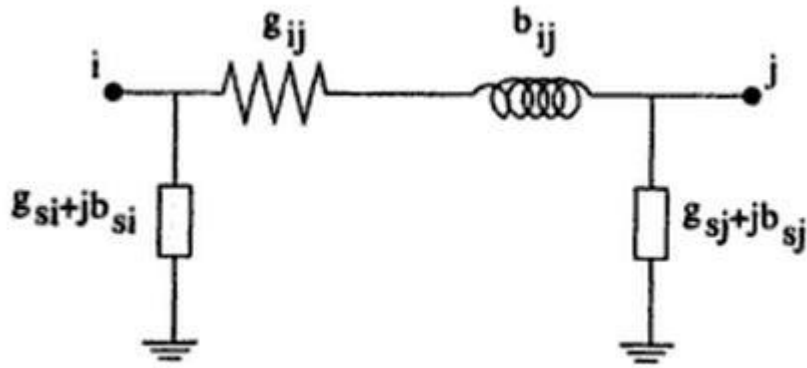
Reiktų pastebėti tai, kad jei antrosios išvestinės sąlyga yra ignoruojama, formulė (1.16) sumažėja iki formulės (1.8). Taigi metodai skiriasi tik stiprinimo matricos $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ išraiškomis. Žinoma antroji išvestinė bus tik netiesiniuose modeliuose. Šios išraiškos efektas konvergavimo greičiui yra susietas su tuo kaip gerai išvestos funkcijos pritaikytos kiekvienam iš uždavinių, t.y. kaip arti $\Delta \mathbf{z}$ pasiekia nulinę reikšmę. Daugeliu situacijų antros eilės išvestinės įtaka konvergavimo greičiui statiniuose elektros sistemų būklės vertinimo uždaviniuose yra nedidelė dėl to daugumoje atvejų nevertinama. [2]

1.3. Matavimų funkcijų matrica $\mathbf{h}(\mathbf{x})$

Matavimai gali būti įvairių tipų. Sudarinėjant būklės vertinimo uždavinius dažniausiai naudojami matavimai yra linija tekantys aktyviosios ir reaktyvios galios srautai, mazgo aktyvios ir reaktyviosios galios, įtampos mazguose bei tekančios srovės. Visi šie dydžiai gali būti išreikšti stačiakampėje ar polinėje koordinačių sistemoje. Kuomet sistemoje sudarytoje iš N elementų naudojama polinė koordinačių sistema būklės matrica bus sudaryta iš $2N-1$ elementų. Tai bus N mazgų įtampų moduliai ir $N-1$ mazgų įtampų kampai. Čia sistemos mazgos įtampa laikoma lygi vienetai o mazgo įtampos kampas lygus 0. Tuomet būklės matrica atrodys (1.17). [1]

$$\mathbf{x} = [\theta_2 \theta_3 \dots \theta_n U_1 U_2 \dots U_n] \quad (1.17)$$

Visų matavimų išraiškos norint susieti būklės matricą su matavimais yra gaunami panaudojus perdavimo linijos modelį, dar kitaip vadinamą „ π “ schemą (1.1 pav.).



1.1 pav. Dviejų mazgų perdavimo linijos π schema

Mazgo aktyviosios ir reaktyviosios galios išraiškos:

$$P_i = U_i \sum_{j \in N_i} U_j (G_{ij} \cdot \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1.18)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j \in N_i} U_j (G_{ij} \cdot \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (1.19)$$

Aktyviosios ir reaktyviosios galios srauto išraiškos iš mazgo i į mazgą j :

$$P_{ij} = U_i^2 (g_{si} + g_{ij}) - U_i U_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1.20)$$

$$Q_{ij} = -U_i^2 (b_{si} + b_{ij}) - U_i U_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (1.21)$$

Linija tenkančios srovės iš mazgo i į mazgą j :

$$I_{ij} = \frac{\sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}}{U_i} \quad (1.22)$$

jeigu nevertinam skersinių laidžių tuomet išraišką (1.22) galima perrašyti sekančiai:

$$I_{ij} = \sqrt{(g_{ij}^2 + b_{ij}^2) (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij})} \quad (1.23)$$

U_i ir θ_i - įtampos modulis ir įtampos kampas mazge i ;

$$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$$

$G_{ij} + jB_{ij}$ - kompleksinio mazgo ij elemento laidžiai;

$g_{ij} + jb_{ij}$ - perdavimo linijos aktyvusis ir reaktyvusis laidis. [1].

1.4. Jacobian matrica $\mathbf{H}(\mathbf{x})$

Jacobian matrica yra naudojama sudarinėjant būklės vertinimo algoritmą. Jacobian matricos išraiška (1.24) pateikta žemiau [1]:

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta} & \frac{\partial P_i}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_i}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij}}{\partial \theta} & \frac{\partial I_{ij}}{\partial V} \\ 0 & \frac{\partial V_i}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

Matricos elementų išraiškos pateiktos žemiau.

Elementas nusakantis mazgo aktyviąsias galias:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = \sum_{j=1}^N U_i U_j (-G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) - U_i^2 B_{ii} \quad (1.25)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (1.26)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + U_i^2 G_{ii} \quad (1.27)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1.28)$$

Elementas nusakantis aktyviosios galios srautus:

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} = U_i U_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (1.29)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} = -U_i U_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (1.30)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial U_i} = -U_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) + 2(g_{si} + g_{ij}) U_i \quad (1.31)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial U_j} = -U_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1.32)$$

Elementas nusakantis mazgo reaktyviasias galias:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = \sum_{j=1}^N U_i U_j (-G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - U_i^2 G_{ii} \quad (1.33)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = U_i U_j (-G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1.34)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + U_i B_{ii} \quad (1.35)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = U_i (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (1.36)$$

Elementas nusakantis reaktyviosios galios srautus:

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} = -U_i U_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1.37)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} = U_i U_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1.38)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial U_i} = -U_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) - 2(b_{si} + b_{ij}) U_i \quad (1.39)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial U_j} = -U_i (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (1.40)$$

Elementas nusakantis mazgų įtampas:

$$\frac{\partial U_i}{\partial U_i} = 1, \frac{\partial U_i}{\partial U_j} = 0, \frac{\partial U_i}{\partial \theta_i} = 0, \frac{\partial U_i}{\partial \theta_j} = 0 \quad (1.41)$$

Elementas nusakantis tinklo srovės (nevertinant skersinių laidžių):

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial \theta_i} = \frac{g_{ij}^2 + b_{ij}^2}{I_{ij}} U_i U_j \sin \theta_{ij} \quad (1.42)$$

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial \theta_j} = -\frac{g_{ij}^2 + b_{ij}^2}{I_{ij}} U_i U_j \sin \theta_{ij} \quad (1.43)$$

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial U_i} = \frac{g_{ij}^2 + b_{ij}^2}{I_{ij}} (U_i - U_j \cos \theta_{ij}) \quad (1.44)$$

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial U_j} = \frac{g_{ij}^2 + b_{ij}^2}{I_{ij}} (U_j - U_i \cos \theta_{ij}) \quad (1.45)$$

2. ENTROPIJA

Entropija tai atsitiktinių dydžių skaitinė charakteristika, kuri kiekybiškai apibūdina tų dydžių neapibrėžtumo laipsnį.

Sakykime, atsitiktiniai dydžiai X ir Y turi skirstinius pateiktus 2.1 lentelėje:

2.1 lentelė. Atsitiktinių dydžių X ir Y skirstiniai

Ω_X	0	1	Ω_Y	1	2	3	4	5	6
p	0.5	0.5	q	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167

Akivaizdu, jog dydžio Y neapibrėžtumo laipsnis yra didesnis, nes tas dydis gali įgyti didesnę skaičių vienodai patikimų reikšmių ir dėl to prieš eksperimentą sunkiau prognozuoti jo baigtį. Jei dydis įgyja tik vieną reikšmę (išsigimę s skirstinys), jokio neapibrėžtumo nėra. Atrodytų neapibrėžtumo laipsnis priklauso nuo baigčių skaičiaus: didesnę jų skaičių atitinka didesnis neapibrėžtumas. Šis veiksnys yra svarbus tačiau ne lemiamas [3].

Priimame skirstinius pateiktus 2.2 lentelėje:

2.2 lentelė. Atsitiktinių dydžių X ir Y skirstiniai

Ω_X	0	1	Ω_Y	-1	0	1
p	0.5	0.5	q	0.005	0.990	0.005

Šiuo atveju didesnę neapibrėžtumo laipsnį turi dydis X - prieš eksperimentą galime beveik atspėti, kad Y įgis reikšmę 0, tuo tarpu apie X to pasakyti negalime. Taigi atsitiktinio dydžio neapibrėžtumo laipsnį lemia tikimybės [3].

Apibūdinsime diskrečiojo atsitiktinio dydžio X, turinčio skirstinį $p_i = \mathbf{P}(X = x_i)$ čia ($i = 1, 2, \dots$), neapibrėžtumo matą – entropiją.

Diskrečiojo atsitiktinio dydžio entropija yra skaičius:

$$H(X) = H(p_1, p_2, \dots) = -\sum_i p_i \log p_i \quad (2.1)$$

čia logaritmo pagrindas gali būti bet kuris skaičius $a > 1$. Inžineriniuose skaičiavimuose, informatikoje vartojami dvejetainiai logaritmai. Tai reiškia, kad neapibrėžtumo laipsnio matavimo vienetu laikomas neapibrėžtumas, kurį sukuria atsitiktinio dydžio su dviem vienodai patikimomis baigtimis, skirstinys. Tuomet gauname :

$$H(X) = H\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) = -\frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} = 1$$

Šis dvejetainis entropijos vienetas vadinamas bitu. Apskaičiuodami entropiją žymėsime $\log_2 p = \log p$ ir laikysime, kad $\log 0 = 0$ [3].

Entropijos savybės:

- 1) $H(X) \geq 0$.
- 2) Jei X skirstinys tolydinis t.y. jei $p_1 = p_2 = \dots = p_N = \frac{1}{N}$, tai $H(X) = \log N$.
- 3) $\max H(p_1, p_2, \dots, p_N) = H\left(\frac{1}{N}, \frac{1}{N}, \dots, \frac{1}{N}\right)$. Ieškome sąlyginio $H(p_1, \dots, p_n)$

maksimumo, kai $\sum_{i=1}^N p_i = 1$. Ši sąlyginio ekstremumo uždavinį sprendžiame sudarydami

Lagranžo funkciją:

$$L(p_1, \dots, p_n) = -\sum_{i=1}^N p_i \log p_i + \lambda \sum_{i=1}^N p_i \quad (2.2)$$

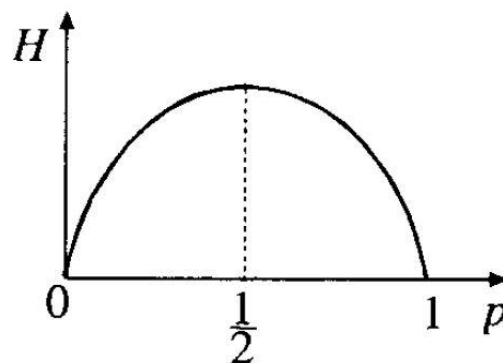
Čia λ – neapibrėžtasis koeficientas. Dalines išvestines kintamųjų p_i atžvilgiu prilyginę nuliui, gauname tokią sistemą:

$$-\log p_i - \frac{1}{\ln 2} + \lambda = 0 \quad (2.3)$$

Iš čia išplaukia, kad $p_1 = p_2 = \dots = p_n$, t.y. $p_i = \frac{1}{N}$.

Kai $N=2$, entropija

$$H(p, 1-p) = -(p \log p + (1-p) \log(1-p)) \text{ ir } H(p, 1-p) \leq H\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) \text{ (2.1 pav.)}$$



2.1 pav. Entropijos skirstinys

- 4) Jei X ir Y yra nepriklausomi, tai:

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y).$$

$$5) \quad H(X, Y) = H(X) + \sum_i p_i \mathbf{P}(Y | X = x_i)$$

Tolydinio atsitiktinio dydžio X entropija apibrėžiama lygybe:

$$H(X) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \log(p(x)) dx \quad (2.4)$$

Šios charakteristikos negalima laikyti atsitiktinio dydžio neapibrėžtumo matu, tačiau, sprendžiant palyginamuosius uždavinius jie labai praverčia [3].

2.1. Lagranžo neapibrėžtųjų daugiklių metodas.

Šiame skyriuje aptarsime Lagranžo (*Joseph Louis Lagrange*) daugiklių metodą. Tokio tipo uždaviniai formuluojami:

$$\min_{X \in D} f(X) \quad (2.5)$$

kai leistinąją sritį D apibrėžia nelygybių ir lygybių sistema:

$$g_i(X) \geq 0, i \quad (2.6)$$

$$h_j = 0, j \quad (2.7)$$

Tai yra siauresnė uždavinių klasė nei matematinio programavimo uždaviniai. Netiesinio programavimo uždaviniuose tikslo funkcija yra netiesinė, o apribojimai (2.6) ir (2.7) gali būti tiek tiesiniai tiek netiesiniai. Nelygybinių ir lygybinių apribojimų vektorius žymėsime atitinkamai $g(X)$ ir $h(X)$ [4].

2.1.1. Lagranžo funkcija ir uždavinio su apribojimais stacionarieji taškai

Tolydžiai diferencijuojamos f -jos minimizavimo uždavinyje be apribojimų būtina optimumo sąlyga taške X^* yra nulinis gradientas $\nabla f(X^*)=0$ Taškas X^* vadinamas stacionariuoju. [4].

Pirmiausia panagrinėkime paprastą minimizavimo uždavinį:

$$\min_{X \in D1} f(X) \quad (2.8)$$

Kai leistinąją sritį $D1$ nusako vienas lygybinis apribojimas:

$$h_1(X) = 0 \quad (2.9)$$

Ieškodami tikslo funkcijos ekstremumo, judame daugiamačiu paviršiumi

$$D1 = \{X : h_1(X) = 0\}$$

Analogiškai atvejui be apribojimų taškas X^* bus uždavinio (2.8),(2.9) stacionarusis taškas, jei gradiento $\nabla f(X^*)$ projekciją į paviršių DI bus nulinė, tiksliau, bus nulinė į projekciją į hiperboliškumą, liečiančią paviršių DI taške X^* . Tai bus jei gradientas $\nabla f(X^*)$ bus lygiagretus paviršiaus DI normaliai $\nabla h(X^*)$ t.y. jei

$$\nabla f(X^*) = \lambda \nabla h(X^*) \quad (2.10)$$

čia λ skaliaras, vadinamas Lagranžo daugikliu [4].

Taigi stacionarusis taškas yra taškas, tenkinantis šias sąlygas:

$$\begin{cases} \nabla f(X) = \lambda \nabla h(X) \\ h(X) = 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Sąlygas galima užrašyti naudojant Lagranžo funkciją $L(X, \lambda)$:

$$L(X, \lambda) = f(X) - \lambda h(X). \quad (2.12)$$

Taškai tenkinantys sąlygą:

$$\nabla L(X, \lambda) = 0 \quad (2.13)$$

yra stacionarūs nes:

$$\nabla_x L(X, \lambda) = \nabla f(X) - \lambda \nabla h(X) = 0 \quad \text{ir} \quad \nabla_\lambda L(X, \lambda) = h(X) = 0$$

t.y. sistemos (2.13) lygtys yra tapačios sistemos (2.11) lygtimis.

Matome, kad uždaviniui be apribojimų suformuluotą būtinąją optimumo sąlygą galime transformuoti į uždavinio su apribojimų sąlyga (2.13), tikslo funkciją pakeisdami Lagranžo funkcija [4].

Daugelio lygybinių apribojimų (uždavinys (2.5)-(2.7)) leistinoji sritis yra apribojimų paviršių sankirtą. Analogiškai nagrinėtam atvejui tikslo funkcijos gradiento projekciją į tą sankirtą stacionariame taške turi būti nulinė. Tai yra tikslo funkcijos gradientas turi būti lygiagretus kuriai nors apribojimų funkcijų gradientų tiesiniai kombinacijai:

$$\nabla f(X) = \sum_{j=1}^{m_2} \lambda_j \nabla h_j(X). \quad (2.14)$$

Taigi šiuo atveju Lagranžo funkcija yra:

$$L(X, \Lambda) = f(X) - \sum_{j=1}^{m_2} \lambda_j h_j(X). \quad (2.15)$$

čia vektorius $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_{m_2})$.

Lagranžo daugiklių metodas susideda iš $n+m_2$ lygčių sistemos sprendimo:

$$\nabla L(X, \Lambda) = \nabla \left(f(X) - \sum_{j=1}^{m_2} \lambda_j h_j(X) \right) = 0 \quad (2.16)$$

Sprendinių (X^*, Λ^*) komponentai X^* yra optimizavimo uždavinio su lygybiniais apribojimais stacionarieji taškai. Dalis jų gali būti uždavinio (2.5)-(2.7) lokaliųjų minimumų taškai, jei tokių minimumų yra. Akivaizdu, kad jei tikslo ir apribojimų yra sudėtingos netiesinės funkcijos, tai išspręsti sistemą (2.16) nelengva [4].

2.1.2. Lagranžo funkcija nelygibinių apribojimų atveju

Tarkime turime tą patį uždavinį kaip ir prieš tai skyriuje (2.5)-(2.7). Leistinojoje srityje nelygibiniai apribojimai $g_i(X) \geq 0, i = \overline{1, m_1}$ gali būti lygūs nuliui (tada jie vadinami aktyviais) arba didesni už nulį – tai yra neaktyvūs apribojimai [4].

Akivaizdu, kad pirmuoju atveju Lagranžo funkciją formuojama panašiai kaip lygibinių apribojimų atveju: gradientas $\nabla f(X^*)$ stacionariajame taške X^* turi būti statmenas aktyviems apribojimams, bet leistinosios srities D ribiniame stacionariajame taške tikslo funkcija turi mažėti tik srities D išorės kryptimi t.y. $\nabla f(X^*)$ turi rodyti į leistinosios srities vidų (antigradientas – į išorę). Kitaip sakant, gradientas $\nabla f(X^*)$ turi rodyti aktyvių apribojimų funkcijų $g_i(X)$ didėjimo kryptimi, nes priešingu atveju sprendinį X^* būtų galima pagerinti. Šias sąlygas patenkinsime, Lagranžo funkcijoje imdami tik neneigiamus Lagranžo daugiklius $\mu_i \geq 0, i = \overline{1, m_1}$. Todėl stacionariajame taške $\nabla f(X^*)$ bus lygus $\nabla g_i(X^*)$, $i = \overline{1, m_1}$ tiesinei kombinacijai su neneigiamais daugikliais [4].

Antruoju atveju neaktyvūs apribojimai neturi jokios įtakos nei taško stacionarumo sąlygoms, nei $\nabla f(X^*)$ reikšmei. Jei stacionariajame taške visi apribojimai neaktyvūs, tai turime atvejį, ekvivalentų optimizavimui be apribojimų, kai $\nabla f(X^*) = 0$. Taigi neaktyvių apribojimų Lagranžo koeficientai turi būti nuliniai. Tai pasieksime su sąlyga.

$$\mu_i g_i(X) = 0, i = \overline{1, m_1} \quad (2.17)$$

t.y. arba apribojimas yra nenulinis (neaktyvus) ir atitinkamas $\mu_i = 0$, arba $g_i(X) = 0$ ir μ_i teigiamas.

Taigi šiuo atveju Lagranžo funkcija tokia:

$$L(X, \Lambda, M) = f(X) - \sum_{j=1}^{m_1} \mu_j g_j(X) - \sum_{j=1}^{m_2} \lambda_j h_j(X) \quad (2.18)$$

čia $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_{m_2})$ ir $M = (\mu_1, \dots, \mu_{m_1})$.

Matyti, kad nelygibinių apribojimų atveju Lagranžo daugiklių metodas susiveda į šios lyčių sistemos sprendimą kintamųjų X, Λ ir M atžvilgiu:

$$\nabla L(X, \Lambda, M) = \nabla \left(f(X) - \sum_{j=1}^{m_1} \mu_j g_j(X) - \sum_{j=1}^{m_2} \lambda_j h_j(X) \right) = 0 \quad (2.19)$$

kur: $\mu_i g_i(X) = 0$, o $\mu_i \geq 0$. [4].

Remiantis šiomis sistemomis grindžiami kitų optimizavimo metodų optimumo sąlygos.

3. BŪKLĖS VERTINIMO UŽDAVINYS NAUDOJANT ENTROPIJOS LYGTIS

Sutrikusių matavimų analizė, kaip matysime tolimesniame tyrime parodys, kad būklės vertinimo uždavinys, paremtas Gauso – Niutono ar Niutono – Rafsono metodais, yra labai jautrus sutrikusiems matavimams. Sutrikus matavimams stipriai apkrautose linijose paklaida atsiranda daugelyje išskaičiuotų matavimų, ir normaliomis sąlygomis įvertinti tinklo būklę sudėtingą arba visiškai neįmanomą. Dėl šių priežasčių buvo nuspręsta ieškoti būdų, naujų algoritmų mažiau jautrių sutrikusiems matavimams. Būtent šioje vietoje buvo nuspręsta mėginti pritaikyti entropijos lygtis sprendžiant būklės vertinimo uždavinį. Panašus tyrimas aprašytas šaltinį [5].

3.1. Nuolatinės srovės tinklo būklės vertinimo uždavinys naudojant entropijos lygtis

Šiame uždavinyje naudosime Gauso normaliojo pasiskirstymo funkciją:

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.1)$$

kur:

x – kintamasis;

μ – vidurkis;

σ – standartinis nuokrypis.

Uždavinys formuojamas sudarinėjant lygtis kurios sieja būklės kintamuosius su matavimo dydžiais panaudojant (3.2), (3.3) ir (3.1) formules:

$$P = B\theta \quad (3.2)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{X_{ij}} (\theta_i - \theta_j) \quad (3.3)$$

$$p = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-B\theta)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.4)$$

Panaudojus entropijos lygtis sudaroma tikslo funkciją:

$$L = \sum_{i=1}^n p_i \cdot \log(p_i) \quad (3.5)$$

Tikslo funkcija yra diferencijuojama būklės kintamųjų ir standartinio nuokrypio atžvelgiu, lygtys prilyginamos nuliui ir sprendžiama lygčių sistema. Sprendžiant lygčių sistemą susiduriama su problema, kad lygčių sistemos sprendimas užima labai daug laiko, nes tikslo funkcijoje yra ir logaritminės ir eksponentinės lygtys, dėl šios priežasties reikia panaudoti daug greitesnius lygčių sistemos sprendimo metodus. Vieni tokių yra Gauso-Zeidelio arba Niutono

Rafsono metodai. Šiuo konkrečiu atveju naudojamas antrasis metodas spręsti sudarytas lygčių sistemas.

3.2. Kintamosios srovės tinklo būklės vertinimo uždavinys panaudojant entropijos lygtis

Pritaikius entropijos lygtis spręsti nuolatinės srovės būklės vertinimo uždavinį, tos pačios formulės buvo pritaikytos sudarinėjant kintamos srovės būklės vertinimo uždavinį paremta entropijos lygtimis. Šiame skyriuje analizuosime galimybes pritaikyti entropines lygtis sprendžiant kintamos srovės būklės vertinimo uždavinį. Uždaviniui formuluoti naudosime tas pačias funkcijas kaip ir 3.1 skyriuje tai yra (3.1), (3.4) ir (3.7).

Sudarant tikslo funkciją ir matavimų matricą kintamos srovės tinklo būklės vertinimo uždavinyje naudosime ne galios srautus linijose o linijų sroves. Linijos srovę galime surasti sekančiai:

$$I_{ij} = y_{ij} \cdot (U_i - U_j) \quad (3.6)$$

kur:

y_{ij} – tinklo linijų laidžiai;

U_i - įtampa mazge;

Šiame uždavinyje matavimų vektorių sudarys linijos srovės, o būklės kintamuosius mazgų įtampos ir įtampų kampai:

$$I_{matuota} = [I_{ij}] \quad (3.7)$$

$$x = [U_i e^{-j\theta_{i1}}] \quad (3.8)$$

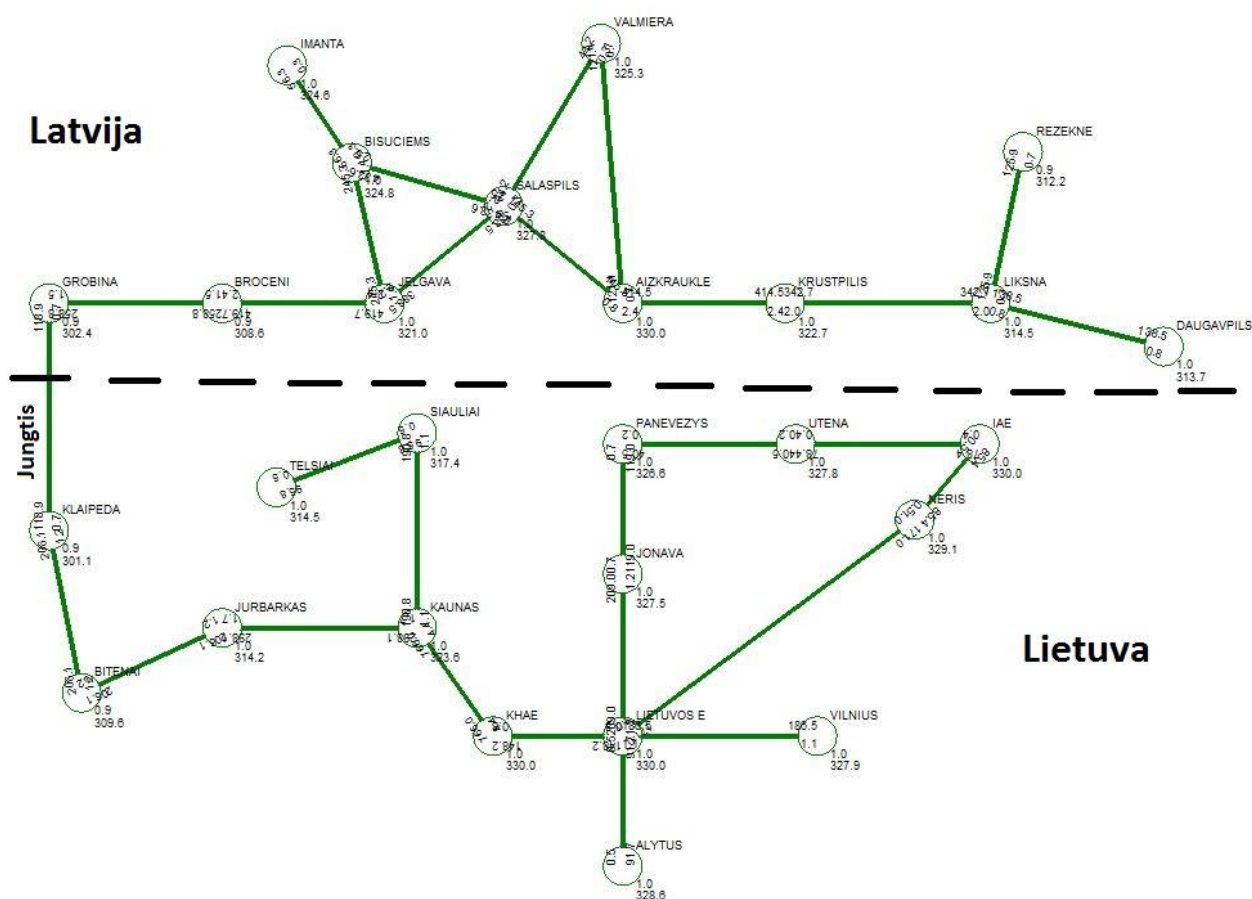
Panaudojus (3.1) formulė galime sudaryti funkcijas siejančias būklės kintamuosius su matavimų matricos elementais:

$$p = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(I_{ij} - (y_{ij} \cdot (U_i - U_j)))^2}{2\sigma^2}} \quad (3.9)$$

Toliau uždavinys formuluojamas analogiškai kaip ir 3.1 skyriuje. Sudaroma tikslo funkcija L (3.5) kuri diferencijuojama būklės kintamųjų ir standartinio nuokrypio atžvilgiu. Gautos išvestinės prilyginamos 0 ir ieškoma ekstremumo taškų. Šiame uždavinyje taip pat naudotas Niutono Rafsono metodas, sprendžiant sudarytą lygčių sistemą.

4. TIRIAMASIS DARBAS

Tyrimui atlikti bus naudojamas Lietuvos ir Latvijos 330 kV elektros perdavimo tinklo modelis (4.1 pav.) sumodeliuotas programa PSS/E, kuriame Lietuvos ir Latvijos elektros sistemos sujungtos viena jungtimi kurios pralaidumas yra sumažintas ir Matlab būklės vertinimo uždavinio algoritmas. Panašios analizės tik su kitokia tinklo topologija yra atliktos [6]-[9] tyrimuose. Elektros tinklą sudaro 27 mazgai, iš kurių 15 aprašo Lietuvos 330kV tinklą, o likusieji Latvijos 330kV tinklą. Tinkle yra 4 generatoriai, du Lietuvos tinkle ir du Latvijos tinkle. Abi sistemas jungia vieną sumažinto pralaidumo liniją, Klaipėda – Grobina. Tinklas subalansuotas taip, kad Lietuvos sistemoje yra galios trūkumas ir jungtimi teką 62 MVA.



4.1 pav. Tiriamasis tinklas

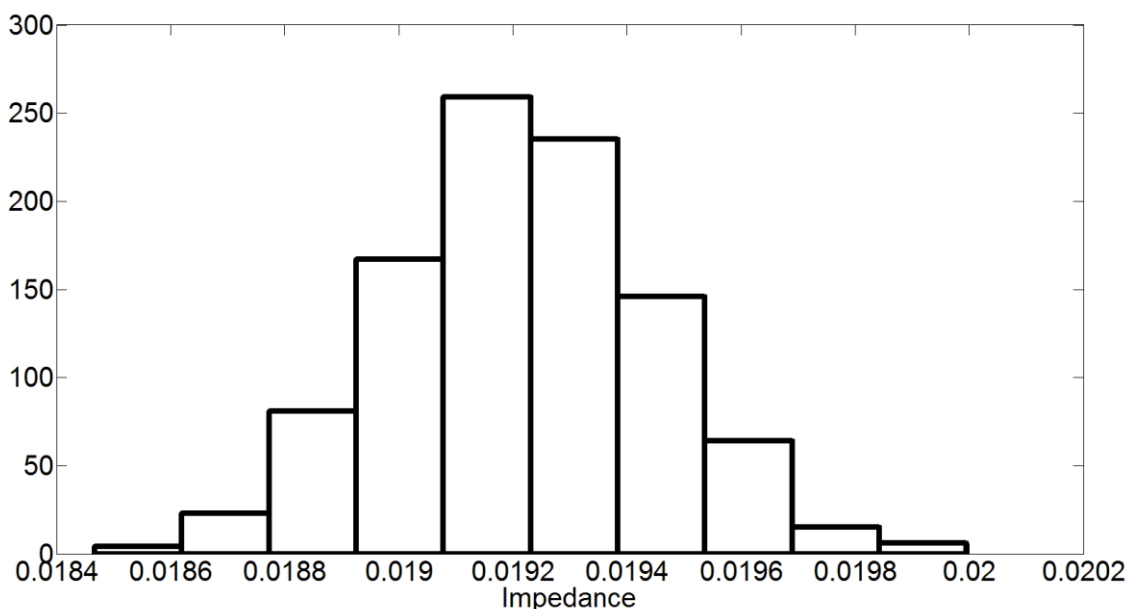
Šis tinklas buvo pasirinktas ir sumodeliuotas norint sudaryti Matlab algoritmą ir iširti jo reakciją į tam tikrus neapibrėžtumus. Dvi elektros sistemos sujungtos viena jungtimi norint imituoti silpną ryšį tarp sistemų (ang. bottleneck). Realiame tinkle tarp šių dviejų sistemų ribojimų nėra ir sistemos sujungtos stipriu ryšiu. Pažvelgus į Baltijos šalių elektros sistemas

tokių vietų yra, vieną iš jų Latvijos – Estijos pjuvis. Įgyvendinant vis daugiau strateginių projektų tokių kaip Nordbalt, Estlink1, Estlink2, Litpolink1 ir Litpolink2 ir importuojant didelius kiekius elektros energijos iš Skandinavijos ir Kontinentinės elektros energetikos tinklų gali atsirasti ir daugiau „siaurų“ vietų kurios gali kelti daug problemų.

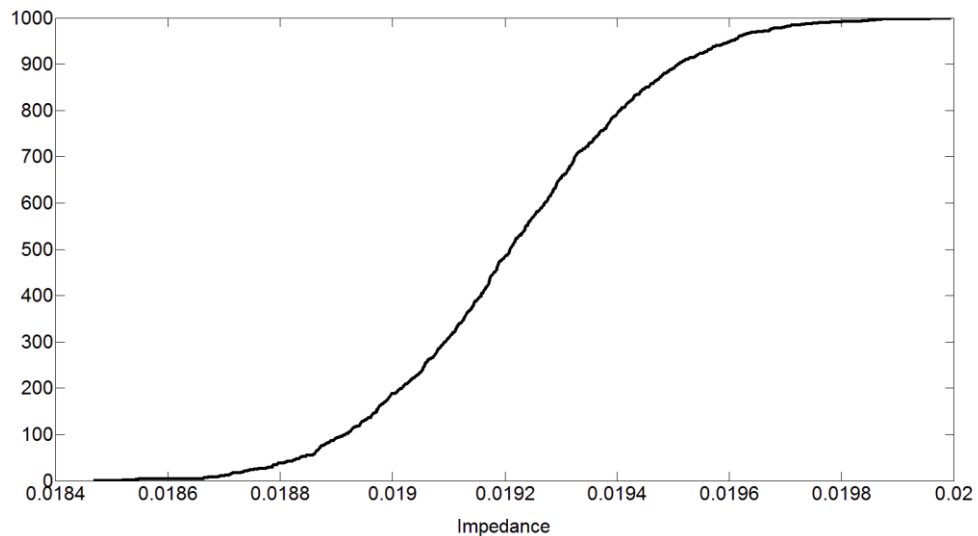
4.1. Tinklo varžų ir matavimų neapibrėžtumo įtaką skaičiavimo rezultatams

4.1.1. Tinklo varžų neapibrėžtumo įtaka skaičiavimo rezultatams

Tiriama būklės vertinimo algoritmo reakcija į tinklo varžų neapibrėžtis. Tyrimas atliktas pasinaudojus Gauso normalųjį skirstinį įvedant 5%, 10% ir 20% neapibrėžtį į tinklo varžas. Vienos tiriamojo tinklo šakos varžos kitimas esant 5% neapibrėžčiai pavaizduota 4.2 ir 4.3 pav. Vidutinė šakos varžos vertė 0.0192 OHM, dispersija 5%.



4.2 pav. Tinklo varžos 5% neapibrėžties pasiskirstymas



4.3 pav. Tinklo varžos 5% neapibrėžties pasiskirstymas

Neapibrėžtys įvedamos į visas tinklo linijas. Atliekant skaičiavimus naudojamas Monte Carlo metodas. Skaičiavimai tęsiami, tol, kol vidutinė būklės vertinimo metodo paklaida nusistovi. Šiuo metodu atliekama 1000 arba daugiau iteracijų. Analogiški skaičiavimai atliekami su 5%, 10% ir 20% neapibrėžtimis. Kiekvienoje Monte Carlo iteracijoje yra ieškoma paklaidos tarp realių ir įvertintų matavimų vidurkio ir standartinio nuokrypio (4.1-4.3).

$$|\varepsilon_i| = \frac{|m_i| - |h_i|}{|h_i|} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

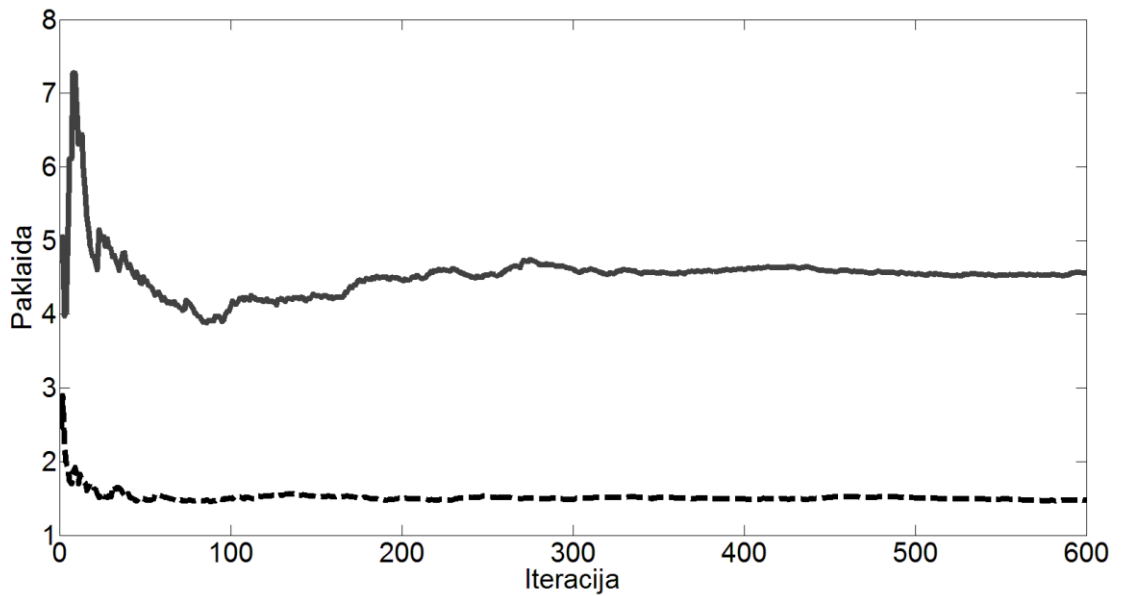
$$\mathbf{A} = \sum_{\xi} \frac{1}{\xi} \cdot (\varepsilon_{\xi} + \varepsilon_{\xi+1}) \quad (4.2)$$

$$\sigma = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})^2 \quad (4.3)$$

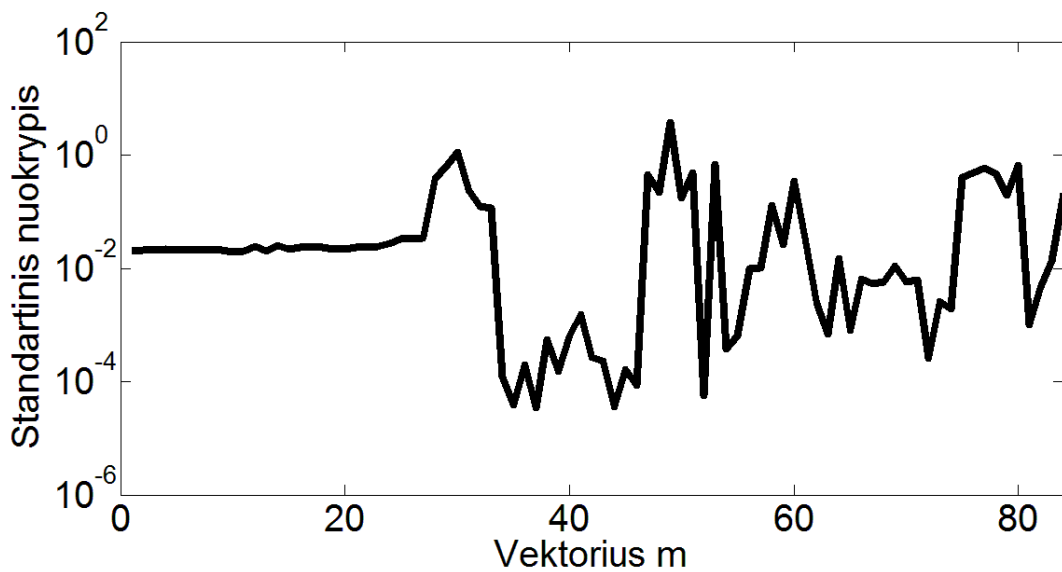
Skaičiavimo rezultatai pateikti 4.1 lentelėje.

4.1. lentelė. Skaičiavimų rezultatai įvertinus neapibrėžtis varžose

Varžų neapibrėžtis	Būklės vertinimo algoritmo paklaida	Būklės vertinimo algoritmo standartinis nuokrypis
5%	4.7%	3.6
10%	9.4%	8.5
20%	21.1%	24.2



4.4 pav. 2 matavimų maksimalios paklaidos vidurkio kitimas Monte Carlo metodu esant 5% neapibrėžčiai



4.5 pav. Matavimų vektoriaus m kiekvieno kanalo standartinis nuokrypis

Varžų neapibrėžtis praktiškai turi tiesinę įtaką į vidutinę algoritmo neapibrėžtį, apskaičiuotą Monte Carlo metodu.

4.1.2. Matavimų vektoriaus neapibrėžtumo įtaka skaičiavimo rezultatams

Šioje dalyje atliekami identiški skaičiavimai kaip ir 4.1.1 skyriuje, tik šiuo atveju 5%, 10% ir 20% neapibrėžtys įvedamos į matavimų vektorių m . Neapibrėžtys generuojamos atsitiktiniu būdu kiekvienam matavimui, normaliniu skirstiniu, su vidurkiu m ir dispersija 5%, 10% ir 20%.

Matavimų vektorių **m** sudaro 85 matavimai, gauti iš perdavimo tinklo modelio sumodeliuoto programa PSS/E (4.1 pav). Matavimai nuo 1 – 27 apibrėžia mazgų įtampas, 28 – 56 aktyviosios galios srautus perdavimo tinkle, 57 – 85 reaktyviosios galios srautus perdavimo tinkle. Matavimų vektorių **m** reikšmės pateiktos 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Matavimų vektorių **m** reikšmės

U	From	To	Pij	From	To	Qij	From	To
1.0000	1	0	0.328	1	2	0.306	1	2
0.9934	2	0	-0.473	1	3	0.123	1	3
0.9973	3	0	-0.173	2	4	0.152	2	4
0.9897	4	0	-0.673	4	6	0	4	6
1.0000	5	0	-0.974	3	5	-0.038	3	5
0.9925	6	0	1.180	5	6	0.190	5	6
0.9958	7	0	0.501	5	7	0.155	5	7
0.9937	8	0	1.002	5	8	0.364	5	8
1.0000	9	0	0.842	5	9	-0.098	5	9
0.9806	10	0	3.941	9	10	1.908	9	10
0.9521	11	0	1.414	10	11	0.890	10	11
0.9619	12	0	1.008	10	12	0.358	10	12
0.9382	13	0	0.902	11	13	0.667	11	13
0.9530	14	0	0.898	13	15	0.644	13	15
0.9123	15	0	0.502	12	14	0.161	12	14
0.9934	16	0	0.673	25	27	0.133	25	27
1.0000	17	0	0.580	25	26	0.482	25	26
0.9729	18	0	1.717	24	25	0.850	24	25
0.9353	19	0	2.116	17	24	1.066	17	24
0.9165	20	0	0.583	17	23	0.376	17	23
0.9842	21	0	-0.799	16	17	-0.205	16	17
0.9835	22	0	0.069	16	23	0.241	16	23
0.9858	23	0	2.276	16	21	1.023	16	18
0.9779	24	0	1.955	16	18	0.940	16	21
0.9530	25	0	0.300	21	22	-0.625	18	21
0.9507	26	0	-1.212	18	21	0.100	21	22
0.9462	27	0	1.994	18	19	1.213	18	19
			1.299	19	20	0.475	19	20
			-0.611	15	20	0.104	15	20

Skaičiavimų rezultatai pateikti 4.3 lentelė

4.3 lentelė. Skaičiavimų rezultatai įvertinus neapibrėžtis matavimų vektoriuje

Matavimų neapibrėžtis	Būklės vertinimo algoritmo paklaida	Būklės vertinimo algoritmo standartinis nuokrypis
5%	4.5%	3.7
10%	9.9%	7.9
20%	21.6%	22.5

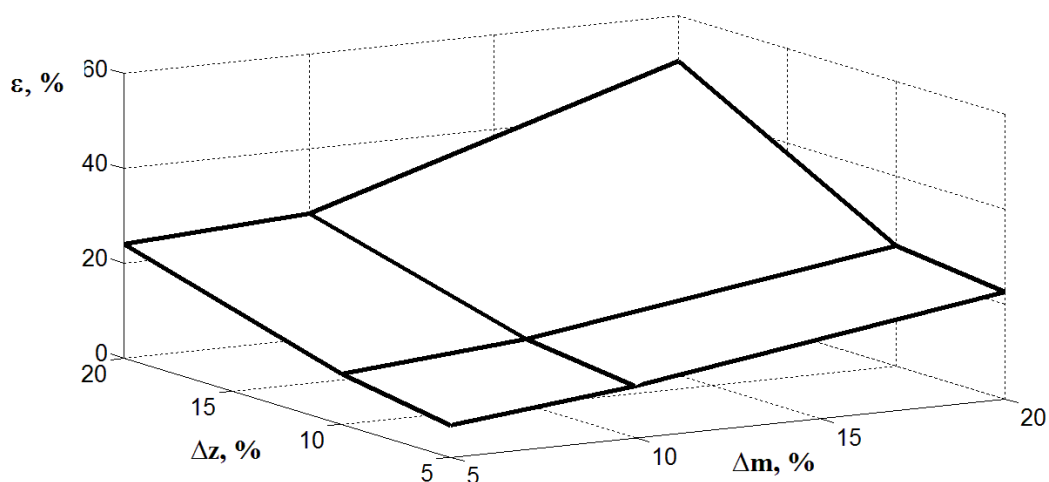
Įvedus neapibrėžtis į matavimo matricia \mathbf{m} , buvo gauti analogiški rezultatai kaip ir tiriant varžų neapibrėžtumo įtaką, gauta tiesinė įtaka į vidutinę algoritmo neapibrėžtį, apskaičiuotą Monte Carlo metodu.

4.1.3. Matavimų ir tinklo varžų įtaka skaičiavimo rezultatams

Šioje dalyje bus iširta būklės vertinimo algoritmo (1.4-1.8) reakciją į kompleksinius neapibrėžtumus. Tai yra kai įvedama neapibrėžtis ne tik į matavimų vektorių \mathbf{m} bet ir į tinklo varžų matricią \mathbf{z} . Skaičiavimų rezultatai pateikti 4.4 lentelėje.

4.4 lentelė. Skaičiavimų rezultatai įvertinus neapibrėžtis varžose ir matavimuose

Neapibrėžtis Δz	Neapibrėžtis $\Delta \mathbf{m}$	Būklės vertinimo algoritmo paklaida	Būklės vertinimo algoritmo standartinis nuokrypis
5%	5%	6.7%	5.3
5%	10%	10.9%	9.1
5%	20%	22.5%	25.9
10%	5%	10.6%	8.7
10%	10%	13.8%	13.6
10%	20%	25.4%	30.3
20%	5%	22.3%	28.1
20%	10%	26.5%	52.8
20%	20%	50.4%	274.4



4.6 pav. Maksimalios paklaidos kitimas esant tinklo varžų ir matavimų neapibrėžtims

Prie didelių neapibrėžčių standartinis nuokrypis įgauna dideles reikšmes, tai reiškia, kad skaičiuojant netiksliai matavimo paklaidos kinta dideliame intervale ir apie tinklo būklę tuomet spręsti sudėtinga.

4.2. Sutrikusių matavimų analizė

Šioje dalyje tiriamė būklės vertinimo algoritmo reakciją į sutrikusius matavimus. Sutrikusių matavimų analizė bus atlikta imituojant keletą skirtingų situacijų: 1. Sutriko įtampos matavimai. 2. Sutriko aktyviosios galios srauto matavimai. 3. Sutriko reaktyviosios galios srauto matavimai. Matavimų sutrikimus imituosime Matlab algoritmę ir stebėsime maksimalios paklaidos kitimą laike.

4.2.1. Sutriko įtampos matavimai

Imituojama, kad sutrinka visi įtampų matavimai iš eilės (1-27) iš matavimų matricos **m** (4.2 lentelė). Prieš sutrikimą didžiausia skaičiavimų paklaida tarp realių ir įvertintų matavimų yra 0.3%. Sutrikus įtampos matavimams, maksimali paklaida tarp realių ir įvertintų matavimų kinta intervale nuo 0.5% iki 61.6%. Tai lėmė, kad jungtyje tarp Lietuvos ir Latvijos sutrikus matavimas būklės vertinimo uždavinys srautą jungtyje suskaičiavo 4 kartus mažesnį, negu normalaus darbo režimu. Dingus matavimo sutrikimui maksimali paklaida nusistovi ties 0.3%. Remiantis tuo, kad sutrikus įtampos matavimas paklaida pakinta dideliame intervale buvo tirta algoritmo reakciją, kuomet duotajame tinkle jungtimi teka ne 62MVA o 110MVA ir 248 MVA. Gauti rezultatai parodė, kad didėjant jungties apkrovimui ir sutrikus įtampos matavimams paklaida tarp realių ir įvertintų matavimų mažėja

4.2.2. Sutriko aktyviosios galios srauto matavimai

Imituojama, kad sutrinka visi po vieną iš eilės aktyvios galios srauto matavimai (28-56) iš matavimų vektoriaus **m**. Atlikus skaičiavimus gauta, kad didžiausia paklaida tarp realių ir įvertintų matavimų prieš sutrikimą yra 0.3%. Sutrikus matavimas paklaida kinta plačiame intervale nuo 0.5% iki 353.5%. Didžiausia paklaida pasireiškė tuose aktyviosios galios srauto matavimuose, kurie buvo arčiausiai sutrikusių matavimų.

4.2.3. Sutriko reaktyviosios galios srauto matavimai

Imituojama ta pati situaciją kaip ir 4.2.2 skyriuje, tik šiuo atveju sutrinka reaktyviosios galios srauto matavimai (57-85) iš matavimų vektoriaus **m**. Atlikus skaičiavimus gauta, kad didžiausia paklaida tarp realių ir įvertintų matavimų iki sutrikimo yra 0.3%. Sutrikus matavimas

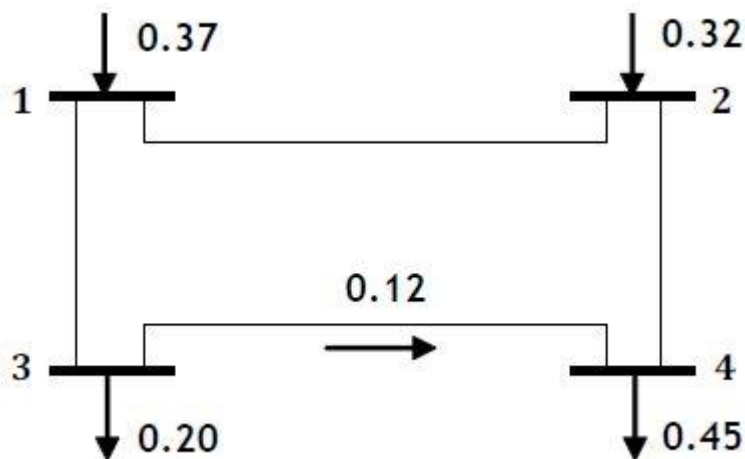
paklaida kinta taip pat plačiame intervale nuo 0.5% iki 275.6%. Didžiausios paklaidos pasireiškė tuose reaktyviosios galios srauto matavimuose, kurie yra arčiausiai sutrikusių matavimų.

Sąlyginai didelės skaičiavimų paklaidas matavimuose lėmė tai, kad tinklas nėra stipriai apkrautas ir srautai kai kuriose iš linijų yra maži. Dėl to pakitus srautui santykinai nedideliame intervale gaunamos didelės paklaidos.

Skaičiavimai buvo atlikti programa „Matlab“ programos kodas pateiktas priede nr. 1.

4.3. Nuolatinės srovės būklės vertinimo uždavinio paremto entropijos lygtimis palyginimas su įprastu būklės vertinimo uždaviniu

Tarkime turime nesudėtingą tinklą, pavaizduotą 4.7 pav. Visų linijų varža lygi $z = j0.1 \text{ p.u.}$. Tinklas subalansuotas taip, kad generacija (0.69 p.u.) ir apkrova (0.65 p.u.). Kiekvieno matavimo paklaidos priimamos vienodos.



4.7 pav. Nuolatinės srovės tiriamasis tinklas

Norint išspręsti uždavinį turime suformuoti funkcijas kurios sietų būklės kintamuosius su išmatuotais dydžiais. Remiantis išvestomis formulėmis [5] galime užrašyti išraišką:

$$P = B\theta \quad (4.4)$$

kur:

P – aktyviosios galios matavimas;

B – mazginių laidžių matricą sudarytą iš tinklo varžų matricos ir tinklo incidencijų matricos;

θ – mazginių įtampų kampas.

Galios srauto matavimas gali būti išreiškiamas sekančiai:

$$P_{ij} = \frac{1}{X_{ij}}(\theta_i - \theta_j) \quad (4.5)$$

Būklės vertinimo uždavinio sprendinys gaunamas išsprendus lygtį:

$$\theta = (M^T \cdot M)^{-1} \cdot M^T \cdot Z \quad (4.6)$$

kur:

Z – matavimų matrica.

M – matrica jungianti matavimus su būklės kintamaisiais, panaudojus formules (4.4) ir (4.5)

θ – mazginių įtampų kampas.

Išsprendę būklės vertinimo uždavinį gauname tokius mazginių įtampų kampus:

$$\theta = \begin{bmatrix} -0.005286 \\ -0.031 \\ -0.041 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Skaičiavimai atlikti programa „Matlab“ programos kodas pateiktas priede nr. 2.

Išsprendus 4.7 pav. Pateiktą nesudėtingą DC tinklą entropijos lygčių metodu aprašytu 3.1 skyriuje, buvo gauti rezultatai pateikti žemiau:

$$\theta = \begin{bmatrix} -0.00521 \\ -0.0304 \\ -0.0410 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

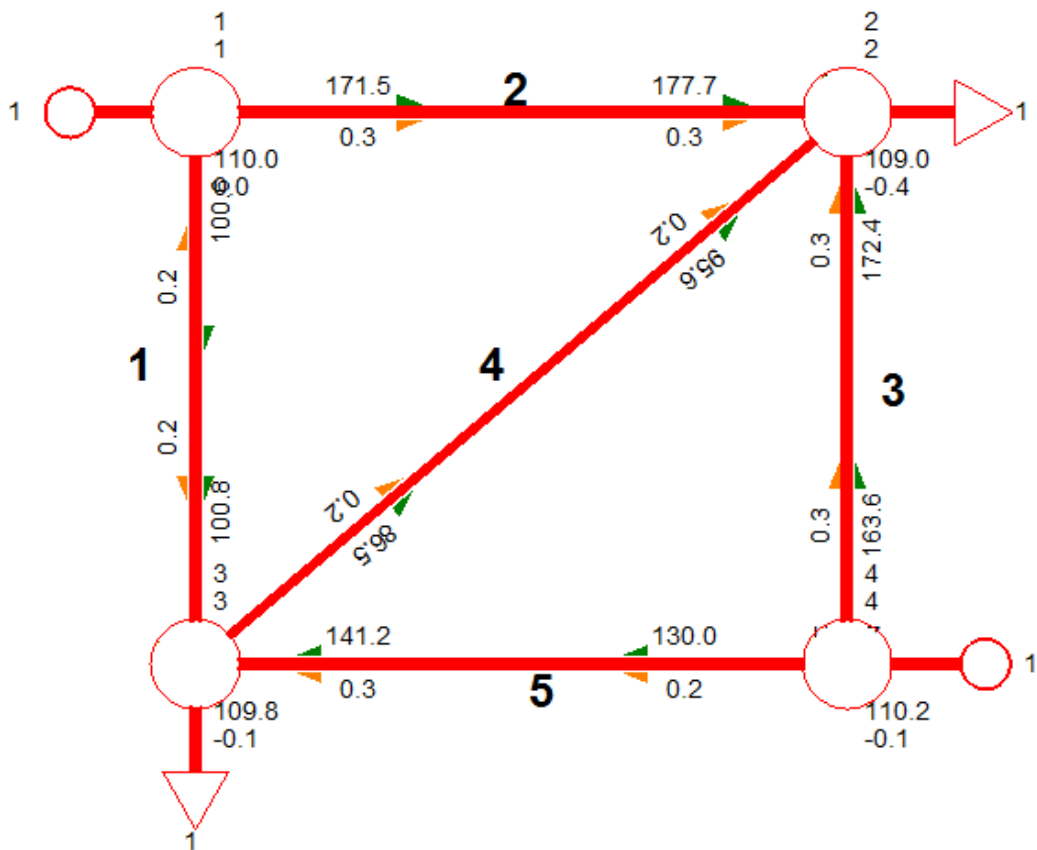
Iš gautų rezultatų matyti, kad abiem atvejais surasti mazginių įtampų kampai (4.7) ir (4.8) skiriasi tik apie 1,5 - 2%.

Skaičiavimai atlikti programa „Matlab“ programos kodas pateiktas priede nr. 2 ir 3.

4.4. Kintamos srovės būklės vertinimo uždavinio paremto entropijos lygtimis palyginimas su įprastu būklės vertinimo uždaviniu.

Peržvelgus 4.3 skyrių buvo įsitikinta, kad entropijos lygtis, galima panaudoti sprendžiant nuolatinės srovės tinklo, būklės vertinimo uždavinį. Šiame skyriuje analizuosime galimybes pritaikyti entropines lygtis sprendžiant kintamos srovės būklės vertinimo uždavinį ir lyginsime gautus rezultatus su įprastu būklės vertinimo uždaviniu, siekiant patikrinti naujojo algoritmo adekvatumą.

Tarkime turime nesudėtingą tinklą, pavaizduotą 4.8 pav. žemiau:



4.8 pav. Tiriamasis kintamos srovės 4 mazgų tinklas

Tinklas sudarytas iš 4 mazgų. Tinkle yra 2 apkrovos, kurių bendra galia yra 111.8 MVA ir du generatoriai mazge 1 ir 4..

Skaičiavimai atliekami naudojant santykinių vienetų sistemą laikant, kad $S_b=100\text{MVA}$ ir $U_b=110\text{kV}$.

Skaičiavimo rezultatai, gauti naudojant įprastą būklės vertinimo uždavinį Gauso-Niutono metodu ir būklės vertinimo uždavinį išspręsta panaudojant entropijos lygtis, pateikti 4.5 lentelėje.

4.5 lentelė. Skaičiavimo rezultatai

Būklės kintamieji	BVŽ Gauso-Niutono metodu	BVŽ naudojant entropijos lygtis	Realūs matavimai
U_1	$109,99e^{-j0}$ kV	$110e^{j0}$ kV	$110e^{j0}$ kV
U_2	$109,02e^{-j0,43}$ kV	$109,22e^{-j0,53}$ kV	$108,96e^{-j0,41}$ kV
U_3	$109,79e^{-j0,11}$ kV	$109,81e^{-j0,093}$ kV	$109,82e^{-j0,11}$ kV
U_4	$110,14e^{-j0,038}$ kV	$110,04e^{j0,07}$ kV	$110,17e^{-j0,06}$ kV

Skaičiavimo rezultatai rodo, kad abiem metodais surasti būklės kintamieji praktiškai nesiskiria. Skirtumas tarp įvertintų būklės kintamųjų ir realių matavimų tradiciniame būklės vertinimo uždavinyje sudaro 0,05%. Būklės vertinimo uždavinio paremto entropijos lygtimis rezultatai nuo realių matavimų skiriasi 0,2%. Iš gautų rezultatų akivaizdu, kad būklės vertinimo uždavinys, paremtas entropijos lygtimis gali būti naudojamas tiriant tiek kintamos tiek ir nuolatinės srovės tinklų būklę.

4.4.1. Sutrikusių matavimų analizė būklės vertinimo uždavinio paremto entropijos lygtimis.

Būklės vertinimo uždavinyje paremto entropijos lygtimis, matavimų matricą \mathbf{m} sudaro tik linijų srovės, todėl šioje analizėje bus sutrikdomas kiekvienas srovės matavimas iš eilės po vieną ir atliekama tinklo būklės skaičiavimai. Gauti rezultatai pateikti 4.6 lentelėje.

4.6 lentelė. Skaičiavimų rezultatai sutrikus matavimams

Sutrikęs matavimas		Įvertintas U , kV	Realus U , kV	ΔU , %
I_{12}	U_1	$110e^{j0}$	$110e^{j0}$	0.000
	U_2	$109.75e^{-j0.21}$	$108.97e^{-j0.41}$	0.716
	U_3	$109.93e^{-j0.04}$	$109.82e^{-j0.11}$	0.100
	U_4	$110.28e^{j0.18}$	$110.18e^{j0.06}$	0.091
I_{13}	U_1	$110e^{j0}$	$110e^{j0}$	0.000
	U_2	$109.33e^{-j0.52}$	$108.97e^{-j0.41}$	0.330
	U_3	$110.04e^{j0.013}$	$109.82e^{-j0.11}$	0.200
	U_4	$110.24e^{j0.15}$	$110.18e^{j0.06}$	0.054
I_{23}	U_1	$110e^{j0}$	$110e^{j0}$	0.000
	U_2	$109.52e^{-j0.38}$	$108.97e^{-j0.41}$	0.555
	U_3	$109.88e^{-j0.07}$	$109.82e^{-j0.11}$	0.055
	U_4	$110.13e^{j0.09}$	$110.18e^{j0.06}$	0.045
I_{24}	U_1	$110e^{j0}$	$110e^{j0}$	0.000
	U_2	$109.28e^{-j0.56}$	$108.97e^{-j0.41}$	0.284
	U_3	$109.82e^{-j0.09}$	$109.82e^{-j0.11}$	0.001
	U_4	$110.08e^{j0.05}$	$110.18e^{j0.06}$	0.091
I_{34}	U_1	$110e^{j0}$	$110e^{j0}$	0.000
	U_2	$109.11e^{-j0.71}$	$108.97e^{-j0.41}$	0.128
	U_3	$109.88e^{-j0.06}$	$109.82e^{-j0.11}$	0.055
	U_4	$109.94e^{-j0.02}$	$110.18e^{-j0.06}$	0.218

Iš gautų rezultatų matyti, kad sutrikus matavimams, būklės vertinimo uždavinys paremtas entropijos lygtimis, tinklo būklę įvertina pakankamai tiksliai. Didžiausia paklaida tarp realių ir įvertintų matavimų sutrikus srovės matavimams yra 0.716%.

4.4.2. Skersinių talpių b_{sh} įtaka būklės vertinimo uždaviniui paremtam entropijos lygtimis analizė

Sudarant būklės vertinimo uždavinio algoritmą paremtą entropijos lygtimis, niekur nebuvo panaudota skersinės talpos b_{sh} išraiška. Jos sukeliama įtaka tinkle idealiu atveju turėtų atsispindėti srovės matavime, kurio atžvilgiu ir yra paremtas šis būklės vertinimo uždavinys. Norint pažiūrėti kokia įtaka skaičiavimo rezultatams turės skersinės talpos įtaka buvo atlikta analizė, kurios metu tinklo modelyje sudarytame programa PSS/E (4.8 pav) į kiekvieną liniją buvo įvedamos skirtingos b_{sh} reikšmės ir atliekami skaičiavimai. Skaičiavimų rezultatai pateikti 4.7 lentelėje.

4.7 lentelė. Skaičiavimo rezultatai prie įvairių b_{sh} verčių.

b_{sh} , p.u.	Realūs dydžiai		Įvertinti dydžiai	Paklaida
				ΔU , %
0	U_1	$110e^{j0}$ kV	$110e^{j0}$ kV	0.000
	U_2	$108.812e^{-j0.35}$ kV	$109.201e^{-j0.57}$ kV	0.357
	U_3	$109.714e^{j0.06}$ kV	$109.789e^{-j0.12}$ kV	0.068
	U_4	$110.022e^{j0.01}$ kV	$110.017e^{j0.01}$ kV	0.005
0.05	U_1	$110e^{j0}$ kV	$110e^{j0}$ kV	0.000
	U_2	$109.021e^{-j0.43}$ kV	$109.22e^{-j0.49}$ kV	0.183
	U_3	$109.857e^{-j0.12}$ kV	$109.833e^{-j0.11}$ kV	0.022
	U_4	$110.22e^{-j0.08}$ kV	$110.095e^{j0.03}$ kV	0.113
0.1	U_1	$110e^{j0}$ kV	$110e^{j0}$ kV	0.000
	U_2	$109.219e^{-j0.5}$ kV	$109.324e^{-j0.53}$ kV	0.096
	U_3	$110.011e^{-j0.18}$ kV	$109.9e^{-j0.04}$ kV	0.101
	U_4	$110.429e^{j0.16}$ kV	$110.156e^{j0.11}$ kV	0.247
0.15	U_1	$110e^{j0}$ kV	$110e^{j0}$ kV	0.000
	U_2	$109.428e^{-j0.58}$ kV	$109.42e^{-j0.47}$ kV	0.007
	U_3	$110.154e^{-j0.25}$ kV	$110.3071e^{j0.2}$ kV	0.139
	U_4	$110.627e^{-j0.24}$ kV	$110.4892e^{j0.33}$ kV	0.125
0.2	U_1	$110e^{j0}$ kV	$110e^{j0}$ kV	0.000
	U_2	$109.637e^{-j0.66}$ kV	$109.487e^{-j0.75}$ kV	0.137
	U_3	$110.308e^{j0.31}$ kV	$109.909e^{-j0.1}$ kV	0.362
	U_4	$110.836e^{j0.33}$ kV	$110.355e^{-j0.004}$ kV	0.434

Skaičiavimo rezultatai rodo, kad būklės vertinimo uždavinys paremtas entropijos lygtimis pakankamai gerai įvertina įtampas kintant skersiniam linijos talpiui. Skaičiavimo paklaida tarp realių ir įvertintų matavimų kinta nuo 0 iki 0,434%.

Būklės vertinimo uždavinys paremtas entropijos lygtimis, pakankamai tiksliai nustato mažos elektros sistemos būklę. Skaičiavimo paklaidos tarp realių ir įvertintų matavimų daugeliu atvejų neviršiję 1%. Norint labiau išanalizuoti šio tipo būklės vertinimo uždavinį ateityje reiktų pritaikyti algoritmą daug sudėtingesnėms sistemoms, tokioms kaip 4.1 pav. Pritaikius algoritmą sudėtingoms sistemoms būtų galima atlikti analogiškus tyrimus kaip aprašyta 4.1- 4.2 ir 4.4 skyriuose ir nustatyti šio algoritmo privalumus ir trūkumus.

Skaičiavimai atlikti programa „Matlab“ programos kodas pateiktas priede nr. 4.

IŠVADOS

1. Atlikus neapibrėžtumo analizę nustatyta, kad varžų ir matavimų neapibrėžtys turi tiesinę įtaką į algoritmo vidutinę neapibrėžtį naudojant Monte Carlo metodą.
2. Varijuojant įvairias neapibrėžtis gauta, kad prie didelių neapibrėžčių gaunami dideli standartiniai nuokrypiai, kurie parodo, kad atliekant Monte Carlo metodą paklaidą kinta plačiame intervale ir tokiais atvejais apie tinklo būklę spręsti sudėtinga.
3. Atlikus sutrikusių matavimų analizę paaiškėjo, kad didelės algoritmo skaičiavimo paklaidas lėmė tai, kad tinklas yra mažai apkrautas. Linijose kurių apkrovimas mažas, pasikeitus srautui sąlyginai nedaug, gaunamos didelės absoliutinės paklaidos.
4. Nustatyta, kad esant mažai jungties apkrovai ir sutrikus įtampoms generuojančiuose mazguose, skaičiavimo paklaida išauga kelis kartus daugiau lyginant su labiau apkrauta jungtimi.
5. Atlikus būklės vertinimo uždavinio paremto entropijos lygtimis skaičiavimus ir palyginus gautus rezultatus su standartiniu būklės vertinimo uždaviniu bei realiais matavimais nustatyta, kad didžiausia paklaida tarp skaičiavimo rezultatų ir matavimų yra 0.2%.
6. Būklės vertinimo uždavinio paremto entropijos lygtimis sutrikusių matavimų analizė parodė, kad metodas esant mažai elektros tinklo konfigūracijai yra mažiau jautrus sutrikusiems matavimams, didžiausia paklaida tarp realių ir įvertintų matavimų sudaro mažiau negu 1%.
7. Atlikus skersinių talpių b_{sh} įtakos analizę nustatyta, kad kintant b_{sh} vertei nuo 0 iki 0,2 p.u. didžiausia algoritmo paklaida tarp realių ir įvertintų matavimų sudarė 0.434%. Galima teikti, kad daugeliu atvejų atliekant skaičiavimus, b_{sh} įtakos galima nevertinti.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Ali Abur, Antonio Gomez Exposito, Power System State Estimation: Theory and Implementation. USA, 2004, p. 1–30
2. Monticelli, A. State Estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach. Brazil, 1999, p. 16-28.
3. Aksomaitis, A. Tikimybių teorija ir statistika, vadovėlis aukštųjų mokyklų studentams. Kaunas: Technologija, 2000, p 155-158.
4. Dzemyda, G., Šaltenis, V., Tiešis, V. Optimizavimo metodai, vadovėlis informatikos krypties doktorantams ir magistrantams. Vilnius: Mokslo aidai, 2007, p. 103-107.
5. Vladimiro Miranda, André Santos, Jorge Pereira. State Estimation Based on Correntropy: A Proof of Concept. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*. 2009, vol 24, no. 4.
6. Chawasak Rakpenthai, Sermsak Uatrongjit, and Suttichai Premrudeepreechacharn. State Estimation of Power System Considering Network Parameter Uncertainty Based on Parametric Interval Linear System. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*. 2012, vol 27, no. 1.
7. Gabriele D'Antona and Mehdi Davoudi. Effects of Parameters and Measurements Uncertainties on the Power System WLS State Estimation. *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. 2012, p. 1015-1020.
8. Ravindra Kumar and Dinanath Prasad. Effect of Bad Measurements on State Estimation in Power System. *Power India Conference*. 2012, p 1-5.
9. Gabriele D'Antona. Uncertainty of Power System State Estimates due to Measurements and Network Parameter Uncertainty. *Applied Measurements For Power Systems (AMPS)*. 2010, p. 37-40.
10. Šauklys, R., Šiožinys, V. Contingency analysis of power system with bottleneck network topology. *The 9TH international conference on Electrical and Control Technologies*. Kaunas 2014, p 157-161.


```

end
if 1==0
%Varzu neapibreztis 20%
deltaz=diag(1+(1*randn(1,29) ./20));
z=z1*deltaz;
end

y=z^-1;

Ym=A'*y*A;

rl=6e-4;
%
matduom = [ % -----El.nr |Tipas | Dydis | ism | im | R |
% -----Itamos -----
          1      1      1.0000    1    0    rl;
          2      1      0.9934    2    0    rl;
          3      1      0.9973    3    0    rl;
          4      1      0.9897    4    0    rl;
          5      1      1.0000    5    0    rl;
          6      1      0.9925    6    0    rl;
          7      1      0.9958    7    0    rl;
          8      1      0.9937    8    0    rl;
          9      1      1.0000    9    0    rl;
         10      1      0.9806   10    0    rl;
         11      1      0.9521   11    0    rl;
         12      1      0.9619   12    0    rl;
         13      1      0.9382   13    0    rl;
         14      1      0.9530   14    0    rl;
         15      1      0.9123   15    0    rl;

         16      1      0.9934   16    0    rl;
         17      1      1.0000   17    0    rl;
         18      1      0.9729   18    0    rl;
         19      1      0.9353   19    0    rl;
         20      1      0.9165   20    0    rl;
         21      1      0.9842   21    0    rl;
         22      1      0.9835   22    0    rl;
         23      1      0.9858   23    0    rl;
         24      1      0.9779   24    0    rl;
         25      1      0.9530   25    0    rl;
         26      1      0.9507   26    0    rl;
         27      1      0.9462   27    0    rl;

%-----Galios srautas Pij-----
         28      2      0.328    1    2    rl;
         29      2      -0.473    1    3    rl;
         30      2      -0.173    2    4    rl;
         31      2      -0.673    4    6    rl;
         32      2      -0.974    3    5    rl;
         33      2      1.180    5    6    rl;
         34      2      0.501    5    7    rl;
         35      2      1.002    5    8    rl;
         36      2      0.842    5    9    rl;
         37      2      3.941    9   10    rl;
         38      2      1.414   10   11    rl;
         39      2      1.008   10   12    rl;
         40      2      0.902   11   13    rl;

```

```

41      2      0.898   13  15  rl;
42      2      0.502   12  14  rl;
43      2      0.673   25  27  rl;
44      2      0.580   25  26  rl;
45      2      1.717   24  25  rl;
46      2      2.116   17  24  rl;
47      2      0.583   17  23  rl;
48      2     -0.799   16  17  rl;
49      2      0.069   16  23  rl;
50      2      2.276   16  21  rl;
51      2      1.955   16  18  rl;
52      2      0.300   21  22  rl;
53      2     -1.212   18  21  rl;
54      2      1.994   18  19  rl;
55      2      1.299   19  20  rl;
56      2     -0.611   15  20  rl;

```

```

%-----Galios srautas Qij-----

```

```

57      3      0.306   1  2  rl;
58      3      0.123   1  3  rl;
59      3      0.152   2  4  rl;

61      3     -0.038   3  5  rl;
62      3      0.190   5  6  rl;
63      3      0.155   5  7  rl;
64      3      0.364   5  8  rl;
65      3     -0.098   5  9  rl;
66      3      1.908   9  10  rl;
67      3      0.890  10  11  rl;
68      3      0.358  10  12  rl;
69      3      0.667  11  13  rl;
70      3      0.644  13  15  rl;
71      3      0.161  12  14  rl;
72      3      0.133  25  27  rl;
73      3      0.482  25  26  rl;
74      3      0.850  24  25  rl;
75      3      1.066  17  24  rl;
76      3      0.376  17  23  rl;
77      3     -0.205  16  17  rl;
78      3      0.241  16  23  rl;
79      3      1.023  16  18  rl;
80      3      0.940  16  21  rl;
81      3     -0.625  18  21  rl;
82      3      0.100  21  22  rl;
83      3      1.213  18  19  rl;
84      3      0.475  19  20  rl;
85      3      0.104  15  20  rl;

```

```

if 1==0
    %Matavimu sutrikimas pasinaudojus random funkcija 5%
    rr1=1+(1*randn(1,84)./80);
    rr=rr1';
    deltammat=matduom(1:end,3).*rr;
    matduom(:,3)=deltamat(:,1);
    matduom;
end

if 1==0
    %Matavimu sutrikimas pasinaudojus random funkcija 10%
    rr1=1+(1*randn(1,84)./40);
    rr=rr1';
    deltammat=matduom(1:end,3).*rr;

```



```

matduom(:,3)=deltamat(:,1);
matduom;
end

    if 1==0
        %Matavimu sutrikimas pasinaudojus random funkcija 20%
        rr1=1+(1*randn(1,84)./20);
        rr=rr1';
        deltammat=matduom(1:end,3).*rr;
        matduom(:,3)=deltamat(:,1);
        matduom;
    end

matduom1=matduom;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%sutriko matavimai
if (1==0)&&(sim==n+1)
    'sutriko matavimai'
    matduom(30,3)=0;

end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
nbus=length(A(1,:));
tipas=matduom(:,2);
Ri = diag(matduom(:,6));
mat=matduom(:,3);
fbus=matduom(:,4);
tbus=matduom(:,5);
U=ones(nbus,1);
del=zeros(nbus,1);
X=[del(2:end);U];
G=real(Ym);
B=imag(Ym);

ui=find(tipas == 1);
pij=find(tipas == 2);
qij=find(tipas == 3);

nui=length(ui);
npij=length(pij);
nqij=length(qij);

iter=1;
tol=5;

while (tol > 1e-9)

    h1 = U(fbus(ui),1);
    h2 = zeros(npij,1);
    h3 = zeros(nqij,1);

    for i = 1:npij
        m = fbus(pij(i));
        n = tbus(pij(i));
        h2(i) = Pij(U(m),U(n),-G(m,n),-B(m,n),del(m)-del(n));
    end

    for i = 1:nqij
        m = fbus(qij(i));
        n = tbus(qij(i));
        h3(i) = Qij(U(m),U(n),-G(m,n),-B(m,n),0,del(m)-del(n));
    end
end

```

```

end

h = [h1; h2; h3];

dz = mat - h;

H11 = zeros(nui,nbus-1);

H12 = zeros(nui,nbus);
for i = 1:nui
    for j = 1:nbus
        if j == i
            H12(i,j) = 1;
        end
    end
end

H21 = zeros(npj,nbus-1);
for i = 1:npj
    m = fbus(pi(i));
    n = tbus(pi(i));
    for j = 1:(nbus-1)
        if j+1 == m
            H21(i,j) = dpij_ti(U(m),U(n),-G(m,n),-B(m,n),del(m)-del(n));
        else if j+1 == n
            H21(i,j) = dpij_tj(U(m),U(n),-G(m,n),-B(m,n),del(m)-del(n));
        else
            H21(i,j) = 0;
        end
    end
end

H22 = zeros(npj,nbus);
for i = 1:npj
    m = fbus(pi(i));
    n = tbus(pi(i));
    for j = 1:nbus
        if j == m
            H22(i,j) = dpij_ui(U(m),U(n),-G(m,n),-B(m,n),del(m)-del(n));
        else if j == n
            H22(i,j) = dpij_uj(U(m),-G(m,n),-B(m,n),del(m)-del(n));
        else
            H22(i,j) = 0;
        end
    end
end

H31 = zeros(nqj,nbus-1);
for i = 1:nqj
    m = fbus(qi(i));
    n = tbus(qi(i));
    for j = 1:(nbus-1)
        if j+1 == m
            H31(i,j) = dqij_ti(U(m),U(n),-G(m,n),-B(m,n),del(m)-del(n));
        else if j+1 == n
            H31(i,j) = dqij_tj(U(m),U(n),-G(m,n),-B(m,n),del(m)-del(n));
        else
            H31(i,j) = 0;
        end
    end
end

```

```

        end
    end

    H32 = zeros(nqij,nbus);
    for i = 1:nqij
        m = fbus(qij(i));
        n = tbus(qij(i));
        for j = 1:nbus
            if j == m
                H32(i,j) = dqij_ui(U(m),U(n),-G(m,n),-B(m,n),0,del(m)-
del(n));
            else if j == n
                H32(i,j) = dqij_uj(U(m),-G(m,n),-B(m,n),del(m)-del(n));
            else
                H32(i,j) = 0;
            end
        end
    end
end

H = [H11 H12; H21 H22; H31 H32];

Gm = H'*inv(Ri)*H;

dx = inv(Gm)*(H'*inv(Ri)*dz);
X = X + dx;
del(2:end) = X(1:nbus-1);
U = X(nbus:end);
iter = iter + 1;
tol = max(abs(dx));
end

iter;
GG=[matduom(1:27,3)];
paklaida=((matduom(1:27,3)-U)./U)*100;
max(abs(paklaida));
paklaida2222=abs((matduom(1:end,3)-h)./h)*100);
aaa=[matduom1(1:end,1) matduom1(1:end,3) h paklaida2222];
max(abs(paklaida2222));
U;

if 1==1
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    'Skaiciavimas be sutrikusiu matavimu';
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

pak=find(paklaida2222 >= 100000);
matduom2 = matduom(setdiff(1:size(matduom,1),[pak]),:);
matduom2;

nbus=length(A(1,:));
tipas=matduom2(:,2);
Ri = diag(matduom2(:,6));
mat=matduom2(:,3);
fbus=matduom2(:,4);
tbus=matduom2(:,5);
U=ones(nbus,1);
del=zeros(nbus,1);
X=[del(2:end);U];
G=real(Ym);
B=imag(Ym);

```

```

ui=find(tipas == 1);
pij=find(tipas == 2);
qij=find(tipas == 3);

nui=length(ui);
npij=length(pij);
nqij=length(qij);

iter=1;
tol=5;

while (tol > 0.000001)

    h1 = U(fbus(ui),1);
    h2 = zeros(npij,1);
    h3 = zeros(nqij,1);

    for i = 1:npij
        m = fbus(pij(i));
        n = tbus(pij(i));
        h2(i) = Pij(U(m),U(n),-G(m,n),-B(m,n),del(m)-del(n));
    end

    for i = 1:nqij
        m = fbus(qij(i));
        n = tbus(qij(i));
        h3(i) = Qij(U(m),U(n),-G(m,n),-B(m,n),0,del(m)-del(n));
    end

    h = [h1; h2; h3];

    dz = mat - h;

    H11 = zeros(nui,nbus-1);

    H12 = zeros(nui,nbus);
    for i = 1:nui
        for j = 1:nbus
            if j == i
                H12(i,j) = 1;
            end
        end
    end

    H21 = zeros(npij,nbus-1);
    for i = 1:npij
        m = fbus(pij(i));
        n = tbus(pij(i));
        for j = 1:(nbus-1)
            if j+1 == m
                H21(i,j) = dpij_ti(U(m),U(n),-G(m,n),-B(m,n),del(m)-del(n));
            else if j+1 == n
                H21(i,j) = dpij_tj(U(m),U(n),-G(m,n),-B(m,n),del(m)-del(n));
            else
                H21(i,j) = 0;
            end
        end
    end
end
end

```

```

H22 = zeros(npij,nbus);
for i = 1:npij
    m = fbus(pij(i));
    n = tbus(pij(i));
    for j = 1:nbus
        if j == m
            H22(i,j) = dpij_ui(U(m),U(n),-G(m,n),-B(m,n),del(m)-del(n));
        else if j == n
            H22(i,j) = dpij_uj(U(m),-G(m,n),-B(m,n),del(m)-del(n));
        else
            H22(i,j) = 0;
        end
    end
end

H31 = zeros(nqij,nbus-1);
for i = 1:nqij
    m = fbus(qij(i));
    n = tbus(qij(i));
    for j = 1:(nbus-1)
        if j+1 == m
            H31(i,j) = dqij_ti(U(m),U(n),-G(m,n),-B(m,n),del(m)-del(n));
        else if j+1 == n
            H31(i,j) = dqij_tj(U(m),U(n),-G(m,n),-B(m,n),del(m)-del(n));
        else
            H31(i,j) = 0;
        end
    end
end

H32 = zeros(nqij,nbus);
for i = 1:nqij
    m = fbus(qij(i));
    n = tbus(qij(i));
    for j = 1:nbus
        if j == m
            H32(i,j) = dqij_ui(U(m),U(n),-G(m,n),-B(m,n),0,del(m)-
del(n));
        else if j == n
            H32(i,j) = dqij_uj(U(m),-G(m,n),-B(m,n),del(m)-del(n));
        else
            H32(i,j) = 0;
        end
    end
end

H = [H11 H12; H21 H22; H31 H32];

Gm = H'*inv(Ri)*H;

dx = inv(Gm)*(H'*inv(Ri)*dz);
X = X + dx;
X;
dx;
del(2:end) = X(1:nbus-1);
U = X(nbus:end);
iter = iter + 1;
tol = max(abs(dx));
U2=U;

```

```

end
iter;

U2;
paklaida1=((matduom1(1:27,3)-U2)./U2)*100;
max(abs(paklaida1));
paklaida33=((matduom2(1:end,3)-h)./h)*100;
max(abs(paklaida33));
bbbbbb=[matduom2(1:end,3) h paklaida33];
GGG=[U2 matduom1(1:27,3)];
paklaida33=abs((matduom2(1:end,3)-h)./h)*100);

a(:,sim)=paklaida33;
f=a';

for pp = 1:84
kk(sim,pp)=std(f(1:end,pp));
end

end

end

nn=sim;
for i = 1:nn
for j = 1:84
b(i,j)=sum(f(1:i,j))/i;
d(i,j)=sum(kk(1:i,j))/i;
end

%d(i)=(sum(kk(1:i,1).^2))^0.5;
end
df=b';
max(df(1:end,sim))
min(df(1:end,sim))

toc;

figure;
plot(b);
figure;
plot(d);

```

Priedas nr. 2. Nuolatinės srovės būklės vertinimo uždavinys mažiausių kvadratų metodu.

```

%Bukles vertinimo uždavinys maziausiu kvadratu metodu DC tinklas
clear all;
clc;
%Sudarome insidenciju matrica A;

A=[-1 1 0 0;
-1 0 1 0;
0 -1 0 1;
0 0 -1 1];
%Sudarome varzu matrica. Visu liniju varzos vienodos ir lygios j0.1;

z=diag([0.1, 0.1, 0.1, 0.1]);

%Surandame linijos laidzius y;

```

```

y=z^-1;

%Surandame mazginiu laidziu matrica B;

B=A'*y*A;

%Sudarome matvimu matrica Z;

Z=[0.37; 0.32; -0.2; -0.45; 0.12];

%Sudarome matica siejancia bukles kintamuosius t2 t3 ir t4 kartu su
%matavimu vektoriaus Z reiksmemis rementis formule kad P=B*teta;

M=[-10 -10 0;
    20 0 -10;
    0 20 -10;
    -10 -10 20;
    0 10 -10];
%Surandame bukles vertino uzdaviniio kintamuosius

teta=((M'*M)^-1)*M'*Z

%Patikrinimas ar surasti kampai teisingi
tetask=[0; teta(1); teta(2); teta(3)];
Bsk=[20 -10 -10 0;
     -10 20 0 -10;
     -10 0 20 -10;
     0 -10 -10 20;
     0 0 10 -10];
Zsk=Bsk*tetask

%Skirtumas tarp matuotu ir ivertintu dydziu;

dZ=Z-Zsk

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Priedas nr. 3. Buklės vertinimo uždavinys paremtas entropijos lygtimis DC tinkle.

```

clear all;
clc;

Z=[0.37;0.32;-0.2;-0.45;0.12];
tic;
if 1 == 2
syms t2 t3 t4 sig

P1=(1/sqrt(2*pi)*sig)*exp(-0.5*((Z(1)+10*t2+10*t3))/sig)^2);
P2=(1/sqrt(2*pi)*sig)*exp(-0.5*((Z(2)-20*t2+10*t4))/sig)^2);
P3=(1/sqrt(2*pi)*sig)*exp(-0.5*((Z(3)-20*t3+10*t4))/sig)^2);
P4=(1/sqrt(2*pi)*sig)*exp(-0.5*((Z(4)-20*t4+10*t3+10*t2))/sig)^2);
P5=(1/sqrt(2*pi)*sig)*exp(-0.5*((Z(5)-10*t3+10*t4))/sig)^2);

L=P1*log10(P1)+P2*log10(P2)+P3*log10(P3)+P4*log10(P4)+P5*log10(P5);
end
%isvestines
if 1 == 1

```

```

%pradines salgos
t2=0;
t3=0;
t4=0;
sig=1;
X=[t2; t3; t4; sig];
n=1;
tol=5;

while (tol > 0.000001) && (n < 100)

dL1=diff(L, t2);
dL2=diff(L, t3);
dL3=diff(L, t4);
dL4=diff(L, sig);

dL=[dL1; dL2; dL3; dL4];

%Jacobian matrica

Jx=[diff(dL1, t2) diff(dL1, t3) diff(dL1, t4) diff(dL1, sig);
diff(dL2, t2) diff(dL2, t3) diff(dL2, t4) diff(dL2, sig);
diff(dL3, t2) diff(dL3, t3) diff(dL3, t4) diff(dL3, sig);
diff(dL4, t2) diff(dL4, t3) diff(dL4, t4) diff(dL4, sig)];

dx=-inv(Jx)*dL;

X = X + dx;
n = n + 1;
tol = max(abs(dx));

t2=X(1);
t3=X(2);
t4=X(3);
sig=X(4);
end

X
End

```

Priedas nr. 4. Būklės vertinimo uždavinys paremtas entropijos lygtimis kintamos srovės tinkle.

```

clear all;
clc;
tic;
%Itampu radimas panaudojant Niutono Rafsono metoda

%Pradiniai duomenys
z=[ 0.0082+0.0098*i      0      0      0      0;
    0 0.0201 + 0.0291*i      0      0      0;
    0      0 0.0223 + 0.0323*i      0      0;
    0      0      0 0.026 + 0.0476*i      0;
    0      0      0      0 0.0082 + 0.0098*i];
y=z^-1;

Sb=100e6;
Ub=110e3;
Ib=Sb/(sqrt(3)*Ub);

```



```

U1=1.00;

% i21=-177.7/Ib; -0.3386
% i13=100.6/Ib; 0.1917
% i23=-95.6/Ib; -0.1821
% i24=-172.4/Ib; -0.3285
% i34=-141.2/Ib; -0.2690

i21=-177.7/Ib;
i13=100.6/Ib;
i23=-95.6/Ib;
i24=-172.4/Ib;
i34=-141.2/Ib;

%U2-U1; U1-U3; U2-U3; U2-U4; U3-U4

U2(1)=1-0.001*i;
U3(1)=1-0.001*i;
U4(1)=1-0.001*i;
sig(1)=1;
X=[U2; U3; U4; sig];
n=1;
tol=5;

while (tol > 0.0000001) && (n < 100)

    %Isvestine pagal U2
    fx1=dLui(i21,y(2,2),U2,U1,sig)+dLui(i23,y(4,4),U2,U3,sig)+dLui(i24,y(3,3),U2,
    U4,sig);
    %Isvestine pagal U3
    fx2=dLuj(i13,y(1,1),U1,U3,sig)+dLuj(i23,y(4,4),U2,U3,sig)+dLui(i34,y(5,5),U3,
    U4,sig);
    %Isvestines pagal U4
    fx3=dLuj(i24,y(3,3),U2,U4,sig)+dLuj(i34,y(5,5),U3,U4,sig);
    %Isvestines pagal sig
    fx4=dLsig(i21,y(2,2),U2,U1,sig)+dLsig(i13,y(1,1),U1,U3,sig)+dLsig(i23,y(4,4),
    U2,U3,sig)+dLsig(i24,y(3,3),U2,U4,sig)+dLsig(i34,y(5,5),U3,U4,sig);

    fx=[fx1; fx2; fx3; fx4];

    %Sudarome Jacoben matrica
    % U2 U3 U4 sig
    %fx1
    %fx2
    %fx3
    %fx4

    Jx11=ddLui_ui(i21,y(2,2),U2,U1,sig)+ddLui_ui(i23,y(4,4),U2,U3,sig)+ddLui_ui(i
    24,y(3,3),U2,U4,sig);
    Jx12=ddLui_uj(i23,y(4,4),U2,U3,sig);
    Jx13=ddLui_uj(i24,y(3,3),U2,U4,sig);

    Jx14=ddLui_sig(i21,y(2,2),U2,U1,sig)+ddLui_sig(i23,y(4,4),U2,U3,sig)+ddLui_si
    g(i24,y(3,3),U2,U4,sig);

    Jx21=ddLuj_ui(i23,y(4,4),U2,U3,sig);

```

```

Jx22=ddLuj_uj (i13,y(1,1),U1,U3,sig)+ddLuj_uj (i23,y(4,4),U2,U3,sig)+ddLui_ui (i
34,y(5,5),U3,U4,sig);
Jx23=ddLui_uj (i34,y(5,5),U3,U4,sig);

Jx24=ddLuj_sig(i13,y(1,1),U1,U3,sig)+ddLuj_sig(i23,y(4,4),U2,U3,sig)+ddLui_si
g(i34,y(5,5),U3,U4,sig);

Jx31=ddLuj_ui (i24,y(3,3),U2,U4,sig);
Jx32=ddLuj_ui (i34,y(5,5),U3,U4,sig);
Jx33=ddLuj_uj (i24,y(3,3),U2,U4,sig)+ddLuj_uj (i34,y(5,5),U3,U4,sig);
Jx34=ddLuj_sig(i24,y(3,3),U2,U4,sig)+ddLuj_sig(i34,y(5,5),U3,U4,sig);

Jx41=ddLsig_ui (i21,y(2,2),U2,U1,sig)+ddLsig_ui (i23,y(4,4),U2,U3,sig)+ddLsig_u
i (i24,y(3,3),U2,U4,sig);

Jx42=ddLsig_uj (i13,y(1,1),U1,U3,sig)+ddLsig_uj (i23,y(4,4),U2,U3,sig)+ddLsig_u
i (i34,y(5,5),U3,U4,sig);
Jx43=ddLsig_uj (i24,y(3,3),U2,U4,sig)+ddLsig_uj (i34,y(5,5),U3,U4,sig);

Jx44=ddLsig_sig(i21,y(2,2),U2,U1,sig)+ddLsig_sig(i13,y(1,1),U1,U3,sig)+ddLsig
_sig(i23,y(4,4),U2,U3,sig)+ddLsig_sig(i24,y(3,3),U2,U4,sig)+ddLsig_sig(i34,y(
5,5),U3,U4,sig);

Jx=[Jx11 Jx12 Jx13 Jx14;
Jx21 Jx22 Jx23 Jx24;
Jx31 Jx32 Jx33 Jx34;
Jx41 Jx42 Jx43 Jx44];
%deltax radimas

dx=-inv(Jx)*fx;

X = X + dx;
n = n + 1;
tol=max(abs(dx));

U2=X(1);
U3=X(2);
U4=X(3);
sig=X(4);

end
toc;
X

U22=real(U2)*110;
t2=imag(U2)*(180/pi);
U33=real(U3)*110;
t3=imag(U3)*(180/pi);
U44=real(U4)*110;
t4=imag(U4)*(180/pi);

X2=[U22 t2;
U33 t3;
U44 t4]

ii21=y(2,2)*(U2-U1);
ii13=y(1,1)*(U1-U3);
ii23=y(4,4)*(U2-U3);
ii24=y(3,3)*(U2-U4);

```

```
ii34=y(5,5)*(U3-U4);
```

```
rez=[i21 ii21;  
      i13 ii13;  
      i23 ii23;  
      i24 ii24;  
      i34 ii34]
```