

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

LIETUVOS ENERGETIKOS INSTITUTAS

TOMAS IEŠMANTAS

ENERGETIKOS TINKLŲ PATIKIMUMO
TYRIMAS ESANT NEAPIBRĖŽTIEMS IR NUO
LAIKO PRIKLAUSOMIEMS DUOMENIMS

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (06T)

Kaunas, 2016

Daktaro disertacija rengta 2011 – 2015 metais Lietuvos energetikos institute, Branduolinių įrenginių saugos laboratorijoje

Redagavo Stefanija Skebienė ir Julija Vasilenko-Maksvytė

Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Robertas ALZBUTAS (Lietuvos energetikos institutas, technologijų mokslai, energetika ir termoinžinerija (06T))

Energetikos ir termoinžinerijos mokslo krypties taryba

Habil. dr. Algirdas KALIATKA (Lietuvos energetikos institutas, Technologijos mokslai, Energetika ir termoinžinerija – 06T) – pirmininkas;

Prof. habil. dr. Juozas AUGUTIS (Vytauto Didžiojo universitetas, Technologijos mokslai, Energetika ir termoinžinerija – 06T);

Prof. dr. Ričardas KRIKŠTOLAITIS (Vytauto Didžiojo universitetas, Technologijos mokslai, Energetika ir termoinžinerija – 06T);

Prof. dr. Pierre-Etienne LABEAU (Briuselio laisvasis universitetas, Technologijos mokslai, Energetika ir termoinžinerija – 06T).

Prof. dr. Egidijus Rytas VAIDOGAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Technologijos mokslai, Statybos inžinerija – 02T);

Disertacija ginama viešame Energetikos ir termoinžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje, kuris įvyks 2016 m. kovo mėnesio 22 d., 10 val. Lietuvos energetikos instituto posėdžių salėje.

Adresas: Breslaujos g. 3–202, Kaunas, Lietuva

Tel. (370) 37 300 042, faks. (370) 37 324 144, el. paštas: doktorantura@ktu.lt

Disertacijos santrauka išsiųsta 2016 m. vasario 22 d.

Su disertacija galima susipažinti internete (<http://ktu.edu>), Lietuvos energetikos instituto (Breslaujos g. 3, Kaunas, Lietuva) ir Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, Kaunas, Lietuva) bibliotekose.

KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

LITHUANIAN ENERGY INSTITUTE

TOMAS IEŠMANTAS

RELIABILITY OF ENERGY NETWORKS
CONSIDERING UNCERTAIN AND TIME-
DEPENDENT DATA

Summary of Doctoral Dissertation
Technological sciences, Energetics and Power Engineering
(06T)

Kaunas, 2016

Doctoral dissertation was prepared during the period of 2011-2015 at Lithuanian Energy Institute, Laboratory of Nuclear Installation Safety

The research was funded by the Research Council of Lithuania

Scientific supervisor:

Prof. dr. Robertas ALZBUTAS (Lithuanian Energy Institute, Technological Sciences, Energetics and Power Engineering (06T))

Dissertation Defense Board of Energetics and Power Engineering Science Field:

Habil. Dr. Algirdas KALIATKA (Lithuanian Energy Institute, Technological Sciences, Energetics and Power Engineering– 06T) – **chairman**

Prof. Dr. habil. Juozas AUGUTIS (Vytautas Magnus University, Technological Sciences, Energetics and Power Engineering– 06T)

Prof. Dr. Ričardas KRIKŠTOLAITIS (Vytautas Magnus University, Technological Sciences, Energetics and Power Engineering– 06T)

Prof. Dr. Pierre-Etienne LABEAU (Universite Libre de Bruxelles, Technological Sciences, Energetics and Power Engineering – 06T)

Prof. Dr. Egidijus Rytas VAIDOGAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering– 02T)

The official defence of the dissertation will be held at 10 a. m. on 22 of March, 2016 at public meeting of the Board of Energetics and Power Engineering Science Field in the Meeting Hall of Lithuanian Energy Institute.

Address: Breslaujos st. 3–202, Kaunas, Lithuania

Tel. (370) 37 300 042, fax. (370) 37 324 144, e-mail: doktorantura@ktu.lt

The summary of dissertation was sent on 22 March, 2016.

The dissertation is available on the internet (<http://ktu.edu>) and at the libraries of Kaunas University of Technology (L. Donelaičio st. 20, 44239, Kaunas, Lithuania) and Lithuanian Energy Institute (Breslaujos st. 3, Kaunas, Lithuania).

ĮVADAS

Energetikos tinklai yra sudėtingos sistemos, turinčios ypatingą svarbą tiek esamam visuomenės būviui, tiek jos vystymuisi. Sudėtingų sistemų patikimumas yra ypatingos svarbos charakteristika. Viena iš visuomenės stabilaus būvio prielaidų yra ta, jog sistemos, atsakingos už tą būvį, nesuges artimiausiu metu. Kaskadiniai gedimai, išplintantys per visą elektros tinklą, sproginiai gamtinių dujų tinkle, pagrindinių transporto kelių spūstys – tai tik keletas pavyzdžių, kuomet infrastruktūrų sutrikimai smarkiai paveikia visuomenę ir jos įprastą būvį.

Be abejo, mokslinė bendruomenė daug stengėsi ir skyrė nemažai laiko sudėtingoms sistemoms analizuoti ir jas modifikuoti saugesnės ir patikimesnės jų eksploatacijos vardan. Ir vis tik – prielaidos ir jomis paremti metodai, išplėtoti prieš keletą dešimtmečių, galima sakyti, beveik išliko nepasikeitę, o tai trukdo vykdyti adekvačią ir geriau realius reiškinius atitinkančią infrastruktūrų analizę. Prielaida, jog sistemos ar jų elementai yra nepriklausomi nuo laiko, yra priimama beveik visoje mokslinėje literatūroje, analizuojančioje sudėtingų sistemų patikimumą – net jei ir yra puikiai suvokiama priklausomumo nuo laiko svarba.

Tokia situacija, manau, susiformavo dėl sistemų ir joms analizuoti skirtų matematinių modelių sudėtingumo, kuomet bandoma atsižvelgti į sistemų priklausomybę nuo laiko. Be to, duomenų neapibrėžtumo dinamikos modeliavimo sunkumas taip pat prisidėjo prie neadekvataus sudėtingų sistemų patikimumo vertinimo.

Šioje disertacijoje sprendžiamos minėtos problemos. Bajeso statistiniai metodai pasirinkti kaip statistinės patikimumo duomenų analizės pagrindas.

Disertacijos tikslas ir uždaviniai

Pagrindinis šios disertacijos tikslas yra sukurti ir pademonstruoti metodiką, kuri sudarytų galimybę atlikti energetikos tinklų patikimumo analizę ir vertinimą, esant neapibrėžtiesiems ir nuo laiko priklausomiems gedimo duomenims.

Uždaviniai:

1. Sudaryti metodiką ir sukurti reikiamus matematinius modelius, kurie įgalintų vertinti patikimumą, kuomet heterogeniški gedimų duomenys ir jų neapibrėžtumas priklauso nuo laiko;
2. Patikrinti ir pademonstruoti metodikos taikymo galimybes, siekiant įvertinti energetikos tinklų nuo laiko priklausomą patikimumą;
3. Pritaikant sukurta metodiką, įvertinti dujų tinklo patikimumą, analizuojant jo įtaką kompresorinių stočių energijos suvartojimui;

4. Įvertinti Lietuvos elektros ir dujų perdavimo tinklų nuo laiko priklausomą patikimumą, atsižvelgiant į heterogeniškus duomenis.

Aktualumas

1. Siekiant atsižvelgti į griežtejančius energijos vartojimo efektyvumo bei tiekimo patikimumo reikalavimus, reikia tokių išsamesnių modelių, kurie taikytini užtikrinant minėtų reikalavimų optimalų įgyvendinimą;
2. Egzistuojantys patikimumo vertinimo metodai nekorektiškai arba nevisiškai atsižvelgia į laike kintančius duomenis bei duomenų neapibrėžtumą;
3. Iki šiol mažai taikytas tinklo patikimumo vertinimas, analizuojant jo įtaką energijos vartojimui atskirose tinklo sistemose.

Mokslinis naujumas

Nustatyti tokie energetikos tinklų patikimumo vertinimo principai, kuomet gedimo duomenys yra priklausomi nuo laiko, neapibrėžti bei heterogeniški.

Tinklų patikimumo teorija papildyta matematiniais modeliais, kurie suteikia galimybę atsižvelgti į gedimų registravimo kriterijų kaitą bei išsamiau vertinti kaskadinių gedimų heterogeniškuose energetikos tinkluose dydį.

Ginamieji teiginiai

1. Sukurta metodika įgalina išsamiau vertinti nuo laiko priklausomą patikimumą ir jo neapibrėžtumą heterogeniškiems energetikos tinklams;
2. Išplėtotas hierarchinis Borrel-Tanner modelis ir nuo duomenų registravimo kriterijaus priklausomas Puasono modelis leidžia gauti tikslesnius dujų ir elektros perdavimo tinklų patikimumo charakteristikų įverčius;
3. Dujų tinklo kompresorinės stoties suvartojama energija tiesiogiai proporcinga tinklo vamzdynų gedimo intensyvumui;
4. Lietuvos elektros tinklo linijų atjungimo ir dujų perdavimo tinklo vamzdynų pažeidimo intensyvumas mažėja ir gali būti vertinamas kaip priklausomas nuo laiko net esant mažai duomenų imčiai ir skirtingiems jų registravimo kriterijams.

Praktinė disertacijos vertė

Darbo metu sukurta metodika įgalina atlikti išsamesnę energetikos tinklų patikimumo analizę ir jos taikymą, kai tinklo elementų charakteristikos kinta laike ir tinklo gedimų duomenys yra heterogeniški. Nuo laiko priklausantys Lietuvos magistralinių dujotiekių ir elektros perdavimo tinklų atjungimų bei pažeidimų intensyvumo įverčiai naudotini siekiant optimizuoti tinklų techninės kontrolės bei remonto darbus. Be to, dujų tinklo patikimumo prognozė naudotina vertinant dujų sprogo rizikos dinamiką ir identifikuojant tai lemiančias priežastis bei užtikrinant tinklo funkcionavimo patikimumą.

Disertacijos darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos darbo rezultatai publikuoti 3 „Thomson Reuters“ duomenų bazėje „Web of Science Core Collection“ referuojamuose leidiniuose. Taip pat 4 straipsniai publikuoti mokslo leidiniuose, registruotuose tarptautinėse mokslinės informacijos duomenų bazėse, bei 11 publikacijų kituose mokslo leidiniuose, konferencijų medžiagoje.

Disertacijos struktūra ir apimtis

Daktaro disertaciją sudaro įvadas, 3 pagrindiniai skyriai, išvados, literatūros sąrašas ir autoriaus publikacijų sąrašas. Disertacijos pagrindinėje dalyje yra 52 paveikslai ir 139 šaltinių cituojamos literatūros sąrašas.

1 SUDĖTINGŲ ENERGINIŲ SISTEMŲ NUO LAIKO PRIKLAUSOMO PATIKIMUMO VERTINIMAS

1.1 Pagrindinės sąvokos

Daugelis sistemų, tame tarpe ir energetikos tinklų, funkcionuojančių aplink mus, gali būti apibūdinamos kaip sudėtingos – turinčios daug elementų, netrivialiai susijusių vienas su kitu. Vieni elementai gali turėti lemiamos reikšmės sistemos stabiliam funkcionavimui, kitų sutrikimai gali būti nepastebimi ilgą laiką. Nagrinėjant sudėtingas sistemas, bus vadovaujamosi šiuo apibrėžimu:

Apibrėžimas. Sistema, sudaryta iš daug susijusių komponentų ar posistemų, netrivialiai sąveikaujančių tarpusavyje, vadinama *sudėtinga sistema*.

Šis apibrėžimas, nors ir ganėtinais apytikslis, yra pakankamas. Jis taip pat yra suderinamas su tuo, kaip sudėtingos sistemos suvokiamos kitose disciplinose.

Kai kurios sudėtingos sistemos gali būti įvardijamos kaip sudėtingos infrastruktūros (pavyzdžiui, elektros ar dujų tiekimo tinklai), kadangi jų komponentai yra išdėstyti didelėse valstybių teritorijose ir jų efektyvus funkcionavimas yra viena varančiųjų jėgų visuomenės raidoje. Dažnai tolesniame tekste sudėtingų sistemų, infrastruktūrų ar tinklų sąvokos bus vartojamos pakaitomis – atsižvelgiant į kontekstą. Šioje disertacijoje dėmesys bus telkiamas į energiją perduodančias sudėtingas sistemas (elektros tinklus, dujotiekius ir pan.), tačiau tolesniame tekste pateikiama metodika gali būti taikoma ir kitoms sistemoms – geležinkelių tinklams, transporto keliams ir pan.

Apibrėžimas (bendro pobūdžio). Sistemos *patikimumas* yra gebėjimas atlikti tai sistemai priskirtą funkciją nustatytu laikotarpiu.

Sudėtingų energiją perduodančių sistemų patikimumą kiekybiškai įvertinti yra sudėtinga ir tam egzistuoja įvairios strategijos ir modeliai. Juos grubiai galima suskirstyti į fizikiniu procesu arba statistiniais duomenimis paremtus matematinius modelius. Abi modelių grupės turi savų privalumų ir trūkumų. Tačiau statistiniais duomenimis grįsti modeliai yra universalesni, palyginti su fizikiniu procesu paremtais modeliais. Todėl

šioje disertacijoje pasirinkta statistiniais duomenimis grįsto patikimumo vertinimo strategija.

Hipotezė, jog sistemos yra nepriklausomos nuo laiko, yra svarbi ir dažnai pakankamai neįvertinama prielaida. Šia prielaida teigiama, jog sistemos gedimo intensyvumas yra nekintantis laike. Tačiau realybė yra kitokia, o vienas šios disertacijos tikslų – šią prielaidą pakeisti tikslesne.

Apibrėžimas. Sistema gali būti klasifikuojama kaip *priklausoma nuo laiko*, jei duomenyse (ar jų skaitinėje funkcijoje), apibūdinančiuose tam tikrus sistemos aspektus, yra išreikšta didėjimo, mažėjimo, tendencija. Tendencijos egzistavimas gali būti patvirtinamas specialiais statistiniais testais, arba ekspertų įžvalgomis.

Gedimo intensyvumo, momentinio dydžio, nusakančio sistemos polinkį gesti, didėjimo tendencija gali pasireikšti, kai sistema sensta ir jos dalys degraduoja, nusidėvi. Mažėjimo tendencija gali būti stebima keletu atvejų: tai vadinamojoje gedimų išdeginimo (angl. *burn-in*) fazėje; arba gerėjant gamybos technologijoms ar techninei priežiūrai bei inspektavimui ir remontui. Gedimo intensyvumas gali kisti laike (mažėti, didėti), jei keičiamas gedimo registravimo *kriterijus*, t. y. sąlygos, kurias turi atitikti sistemos sutrikimas, kad jis būtų įrašomas, pavyzdžiui, į duomenų bazes.

Šioje disertacijoje svarbus sistemų patikimumo aspektas yra patikimumo duomenų heterogeniškumas.

Apibrėžimas. Gedimų duomenys, gauti iš įvairių informacijos šaltinių, yra laikomi *heterogeniškais*, jei skirtingos duomenų imtys yra skirtingai pasiskirsčiusių atsitiktinių dydžių realizacijos.

Tarkime, turime tam tikrą aibę sistemos komponentų, veikiančių plačioje geografinėje zonoje. Tuos komponentus veikia skirtingos oro sąlygos, nevienodai efektyvios inspektavimo ir remonto programos. Dėl to pasireiškia papildomas duomenų neapibrėžtumo lygmuo – sistemos generuojami gedimų duomenys negali būti laikomi vienodai pasiskirstę, jie yra „panašūs“, tačiau neidentiški (tikimybinio skirstinio prasme). Tokius duomenis vadinsime heterogeniškais. Įprasta praktika: tarti, jog duomenys generuojami vieno skirstinio, tačiau, kaip matysime vėliau, ši prielaida yra neteisinga ir turi didelės įtakos galutiniams rezultatams.

Šioje disertacijoje taip pat bus nagrinėjama sistemų nepatikimumo ir energijos vartojimo charakteristikų sąveika, t. y. bus siekiama atsakyti į klausimą:

Kaip kiekybiškai įvertinti sistemos patikimumo lygmens poveikį tos pačios sistemos energijos vartojimo charakteristikoms?

Pavyzdžiui, yra nustatyta, jog nuo 2000 iki 2011 m. JAV gamtinių dujų vartotojai turėjo sumokėti 20 milijardų dolerių už dujas, kurių jie negavo, t. y. tam tikras apskaitomas dujų kiekis visgi išteka į atmosferą dėl trūkių ir kitų pažeidimų dujų tinkle.

Žemiau yra pateikiama patikimumo ir gedimo intensyvumo formalūs apibrėžimai.

Sistemos būseną laiko momentu t apibrėžiama būsenos vektoriumi $X(t) = (X_1(t), \dots, X_n(t))$. Todėl bet kuriuo momentu tam tikros sistemos būsenos tikimybė apibūdinama įvykio $X_1(t) \leq x_1, \dots, X_n(t) \leq x_n$

pasiskirstymo funkcija $F(x_1, \dots, x_n; t)$. Jei S yra laikas iki sistemos gedimo, (t. y. laikas iki tam tikros sistemos būsenos, sutartinai laikomos sistemos gedimu), tai sistemos patikimumas apibrėžiamas taip:

$$R(t) = \mathbb{P}[S > t]. \quad (1)$$

Gedimo intensyvumas yra momentinė sistemos būsenos charakteristika, apibrėžiama taip:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (2)$$

Sistemos patikimumą ir jos gedimo intensyvumą sieja ši formulė:

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(u) du\right). \quad (3)$$

Bajeso paradigmos kontekste, kada gedimo intensyvumas modeliuojamas kaip parametrinė funkcija, jo parametrų aposteriorinė tankio funkcija apibūdinama taip:

$$\pi_1(\theta | X(t)) \propto \pi_0(\theta) f(X(t) | \theta). \quad (4)$$

Esama daug kitų patikimumo teorijos sąvokų, kurios nėra aktualios šios disertacijos kontekste ir gali būti randamos bet kuriame patikimumo teorijos vadovėlyje.

Apibrėžkime indikatoriaus funkciją sistemai:

$$z(t) = \begin{cases} 1, & \text{jei sistema yra parengta momentu } t, \\ 0, & \text{kitu atveju.} \end{cases}$$

Indikatoriaus funkcija i -ajam sistemos elementui e_i , $i = 1, 2, \dots, n$:

$$z_i = \begin{cases} 1, & \text{jei } e_i \text{ yra parengtas,} \\ 0, & \text{kitu atveju.} \end{cases}$$

Tuomet

$$z(t) = \varphi(z_1(t), \dots, z_n(t))$$

yra vadinama sistemos struktūros funkcija.

Jei tikimybė, jog i -asis elementas e_i bus parengtas laiko momentu t , yra $p_i(t)$, tai sistemos patikimumas išreiškiamas taip:

$$R(t) = \varphi(p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)). \quad (5)$$

Bajeso statistinių metodų kontekste turime patikimumo vidurkio išraišką:

$$\bar{R}(t) = \mathbb{E}_{\pi(p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t) | X)} [\varphi(p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t))]; \quad (6)$$

čia vidurkis yra skaičiuojamas aposteriorinio skirstinio su tankio funkcija $\pi(p_1(t), \dots, p_n(t) | X)$ atžvilgiu.

1.2 Metodika

Šiame poskyryje pristatoma metodika, suteikianti galimybę vertinti tinklo patikimumą, kai heterogeniški gedimų duomenys ir jų neapibrėžtumas priklauso nuo tinklo eksploatacijos laiko. Pirma aprašoma bendroji metodikos dalis, kuri galioja ne vien energetikos tinklams (pvz., elektros ar dujų), bet ir bendresniu atveju, pavyzdžiui, geležinkelių tinklams ar kito tipo transporto keliams. Ši bendroji dalis yra skirta konstruoti tinklo patikimumo, priklausomo nuo laiko, modelį įtraukiant duomenų heterogeniškumo vertinimą. Toliau pristatomas nuo duomenų registravimo kriterijaus priklausomas modelis (toliau, CDP modelis), taikytinas dujų tinklų patikimumui vertinti, kai įvykio įtraukimo į duomenų bazę kriterijus (arba taisyklė) pasikeičia vieną ar daugiau kartų per visą stebimą laikotarpį. Kitas skyrelis skirtas Borrel-Tanner modelio išplėtojimui, kai atsižvelgiama į elektros tinklo duomenų heterogeniškumą ir iš to kylantį neapibrėžtumą.

1.2.1 Nuo laiko priklausomų sistemų patikimumo vertinimas

Jei turimi duomenys rodo kitimo tendenciją, tuomet gedimo intensyvumui modeliuoti dažnai pasitelkiamos trendo funkcijos, nusakančios priklausomybę nuo laiko:

1. dalimis pastovus $\lambda(t) = \lambda_i, t \in [\tau_i; \tau_{i+1}]$;
2. tiesinis $\lambda(t) = \theta_1 + \theta_2 t$;
3. eksponentinis (log-tiesinis) $\ln \lambda(t) = \theta_1 + \theta_2 t$;
4. laipsninis $\lambda(t) = \theta_1 t^{\theta_2}$;
5. Xie ir Lai modelis

$$\lambda(t) = \theta_1 \theta_2 (\theta_1 t)^{\theta_2 - 1} + \theta_3 \theta_4 (\theta_3 t)^{\theta_4 - 1}, 0 < \theta_2 < 1, \theta_4 > 1;$$
6. apibendrintas Makehamo $\lambda(t) = \theta_1 e^{\theta_2 t} + \frac{\theta_3}{1 + \theta_4 t}$;

čia $\lambda(t)$ – nuo laiko priklausomas gedimo intensyvumas, t – laiko kintamasis, $\Theta = (\theta_1, \dots, \theta_4)$ – parametrai, lemiantys funkcijos formą.

Deja, Bajeso metodai įprastai netaikomi tolydiems dydžiams, pvz., laikui. Šią problemą iš dalies galime išspręsti nagrinėdami sistemos būsenos kitimą laike kaip diskretų procesą, kuris įgyja pastovias reikšmes tam tikrais laiko

intervalais su šuoliu to intervalo pabaigoje. Matematiškai tai gali būti išreiškama taip:

$$d(t) = \sum_{i=1}^{N-1} \mathbf{1}_{\{t_i < t < t_{i+1}\}} d(t_i); \quad (7)$$

čia $d(t)$ – nagrinėjamos patikimumo charakteristikos funkcija; konstanta $d(t_i)$ – tos charakteristikos vertė laiko periodu $t_i < t < t_{i+1}$; N – laiko intervalų skaičius. Jei turime duomenų imtį su tūriu N , tuomet aposteriorinė nežinomų parametrų tikimybės tankio funkcija bus išreiškama formule:

$$\pi(\Theta | Y, t) = \frac{\prod_{i=1}^m \pi_i(\theta_i) \prod_{j=1}^n f(y_j | d(t_j, \Theta))}{\int_{\Omega} \prod_{i=1}^m \pi_i(\theta_i) \prod_{j=1}^n f(y_j | d(t_j, \Theta)) d\Theta}. \quad (8)$$

Modelio suderinamumas gali būti nagrinėjamas vertinant vadinamąsias aposteriorines p reikšmes (tai būtų hipotezės tikrinimas), arba skaičiuojant Nuokrypio informacijos kriterijaus (DIC, angl. *Deviance Information Criterion*) reikšmes (keleto modelių tarpusavio palyginimui). Aposteriorinė p reikšmė apibrėžiama taip:

$$p = \mathbb{P} \left[D(Y^{rep}, \theta) > D(Y, \theta) | Y \right];$$

čia Y^{rep} – replikuoti duomenys, kurie galėtų būti stebimi esant pasirinktam modeliui. $D(Y, \theta)$ – neatitikimo matas (angl. *discrepancy measure*). Keli neatitikimo matai (dažniausiai aptinkami literatūroje) bus naudojami vėliau:

$$D_1(Y, \theta) = \sqrt{E(Y - E(Y | \theta))^2}, \quad D_2(Y, \theta) = \sum \frac{(Y_i - E[Y_i | \theta])^2}{\text{Var}[Y_i | \theta]}. \quad (9)$$

DIC apibrėžiamas taip:

$$\text{DIC} = -2\mathbb{E}_{\Theta|X} [\log L(Y | \Theta)] + p_D; \quad (10)$$

čia $L(Y | \Theta)$ – tikėtinumo funkcija, kai turimi duomenys yra Y , o modelio parametrų vektorius yra Θ , $p_D = \frac{1}{2} \text{Var}[-2 \log L(X | \Theta)]$. Paprastai modelis gerai atitinka duomenis, kai p reikšmė yra artima 0,5, o nagrinėjant DIC reikšmes sakoma, jog vienas modelis geriau atitinka duomenis, nei kitas modelis, jei pastarojo modelio DIC reikšmė yra didesnė už kito modelio DIC reikšmę, t. y. modelis su mažiausia DIC reikšme geriausiai atitiks duomenis (palyginus su kitais nagrinėjamais modeliais).

Neretai susidaro tokia situacija, jog su nagrinėjama duomenimis yra suderinamas daugiau nei vienas modelis, t. y. galima „geru“ modelių aibė yra tokia:

$$M = (d_1(t, \Theta_1), \dots, d_r(t, \Theta_r));$$

čia $d_i(t, \Theta_i), i = \overline{1, r}$ – modeliai, kuriems yra nustatytas aukštas suderinamumas su duomenimis. Tokiomis aplinkybėmis modeliavimo neapibrėžtumas negali būti nusakomas klasikiais metodais, t. y. klasikinė statistika negelbsti apibūdinant modelio parinkimo neapibrėžtumą. O tai, savo ruožtu, veda prie nekorektiško bendro neapibrėžtumo kiekybinio vertinimo. Bajeso metodai, priešingai, šiuo atveju yra ypač parankūs, kadangi galima atlikti vadinamąją modelių vidurkinimo procedūrą.

Tegul $A(t)$ yra suvidurkintas gedimo intensyvumas (ar kokia kita modeliuojama patikimumo charakteristika) per modelių aibę M . Tuomet turėsime aposteriorinį tikimybės skirstinį:

$$\pi(A(t) | Y) = \sum_{j=1}^r \pi(A(t) | Y, d_j(t, \Theta_j)) \pi(d_j(t, \Theta_j) | Y); \quad (11)$$

čia $\pi(d_j(t, \Theta_j) | Y)$ – modelio $d_j(t, \Theta_j)$ aposteriorinis tikimybės skirstinys; $p(A(t) | Y, d_j(t, \Theta_j))$ – dydžio $A(t)$ aposteriorinė tikimybės tankio funkcija, esant modeliui $M_j = d_j(t, \Theta_j)$. Aposteriorinis modelio M_j tikimybės skirstinys tuomet yra

$$p(M_j | Y) = \frac{p(Y | d_j(t, \Theta_j)) p(d_j(t, \Theta_j))}{\sum_{l=1}^r p(Y | d_l(t, \Theta_l)) p(d_l(t, \Theta_l))}. \quad (12)$$

Anksčiau buvo pristatyti bendri nuo laiko priklausomų patikimumo charakteristikų Bejeso modeliavimo bruožai. Toliau visa tai išplėsime nagrinėdami tam tikrus specifinius atvejus. Pirmasis atvejis yra konstruojamas turint galvoje dujotiekio patikimumą, tačiau metodika yra bendra ir gali būti taikoma kitoms sistemoms.

1.2.2 Patikimumo duomenų heterogeniškumo modeliavimas

Paprastai, siekiant įvertinti sistemos patikimumą, visi statistiniai gedimų duomenys iš skirtingų šaltinių sujungiami į vieną imtį. Tačiau toks agregavimas yra klaidingas, kai negalima skirtingų šaltinių duomenų imčių laikyti kaip sugeneruotų pagal tą patį tikimybinį skirstinį, pvz., panašūs komponentai ar sistemos gali degraduoti/senti skirtingu greičiu, atsižvelgiant

į aplinką, kurioje jie eksploatuojami, arba dėl besiskiriančių inspektavimo ir remonto programų patikimumo charakteristikos be jokios abejonės nebus identiškos. Taigi, atsiranda papildomas neapibrėžtumo lygmuo – vadinamoji *variacija tarp šaltinių*. Ši papildoma variacija gerokai paveikia, kaip matysime, galutinius patikimumo vertinimo rezultatus ir jų neapibrėžtumą.

Tarkime, turime tam tikro tipo komponentų ar sistemų patikimumo duomenis iš N skirtingų duomenų šaltinių. Paprastumo dėlei tarsime, jog stebėjimo laiko intervalai yra lygūs, o visas stebėjimo periodas yra T . Tuomet duomenis aprašys tokia matrica:

$$Y = (Y^1, Y^2, \dots, Y^N) \in R^{N \times T}, \text{ kai } Y^i = [y_1^i, y_2^i, \dots, y_T^i].$$

Kiekvienos imties Y^i tikimybės tankio funkcija tegul bus $f(Y^i | d(t, Z^i; \theta^i))$; čia $d(t, Z^i; \theta^i)$ – parametrinė funkcija, nusakanti patikimumo charakteristikos priklausomybę nuo laiko, nuo kitų kintamųjų Z ir parametru θ . Paprastumo vardan, toliau nebebus rodoma priklausomybė nuo Z . Nagrinėjamu atveju tikėtinumo funkcija yra tokia:

$$L(Y | \theta) = \prod_{i=1}^N f(Y^i | d(t; \theta^i)). \quad (13)$$

Visas hierarchinis modelis tuomet gali būti išreiškiamas taip:

$$\begin{aligned} Y^i | \theta^i &\sim f(Y^i | d(t; \theta^i)), \\ \theta^i | \xi &\sim \pi_1(\theta^i | \xi), i = \overline{1, N}, \\ \xi &\sim \pi_2(\xi). \end{aligned} \quad (14)$$

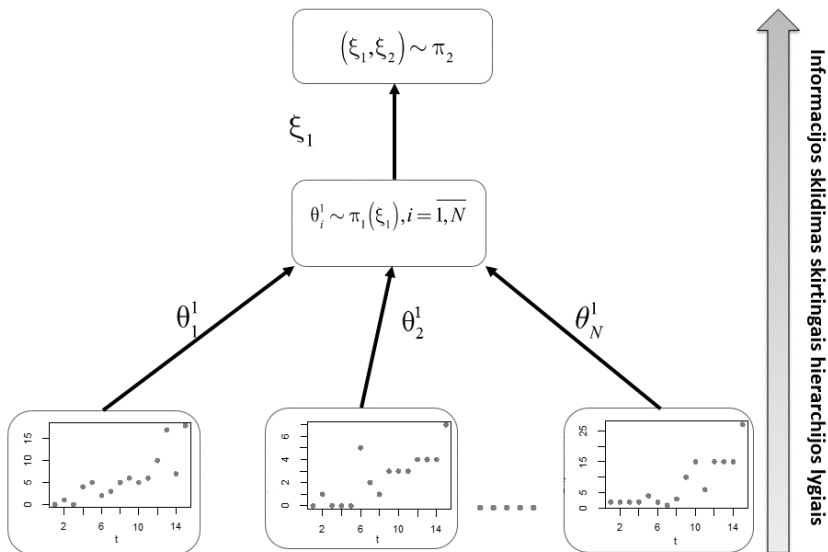
Aposteriorinė nežinomų parametru tikimybės tankio funkcija:

$$\theta, \xi | Y \sim L(Y | \theta) \left[\prod_{i=1}^N \pi_1(\theta^i | \xi) \right] \cdot \pi_2(\xi). \quad (15)$$

Grafiškai hierarchinio modelio principas pademonstruotas 1.1 pav.

1.2.3 Nuo kriterijaus priklausomas Puasono modelis

Neretai sistemų patikimumo duomenyse pasireiškia tam tikri netolydumai, trūkiai. Taip gali nutikti dėl kriterijaus (šiam tekste šis terminas vartojamas kaip žodžio „taisyklė“ sinonimas), naudojamo įvykį registruoti kaip gedimą, kaitos. Šie duomenų registravimo kriterijai laikui bėgant yra keičiami, t. y. jie priklauso nuo laiko. Taip gali įvykti dėl įvairių priežasčių, pavyzdžiui, siekiant mažinti sistemų keliamą riziką visuomenei. Tokia kriterijų kaita būdinga dujotiekio sistemų veiklą ir sutrikimus reglamentuojančiuose dokumentuose.



1.1 pav. Hierarchinio Bajeso metodo grafinis vaizdas

Pristatant tokių pokyčių modeliavimo metodiką, kad būtų aiškiau, tuo pačiu bus nagrinėjama ir OPS duomenų bazės (kuri apima Š. Amerikos dujotiekio vamzdynų pažeidimų statistiką) pavyzdį. Tarkime, vamzdynams, kurių amžius (t. y. laikas, praėjęs nuo eksploatacijos pradžios) yra t ir ilgis L_t , įvykių skaičius yra X_t . Bus laikoma, jog įvykių intensyvumas kiekvienais metais t yra tuo metu naudojamo incidentų registravimo kriterijaus C_t funkcija:

$$\lambda = \lambda(t; C_t).$$

Tegul C žymės visų naudotų gedimo duomenų registravimo kriterijų aibę, t. y. $C_t \subseteq C$, visiems t . Pavyzdžiui, OPS duomenims turime, jog per 42 metus buvo naudojami 3 kriterijai:

$$C = \{C_1 (> 5\,000 \$), C_2 (> 50\,000 \$), C_3 (> 50\,000 \$ \text{ arba } > 84\,000 \text{ m}^3)\}.$$

Tačiau čia iškyla problema – kriterijai nėra tarpusavyje nesutaikomi, t. y. įvykis, kurio metu patirta žala yra daugiau nei 50000 \$, tenkina visus kriterijus, o įvykis su žala, mažesne nei 50000 \$, bet didesne nei 5000 \$, tenkina tik pirmąjį kriterijų. Šiems kriterijams turime tokius sąryšius:

$$C_2 \subset C_3 \subset C_1.$$

Kitas kelias būtų tiesiog pasirinkti bazinę funkciją gedimo intensyvumui, o kiekvienam kriterijui modeliuoti parinkti skirtingą parametą-daugiklį (t. y. nežinomą parametą, kurį reikės įvertinti statistiškai). Tačiau šie daugikliai neturi natūralios interpretacijos. Be to, šis supaprastintas modelis negalėtų būti išplėstas atveju, kai skirtingos duomenų bazės naudojamos vienoje analizėje. Taigi, pirmiausiai iš naujo apibrėšime kriterijus, kurie jau bus tarpusavyje nesutaikomi. Gauname tokius naujus kriterijus:

$$C' = \left\{ C'_1 (> 5\,000 \$, < 50\,000 \$, < 84\,000 \text{ m}^3), \right. \\ C'_2 (> 5\,000 \$, < 50\,000 \$, > 84\,000 \text{ m}^3), \\ C'_3 (> 50\,000 \$, < 84\,000 \text{ m}^3), \\ \left. C'_4 (> 50\,000 \$, > 84\,000 \text{ m}^3) \right\},$$

kai šie sąryšiai yra tenkinami:

$$C_1 = C'_1 \cup C'_2 \cup C'_3 \cup C'_4, \\ C_2 = C'_3 \cup C'_4, \\ C_3 = C'_2 \cup C'_3 \cup C'_4.$$

Tarkime, jog įvykių, tenkinančių visus kriterijus C' , skaičius laiko periodu t yra \tilde{Y}_t . Tik dalis šio įvykių skaičiaus yra įvykiai, tenkinantys laiko momentu t galiojančią kriterijų C'_i , šią dalį žymėsime $\tilde{Y}_{t,i}$. Jei tarsime, jog kiekvienas įvykis yra „eksperimento“ rezultatas, atitinkantis tam tikro kriterijaus kategoriją, tai galime laikyti \tilde{Y}_t kaip sumą atsitiktinių dydžių, turinčių polinominį skirstinį, pvz., $\tilde{Y}_t = \tilde{Y}_{t,1} + \tilde{Y}_{t,2} + \tilde{Y}_{t,3} + \tilde{Y}_{t,4}$. Tuomet, jei kriterijaus C'_i tikimybė yra p_i , tai kiekvienu momentu t turime, jog

$$f(y_{t,1}, \dots, y_{t,K}; Y_t, \bar{p}_1, \dots, \bar{p}_K) = \frac{Y_t!}{y_{t,1}! \dots y_{t,K}!} \bar{p}_1^{y_{t,1}} \dots \bar{p}_K^{y_{t,K}}; \quad (16)$$

čia $\sum y_{t,i} = \tilde{Y}_t$. Kadangi OPS duomenų bazės atveju yra išskirti 4 tarpusavyje nepriklausomi kriterijai, tai $K = 4$. Tuo tarpu kiekvienam $\tilde{Y}_{t,i}$ turime, jog

$$\tilde{Y}_{t,i} \sim \text{Poisson}(\lambda_t \bar{p}_i); \quad (17)$$

čia λ_t – bazinė gedimo intensyvumo funkcija, priklausanti nuo laiko, t. y. $Y_t = \sum Y_{t,i} \sim \text{Poisson}(\lambda_t)$.

Galiausiai, stebimiems duomenims, t. y. tiems įvykiams, kuriems konkrečiu laikotarpiu galiojo konkretūs kriterijai, turime tokį modelį:

$$\tilde{Y}_i \sim \text{Poisson} \left(\lambda_i \sum_{C_i} \bar{p}_i \right), \quad (18)$$

OPS duomenų bazės atveju įvykių kriterijų aibei $C = \{C_1, C_2, C_3\}$ turime tokius daugiklius:

$$(1, \bar{p}_3 + \bar{p}_4, \bar{p}_2 + \bar{p}_3 + \bar{p}_4) = (1, 1 - \bar{p}_1 - \bar{p}_2, 1 - \bar{p}_1). \quad (19)$$

Šis modelis leidžia panaudoti visus prieinamus duomenis, neatsižvelgiant į kriterijus. Tai reiškia, jog gausime tikslesnius patikimumo įverčius, kadangi nėra reikalo atmesti dalį duomenų, stebėtų esant kitiems kriterijams.

1.2.4 Hierarchinis Borrel-Tanner modelis

Šiame skyrelyje nagrinėsime kaskadinio gedimo elektros perdavimo tinkle modeliavimo galimybes. Be abejo, tokio gedimo modeliavimo taikymas kitoms sistemoms yra panašus, tačiau kaskadinis gedimas vis dėlto yra aktualiausias elektros tinklams.

Nagrinėjant kaskadinį gedimą tariama, jog besišakojantis procesas su puasoniniu atjungimų linijų skaičiaus skirstiniu gali būti taikomas kaskadinio gedimo apimčiai modeliuoti. Bendras skaičius individų iš M_0 tėvų yra pasiskirstęs pagal Borrel-Tanner skirstinį:

$$\mathbb{P}[R = r | \theta, M_0] = M_0 \theta (r\theta)^{r-M_0-1} \frac{e^{-r\theta}}{(r-M_0)!}, \quad r \geq M_0, \quad 0 < \theta < 1; \quad (20)$$

čia parametras θ – kaskadinių atjungimų sklidimo intensyvumas.

Kai pradinis atjungimų skaičius yra puasoninis, iš Borrel-Tanner skirstinio gauname besąlyginį skirstinį:

$$\mathbb{P}[X = r | \lambda, \theta] = \frac{\lambda(\lambda + (r-1)\theta)^{r-2}}{(r-1)!} \exp[-\lambda - (r-1)\theta], \quad r = 1, 2, 3, \dots; \quad (21)$$

čia λ – pradinių atjungimų intensyvumas. Šis skirstinys žinomas kaip Apibendrintasis Puasono skirstinys (APS).

Toliau bus tariama, jog kiekviena atjungimų kaskada yra tam tikra prasme kitokia, nei visos kitos.

Tegu kiekviena m -oji kaskada modeliuojama su APS, kurio parametrai yra λ_m ir θ_m . Taip pat tarkime, jog parametrai λ_m ir θ_m pasiskirstę pagal log-normalųjį ir normalųjį skirstinius su nežinomais parametrais μ_i ir σ_i , $i \in \{1, 2\}$. Bendras hierarchinis Borrel-Tanner modelis matematiškai aprašomas taip:

$$\begin{aligned}
r_m | \lambda_m, \theta_m &\sim APS(\lambda_m, \theta_m), m = \overline{1, M}, \\
\lambda_m | \mu_1, \sigma_1 &\sim LN(\mu_1, \sigma_1^2), \\
\theta_m | \mu_2, \sigma_2 &\sim N(\mu_2, \sigma_2^2), \\
\pi(\mu_1, \sigma_1, \mu_2, \sigma_2) &\propto 1.
\end{aligned}
\tag{22}$$

Dėl įvairių aplinkos, remonto, inspektavimo veiksnių įtakos linijų atjungimai yra pasiskirstę pagal dėsnius, turinčius skirtingus parametrus, o hierarchinis Borrel-Tanner modelis būtent ir įvertina šiuos skirtumus ir iš to kylantį rezultatų neapibrėžtumą.

1.3 Energijos suvartojimo vertinimas atsižvelgiant į sistemos patikimumą

Siekiant įvertinti, kaip sistemos patikimumas lemia tos sistemos energijos vartojimo charakteristikas, vienas būdų yra sistemos procesų imitacija ar modeliavimas. Fizikiniai procesai yra pagrindiniai veiksniai, turintys įtaką energijos suvartojimui.

Vartojamos energijos vertinimas pirmiausiai yra skaičiavimo procedūra, pateikianti energijos, reikalingos tam tikram procesui vykdyti, kiekybinį įvertį.

Iš čia gauname galimą *energijos modeliavimo įrankio* apibrėžimą. Tai yra programinė priemonė (programos modulis, programa, kodas, paketas), paremta tam tikro proceso modeliavimu ir skirta pakartotiniams (bet, galbūt, su kitais parametrais) to paties proceso energijos vartojimo skaičiavimams.

Energijos modeliavimo įrankis (arba Energijos simulatorius – ES) turi šią architektūrą:

- Pradinių duomenų bloką;
- Energijos vartojimo matematinio modelio bloką;
- Energijos vartojimo imitavimo bloką;
- Duomenų išvesties bloką.

Tokia ES koncepcija buvo išplėsta, sudarant galimybę įtraukti sistemos patikimumo charakteristikas. Ši koncepcija realizuota programine priemone ir pritaikyta vertinant dujų tinklų patikimumo įtaką kompresorių energijos vartojimui.

Tarkime, jog tinklas sudarytas iš dujų vamzdžių, kompresorių ir apkrovos taškų (vartotojų). Kiekviename apkrovos taške dujų vartojimas nusakomas atsitiktiniu dydžiu, t. y. turime tam tikrą suvartojamų dujų debito stochastinę laiko eilutę. Nenagrinėsime pereinamųjų procesų, o darysime prielaidą, jog kiekvienu laiko momentu dujotiekyje yra nusistovėjęs režimas.

Trūkių–inspektavimo–remonto dinamika

1. Sugeneruoti kiekvienam apkrovos taškui debitų laiko eilutes;
2. Kartoti kiekvienam imitavimo periodui (pasirinkta 1 dienai):
 - 2.1. Prognozuoti naujų trūkių skaičių N tinkle;
 - 2.2. Generuoti N pradinių trūkių gylių;
 - 2.3. Generuoti N pradinių trūkių ilgių;
 - 2.4. Generuoti N trūkių didėjimo intensyvumų.
3. Kiekvienam naujam i -ajam trūkiui:
 - 3.1. Naudoti aptikimo tikimybes prognozuoti laikui L kai i -asis trūkis bus aptiktas ir pašalintas;
 - 3.2. „Auginti“ trūkį iki ilgio L ir pašalinti po $\lceil L / \text{Augimo intensyvumas} \rceil$ dienų.

1.2 pav. Trūkių dinamikos imitavimo algoritmas

Dujų debitų ir energijos vartojimo skaičiavimai

Kartoti kiekvienam imitavimo periodui (pasirinkta 1 diena):

1. Modifikuoti gretimumo matricą pridedant/sunaikinant mazgus, atitinkančius naujus/suremontuotus ištekėjimus;
2. Įvertinti naujo trūkio pratekėjimo dydį, atsižvelgiant į dimensijas, ir analizuoti jį kaip naują vartotoją;
3. Automatiškai sukonstruoti naują netiesinių lygčių sistemą ir apskaičiuoti naujus debitus bei slėgius;
4. Apskaičiuoti kompresorinės stoties energijos suvartojimą.

1.3 pav. Imitacinio dujotiekio debitų, slėgių ir energijos suvartojimo modeliavimo algoritmas

Laikysime, jog vamzdyje atsivėręs ir besiplečiantis trūkis yra toks mazgas, kuriame taip pat dujos yra vartojamos. Taigi, skirtingais laiko momentais bus skirtingas kiekis apkrovos taškų, o kartu tinklo topologija bus besikeičianti laike. Tai savo ruožtu reiškia, jog lygčių, nusakančių slėgių pokyčius ir debitus, sistema yra nuolat besikeičianti – su atsitiktinai kintančiu kintamųjų skaičiumi. Dėl šios priežasties lygčių sistema negali būti *a priori* apibrėžta programoje.

Visa tinklo darbo imitavimo programa gali būti padalyta į dvi stambias dalis: viena – trūkių dinamikos imitacijai (1.2 pav.), kita – srautams, slėgiui ir energijos vartojimui skaičiuoti (1.3 pav.).

Kompresoriaus galia, reikalinga sukurti slėgį P_d , apskaičiuojama taip:

$$\text{Galia} = 4,0639 \cdot \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot Q \cdot T \cdot \frac{Z_s + Z_d}{2} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \left[\left(\frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]; \quad (23)$$

čia γ – specifinių šilumų santykis, Q – įtekėjimo debitas, T_K – įtekančių dujų temperatūra, Z_s ir Z_d – įtekančių ir ištekančių dujų spūdumo koeficientas, η – kompresoriaus adiabatinis efektyvumas.

Trūkių atsiradimas, jų pradiniai parametrai ir augimo intensyvumai buvo generuojami atsitiktinai, panaudojant realiai nustatytas charakteristikas. Tikimybinis skirstinys, iš kurio generuojami pradinės dimensijos ir augimo intensyvumai, buvo log-normalusis.

Taip pat įtraukėme ir remonto/inspektavimo efektyvumo rodiklius: pasinaudojant vadinamosiomis Aptikimo tikimybėmis (angl. POD – *probability of detection*), ir galiausiai kiekvienam naujam trūkiui buvo sugeneruota per kiek laiko jis bus aptiktas ir pašalintas.

1.4 Tinklo patikimumo vertinimas

Tarkime, nagrinėjame bet kurio tipo tinklą, t. y. neapibrėžiamą, ar tai elektros, ar transporto kelių, ar dujų tinklas. Kaip minėta 1.1 poskyryje, tinklo patikimumas yra nusakomas per jo struktūros funkciją:

$$R(t) = \varphi(p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)).$$

Funkcija $\varphi(\cdot)$ nusako galimybę iš vieno tinklo elemento patekti į kitą elementą keliaujant per tinklo viršūnes ir briaunas. $p_i(t)$ yra elemento patikimumas, t.y. tikimybė, jog i -asis tinklo elementas yra vis dar nesugedęs momentu t . Tiksliau,

$$p_i(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t \lambda_i(\tau; \theta) d\tau\right);$$

čia $\lambda(t; \theta)$ – nuo laiko priklausomas gedimo intensyvumas. Tinklo patikimumo modelio konstravimas ir vertinimas gali būti nusakomas tokiais žingsniais:

1. Apsibrėžti kiekvienam tinklo elementui nuo laiko priklausomo patikimumo modelį, t. y. parinkti funkcinę išraišką gedimo intensyvumui $\lambda(t; \theta)$;
2. Modelį diskretizuoti (1.2.1 poskyris, (7) formulė):

$$\lambda(t; \theta) = \sum_{i=1}^{N-1} 1_{\{t_i < t < t_{i+1}\}} \lambda(t_i; \theta);$$

3. Sudaryti Bajeso aposteriorinį skirstinį nagrinėjamam modeliui ((8) formulė);
4. Atlikti modelio atitikimo duomenims patikrą ((9) ir (10) formulės);
5. Išplėsti modelį su galimybe modeliuoti heterogeniškus duomenis (1.2.2 poskyris, (14) formulė);
6. Sukonstruoti aposteriorinį nežinomų modelio parametrų skirstinį ((15) formulė);
7. Sukonstruoti tinklo struktūros funkciją $\varphi(\cdot)$ ir apskaičiuoti tinklo patikimumą laiko momentu t :

$$R(t) = \varphi(p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)).$$

Šie žingsniai yra bendri bet kurio tipo tinklui. Tačiau jei turim elektros ar gamtinių dujų perdavimo tinklus, galimi išsamesni skaičiavimai. Gamtinių dujų tinklui turime nuo kriterijaus priklausomą Puasono modelį ir jo hierarchinį plėtinį (1.2.3 poskyris). Elektros perdavimo tinklo atveju galima nagrinėti kaskadinius gedimus pasinaudojant hierarchiniu Borrel-Tanner modeliu (1.2.4 poskyris).

Esant poreikiui, galima nagrinėti ir susijusius uždavinius, pvz., gamtinių dujų tinklo patikimumo įtaka kompresorinių stočių suvartojamai energijai vertinti (1.3 poskyris).

1.5 Skyriaus rezultatai

Šiame skyriuje pristatyta tinklų patikimumo vertinimo metodika, kai atsižvelgiama į duomenų neapibrėžtumą ir priklausomumą nuo laiko. Aptarta, kaip priklausomybė nuo laiko bei duomenų heterogeniškumas turėtų būti įtraukiami į tinklo patikimumo vertinimą. Atsižvelgimas į priklausomybę nuo laiko ir duomenų heterogeniškumą, o taip pat ir tinklo patikimumo modelių formavimas yra bendrieji žingsniai, taikytini bendruoju atveju, t. y. ne tik energetikos tinklams. Borrel-Tanner modelis buvo išplėtotas į hierarchinį modelį bei sukurtas nuo duomenų registravimo kriterijaus priklausomas Puasono modelis turint galvoje kaskadinius elektros tinklo gedimus bei duomenų registravimo kriterijaus kaitą dujų vamzdynų gedimų

duomenų bazėse. Taip pat suformuluoti energijos suvartojimo dujų kompresorinėse stotyse priklausomybės nuo tinklo patikimumo charakteristikų tyrimo principai.

2 METODIKOS ANALIZĖ IR TAIKYMAS

2.1 Metodikos ir sukurtų priemonių tyrimas

Šiame skyriuje bus nagrinėjama ir pritaikyta ankstesniame skyriuje pristatyta tinklo patikimumo vertinimo metodika. Pademonstruoti metodikos universalumui bus įvairūs tinklais ir sistemos, o tai pat ir jų gedimų duomenų imtys. Poskyris 2.1 yra skirtas nagrinėti metodikos pritaikomumą retiems duomenims vertinti, kai atsižvelgiama tik į sistemos amžių (t. y. turime senėjimo atvejį). Toliau, 2.2 poskyryje, nagrinėsime atvejį, kai gedimų duomenys yra ne tik reti ir priklausomi nuo laiko, bet ir jie yra heterogeniški. 2.3 bei 2.4 poskyriai skirti Šiaurės Amerikos elektros perdavimo tinklo 500 kV dalies bei gamtinių dujų perdavimo tinklo patikimumui vertinti. Poskyris 2.5 yra skirtas nagrinėti atskirtą uždavinį – nustatyti kompresorinės stoties energijos suvartojimo priklausomybę nuo gamtinių dujų tinklo patikimumo lygmens, kuris vertinamas pritaikant sudarytą metodiką.

2.1.1 Nuo laiko priklausančio patikimumo vertinimas

Svarbu suprasti, jog elektros tinklo patikimumui įtakos turi elektrinių patikimumas, kuris yra priklausomas nuo atskirų elektrinės sistemų patikimumo. Elektrinė gali būti nagrinėjama kaip mazgas elektros tinklo grafe su keletu iš mazgo išeinančių briaunų (aukštos įtampos elektros linijų). Viena elektrinės sistemų, turinčių įtakos elektros tiekimo patikimumui, yra Instrumentų ir kontrolės sistema (I&C, angl. *Instrumentation and Control*). Pavyzdžiui, panašiai į kitas sistemas gali būti nagrinėjama branduolinės elektrinės I&C sistema.

I&C sistema kartu su ją aptarnaujančiu personalu gali būti laikoma branduolinės elektrinės „centrine nervų sistema“, kontroliuojančia fizinius elektrinės parametrus, eksploatacijos charakteristikas, integruojančia informaciją ir darančia automatines elektrinės darbo korekcijas. Iš esmės, I&C sistema, be kitų jos funkcijų, branduolinėje elektrinėje įgalina ir užtikrina saugią ir patikimą elektros generaciją. Todėl yra ypač svarbu turėti modelį šios sistemos komponentų patikimumui vertinti. Šis modelis gali būti susietas su tikimybine saugos analize, siekiant gauti elektrinės elektros gamybos patikimumo įvertį.

Toliau bus nagrinėjama imtis duomenų, nusakančių elektroninių I&C komponentų, naudojamų branduolinėse elektrinėse, gedimus. Duomenys surinkti per 11 metų iš 20 branduolinių reaktorių. Pradinė statistinė analizė,

kur nustatyta, jog pasireiškia senėjimo efektas, pateikta Europos komisijos Jungtinio tyrimų centro Energetikos ir transporto instituto ataskaitoje.

Nagrinėjime gedimo intensyvumą kaip funkciją $\{\lambda(t); t \geq 0\}$, turinčią šuolius kiekvieno stebėjimo intervalo pabaigoje:

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^T 1_{\{t_i < t \leq t_{i+1}\}} \lambda_i. \quad (24)$$

Taigi, kiekvienais metais gedimai yra generuojami homogeninio Puasono skirstinio su skirtingais gedimo intensyvumo parametrais $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, 15$; čia skaičius 15 reiškia, jog seniausiems komponentams buvo 15 metų. Kiekvienais metais skyrėsi stebimų reaktorių skaičius, todėl skyrėsi ir bendras komponentų eksploatacijos laikotarpis τ_i . Jei i -aisiais metais įvykusių gedimų skaičius yra N_i , tai turime tokį gedimų skaičiaus skirstinį:

$$\mathbb{P}(N_i) = \frac{e^{-\lambda_i \tau_i} (\lambda_i \tau_i)^{N_i}}{N_i!}. \quad (25)$$

Atitinkamai, tikėtinumo funkcija:

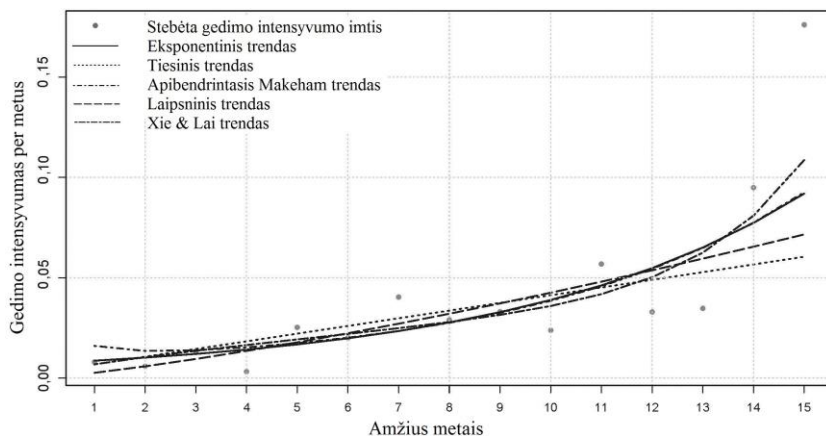
$$L(\Theta) = P(Y | \Theta) = \prod_{i=1}^n \exp\{-\lambda(t_i, \Theta) \tau_i\} \frac{(\lambda(t_i, \Theta) \tau_i)^{N_i}}{N_i!}. \quad (26)$$

Buvo patikrinti 5 gedimo intensyvumo modeliai: tiesinis, eksponentinis, laipsninis, Makeham bei Xie ir Lai (2.1 pav.).

Atitinkamos aposteriorinės suderinamumo testų reikšmės pateiktos 1 lentelėje:

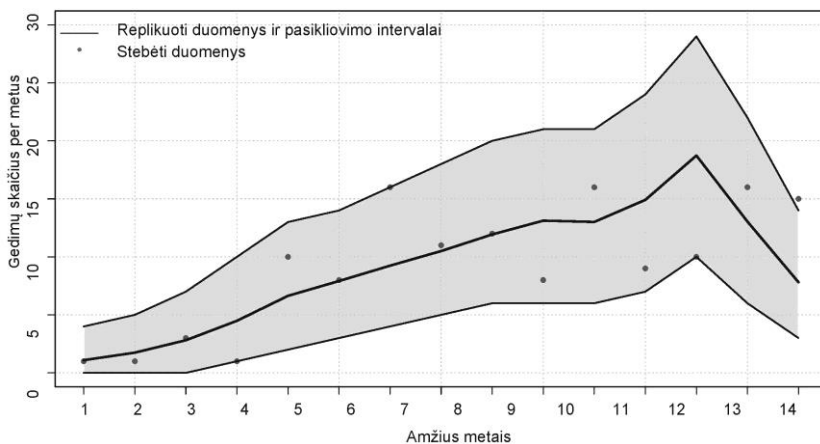
1 lentelė. Aposteriorinės p reikšmės nagrinėtiems gedimo intensyvumo modeliams

Modelis	Tiesinis	Eksponentinis	Laipsninis	Makehamo	Xie & Lai
$p(D_1)$	0,5458	0,6333	0,7356	0,6178	0,7006
$p(D_2)$	0,0042	0,0278	0,0084	0,0306	0,0110



2.1 pav. Nagrinėtų gedimo intensyvumo trendo modelių palyginimas

Nagrinėjant aposteriorines p reikšmes esant χ^2 neatitikimo matui D_2 (žr. (9) formulę) matyti, jog nei vienas iš modelių nėra tinkami (kuo reikšmė arčiau 0,5, tuo modelis geriau suderinamas su duomenimis), o $p(D_1)$ rodo, jog visi modeliai gerai paaiškina duomenis (tai matyti ir 2.2 pav.).



2.2 pav. Replikuoto gedimų skaičiaus pagal eksponentinį modelį ir realių duomenų palyginimas

Taigi, panaudojus p -reikšmę gaunami nevienareikšmiai rezultatai. Todėl dar buvo nagrinėjamas kitas matas – nuokrypio informacijos kriterijų (žr.

(11) formulę). Atitinkamos reikšmės pateiktos 2 lentelėje. Kuo mažesnė reikšmė, tuo modelis geriau suderinamas su duomenimis.

2 lentelė. Nuokrypio informacijos kriterijaus reikšmės nagrinėtiems gedimo intensyvumo trendo modeliams

Modelis	Tiesinis	EkspONENTINIS	Laipsninis	Makeham	Xie & Lai
DIC	91,39	86,48	88,42	94	88

Taip pat matyti, kad visi nagrinėti modeliai DIC kriterijaus atžvilgiu paaiškina duomenis ganėtinai vienodai, galbūt tik kiek geresnis suderinamumas yra eksponentiniam modeliui. Todėl pasinaudojome Bajeso vidurkinimo procedūra ((12) formulė). Gautos modelių tikimybės pateiktos 3 lentelėje.

3 lentelė. Nagrinėtų gedimo intensyvumo trendo modelių tikimybės

Modelis	Tiesinis	EkspONENTINIS	Laipsninis	Makeham	Xie & Lai
$p(d_j(t, \Theta_j) Y)$	0,107	0,422	0,108	0,216	0,147

Matyti, jog modelių tikimybės atspindi su DIC kriterijumi susijusius rezultatus taip pat dominuojant eksponentiniam modeliui, t. y. tikimybė, jog nagrinėjami duomenys yra sugeneruoti esant eksponentiniam trendui, yra lygi apytiksliai 0,4.

2.1.2 Mažos imtys taikant hierarchinius Bajeso metodus patikimumui vertinti

Siekiant įvertinti, ar mažų imčių atveju (tai būdinga aukšto patikimumo sistemoms) patikimumo charakteristikų įverčiai nėra labai nutolę nuo realių parametrų verčių, buvo atlikta analizė su bandomosiomis imtimis. Imtys buvo generuojamos pagal Puasono skirstinį, esant skirtingiems parametrams. Tariama, jog gedimo intensyvumas priklauso nuo laiko ir turi eksponentinę formą su dviem parametrais, kuriems priskirtas normalusis antro lygio apriorinis skirstinys (1.1.2. poskyris), su iš anksto žinomomis parametrų $(\mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2)$ vertėmis.

Kadangi bet kurie parametrų įverčiai iš esmės yra vadinamosios nuostolių funkcijos pasirinkimo rezultatas, buvo nagrinėta kvadratinio nuostolio funkcija bei tam tikra nesimetrinė nuostolių funkcija $\text{LINEX}(\Delta) = be^{a(\Delta)} - c(\Delta) - b$ (čia $\Delta = \hat{\theta} - \theta$, θ – vertinamas parametras, $\hat{\theta}$ – to parametro įvertis) ir iš jų gaunami parametrų įverčiai. Tada sugeneruota 2 tūkstančiai imčių kiekvienam parametrų deriniui (4 lentelė). Kadangi tai

yra hierarchinis modelis, tariame, jog skirtingų šaltinių yra $N=10$ ir kiekvienam šaltiniui duomenys rinkti $T \in \{ 5, 7, 9, 11 \}$ metų laikotarpiais.

4 lentelė. Parametrų $(\mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2)$ reikšmės, naudotos modeliavimui

Parametras	Reikšmė			
μ_1	-0,5	-0,5	0,2	0,2
μ_2	0,2	0,2	0,2	0,2
σ_1	0,1	0,01	0,1	0,01
σ_2	0,1	0,1	0,1	0,1

Nustatyta, jog parametrų μ_1, μ_2 atveju LINEX nuostolių funkciją atitinkantys įverčiai vidutiniškai buvo arčiau tikrųjų reikšmių, nei kvadratinių nuostolių funkcijos atveju. Variacijos parametrams σ_1, σ_2 nustatytas atvirkštinis efektas – įprastas vidurkis (atitinka kvadratinių nuostolių funkciją) pasiekė geresnius rezultatus, nei LINEX nuostolių funkcija. Tačiau visais atvejais įverčių artumą vidurkiui nusakantis paslinktumas buvo ne itin didelis, net ir labai mažų imčių atveju. Tai rodo, kad hierarchinis modelis, net ir būdamas gana sudėtingas, yra pakankamai stabilus, jog būtų naudotinas vertinant sistemų patikimumą.

2.1.3 Šiaurės Amerikos elektros tinklo patikimumo heterogeniškumas

Toliau nagrinėsime metodikos taikymo galimybes pasitelkę Šiaurės Amerikos 500 kV tinklo dalies atjungimų duomenis. Pirmiausiai nagrinėsime perdavimo linijų nepatikimumą, po to – kaskadinių gedimų apimčių modeliavimą. Pradiniai atjungimų dažniai atskiroms linijoms pateikti 2.3 pav.

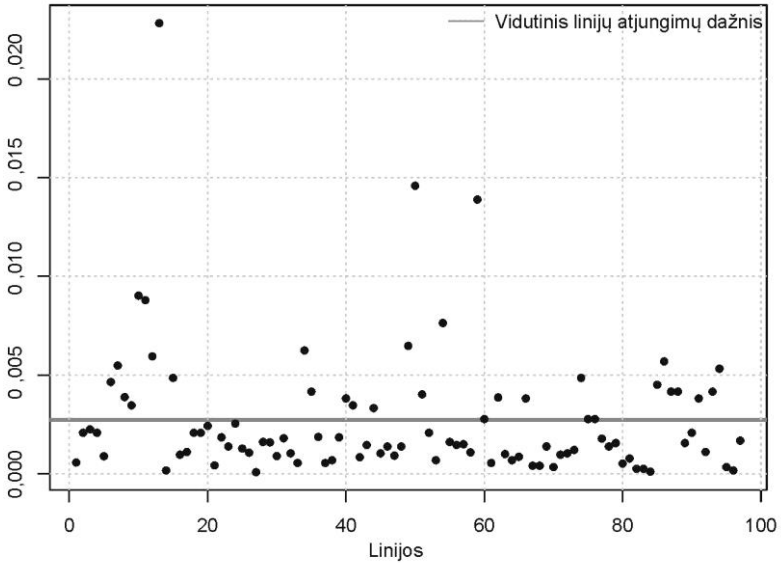
Norint nagrinėti kaskadinius atjungimus, sugrupavome atjungimus, atsižvelgiant į atjungimo laiką – viena paskui kitą atjungiamos linijos priskiriamos tai pačiai kaskadai, jei tarp atjungimų buvo mažiau nei valanda. Duomenys pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Kaskadų statistika

Pakopos numeris	1	2	3	4	5	6	7	8
Linijų skaičius	2572	411	117	47	19	10	2	1

Atjungimų skaičius buvo modeliuojamas kaip turintis Puasono skirstinį. Pirmiausiai buvo tariama, jog atjungimų intensyvumas yra vienodas visoms linijoms. Šiuo atveju nustatyta, jog 0,95 Bajeso pasiklovimo intervalas yra

$$\mathbb{P}[0,00205 \leq \lambda \leq 0,00224] = 0,95. \quad (27)$$



2.3 pav. Atjungimų dažnio įverčių ir jų vidurkio palyginimas

Toliau buvo daroma prielaida, jog linijos nėra identiškios, nors ir panašios, o jų atjungimai generuojami Puasono skirstinių su skirtingais parametrais. Kadangi negalima paneigti linijų panašumo, hierarchinis modelis šiuo atveju yra ypač parankus. Matematiškai šis modelis išreiškiamas taip:

$$\begin{aligned} X_i | \lambda_i &\sim \text{Poisson}(\Delta t_i L_i \lambda_i), \quad i = \overline{1, N}, \\ \lambda_i | \theta &\sim f(\theta), \\ \pi(\theta) &\propto 1; \end{aligned} \quad (28)$$

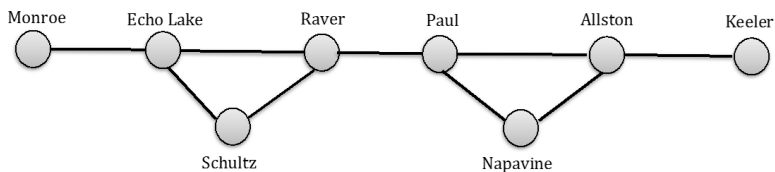
čia X_i – i -osios linijos atjungimų skaičius, per periodą Δt_i , esant atjungimų intensyvumui λ_i . Atjungimų intensyvumai yra pasiskirstę pagal tam tikrą skirstinį (mūsų atveju nagrinėjome 5 skirtingus skirstinius). 6 lentelėje pateikti atitinkami DIC kriterijaus vertinimo rezultatai.

6 lentelė. Tinklo atjungimų modelių DIC kriterijaus reikšmės

Modelis	Nehierarchinis	Normalusis	Gama	Log-normalusis	Veibulo
DIC	29497,24	28219,73	27158,41	26986	27160,01

DIC reikšmės rodo gana didelį skirtumą tarp hierarchinio ir nehierarchinio modelių. Hierarchinė struktūra leidžia efektyviau modeliuoti atjungimus ir rodo, jog tam tikros linijos yra pažeidžiamesnės, nei kitos. Taip yra todėl, kad skirtinguose regionuose galimai skiriasi aplinkos sąlygos, inspektavimo ir remonto efektyvumas.

Tarkime, jog reikia įvertinti tinklo, pavaizduoto 2.4 pav., patikimumą, t. y. tikimybę, jog laikotarpiu $[0; T]$ elektros tiekimas tarp Monroe ir Keeler mazgų nenutrūks.



2.4 pav. Š. Amerikos elektros tinklo dalis

Nagrinėjamos tinklo dalies patikimumas išreiškiamas formule:

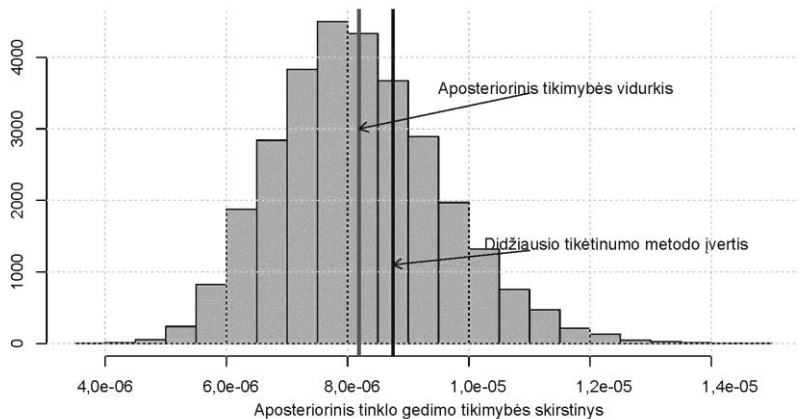
$$R(t) = \mathbb{E}[\phi(Y_1(t), \dots, Y_8(t)) | X] = \int \dots \int \phi(p_1(t), \dots, p_8(t)) \pi(p_1(t), \dots, p_8(t)) dp_1(t), \dots, dp_8(t); \quad (29)$$

čia $p_k(t) = \mathbb{P}[Y_k(t) = 1]$.

Toliau palyginsime patikimumo įvertį, gautą įprastu didžiausio tikėtimumo metodu su įverčiu iš aposteriorinio skirstinio, gauto Bajeso hierarchiniu metodu (2.5 pav.).

Kadangi atskirų linijų atjungimai efektyviausiai modeliuojami hierarchiniu modeliu (6 lentelė), tikėtina, jog šis efektas paveiks ir kaskadinius gedimus. Kaskadų apimtis modeliuosime Borrel-Tanner modeliu su įvairiais hierarchijų deriniais:

1. kuomet tariama, jog duomenys nėra heterogeniški (nehierarchinis modelis);
2. kai tik kaskadų pradinių atjungimų duomenys yra heterogeniški (λ hierarchinis modelis);
3. kai tik kaskadų atjungimų intensyvumai yra heterogeniški (θ hierarchinis modelis) ir kai tiek pradiniai atjungimai, tiek kaskadų sklidimo intensyvumai yra heterogeniški (pilnai hierarchinis modelis).



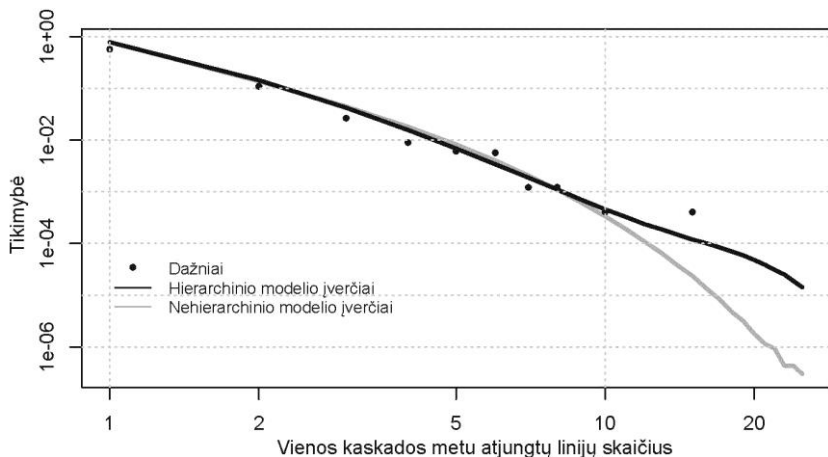
2.5 pav. Aposteriorinė tinklo gedimo tikimybės tankio funkcija

Skirtingų modelių palyginimas (7 lentelė) rodo, jog modeliuojant efektyviausia panaudoti hierarchiją λ parametru. Jis atspindi pradinis atjungimų skaičius kaskadose, t. y. pirmosios pakopos skirstinį. Tai yra natūrali pasekmė jau anksčiau nustatyto fakto, jog linijų atjungimai efektyviau modeliuojami hierarchiniu modeliu.

7 lentelė. Kaskadinių gedimų atranka pagal DIC kriterijaus reikšmes

Modelis	Nehierarchinis	λ hierarchinis modelis	θ hierarchinis modelis	Hierarchinis modelis
DIC	2642,7	-1106,1	6042	-636,4

Palyginus nehierarchinio ir hierarchinio modelių rezultatus matyti (žr. 2.6 pav.), jog rezultatai yra identiški beveik visur, išskyrus didelių apimčių kaskadas. Hierarchinis modelis leidžia tiksliau modeliuoti dideles kaskadas. Tai yra svarbu, kadangi pripažįstama, jog esantys modeliai dideles kaskadas negeba įvertinti korektiškai, t. y. didelės kaskados atveju gaunama mažesnė tikimybė, nei stebėti duomenys rodo. Elektros perdavimo tinklo kaskadinio gedimo tikimybės įvertis, taikant išplėtotą hierarchinį Borrel-Tanner modelį, palyginus su nehierarchinio modelio rezultatu, yra artimesnis stebimų gedimų pagrindu gautam įverčiui. Didžiausiam nagrinėtam (11 linijų) kaskadiniam gedimui šis įvertis yra lygus $4 \cdot 10^{-3}$, kai vertinant nehierarchiniu modeliu, gaunamas $1 \cdot 10^{-5}$ įvertis, o taikant išplėtotą hierarchinį modelį – tikslesnis $1 \cdot 10^{-4}$ gedimo tikimybės įvertis.



2.6 pav. Hierarchinio ir nehierarchinio modelių rezultatų palyginimas su empiriniais duomenimis

2.1.4 Dujų perdavimo tinklo patikimumo dinamika

Informacija apie įvykius dujų tinkluose skirtingose šalyse ar regionuose užfiksuota keliuose duomenų bazėse: OPS, EGIG, UKOPA, NEB. Tačiau kriterijai, naudoti įvykiui įtraukti į duomenų bazes, nebuvo identiški. Pavyzdžiui, OPS duomenų bazėje naudoti trys skirtingi kriterijai per daugiau nei 40 metų laikotarpį. Tai, be abejo, turi įtaką gedimo (skirtingai registruojamų įvykių) intensyvumo įverčiui – pasikeitus kriterijui įvyksta gedimų dažnio šuolis. Šiame skyrelyje pritaikysime anksčiau apibrėžtą nuo kriterijaus priklausomą Puasono modelį. Kadangi modelis buvo nagrinėjamas kartu su OPS duomenų bazės pavyzdžiu, tai čia apsiribosime tuo, jog iš karto pateiksime matematinio modelio formuluoatę:

$$Y_t | \lambda(t), p^v, p^{2v} \sim \begin{cases} \text{Poisson}(E_t \lambda(t)), t = \overline{1,14} \\ \text{Poisson}(E_t \lambda(t)(1 - p^v - p^{2v})), t = \overline{15,33} \\ \text{Poisson}(E_t \lambda(t)(1 - p^v)), t = \overline{34,52} \end{cases} \quad (30)$$

Analizė parodė, jog geriausiai duomenis paaiškina laipsninis modelis $\lambda(t) = \theta_1 t^{\theta_2}$. Taigi, nežinomų parametų aposteriorinė tikimybės tankio funkcija išreiškiama taip:

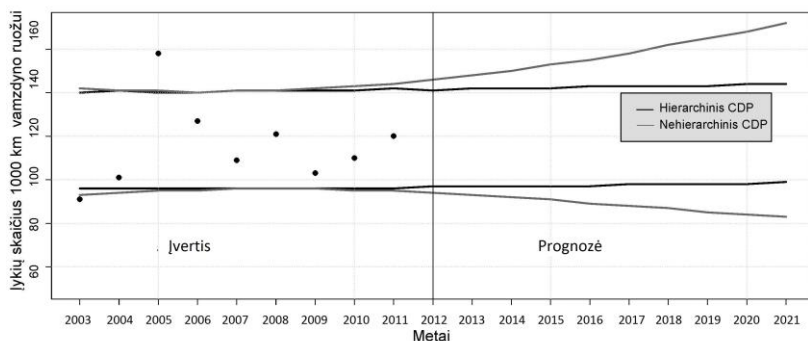
$$\pi(\theta_1, \theta_2, p', p'' | Y_1, \dots, Y_{42}) \propto \left(\prod_{t=1}^{14} e^{-\theta_1 t^{\theta_2} E_t} (\theta_1 t^{\theta_2})^{Y_t} \right) \left(\prod_{t=15}^{33} e^{-\theta_1 t^{\theta_2} E_t (1-p' - p'')} (\theta_1 t^{\theta_2} (1-p' - p''))^{Y_t} \right) \cdot (31) \cdot \left(\prod_{t=34}^{42} e^{-\theta_1 t^{\theta_2} E_t (1-p'')} (\theta_1 t^{\theta_2} (1-p''))^{Y_t} \right).$$

8 lentelėje pateikti aposterioriniai vidurkiai bei neapibrėžtumo ribos atitinkamiems parametrams.

8 lentelė. Modelio parametų aposterioriniai įverčiai ir pasiklovimo intervalai

Parametras	Aposteriorinis vidurkis	95 % pasiklovimo intervalas
θ_1	0,93	[0,925; 0,930]
θ_2	0,00144	[0,0014; 0,0015]
p'_1	0,004	[5E-06; 0,02]
p'_2	0,48	[0,44; 0,52]

Buvo palyginta (2.7 pav.) replikuoti gedimų skaičiai, gauti nuo kriterijaus priklausomu Puasono modeliu, su klasikiniu Puasono modeliu (t. y. modeliu, kuris neatsižvelgia į kriterijaus kitimą ir todėl tegali panaudoti duomenis po registravimo kriterijaus pokyčio). Įdomu, jog 95 % pasiklovimo intervalai abiejų modelių atveju yra praktiškai identiški. Skirtumai išryškėja, kai prognozuojamas gedimo intensyvumas – prognozės neapibrėžtumo ribos yra siauresnės, palyginus su klasikiniu Puasono modeliu. Taip įvyko todėl, kad panaudoję sudarytą nuo kriterijaus priklausomą Puasono modelį modelį, galėjome panaudoti visa statistine informacija.

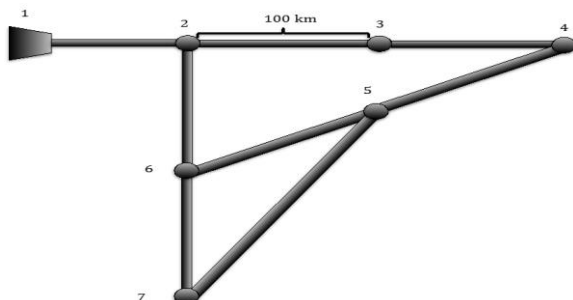


2.7 pav. 95 % pasiklovimo intervalai

Šiame poskyryje pateikėme nuo kriterijaus priklausomo Puasono modelio analizę, palygindami rezultatus su klasikine Puasono modelio versija ir pademonstruodami sudaryto modelio pranašumą.

2.1.5 Energijos vartojimo kompresorinėje stotyje padidėjimas dėl dujotiekio nepatikimumo

Šiame poskyryje bus nagrinėjamas bandomasis dujų tinklas – bus vertinama, kaip tinklo patikimumo lygmuo siejasi su kompresorinės stoties vartojama energija. Siekiant, kad tinklo topologija ir parametrai būtų realistiški, tarkime, jog tinklo topologija yra tokia, kaip pavaizduota 2.8 pav.: vienas dujų kompresorius (ar kompresorinė stotis), kiekviena dujotiekio dalis yra 100 km ilgio ir 1 000 mm skersmens.

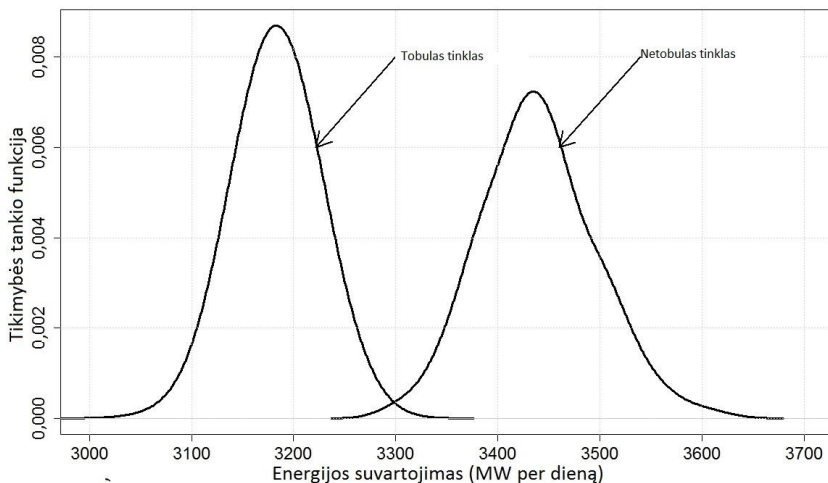


2.8 pav. Dujotiekio tinklo topologija

Analizės strategija jau buvo aptarta anksčiau, todėl čia nesikartosime, o iš karto pateiksime skaičiavimų rezultatus.

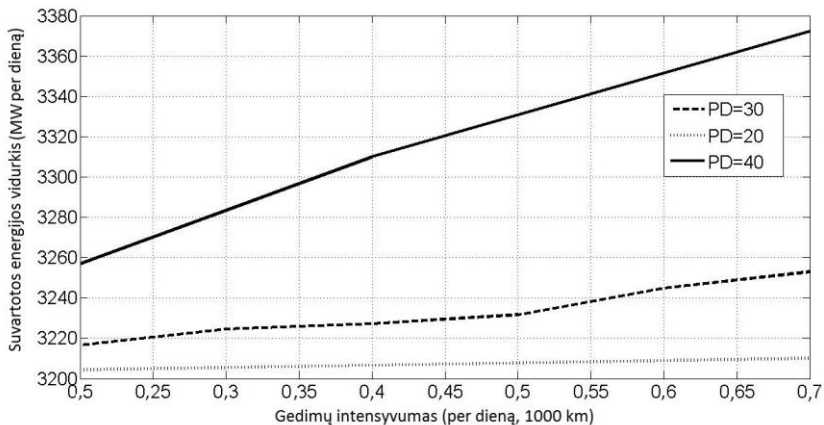
Buvo atlikta 500 simuliacijų, kiekvieną kartą atsitiktinai generuojant vamzdinių trūkių vietą, gylį, plotį, bei augimo greitį. Kiekviena imtis atspindėjo 25 metų dujotiekio darbą. Taigi, buvo gauta 500 vidurkinių energijos suvartojimo reikšmių kompresorinėje stotyje. Gautas energijos suvartojimo kompresorinėje stotyje skirstinys, buvo palygintas su tobulo tinklo, t. y. be jokių trūkių, energijos suvartojimu (2.9 pav.).

Iš rezultatų matyti, kad dujų ištekėjimų pažeistame tinkle įtaka yra apytiksliai 8 %. Tai reiškia vidutiniškai 8 % didesnius kaštus, kuriuos galimai turėtų sumokėti patys vartotojai, o per keletą metų susidarytų nemaža pinigų suma. Taigi, akivaizdu, jog tinklo patikimumo charakteristikų nagrinėjimas kartu su energijos suvartojimu yra svarbus ar netgi būtinas aspektas planuojant tinklo darbą.



2.9 pav. Kompresorinės stoties energijos suvartojimo vidurkių skirstiniai

Kadangi inspektavimo efektyvumas yra svarbus dujotiekio patikimumo kontrolės aspektas, nagrinėjome energijos suvartojimo jautrumą trūkio aptikimo tikimybei. Tarėme, jog gama skirstinys atspindi aptikimo tikimybę (šiuo atveju skirstinio tipo pasirinkimas yra pakankamai laisvas, kadangi buvo svarbu pirmiausiai įvertinti, energijos vartojimo priklausomybės nuo vidutinio trūkio dydžio pobūdį). Fiksavome gama skirstinio skalės parametraž ties 0,007, o formos parametrai suteikėme vertes 20, 30 ir 40 (šie parametrai išreiškia aptinkamo trūkio vidutinį dydį, kas nusako inspektavimo efektyvumą). Kadangi vamzdynų trūkių intensyvumo įverčiai taip pat turi tam tikrą neapibrėžtumą, nagrinėjome ir tai, kaip trūkių atsiradimo intensyvumas paveikia energijos suvartojimo charakteristikas. Jautrumo analizė pavaizduota 2.10 pav. Galime pastebėti, jog energijos suvartojimas tiesiškai priklauso nuo gedimo (trūkių) intensyvumo, o greitis, kuriuo didėja energijos suvartojimas, priklauso nuo trūkių aptikimo tikimybės parametro PD, t. y. nuo inspektavimo efektyvumo. Kitaip tariant, kompresorinės stoties papildomai suvartojama energija dėl dujų, ištekančių per trūkius, yra proporcinga tinklo vamzdynų gedimo intensyvumui.

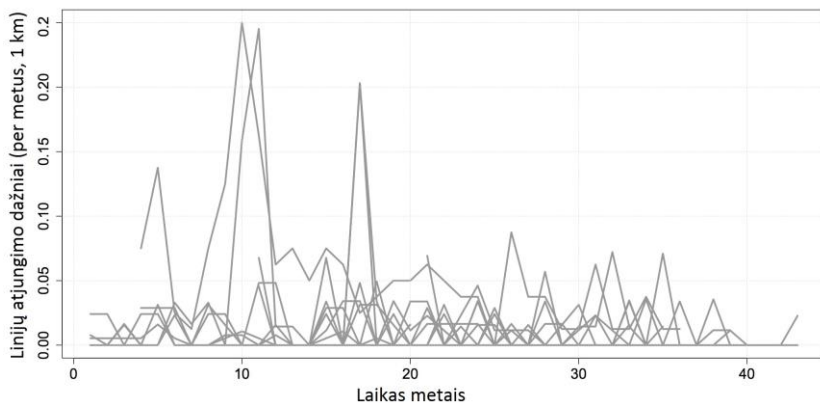


2.10 pav. Energijos suvartojimo priklausomumas nuo trūkių atsiradimo intensyvumo ir inspektavimo efektyvumo parametro PD

2.2 Lietuvos energetikos tinklų nuo laiko priklausomas patikimumas

2.2.1 Lietuvos elektros 330 kV dalies perdavimo tinklo patikimumas

Turimi duomenys apėmė 13 elektros oro linijų. Bendras stebėjimo laikotarpis buvo 40 metų, tačiau kai kurioms linijoms stebėjimo laikotarpiai buvo trumpesni. Atjungimo duomenų eilutės kiekvienai linijai pateiktos 2.11 pav. – bendra atjungimo skaičiaus mažėjimo tendencija yra akivaizdi.



2.11 pav. Atjungimų dažnių įverčiai

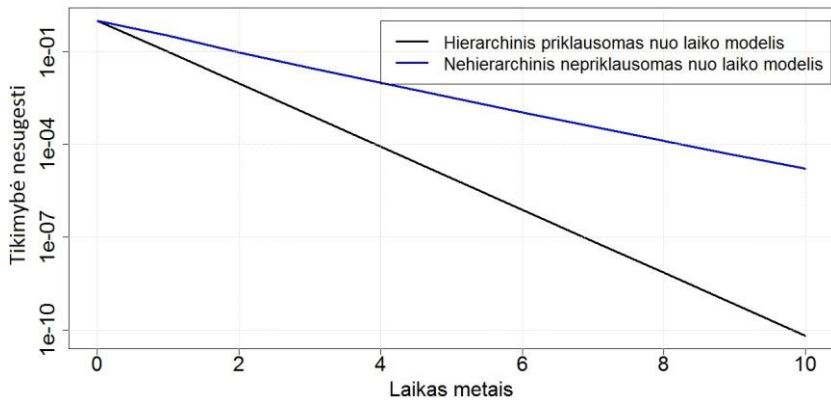
Kadangi nagrinėdami Š. Amerikos elektros tinklo duomenis nustatėme, jog tinklas yra heterogeniškas (duomenų prasme), natūralu ir Lietuvos elektros tinklo atjungimų duomenis modeliuoti naudojantis hierarchiniu modeliu:

$$\begin{aligned}
 X_{i,t} | \theta_{i,1}, \theta_{i,2} &\sim \text{Poisson}\left(L_i \lambda(\theta_{i,1}, \theta_{i,2}, t)\right), t = \overline{1,43}, i = \overline{1,13}, \\
 \theta_{i,k} | \mu_k, \sigma_k &\sim N\left(\mu_k, \sigma_k^2\right), k = 1, 2, \\
 \pi(\mu_1, \sigma_1, \mu_2, \sigma_2) &\propto 1;
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

čia $\lambda(t) = \exp[\theta_{i,1} + \theta_{i,2} \ln(t)]$, L_i – i -osios linijos ilgis, $\pi(\mu_1, \sigma_1, \mu_2, \sigma_2)$ – apriorinis skirstinys (bendru atveju parinktas neinformatyvus).

Rezultatai rodo, jog linijų atjungimo intensyvumo tendencija yra mažėjimo, t. y. laikui bėgant atjungimų skaičius visame 330 kV tinkle mažės.

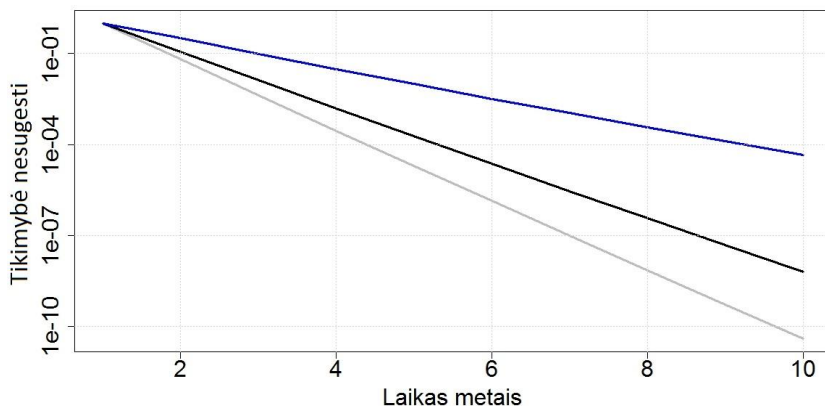
Taip pat nagrinėjome 330 kV dalies viso tinklo patikimumą (žr. 2.12 pav.), t. y. tikimybę, jog tarp dviejų mazgų elektros tiekimas nenutrūks. Rezultatus palyginę su patikimumo įverčiu, kai tariame, jog duomenys nepriklauso nuo laiko, matome, jog skirtumai yra ryškūs ir nepriklausomumo nuo laiko prielaida galiausiai duotų labai netikslius tinklo patikimumo įverčius.



2.12 pav. Tinklo patikimumo funkcija

Taip pat nagrinėjome atvejį, kada tariama jog nutiesiamos dvi naujos elektros perdavimo oro linijos. Viena jų – jau nutiesta linija Klaipėda–Telšiai, o kita yra perspektyvinė linija Kruonio HAE–Alytus. Gedimo tikimybės pokytis yra žymus. 2.13 pav. pateikti rezultatai, kaip pasikeičia gedimo tikimybė įvedus paeiliui po vieną naują liniją: aukščiausiai esanti kreivė nusako buvusį patikimumo lygį, vidurinė kreivė – patikimumo lygį nutiesus

liniją Klaipėda–Telšiai, o apatinė kreivė – būsimą patikimumą, kai bus baigtas projektas Kruonio HAE–Alytus.



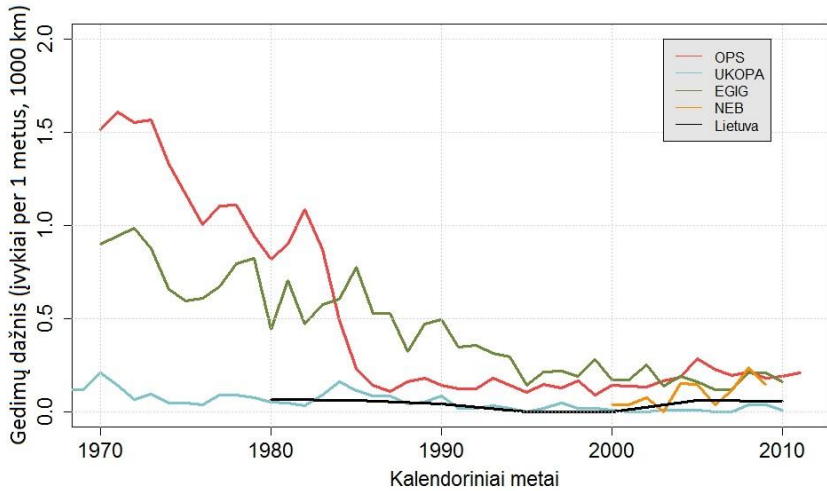
2.13 pav. Papildomų oro linijų įtaka tinklo patikimumui

2.2.2 Lietuvos gamtinių dujų perdavimo tinklo patikimumo analizė

Šiame poskyryje nagrinėsime Lietuvos dujų perdavimo tinklą. Iki 2004 m. galiojo nuostata, jog informacija yra renkama tik apie įvykius, kada įvyksta sprogimas ar dujos užsiliepsnoja. Nuo 2004 m. registruojami visi įvykiai, susiję su dujų pratekėjimu. Taigi, per visą stebėjimo laikotarpį turime du įvykio kriterijus. Svarbu paminėti, jog bendra duomenų imtis yra maža ir todėl patikimumo įverčių neapibrėžtumas būtų didelis. Dėl šių priežasčių nagrinėsime visas duomenų bazes, minėtas ankstesniuose skyriuose, ir nuo kriterijaus priklausomo Puasono modelio hierarchinį plėtinį. Visų nagrinėtų duomenų bazių gedimo dažniai yra palyginti 2.14 pav.

Galima pastebėti (2.14 pav.), jog laikui bėgant gedimo dažniai visose nagrinėjamose duomenų bazėse supanašėja. Tačiau vertinant šia prasme Šiaurės Amerikos duomenis, reikia atsižvelgti į tai, jog jų registravimui taikomas kitoks kriterijus, nei kitų duomenų bazių atveju: į OPS duomenų bazę įvykis įrašomas tada, kai žala didesnė nei 50 000 \$, arba nuotėkis yra didesnis nei 84 000 m³. Taigi, jei skaičiuotume visus įvykius (taip, kaip yra daroma kitose duomenų bazėse), tuomet Šiaurės Amerikos duomenų perdavimo tinklo gedimo dažnis būtų kur kas aukštesnis, nei kitų tinklų gedimo dažniai. Ši pastaba rodo, jog Šiaurės Amerikos tinklai ganėtinai skiriasi nuo kitų nagrinėjamų tinklų. Viena iš priežasčių būtų tai, jog Šiaurės Amerikoje didelę įtaką turi gausenės ekstremalių reiškinių kiekis. Dėl šios priežasties į tolesnius skaičiavimus neįtrauksime OPS duomenų bazės duomenų. Tačiau,

kaip parodė skaičiavimai, tai neturi didelės įtakos galutiniams rezultatams, o tai rodo, jog Bajeso procedūra yra robastiška tokioms išskirtims.



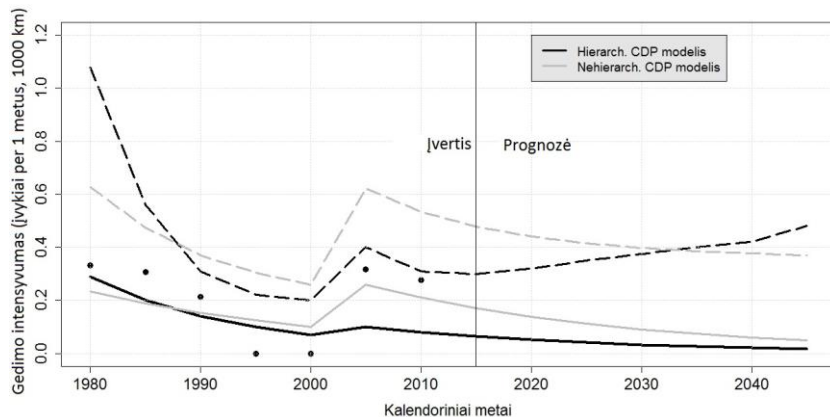
2.14 pav. Visų nagrinėtų duomenų bazių gedimo dažnių palyginimas

Lygindami trendo įvertį (žr. 2.15 pav., įverčio sritis), matome, jog hierarchiniu modeliu gaunama viršutinė 0,95 pasikliautinio intervalo riba yra didesnė, nei apskaičiuota nehierarchiniu modeliu. Taip yra todėl, jog panaudodami kitas duomenų bases, į modelį įtraukėme papildomą neapibrėžtumą. Įdomu palyginti dviejų modelių prognozes (žr. 2.15 pav., prognozės sritis) – neapibrėžtumo lygmuo ilgo laikotarpio prognozei didėja gerokai lėčiau hierarchinio modelio atveju, nei kai taikomas nehierarchinis modelis. Taip yra todėl, kad esant mažesniams duomenų kiekiui (nehierarchinio modelio atveju), informacijos apie būsimus įvykius kiekis yra mažesnis.

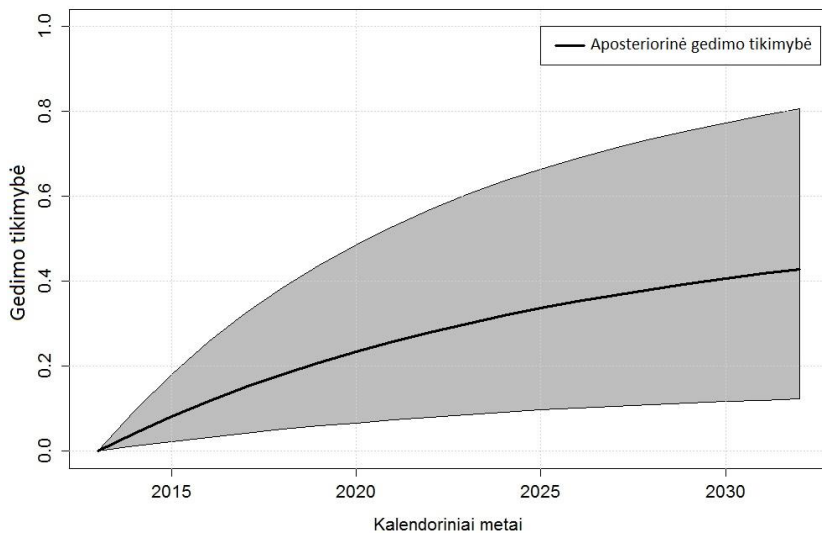
Beje, trendo funkcijos įvertis nuo kriterijaus priklausomo hierarchinio Puasono modelio atveju yra artimesnis stebėtiems duomenims. Tuo tarpu nehierarchinio modelio atveju įvertis yra labai netikslus. Tai savo ruožtu lemtų, jog šiuo modeliu grįsti sprendimai būtų pernelyg optimistiniai.

Taigi, duomenų bazių panaudojimas Lietuvos dujotiekio atveju suteikė galimybę patikslinti esamą gedimo intensyvumo (bei patikimumo) įvertinį. Taip pat remiantis patikslintu gedimo intensyvumo įverčiu atlikta gedimo intensyvumo prognozė ilgam laikotarpiui (žr. 2.16 pav., 20 metų patikimumo prognozė 1 000 km dujotiekio ruožui) – tikimybė, jog Lietuvos dujų tinkle įvyks gedimas 20 metų laikotarpyje (1 000 km ilgio atkarpoje), yra lygi 0,4

su 95 % pasikliautinumu intervalu [0,15; 0,8]. Tuo tarpu nehierarchiniu CDP modeliui atlikta prognozė rodo, jog ši tikimybė yra 0,1.



2.15 pav. Gedimo intensyvumo įvertis ir prognozė nehierarchiniu ir hierarchiniu nuo kriterijaus priklausomu Puasono modeliui



2.16 pav. Dujotiekio gedimo tikimybės prognozė ir 95 % pasiklovimo intervalai (užtušuota sritis)

2.3 Skyriaus rezultatai

Šis skyrius sudarytas iš dviejų dalių. Pirmoji dalis skirta metodikos tyrimui ir taikymui įvairioms duomenų imtims, antroji dalis – metodikos taikymui Lietuvos elektros ir gamtinių dujų tinklų atvejams.

Šiame skyriuje įvairiais aspektais analizuota sudaryta metodika. Atvejais, kai gedimų duomenys yra priklausomi tik nuo laiko, pateikė išvalgų, kaip veikia metodika, kuomet jokių papildomų prielaidų apie duomenų heterogeniškumą nėra priimama. Pastebėta, jog nuokrypio informacijos kriterijus tinka įvairiems modeliams testuoti ir palyginti.

Mažų imčių analizės metu gauti rezultatai parodė, jog Bajeso metodu gauti įverčiai (vidutiniškai) yra mažai nutolę nuo parametrų tikrųjų reikšmių. Taigi, galima teigti, jog metodika gali būti naudojama heterogeniškiems duomenims, esant mažoms jų imtims, vertinti.

Tuomet nagrinėti Šiaurės Amerikos elektros perdavimo bei gamtinių dujų perdavimo tinklai. Borrel-Tanner modelio hierarchinio plėtinio taikymas leido gauti tikslesnius tikimybių įverčius didelės apimties kaskadoms. Tuo tarpu nehierarchiniu modeliu gaunami tikimybių įverčiai labiau skiriasi nuo įverčių, gautų pagal realiai stebėtus duomenis didelių kaskadų atveju. Be to, nuo duomenų registravimo kriterijaus priklausomu Puasono modeliu gautų prognozių neapibrėžtumas pasirodė esantis mažesnis, nei taikant klasikinį Puasono modelį.

Galiausiai, metodika buvo pritaikyta Lietuvos elektros perdavimo ir dujų magistralinio dujotiekio patikimumui vertinti.

3 IŠVADOS

Sudarius metodiką, kai išsamiau analizuojamas ir įvertinamas nuo laiko priklausomas patikimumas bei jo neapibrėžtumas, ir pademonstravus šios metodikos taikymą heterogeniškiems energetikos tinklams, gautos tokios išvados:

1. Elektros perdavimo tinklo kaskadinio gedimo tikimybės įvertis, taikant išplėtotą hierarchinį Borrel-Tanner modelį, palyginus su nehierarchinio modeliavimo rezultatu, yra artimesnis stebimų gedimų pagrindu gautam įverčiui. Didžiausiam nagrinėtam (11 linijų) kaskadiniam gedimui šis įvertis yra lygus $4 \cdot 10^{-3}$, kai vertinant nehierarchiniu modeliu, gaunamas $1 \cdot 10^{-5}$ įvertis, o taikant išplėtotą hierarchinį modelį – tikslesnis $1 \cdot 10^{-4}$ gedimo tikimybės įvertis.
2. Gamtinių dujų tinklo pažeidimų intensyvumas, taikant nuo duomenų registravimo kriterijaus priklausomą Puasono modelį, yra vertinamas detaliau, nes atsižvelgiama į laike kintantį

neapibrėžtumą. Dėl to, net esant ženkliai kriterijaus ir užregistruotų duomenų kaitai, jų pagrindu detaliau vertinamo intensyvumo neapibrėžtumas visgi taip ženkliai nekinta.

3. Dujų tinklui su kompresorine stotimi pritaikius sudarytą metodiką, nustatytas 8 % skirtumas tarp stoties energijos suvartojimo idealaus (negendančio) tinklo ir realaus tinklo su pažeidimais atvejais. Pademonstruota, kad dujų tinklo kompresorinės stoties suvartojama energija tiesiogiai proporcinga vamzdynų gedimo intensyvumui.
4. Lietuvos elektros perdavimo tinklo linijų atjungimo intensyvumas, taikant sudarytą metodiką, gali būti modeliuojamas išsamiau, kadangi atsižvelgiama į duomenų ir neapibrėžtumo priklausomybę nuo laiko. Pademonstruota, kad pastaruoju metu tinklo linijų atjungimo intensyvumas mažėja pagal laipsninį dėsnį.
5. Lietuvos dujų perdavimo tinklo vamzdynų pažeidimo intensyvumas, taikant sudarytą metodiką, gali būti modeliuojamas išsamiau, kadangi atsižvelgiama į priklausomybę nuo laiko bei nuo duomenų registravimo kriterijaus. Tikimybės, jog per 20 metų 1000 km ilgio dujotiekyje įvyks pažeidimas, įvertis lygus 0,4 (apskaičiuota detalesniu hierarchiniu modeliu), o neapibrėžtumo asyra mažesnis, nei taikant nehierarchinį modelį (atitinkamai, tikimybės įvertis 0,1).

SAŖAŠAS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA

Straipsniai “Thomson Reuters” duomenų bazėje “Web of Science Core Collection” referuojamuose leidiniuose

1. ALZBUTAS, R. ir T. IEŠMANTAS. Application of Bayesian methods for age-dependent reliability analysis. *Quality and Reliability Engineering International*. 2014, 30(1), 121-132. ISSN 0748–8017.
2. ALZBUTAS, R., T. IEŠMANTAS, M. POVILAITIS, J. VITKUTĖ. Risk and uncertainty analysis of gas pipeline failure and gas combustion consequence. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2014, 28(6), 1431-1446. ISSN 1436-3240.
3. IEŠMANTAS T. ir R. ALZBUTAS. Bayesian assessment of electrical power transmission grid outage risk. *International Journal Electrical Power & Energy Systems*. ISSN 0142-0615. 2014, 58, 85–90.

Straipsniai mokslo leidiniuose, registruotuose tarptautinėse mokslinės informacijos duomenų bazėse

1. ALZBUTAS, R., T. IEŠMANTAS, R. ŠKĖMA, T. BLAŽAUSKAS. Modelling for efficient network system design considering physical processes and power consumption. *Energetika*. 2013. 59(2), 83-92. ISSN 0235–7208.
2. BLAŽAUSKAS, T., T. IEŠMANTAS, R. ALZBUTAS. Service-oriented architecture for designing of physical systems with efficient power consumption. In *Information and software technologies: proceedings of 18th international conference, ICIST 2012, Kaunas, Lithuania, September 13–14, 2012*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 275–287.
3. MENDIKOA, I., M. SORLI, A. ARMIJO, L. GARCIA, L. ERAUSQUIN, M. INSUNZA, J. BILBAO, H. FRIDEN, A. BJÖRK, L. BERGFORS, R. ŠKĖMA, R. ALZBUTAS, T. IEŠMANTAS. Heat treatment process energy efficient design and optimisation. *Procedia engineering*. 2013, 63, 303–309. ISSN 1877-7058.
4. MENDIKOA, I., M. SORLI, A. ARMIJO, L. GARCIA, L. ERAUSQUIN, M. INSUNZA, J. BILBAO, H. FRIDEN, A. BJÖRK, L. BERGFORS, R. ŠKĖMA, R. ALZBUTAS, T. IEŠMANTAS. Energy efficient heat treatment process design and optimisation. *Materials Science Forum*. 2014, 797, 139–144.

Straipsniai kituose mokslo periodiniuose leidiniuose

1. IEŠMANTAS, T. ir R. ALZBUTAS. Bayesian methods for analysis of electric grid outages. *The journal of the safety and reliability society*. 2013, 33(4), 12–23. ISSN 0961-7353.

Pranešimai kituose mokslo leidiniuose, konferencijų medžiagoje

1. ALZBUTAS, R. ir T. IEŠMANTAS. Application of Bayesian methods for age-dependent reliability analysis. In *Advances in risk and reliability symposium (AR2TS): proceedings of 19th international conference, Stratford-upon-Avon, England, April 12–14, 2011*. England, 2011, 432–447. ISBN 9780904947656.
2. IEŠMANTAS, T. ir R. ALZBUTAS. Designing of energy efficient system considering power consumption reliability. In *9th annual conference of young scientists on energy issues CYSENI 2012: international conference, Kaunas, Lithuania, 24–25 May, 2012*. Kaunas: LEI, 2012, 179–189. ISSN 1822-7554.
3. IEŠMANTAS, T. ir R. ALZBUTAS. Age-dependent hierarchical Bayesian modelling for reliability assessment under small data sample. In *11th international probabilistic safety assessment and management conference and the annual European safety and reliability conference (PSAM11 ESREL2012), Helsinki Finland, June 25–29, 2012*. IAPSAM & ESRA, 2012, 2527–2537. ISBN 978-1-62276-436-5.
4. IEŠMANTAS, T. ir R. ALZBUTAS. Methodology for gas transmission network age-dependent reliability assessment considering variation of incident criteria. In *10th annual international conference of young scientists on energy issues (10 CYSENI anniversary): Kaunas, Lithuania, May 29–31, 2013*. Kaunas, LEI, 2013, 222–230. ISSN 1822-7554.
5. IEŠMANTAS, T. ir R. ALZBUTAS. Maintenance of power systems considering time-dependent uncertainty. In *Safety and Reliability: Methodology and Applications, proceedings of the European safety and reliability conference, Esrel 2014, Wroclaw, Poland, 14–18 2014*. CRC Press: Taylor & Francis Group, London, UK, 2015, 1127–1131. ISBN 978-1-138-02681-0.
6. IEŠMANTAS, T. ir R. ALZBUTAS. Bayesian analysis of electric transmission network outages. In *Proceedings of the 20th advances in risk and reliability technology symposium (AR2TS), Loughborough, Leicestershire, May 21–23, 2013*. Loughborough University, 2013, 286–294. ISBN 978-1-907382611.
7. IEŠMANTAS, T. ir R. ALZBUTAS. Hierarchical Bayesian model for gas transmission network reliability. In *Safety, reliability and risk analysis: Beyond the horizon, proceedings of the European safety and reliability conference, Esrel 2013, Amsterdam, The Netherlands, 29 September–2 October 2013*. CRC Press: Taylor & Francis Group, London, UK, 2014, 1101–1106. ISBN 978-1-138-00123-7.

8. MATUZAS, V., R. ALZBUTAS, T. IEŠMANTAS. Modelling and reliability analysis of energy networks. In *Safety, reliability and risk analysis: Beyond the horizon, proceedings of the European safety and reliability conference, Esrel 2013, Amsterdam, The Netherlands, 29 September–2 October 2013*. CRC Press: Taylor & Francis Group, London, UK, 2014, 2891–2898. ISBN 978-1-138-00123-7.
9. MENDIKOA, I., M. SORLI, A. ARMIJO, L. GARCIA, L. ERAUSQUIN, M. INSUNZA, J. BILBAO, H. FRIDEN, A. BJÖRK, L. BERGFORS, R. ŠKĚMA, R. ALZBUTAS, T. IEŠMANTAS. Energy efficiency optimisation in heat treatment process design. In *Advances in production management systems: international conference (APMS 2012), September 24–26, 2012, Rhodes Island, Greece*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012, 127–134. ISBN 978-3-642-40351-4.
10. UŠPURAS, E., S. RIMKEVIČIUS, M. POVILAITIS, T. IEŠMANTAS, R. ALZBUTAS. Hazard analysis and consequences assessment of gas pipeline rupture and natural gas explosion. In *Management of natural resources, sustainable development and ecological hazards. Ravage of the planet III: third international conference on management of natural resources, sustainable development and ecological hazards / Eds. C. A. Brebbia, S. S. Zubir*. Ashurst, Southampton: WIT Press, 2012. 495–504. ISBN 978-1-84564-532-8.

INFORMACIJA APIE AUTORIŲ

Tomas Iešmantas (gim. 1987-04-17) matematikos bakalauro laipsnį gavo 2005 metais, Kauno technologijos universitete, Fundamentalųjų mokslų fakultete. 2009 metais baigė studijas Kauno technologijos universitete, Fundamentalųjų mokslų fakultete, ir gavo matematikos magistro laipsnį. 2015 metais baigė jungtinės Kauno technologijos universiteto ir Lietuvos energetikos instituto doktorantūros studijas (Technologijų mokslai, energetika ir termoinžinerija (06T)). Nuo 2008 metų dirba Lietuvos energetikos institute, Branduolinių įrenginių saugos laboratorijoje. Nuo 2013-09 iki 2013-11 stažavosi Nottinghem universitete (Anglija), Civilinės inžinerijos departamente.

SUMMARY

The aim and tasks of the work

The aim of this thesis is to develop and demonstrate the methodology that would enable comprehensive assessment, analysis and application of reliability of energy networks, when taking into consideration uncertain and time-dependent data.

Objectives:

1. To develop a methodology and create necessary mathematical models, enabling reliability assessment, when heterogeneous failure data and their uncertainty depend on time;
2. To examine and demonstrate the potential of methodology for the purpose of assessment of time-dependent reliability of energy networks;
3. By applying the methodology, to investigate the gas network reliability and its effect on the energy consumption at gas compressor stations;
4. To assess the time-dependent reliability of Lithuanian power and gas transmission networks, taking into account data heterogeneity.

Relevance of the thesis

1. In order to guarantee that the constantly increasing requirements for energy consumption efficiency and reliability of supply are optimally fulfilled, more comprehensive mathematical models are needed;
2. Currently available models for the reliability assessment are not sufficient for the case of network reliability, when taking into consideration the dependency on time and uncertainty of data;
3. Until now, little effort was devoted to the assessment of network reliability, while jointly investigating its effect on energy consumption in different parts of the network.

Scientific novelty of the thesis

The principles of energy network reliability assessment were established, when failure or fault data are dependent on the age of system, uncertain and heterogeneous.

Network reliability theory was supplemented by the mathematical models, which enable to take into consideration change of incident

registration criteria and to assess more adequately severe cascading outages in the network.

Statements to be defended

1. The proposed methodology enables more comprehensive assessment of time-dependent reliability and uncertainty for heterogeneous energy networks;
2. Hierarchical generalization of Borrel-Tanner and data registration criteria-dependent Poisson models provides more accurate estimates of reliability characteristics for gas and power transmission networks;
3. Energy consumption of gas network compressor station is directly proportional to the failure rate of network pipelines;
4. Line outage and pipeline failure rates of Lithuanian power and gas transmission networks are decreasing and may be modelled as time-dependent even for the small data samples and under different data registration criteria.

Practical significance of the dissertation

The developed methodology enables to perform more complete network reliability analysis and its application, when characteristics of network elements change over time and failure data are heterogeneous. Estimates of time-dependent line outage and pipeline failure rates for Lithuanian power and gas transmission networks might be used in order to optimize maintenance and inspection programs. In addition, prediction of gas network reliability shall be used for the assessment of gas explosion risk dynamics and identification of its main factors.

Conclusions

Development and demonstration of the methodology, which enables a more comprehensive analysis and assessment of time-dependent reliability and its uncertainty for heterogeneous energy networks, resulted into following conclusions:

1. Power transmission network cascading outage probability estimate, obtained by application of hierarchical generalization of Borrel-Tanner model, is closer to the estimate based on the observed data, as compared to the results of the non-hierarchical model. This estimate for the largest (spanning over 11 lines) considered cascading failure is $4 \cdot 10^{-3}$ while according to the assessment based on the non-hierarchical model it equals $1 \cdot 10^{-5}$

- and a more accurate estimate were obtained by means of hierarchically generalized model;
2. Failure rate of natural gas transmission network was modelled in greater detail with developed data registration criteria-dependent Poisson model by taking into account time-dependent dynamics of uncertainty. For this reason, even if there is a significant change in data collection criteria and failure data, the uncertainty level of predictions does not change significantly;
 3. Application of the methodology to the gas network with compressor station led to the determination of 8 % difference between energy consumption in ideal (i.e., without failures) and real networks. It was demonstrated that energy consumption in compressor station is directly proportional to the failure rate of network pipelines;
 4. Outage rate of Lithuanian electricity transmission network lines can be modelled more comprehensively by applying the developed methodology and taking into account data and uncertainty dependence on time. It was demonstrated that outage rate is currently decreasing according to the power law;
 5. Failure rate of Lithuanian gas transmission network pipelines can be modelled more comprehensively by applying the developed methodology and taking into account data dependence on time and on data registration criteria. Estimate of probability of failure over the next 20 years for 1000 km pipeline section is 0.4 (as obtained by hierarchical model), while uncertainty interval is smaller as compared to the results of the non-hierarchical model (probability is 0.1).

UDK 621.311-192(043.3)

SL344. 2016-02-17, 2.3 leidyb. apsk.1. Tiražas 50 egz. Užsakymas 82.
Išleido leidykla „Technologija“, Studentų g. 54, 51424 Kaunas.
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas