

Centralizuotų šilumos tinklų patikimumo vertinimo metodika

Algirdas Kaliaatka¹,

Mindaugas Valinčius¹,

Juozas Augutis^{1,2},

Ričardas Krikštolaitis^{1,2},

Sigitas Rimkevičius¹,

Gintautas Dundulis¹,

Rimantas Bakas³

Straipsnyje pateikiama centralizuoto šilumos tiekimo sistemos patikimumo vertinimo metodika, jungianti termohidraulinį, stipruminį-tikimybinį ir matematinį modelius. Kuriant modelį buvo taikomi baigtinių elementų, pirmos eilės patikimumo bei atsako paviršiaus, gedimų medžių, Monte Karlo modeliavimo metodai. Kaip pasiūlytos metodikos pavyzdys yra pademonstruotas termofikacinio vandens tiekimo į Kauno miesto centrą patikimumo vertinimas. Vertinant patikimumą buvo išanalizuoti galimi keliai, kuriais miesto centrą pasiekia termofikacinis vanduo, ir identifikuotos galimos vamzdynų avarijų vietos. Nustatytuose mazguose atlikti tikimybiniai ir termohidrauliniai skaičiavimai.

Raktažodžiai: centralizuotas šilumos tiekimas, patikimumas, termohidraulinis modelis, stipruminis-tikimybinis modelis, matematinis modelis

¹ Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinių įrenginių saugos
laboratorija, Breslaujos g. 3,
LT-44403 Kaunas
El. paštas: ricardas@mai.lei.lt

² Vytauto Didžiojo universitetas,
Matematikos ir statistikos katedra,
Vileikos g. 8, LT-44404 Kaunas
El. paštas: ricardas@if.vdu.lt

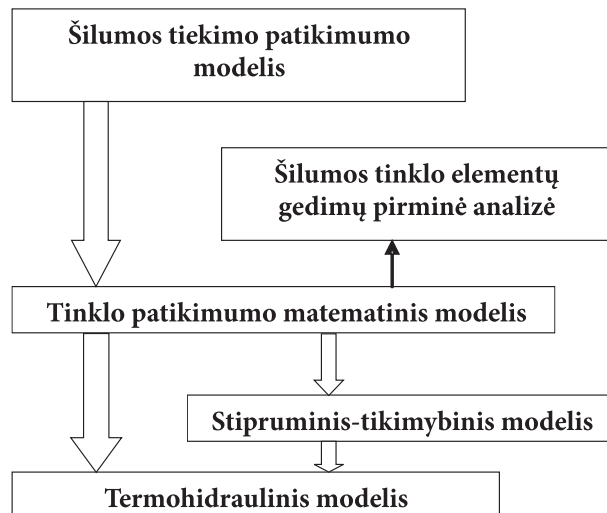
³ AB „Kauno energija“,
Raudondvario pl. 84,
LT-47179 Kaunas
El. paštas: r.bakas@kaunoenergija.lt

1. ĮVADAS

Lietuvoje ir kitose Baltijos šalyse dauguma centralizuoto šilumos tiekimo sistemų didesniuose miestuose suprojektuota ir įrengta daugiau kaip prieš 30 metų. Dinamiški pokyčiai energetikos ir pramonės įmonėse smarkiai veikė centralizuoto šilumos tiekimo sistemų darbą (sumažėjo suminis šilumos vartojimas, kai kurie vartotojai nuo centralizuoto šilumos tiekimo sistemų atsijungė, atsirado naujų vartotojų, sparčiai diegiami automatizuoti šilumos punktai ir t. t.). Dėl šių priežasčių centralizuoto šilumos tiekimo sistemos veikia neoptimaliais darbo režimais, šilumos tinkluose susidaro dideli perdavimo nuostoliai, slėgio ir temperatūros netolygumai, padidėja tinklų eksploatacijos sąnaudos. Per eksploatacijos laiką centralizuoto šilumos tiekimo sistemų vamzdiniai ir prie jų prijungtos sklendės, movos, jungtys ir pan. smarkiai susidėvėjo – jų eksploataavimo amžius yra arti kritinės

ribos, o tai didina galimų avarijų tikimybę. Tačiau nepaisant to, pagrindinė vamzdynų (šilumos tiekimo trasų) dalis yra keičiama tik atsiradus būtinybei – kai neužtenka pralaidumo ar įvyksta magistralinio vamzdyno trūkis. Viena pagrindinių centralizuoto šilumos tiekimo (CŠT) sistemų eksploataavimo problemų yra tai, kad sistemos tiriamos ir vertinamos daugiausia bendrovių specialistų jėgomis ar sudarius trumpalaikės sutartis su konsultantais, bet nėra sisteminio įvertinimo ar vieningos technologijos, susijusios su realiu CŠT vamzdynų eksploataavimo patikimumo ir rizikos veiksnių vertinimu bei silpniausių sistemos mazgų identifikavimu. Taigi dėl kelių priežasčių (techninių, ekonominių, juridinių) yra poreikis sukurti sisteminę ir vieningą CŠT sistemų įvertinimo metodiką, kuri leistų:

- įvertinti CŠT sistemos bei atskirų jos elementų esamą patikimumą ir pateikti jo prognozes, atsižvelgiant į sistemos senėjimą, remontų ir atnaujinimo strategijas;



1 pav. Šilumos tinklo patikimumo įvertinimo modelis

- analizuoti galimas avarijas, įvertinti jų tikimybes ir riziką;
- įvertinti ir palyginti šilumos tinklų priežiūros planus, optimizuojant remontą, parengti avarijų valdymo planus vamzdynų dalių keitimui, kartu atliekant galimų avarijų prevenciją;
- ekonomiškai pagrįsti sistemos patikimumo gerinimo planą ir t. t.

Tokios sisteminės ir vieningos CŠT sistemų įvertinimo metodikos pagrindas yra šilumos tiekimo patikimumo modelis, kuris susideda iš sistemos termohidraulinio modelio, stipruminio-tikimybinio modelio ir tinklo patikimumo matematinio modelio (1 pav.).

Šilumos tiekimo vartotojams patikimumą sąlygoja du pagrindiniai veiksniai: tinklo pajėgumas ir tinklo patikimumas. Tinklo pajėgumas – tai tinklo galimybės įvairiais režimais pateikti reikiamą šilumos kiekį vartotojui. Aišku, svarbiausia yra sunkiausi režimai, tokie kaip ilgas šaltas periodas, staigus atšalimas ir pan. Tinklo pajėgumui įvertinti, naujų vartotojų pajungimo galimybių analizei reikalingas viso tinklo (įskaitant šilumos generatorius) termohidraulinis modelis, pagal kurį būtų skaičiuojami pagrindiniai tinklo termohidrauliniai parametrai modeliuojant įvairius darbo režimus, tinklo konfigūraciją, pereinamuosius procesus ir kt.

Tinklo patikimumui bet kuriame jo taške įvertinti pirmiausia būtina nustatyti, kuriais keliais į šį tinklo tašką gali būti tiekiamas šiluma. Tam reikia tinklo patikimumo modelio, automatiškai išrenkančio visus galimus bet kurio tinklo taško aprūpinimo šiluma kelius ir šiems keliams priklausančius tinklo elementus. Skaičiuojant patikimumą būtina remtis kiekvieno tinklo elemento gedimų intensyvumu ir pagrindinėmis gedimų charakteristikomis, tokiomis kaip įrenginio gedimo įtaka šilumos tiekimui, gedimo pašalinimo vidutinis laikas, gedimo aptikimo vidutinis laikas ir pan.

Įrenginių gedimų intensyvumai yra priklausomi ne tik nuo įrenginių amžiaus, degradacijos lygio, eksploatacijos sąlygų, bet ir nuo konkrečių darbinio tinklo parametrų – slėgio ir temperatūros. Du paskutiniai parametrai yra gaunami iš termohidraulinio tinklo modelio skaičiuojant juos konkrečiam darbo režimui.

Vienas tinklo elementų gedimų dažnio nustatymo šaltinių yra konkreti gedimų statistika, sukaupta tinklo eksploatacijos duomenų bazėje. Tiksliesniam patikimumo įvertinimui statistinių gedi-

mų duomenų neužtenka, reikalingas pagrindinių tinklo elementų struktūrinis patikimumo modelis, kuris leidžia apskaičiuoti tinklo elementų gedimo tikimybių priklausomybes nuo esamos elemento būklės, eksploatacijos sąlygų (grunto, izoliacijos ir pan.) bei dalinių parametrų (slėgio, temperatūros ir pan.). Nustatant įvairių konstrukcijų patikimumą yra svarbu atlikti jų stipruminę analizę, įvertinant normalios eksploatacijos ir avariniais atvejais susidarantį apkrovą. Modeliuojant nagrinėjamas konstrukcijas stiprumo analizei turi būti realiai įvertintos pradinės paruošto modelio sąlygos, t. y. medžiagų savybės, elementų geometrijos duomenys ir apkrovos. Tačiau nagrinėjant sudėtingos konstrukcijos, didelių matmenų įrenginius yra sunku aprašyti minėtas pradines sąlygas nekintamais dydžiais. Todėl atliekant konstrukcijų stiprumo analizę yra nagrinėjama jų suirimo tikimybinė analizė, priimant, kad medžiagų savybės, elementų geometrijos duomenys bei apkrovos yra neapibrėžti dydžiai. Tuo tikslu, siekiant atsižvelgti į įvairių sistemų atskirų parametrų tikimybinę prigimtį, suirimo tikimybei nustatyti yra integruojami deterministiniai ir tikimybiniai metodai. Deterministinei stipruminei analizei yra naudojama baigtinių elementų metodika (kompiuterinė programa NEPTUNE), o tikimybinei analizei panaudojami matematiniai Monte Karlo modeliavimo, pirmos eilės patikimumo bei atsako paviršiaus metodai (kompiuterinė programa ProFES).

Šiame straipsnyje trumpai aprašytas CŠT sistemos modelis, sukurtas Kauno miesto termofikacinių vamzdynų magistraliniams tinklams. Kaip modelio darbo iliustracija pateikiami šiuo modeliu atlikti tyrimai:

- Trūkių Kauno miesto magistraliniame tinkle įtaka šilumos tiekimui miesto centre;
- Judamos atramos suirimo tikimybinė analizė.

2. CENTRALIZUOTO ŠILUMOS TIEKIMO SISTEMOS PATIKIMUMO MODELIS

2.1. Centralizuoto šilumos tiekimo sistemos termohidraulinis modelis

Kaip minėta, pirmasis etapas, kuriant šilumos tiekimo patikimumo modelį, yra centralizuoto šilumos tiekimo sistemos termohidraulinio modelio sudarymas. Šis modelis, net ir nesukūrus viso šilumos tiekimo patikimumo modelio, leidžia analizuoti avarijų šilumos tinkle padarinius, gali būti panaudotas sprendžiant šilumos tinklų pertvarkymo, remonto optimizavimo ir panašius klausimus. Šis modelis paprastai kuriamas naudojantis programų paketais, kuriais aprašoma centralizuota šilumos tiekimo sistema su savo pagrindiniais komponentais: vamzdynais, siurbliais, vandens šildymo įrenginiais, sklendėmis, šilumos vartotojais ir t. t. Programų paketai modeliuoja termohidraulinis procesus, vykstančius vandenyje, jam tekant sistemos vamzdynais. Sukurtas modelis turi atsakyti į klausimus, kuriuos jam kelia kitos sistemos patikimumo modelio dalys – stipruminis-tikimybinis ir matematinis patikimumo modeliai. Taigi šis modelis turi pateikti slėgių ir temperatūros pasiskirstymą magistraliniame tinkle, vandens tekėjimo kryptis ir greičius ir pan. Patogiausia tokiai termohidraulinei analizei taikyti specializuotus programų paketus, skirtus CŠT termohidrauliniam modeliavimui, pvz., įmonės „7-Technologies“ sukurtą programų paketą TERMIS [1], tačiau galima pritaikyti ir kitus sisteminei termohidraulinei analizei skirtus paketus.

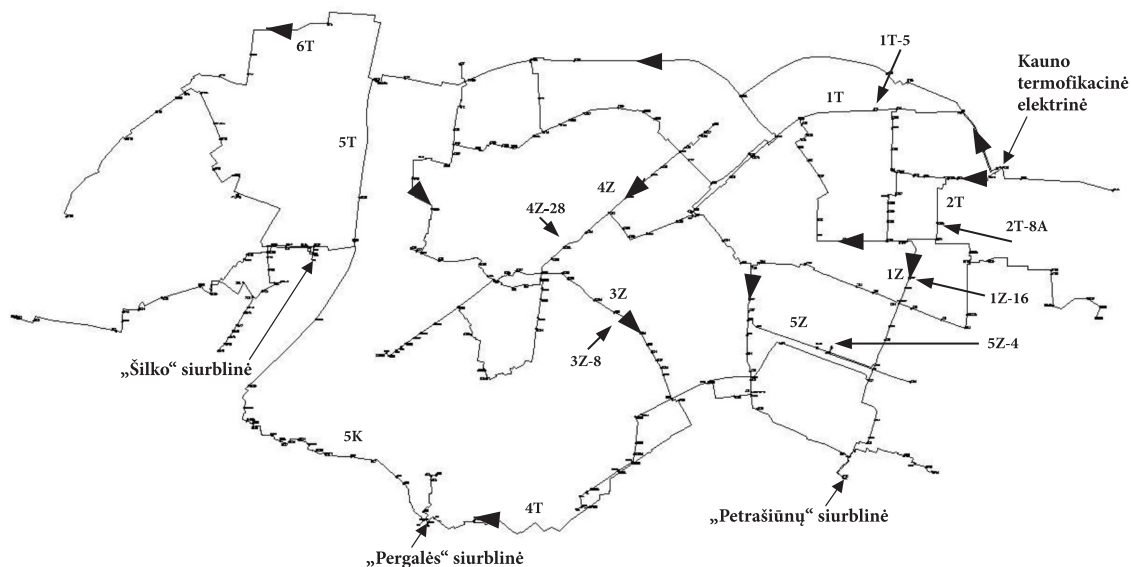
Šiame straipsnyje pateikiamas pavyzdys – Kauno miesto CŠT sistemos modelis. Termohidraulinių procesų, vykstančių Kauno termofikacinių vamzdynų magistraliniuose tinkluose, pereinamųjų ir avarinių procesų analizei pasirinktas RELAP5 programų paketas [2]. Šis programų paketas sukurtas Idaho (JAV) nacionalinėje laboratorijoje ir skirtas avarijų, kurių metu prarandamas šilumnešis, analizei branduolinėse jėgainėse. Šis programų paketas šilumnešio tekėjimą aprašo vienmačiais nehomogeniniais nepusiausvyriniais skysčio modeliais, panaudodamas šešias masės, impulso ir energijos tvarumo lygtis, atskirai vandens ir garo fazėms. Energijos tvarumo lygtims uždaryti naudojamos tarpfazinio pernešimo, impulso bei šilumos pusiau empirinės priklausomybės, kurių pavidalas priklauso nuo šilumnešio tekėjimo režimo. RELAP5 programų paketas turi šilumos laidumo modelius plokščiai, cilindrinei bei sferinėms geometrijoms, turi specialius modulius, skirtus atskiriems

fizikiniams procesams ir elementams (kritiniams tekėjimams, šilumos išsiskyrimui, siurbliams, vožtuvams, hidroakumulatoriams, gavo separatoriams, išsišakojimams ir kt.) modeliuoti. Visos išvardytos programų paketo savybės yra tinkamos modeliuoti termohidraulinius procesus bet kuriose vamzdynų sistemose, tiek branduolinių jėgainių, tiek šilumos tiekimo vamzdynuose. Kauno termofikacinių vamzdynų magistralinių tinklų schema, kurios modelis sukurtas naudojant RELAP5, pavaizduota 2 paveiksle.

Kuriant modelį, buvo remtasi informacija apie magistralinio vamzdžio atskirų dalių ilgus, skersmenis, vamzdžių šiuurštumą ir pan. Taip pat buvo pasinaudota informacija apie vandens srautus tam tikrose linijose, slėgius konkrečiuose taškuose, prie magistralinio tinklo prijungtų vartotojų apkrovas. Ši informacija panaudota tinklo modeliui derinti, siekiant numatytos stacionarios būsenos. Parametrai magistraliniame tinkle stacionarios

1 lentelė. Pagrindiniai Kauno CŠT sistemos parametrai (pagal realią būklę 2005 metų vasarį)

Parametras	Gauta informacija	Modeliuojant apskaičiuota reikšmė
Iš KTE tiekiamo vandens srauto slėgis	7,4 bar	7,6 bar
Į KTE grįžtančio vandens srauto slėgis	2,2 bar	2,2 bar
Slėgis „Pergalės“ siurblinėje:		
tiekimo linijoje prieš droselį		9,1 bar
tiekimo linijoje už droselio	5,5 bar	5,8 bar
grįžimo linijoje prieš siurblius	3,3 bar	3,4 bar
grįžimo linijoje už siurblių		8 bar
Slėgis „Šilko“ siurblinėje:		
tiekimo linijoje prieš droselį		9,7 bar
tiekimo linijoje už droselio	5,5 bar	5,8 bar
grįžimo linijoje prieš siurblius	3,3 bar	3,4 bar
grįžimo linijoje už siurblių		7,1 bar
Slėgis „Petrašiūnų“ siurblinėje:		
tiekimo linijoje prieš droselį		9 bar
tiekimo linijoje už droselio	5,5 bar	5,9 bar
grįžimo linijoje prieš siurblius	3,3 bar	3,7 bar
grįžimo linijoje už siurblių		7,2 bar
Vandens srautas per „Pergalės“ siurblinę	970 t/h (269 kg/s)	970 t/h (269 kg/s)
Vandens srautas per „Šilko“ siurblinę	450 t/h (125 kg/s)	622 t/h (173 kg/s)
Vandens srautas per „Petrašiūnų“ siurblinę	250 t/h (69 kg/s)	198 t/h (55 kg/s)
Bendras vandens srautas iš KTE	6429 t/h (1786 kg/s)	6429 t/h (1786 kg/s)



2 pav. Kauno šilumos tinklų magistralinių vamzdynų schema

būsenos atveju, kai vanduo šildomas tik Kauno termofikacinėje elektrinėje (KTE) (būseną, atitinkanti 2005 metų vasario mėnesio realią būklę), pateikti 1 lentelėje. Slėgiai visur šioje ataskaitoje pateikiami pertekliniai (manometriniai).

Sukurtas modelis buvo panaudotas atliekant elektros energijos praradimo „Pergalės“ siurblinėje analizę, nustatant trūkių magistraliniame tinkle įtaką šilumos tiekimui miesto centre, įvertinant rezervinių šilumos tiekimo šaltinių būtinybę ir t. t. Toliau pateikiama magistralinio tinklo vamzdžių schemos patikimumo analizė, atlikta naudojant šį termohidraulinį vamzdžių modelį.

2.2. Centralizuoto šilumos tiekimo sistemos stiprumis-tikimybinis modelis

Centralizuoto šilumos tiekimo sistemos galimo suirimo tikimybiniam įvertinimui naudota metodika, apjungianti deterministines ir tikimybinės skaičiavimo metodikas. Deterministinei objektų struktūrinio vientisumo analizei naudota deterministinė baigtinių elementų kompiuterinė programa NEPTUNE [3]. Tikimybiniam stiprumui įvertinti naudota kompiuterinė programa ProFES (tikimybinė baigtinių elementų sistema) [4]. ProFES leidžia greitai sudaryti tikimybinius modelius: vykdomuosius modelius, analitines formuluotes ir baigtinių elementų modelius. ProFES galima naudoti net ir neatliekant tikimybinio modeliavimo, panaudojant vidines ProFES funkcijas arba funkcijas, kurios gali būti įtrauktos rankiniu būdu. ProFES gali būti taikomas kaip papildymas vykdomiesiems modeliams, tuo būdu galima atlikti tikimybinius tyrimus, panaudojant deterministinius modelius. Kompiuterinės programos ProFES ir NEPTUNE yra apjungtos specialiu transliatoriumi ProFES/NEPTUNE (pn_glue programa) [5]. Stiprumo analizė atliekama kompiuterine programa NEPTUNE naudojant skirtingus konstrukcijos geometrinius, medžiagų savybių ir apkrovimo duomenis, kurie yra paruošiami pasitelkus kompiuterinę programą ProFES. Stiprumo analizės rezultatai apdorojami irgi kompiuterine programa ProFES, todėl gaunamos konstrukcijų suirimo tikimybės atsižvelgiant į įvairius parametrus.

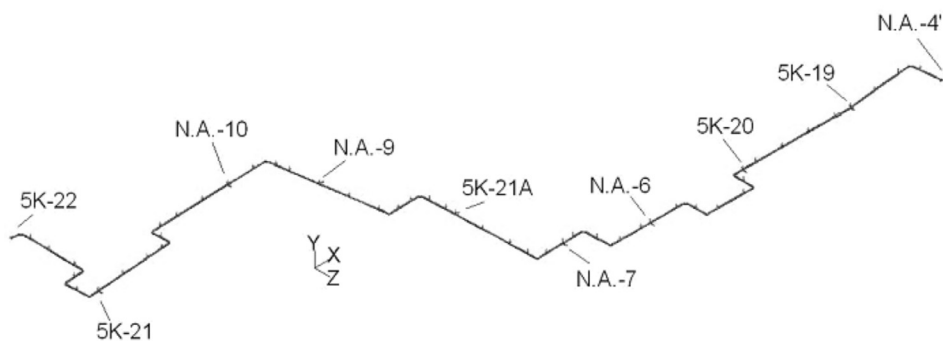
Nagrinėjamos šilumos tiekimo sistemos suirimo tikimybinė analizė atlikta dviem etapais. Pirmiausia analizuota šilumos tiekimo sistemos vamzdžių atkarpos dalis, kurioje yra sumontuotas suirimo tikimybinei analizei parinktas sistemos elementas (šios analizės atveju judanti atrama, 1 skyrius), ir atkarpos, esančios tarp nejudančių atramų. Magistralinių tinklų vamzdžių bendram struktūrinio vientisumo įvertinimui naudota baigtinių elementų metodika. Ši analizė atlikta kompiuterine baigtinių elementų programa ADLPIPE V10 [6]. Ši programa yra skirta

vamzdinių sistemų stipruminei analizei. Geometriniai magistralinių tinklų vamzdžių modeliai sudaryti pagal AB „Kauno energija“ pateiktus brėžinius. Vamzdžio struktūrinio vientisumo analizei naudotas baigtinių elementų modelis parodytas 3 paveiksle.

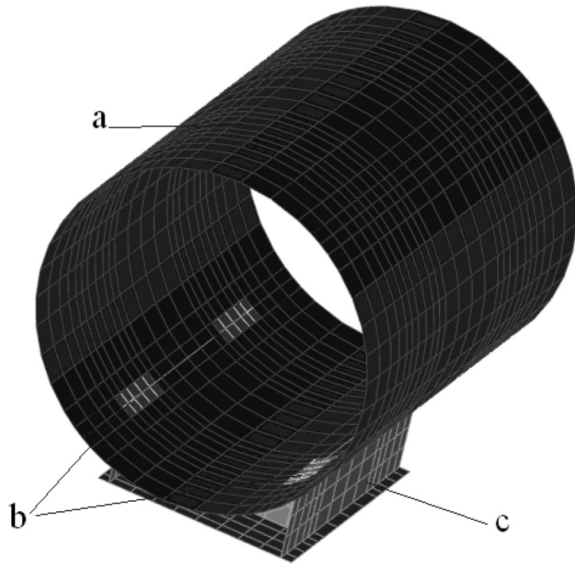
Skaitiniame modelyje magistralinių tinklų vamzdžiai sumodeliuoti RUN tipo elementais, alkūnės ELBOW elementais. Šiluminėse magistralėse vamzdžių temperatūros plėtimasis yra kompensuojamas kilpiniais kompensatoriais, riebokšliniais kompensatoriais bei pačios magistralės konfigūracija. Skaitiniame modelyje riebokšliniai kompensatoriai sumodeliuoti pasitelkus BELLOW elementus. BELLOW elementuose yra leidžiami poslinkiai ašine vamzdžio kryptimi ir posūkiai apie ašinę vamzdžio ašį, o poslinkiai ir posūkiai kitomis kryptimis yra suvaržyti. Paslankios atramos sumodeliuotos, kaip dvikryptės spyruoklės, kurioms suteiktas $1 \cdot 10^8$ N/m standumas neigiama Y koordinatės kryptimi, t. y. konstrukcijai yra leidžiami poslinkiai horizontalioje plokštumoje bei teigiama Y ašies kryptimi.

Vamzdžiai ir alkūnės pagaminti iš plieno St3. Vamzdžių stipruminėje analizėje yra naudotos normatyvinės plieno St3 charakteristikos [7], tačiau parengtame modelyje galima naudoti eksperimentiškai nustatytas vamzdžių metalo mechanines charakteristikas, todėl būtų įvertinamas degradacijos poveikis šioms charakteristikoms. Magistralinių tinklų vamzdžių stipruminė analizė atlikta veikiant normalios eksploatacijos ir hidraulinių bandymų apkrovoms. Šioje analizėje naudotos apkrovos gautos iš termohidraulinės analizės rezultatų (3 skyrius). Naudojant šį baigtinių elementų modelį yra nustatomos labiausiai apkrautos vamzdžių dalys, t. y. pavojingiausios vamzdžių vietos stiprumo požiūriu. Analizuojant vamzdžio skaičiavimo rezultatus yra apskaičiuotos judančioje atramoje veikiančios ašinės, skersinės, vertikalios jėgos ir sukimo momentai apie visas ašis. Šios veikiančios apkrovos yra įvertintos išsamiaje judančios atramos baigtinių elementų modelyje.

Kitame skaičiavimo etape yra parenkamas pavojingiausias nagrinėjamos sistemos elementas ir parengiamas išsamus baigtinių elementų modelis suirimo tikimybiniam įvertinimui. Šiame straipsnyje, atsižvelgus į eksploatacijos kontrolės patirtį, struktūrinio vientisumo tikimybinei analizei buvo parinktas vamzdžių judančios atramos elementas. Judančioje atramoje dėl korozijos ir šiluminio plėtimosi susiformuoja defektai, todėl suyra vamzdžiai. Judanti atrama sumodeliuota panaudojant plokščius baigtinius elementus [3]. Parengtas baigtinių elementų modelis parodytas 4 paveiksle. Visi reikalingi matmenys paimti iš techninės dokumentacijos. Modelį sudarantys geometriniai elementai pagal jiems priskiriamas savybes (storį) yra:



3 pav. Magistralinio tinklo vamzdžio dalies baigtinių elementų modelis



4 pav. Judančios atramos baigtinių elementų modelis tikimybinei analizei

- Nepažeistas vamzdis, kurio sienelės storis 7 mm (4 pav., a);
- Pažeistas vamzdis (dėl korozijos sumažėjęs sienelės storis). Pažeidimų srities matmenys ir vieta nustatyti iš pateikto natūrinio pavyzdžio. Šios sritys parodytos 4 pav., b);
- Judanti vamzdžio atrama (4 pav., c).

Analizuojamos judančios atramos įtvirtinimo sąlygas apibrėžia magistralinio tinklo vamzdyno nagrinėjamoje dalyje susidarančios jėgos. Analizuojant vamzdyną nustatyta (ADLPIPE skaičiavimo rezultatai), kad įtvirtinamame gale veikia ašinė, skersinė, vertikali jėgos ir sukimo apie visas ašis momentai. Kitas vamzdžio galas yra visiškai suvaržytas, t. y. negalimi poslinkiai ašine skersine ir vertikalia kryptimi, taip pat posūkiai apie išvardytas ašis.

Naudojant šį modelį yra atlikta judančios atramos suirimo tikimybinė analizė.

2.3. Centralizuoto šilumos tiekimo sistemos matematinis patikimumo modelis

Energijos tiekimo sistemos patikimumas priklauso nuo sistemos mazgų priežiūros darbų kokybės, tų mazgų būklės. Nuolat sensant energijos tiekimo sistemos įrenginiams, baigiantis jų darbo ištekliui mažėja jų patikimumas. Patikimumo analizė – viena sudėtinių techninės analizės dalių, leidžianti kiekybiškai įvertinti energijos tiekimo sistemos patikimumo parametrus bei numatyti galimų avarių dažnį ir pasekmes, identifikuojant pavojingiausias sistemos vietas [8].

CŠT patikimumą galima aprašyti kaip kelių veiksnių funkciją:

$$P = P(\lambda, t, Ap, S); \quad (1)$$

čia λ – sistemos elementų gedimų intensyvumo funkcija, t – laikas, Ap – išorinės aplinkos sąlygų kompleksas, S – darbinės tinklo charakteristikos, gaunamos termohidraulinės analizės metu.

Vertinant sistemos elementų gedimų intensyvumo funkciją λ yra atsižvelgiama į keletą dalykų. Pirmia – pagrindiniai CŠT

sistemos elementai yra nuosekliai sujungti vamzdynai ir siurblynės. Visus vamzdynus pagal vamzdžių skersmenis galima suskaidyti į atkarpas. Be to, atliekant patikimumo analizę, CŠT sistemą galima laikyti orientuotu grafu (2 pav.), kadangi šilumos energija sklinda iš šilumos generatorių – termofikacinių elektrinių, katilinių. Norint įvertinti patikimumą tam tikrame sistemos taške, reikia sudaryti kelius, kuriais galima tiekti šilumą į pasirinktą tašką. Šie keliai susideda iš vamzdynų atkarpų ir siurblynų su savo individualiais gedimo dažniais λ_i , gaunamais atliekant turimų duomenų statistinę analizę. Vamzdynai skaidomi į atkarpas atsižvelgus į vamzdyno skersmenį, vamzdynų trasų išsišakojimą, vamzdynų eksploatacijos laiką ir pan. Nustatant kiekvieno kelio elemento gedimo dažnį λ_i , atsižvelgiama į eksploatacijos laiką, buvusių gedimų skaičių, jeigu kelio elementas yra vamzdynas, tai ir tos atkarpos ilgi.

Svarbus sistemos patikimumo matas yra patikimumo funkcija $R(t)$, kuri reiškia, kad numatytu laiko momentu t sistema yra nesugedusi. Turint nuosekliai sujungtus elementus, sistemos patikimumas

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i. \quad (2)$$

Lygiagrečiai sujungtiems elementams atitinkamai turėsime:

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i); \quad (3)$$

čia R_i – kiekvieno sistemos elemento patikimumas, priklausantis nuo gedimo dažnio λ_i . Ekspontinio skirstinio atveju $R_i(t) = e^{-\lambda_i t}$.

Šalia pateiktų patikimumo indikatorių yra nagrinėjami ir tokie šilumos tiekimo sistemos kokybiniai rodikliai:

1. Sistemos vidutinės nutraukimų trukmės rodiklis (toliau – SAIDI) parodo, kiek vidutiniškai laiko per ataskaitinį laikotarpį energija nebuvo tiekiama vienam vartotojui. Vidutinė tiekimo nutraukimo trukmė (SAIDI – *System Average Interruption Duration Index*) vienam vartotojui, diferencijuojant pagal tiekimo nutraukimo trukmę, tipą ir priežastis, apskaičiuojama pagal formulę:

$$\text{SAIDI} = \sum \frac{\text{Vartotojų, kuriems nutrauktas tiekimas, skaičius} \times \text{Nutraukimo trukmė (min)}}{\text{Visų sistemos vartotojų skaičius}}.$$

2. Sistemos nutraukimų vidutinio dažnumo rodiklis (toliau – SAIFI) parodo, kiek vidutiniškai kartų per ataskaitinį laikotarpį energija nebuvo tiekiama vienam vartotojui. Vidutinis tiekimo nutraukimų skaičius (SAIFI – *System Average Interruption Frequency Index*) vienam vartotojui, diferencijuojant pagal tiekimo nutraukimo tipą ir priežastis, apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$\text{SAIFI} = \sum \frac{\text{Vartotojų, kuriems nutrauktas tiekimas, skaičius}}{\text{Visų sistemos vartotojų skaičius}}.$$

Pateiktą matematinį modelį galima taikyti pasirinkto CŠT sistemos taško, naujų tinklo elementų įtakos patikimumui vertinti, planuojant rekonstrukcijas ir keičiant tinklo konfigūracijas.

3. CENTRALIZUOTO ŠILUMOS TIEKIMO SISTEMOS PATIKIMUMO MODELIO TAIKYMO PAVYZDŽIAI

Šiame darbe pateikiami pirmieji CŠT sistemos patikimumo modelio taikymo pavyzdžiai. Darbas buvo atliktas „Kauno energijos“ termofikacinio vandens tiekimo vamzdinių magistraliniams tinklams.

3.1. Trūkių magistraliniame tinkle įtaka šilumos tiekimui miesto centre

Kauno miesto CŠT sistemos specifika yra tai, kad pagrindinis šilumos tiekimo šaltinis – Kauno termofikacinė elektrinė (KTE) yra miesto pakraštyje ir termofikacinio vandens kelias iki vartotojų yra pakankamai ilgas. Taip pat vartotojai yra išdėstyti skirtingame aukštyje, tad patikimam termofikacinio vandens tiekimui yra įrengtos specialios siurblynės. Šiame darbe buvo panagrinėta termofikacinio vandens tiekimo į miesto centrą problema.

Reikiamai termofikacinio vandens cirkuliacijai į miesto centrą ir į pietrytinę miesto dalį užtikrinti veikia „Pergalės“ siurblynė, kuri grįžtantį iš šių rajonų šilumos vartotojų termofikacinį vandenį atsiurbia ir grąžina į grįžtamojo vandens vamzdyną, vedantį į Kauno termofikacinę elektrinę. Buvo nagrinėjamos avarinės situacijos, kai pratrūksta vamzdžiai įvairiose tiekimo linijų vietose, ir aiškinamasi, kaip tai paveiks šilumos tiekimą visame mieste ir miesto centre. Buvo priimta, kad kažkurioje vamzdinio dalyje įvykus avarijai, ta atkarpa yra izoliuojama magistralinėmis sklendėmis iš abiejų tos atkarpos pusių. Taigi vanduo šiomis magistralinio tinklo tiekimo linijų atkarpomis neteka, o vandens srautai persiskirsto į greta esančius vartotojus ir teka kitais keliais (žr. 2 pav.).

Buvo priimta, kad iš KTE aprūpinti Kauno m. centrą galima septyniais keliais (vamzdiniais):

KTE – 2T-93 – 1Z-19 – 1Z-14' – 1Z-8 – 4T-6 – 4T-13 – 4T-15 – SIURB4 – 5K-4;

KTE – 2T-93 – 1Z-19 – 7Z-11 – 4Z-6 – 2Z-13 – 2Z-21 – 4T-15 – SIURB4 – 5K-4;

KTE – 2T-93 – 1Z-19 – 1Z-14' – 1Z-8 – 4Z-6 – 2Z-13 – 2Z-21 – 4T-15 – SIURB4 – 5K-4;

KTE – 1T-10 – 4Z-17 – 1T-153 – 7Z-11 – 4Z-6 – 2Z-13 – 2Z-21 – 4T-15 – SIURB4 – 5K-4;

KTE – 1T-10 – 1T-15 – 1T-153 – 7Z-11 – 4Z-6 – 2Z-13 – 2Z-21 – 4T-15 – SIURB4 – 5K-4;

KTE – 1T-10 – 1T-15 – 1T-18 – 8Z-2 – 4Z-27 – 4Z-17 – 1T-153 – 7Z-11 – 4Z-6 – 2Z-13 – 2Z-21 – 4T-15 – SIURB4 – 5K-4;

KTE – 1T-10 – 1T-15 – 1T-18 – 8Z-2 – 4Z-27 – 3Z-15 – 2Z-21 – 4T-15 – SIURB4 – 5K-4.

Vamzdinių avarių įtakai įvertinti buvo išanalizuoti galimi šilumos tiekimo į miesto centrą keliai ir parinktos šešios galimos vamzdinio avarių vietos, pavaizduotos 2 paveiksle:

1. 2T-8A,
2. 1T-5,
3. 4Z-28,
4. 3Z-8,
5. 1Z-16,
6. 5Z-4.

Pirmiausia miesto centro šildymo patikimumas buvo įvertintas naudojant *tinklo patikimumo matematinį modelį*.

2 lentelė. Šilumos tiekimo patikimumo pokyčiai dėl trūkio vietos

Eil. Nr.	Avarijos vieta	Patikimumo sumažėjimas %
1	2T-8A	4,24
2	1T-5	7,96
3	4Z-28	0,38
4	3Z-8	0,38
5	1Z-16	4,24
6	5Z-4	0,50

Atliekant tikimybinę-statistinę analizę vienas pagrindinių rodiklių buvo trasos gedimų dažnis. Gedimų dažniai buvo skaičiuojami kiekvienai vamzdinio atkarpa, kurių iš viso buvo 27. Gedimų dažnį pagrindiniai sąlygojantys veiksniai buvo atkarpoje (vamzdyje) įvykusių gedimų skaičius ir tos atkarpos eksploatacijos laikas metais. Skaičiuojant bendrą sistemos patikimumą buvo laikomasi sąlygos, kad šiluminė energija į paskutinį tašką ateina visais keliais. Skaičiavimams buvo naudojamos (2) ir (3) formulės, kadangi manyta, kad vienas kelias yra sudarytas iš nuosekliai sujungtų elementų, o visi keliai sujungti lygiagrečiai.

Atlikus tikimybinę-statistinę analizę gauta, kad tikimybė, jog į miesto centrą bus patiekta šilumos energija, yra lygi 0,9962. Taip pat norėta įvertinti tam tikros tinklo dalies visiško gedimo įtaką. Gauti rezultatai pateikiami 2 lentelėje.

Iš gautų rezultatų galima padaryti išvadą, kad statistiškai didžiausią įtaką miesto centro šildymo patikimumui turi gedimai bet kurioje trasos KTE – 1T-10 dalyje.

Toliau galimos tokių vamzdinių avarių pasekmės buvo įvertintos *termohidrauliniu modeliu*, t. y. aiškintasi šilumos tiekimo miesto centrui ir vartotojams, esantiems prieš siurblynę „Pergalė“, įtaka. Užblokavus vandens tiekimą kažkurio vamzdinio, vandens srautai automatiškai persiskirsto ir teka kitais keliais. Tačiau automatiškai padidėja vandens greičiai kituose vamzdžiuose, todėl padidėja slėgis vamzdinyse prie Kauno termofikacinės elektrinės. Maksimalus leistinas slėgis iš KTE išeinančioje tiekiamo vandens linijoje yra 8,5 bar. Dėl slėgio padidėjimo vamzdinyse KTE esančių siurblių našumas sumažėja. KTE tiekimo linijoje slėgiui pakilti daugiau kaip 8,5 bar neleidžia apsaugos vožtuvai. Taip pat daroma prielaida, kad po vamzdinių kai kurių atkarpų uždarymo, sumažėjus vandens tiekimui į miesto centrą, siurblynėje „Pergalė“ yra atidaromas tiekimo linijoje esantis droselinis vožtuvas ir termofikacinio vandens tiekimo srautas į miesto centrą atstatomas. Analizė atlikta dviem atvejams: 1) be vandens srauto į miesto centrą reguliavimo ir 2) atstačius šį vandens srautą iki pradinės reikšmės.

Kaip minėta, nebetiekiant vandens kažkurio vamzdinio, vandens srautai automatiškai persiskirsto ir teka kitais keliais. Tačiau vamzdinyse prie Kauno termofikacinės elektrinės slėgis padidėja, o prieš siurblynę „Pergalė“ ir miesto centre – sumažėja. Kaip matyti 3 lentelėje, termofikacinio vandens srautas iš KTE dauguma atvejų sumažėja (vandens srauto pokyčiai turi neigiamas reikšmes). Tačiau 3Z-8 ir 5Z-4 uždarymo atveju nei slėgiai, nei vandens srautai nekinta. Tai reiškia, kad ir normalaus darbo atveju vandens srautas per šiuos vamzdinius yra nedidelis. Vandens srautai į miesto centrą per siurblynę „Pergalė“ (jei po avarijos joje vandens tiekimas nebuvo reguliuojamas) taip pat pamažėja. Įdomus yra 1T-5 atkarpos uždarymo atvejis: srautas į miesto centrą ne tik nesumažėja, bet ir truputį padidėja. Slėgiai prieš „Pergalės“ siurblynę ir už jos tiek tiekimo, tiek grįžimo li-

3 lentelė. Termofikacinio vandens srautų ir slėgių pokyčiai po vamzdynų kai kurių atkarpų uždarymo

Nr.	Avarinis tinklo ruožas	Srauto iš KTE pokytis	Srauto per „Pergalės“ siurblinę pokytis	1) Nereguliuojant srauto į miesto centrą				2) Reguliuojant srautą į miesto centrą			
				Slėgis prieš „Pergalės“ siurblinę		Slėgis už „Pergalės“ siurblinės (miesto centre)		Slėgis prieš „Pergalės“ siurblinę		Slėgis už „Pergalės“ siurblinės (miesto centre)	
				tiekimo linija	grįžimo linija	tiekimo linija	grįžimo linija	tiekimo linija	grįžimo linija	tiekimo linija	grįžimo linija
				bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar
Slėgiai normalaus darbo atveju:				9,07	8,01	5,78	3,4	9,07	8,01	5,78	3,4
1	2T-8A	-37	-6	8,74	7,93	5,57	3,29	8,51	7,9	5,67	3,31
2	1T-5	-65	0,5	9,1	8,01	5,8	3,41	8,76	7,9	5,67	3,31
3	4Z-28	-1	-4	8,81	7,94	5,61	3,31	8,77	7,96	5,73	3,37
4	3Z-8	0	0	9,07	8,01	5,78	3,4	9,07	8,01	5,78	3,4
5	1Z-16	-30	-6	8,69	7,92	5,53	3,27	8,49	7,9	5,68	3,31
6	5Z-4	0	0	9,07	8,01	5,78	3,4	9,07	8,01	5,78	3,4

4 lentelė. Termofikacinio vandens srautų ir slėgių santykiniai pokyčiai po vamzdynų kai kurių atkapų uždarymo

Nr.	Avarinis tinklo ruožas	Srauto iš KTE pokytis	Srauto per „Pergalės“ siurblinę pokytis	1) Nereguliuojant srauto į miesto centrą		2) Reguliuojant srautą į miesto centrą	
				Slėgio perkričio pokytis linijose prieš „Pergalės“ siurblinę	Slėgio perkričio pokytis linijose už „Pergalės“ siurblinės	Slėgio perkričio pokytis linijose prieš „Pergalės“ siurblinę	Slėgio perkričio pokytis linijose už „Pergalės“ siurblinės
				%			
1	2T-8A	-2,1	-2,2	-23,6	-4,2	-42,5	-0,8
2	1T-5	-3,6	0,2	2,8	0,4	-18,9	-0,8
3	4Z-28	-0,1	-1,5	-17,9	-3,4	-23,6	-0,8
4	3Z-8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1Z-16	-1,7	-2,2	-27,4	-5,0	-44,3	-0,4
6	5Z-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

nijose taip pat sumažėja (tuo atveju, kai vandens srautas iš KTE nesumažėja, nesumažėja ir slėgiai).

Kad lengviau būtų galima įvertinti kai kurių vamzdyno atkarpų uždarymo įtaką, vandens srautų santykiniai pokyčiai buvo pavaizduoti procentais (4 lentelė). Taip pat palyginti slėgių tiekimo ir grįžimo linijose prieš „Pergalės“ siurblinę ir už jos skirtumai. Kaip matyti 4 lentelėje, po vamzdynų uždarymo daugeliu atvejų sumažėja ne tik vandens srautai, bet ir (neigiamos reikšmės) santykiniai slėgio skirtumai tiekimo ir grįžimo linijose prieš „Pergalės“ siurblinę ir už jos. Jei vandens srautas į miesto centrą sureguliuojamas atidarant „Pergalės“ siurblinėje tiekimo linijoje esantį droselinį vožtuvą, tai slėgių skirtumų pokytis linijose už „Pergalės“ siurblinės yra labai nedidelis. Tačiau atidarius droselinį vožtuvą papildomai sumažėja slėgių skirtumas linijose prieš „Pergalės“ siurblinę. Pavyzdžiui, 2T-8A uždarymo dėl gedimo joje atveju santykinis slėgių skirtumas prieš „Pergalės“ siurblinę po vandens srauto į miesto centrą atkūrimo sumažėja nuo 23,6 iki 42,5%. Atkarpos 1Z-16 uždarymo atveju santykinis slėgių prieš „Pergalės“ siurblinę skirtumas sumažėja nuo 27,4 iki 44,3%. Kadangi termofikacinio vandens srautas (šilumos srautas) per apkrovas tiesiogiai priklauso nuo slėgių tiekimo ir grįžimo linijose skirtumo, toks slėgio skirtumo sumažėjimas reiškia ir šilumos tiekimo sumažėjimą. Kuo skaitine reikšme didesnis yra slėgių skirtumo pokytis (neigiamos reikšmės vaizduoja slėgių skirtumo santykinį sumažėjimą), tuo mažiau tiekama šilumos. Kaip matyti 4 lentelėje, vartotojams prieš „Pergalės“

siurblinę pats blogiausias yra atkarpos 1Z-16 uždarymo atvejis. Atkarpų 3Z-8 ir 5Z-4 uždarymas neturi įtakos.

3.2. Judančios atramos suirimo tikimybinė analizė

Kauno centralizuoto šilumos tiekimo sistemos tinkluose sumontuota daug vamzdynų (1 skyrius), o tai sudaro apie 88 km pagal ilgį. Norint atlikti bendrą vamzdynų stiprumo įvertinimą, reikia surinkti visą projektinę dokumentaciją, atlikti daug eksperimentinių tyrimų, nustatant vamzdynų medžiagų savybes, įvertinti įvairių defektų priežastis. Tai būtų labai didelės apimties analizė. Todėl šioje analizėje remiantis eksploatacijos kontrolės patirtimi struktūrinio vientisumo tikimybinei analizei buvo parinktas vamzdynų judančios atramos elementas. Judančioje atramoje dėl korozijos ir šiluminio plėtimosi susiformuoja defektai, todėl vamzdynai po tam tikro laiko suyra. Modelis, naudotas šiai analizei, yra pateiktas 2 skyriuje.

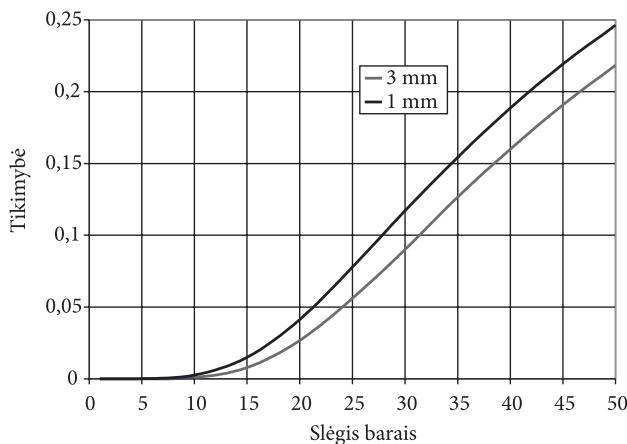
Judančios atramos suirimo tikimybinėje analizėje nustatyta jos suirimo priklausomybės nuo apkrovos ir korozijos pažeistos sienelės storio. Priklausomybėms, išreikštos apkrova-tikimybės funkcija ir pažeistos vietos storis-tikimybės funkcija, nustatyti taikytas atsako paviršiaus / Monte Karlo modeliavimo metodas [4]. Atlikta 1000 skaičiavimų. Analizėje buvo naudojami logaritminiai normaliniai medžiagų savybių pasiskirstymai. Pažeistos sienelės storiui ir apkrovai buvo naudoti tolyginiai pasiskirstymai. Judančios atramos vamzdžio sienelės storis ir apkrovos dydis buvo priimti kintami. Sienelės storio kitimas buvo

priimtas nuo 0,5 iki 6,5 mm, o apkrovos – nuo 4 iki 20 bar. Buvo gauta suirimo ribinės būsenos priklausomybė nuo apkrovos, pažeistos sienelės storio ir medžiagų mechaninių charakteristikų:

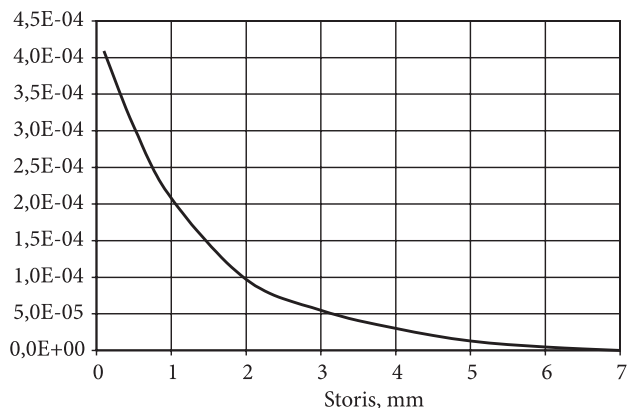
$$y = 7e^7 - 9,4 \cdot P - 10,3 \cdot P_a + 0,00023 \cdot E_1 - 2,25e^9 \cdot b + 21,5 \cdot P_b - 13,7 \cdot P_c - 37,5 \cdot P_d - 18672 \cdot t - 1,3e^{-5} \cdot E_1 - 0,044 \cdot \sigma_{y1} - 2,4e^{-5} \cdot E_2 - 0,009 \cdot \sigma_{y2} - 6,4e^{-5} \cdot E_3 - 0,04 \cdot \sigma_{y3} + 3,7e^{-5} \cdot E_4 - 0,02 \cdot \sigma_{y4} + 8,2e^{-6} \cdot E_5 - 0,02 \cdot \sigma_{y5}; \quad (4)$$

čia y – ribinio būvio atsako kintamasis; P, P_a, P_b, P_c ir P_d – slėgis vamzdžio viduje; b – pažeistos sienelės storis; t – temperatūra vamzdžio viduje; E_1, E_2, E_3, E_4 ir E_5 – plieno St3 tamprumo modeliai esant 20, 50, 100, 120 ir 150°C temperatūroms; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ ir σ_5 – plieno St3 takumo riba esant 20, 50, 100, 120 ir 150°C temperatūroms.

Gauta ribinės būsenos priklausomybė (4) buvo naudota kaip vidinė atsako funkcija skaičiuojant suirimo tikimybes Monte Karlo modeliavimo metodu [4]. Atlikta 1000000 Monte Karlo skaičiavimų. Šioje analizėje buvo naudojamos nominalios medžiagų savybių ir geometrinių duomenų reikšmės ir normalusis apkrovos pasiskirstymas (20%). Naudojant (4) lygtį prognozuotos judančios atramos vamzdžio suirimo tikimybės priklausomybės nuo slėgio ir nuo vamzdžio sienelės storio korozijos pažeistoje vietoje. Gauti rezultatai yra pavaizduoti 5 ir 6 paveiksluose.



5 pav. Judančios atramos vamzdžio korozijos pažeistoje vietoje suirimo tikimybė veikiant slėgiui



6 pav. Judančios atramos vamzdžio korozijos pažeistoje vietoje suirimo tikimybė kintant sienelės storiumi ir veikiant 5 bar slėgiui

luose. Suirimo tikimybės priklausomybės nuo slėgio nustatytos atvejams, kai korozijos pažeistos sienelės storis yra 1 ir 3 mm (6 pav.). Nustatyta, kad suirimo tikimybė yra $2,08e^{-4}$ esant eksploatacijos slėgiui (5 bar) ir $4,13e^{-2}$ esant hidraulinių bandymų slėgiui (20 bar), kai sienelės storis yra 1 mm.

Naudojant (4) lygtį atlikti judančios atramos vamzdžio suirimo tikimybės prognozavimas kintant korozijos pažeistos sienelės storiui, kai yra eksploatacijos slėgis. Gauti prognozavimo rezultatai parodyti 6 paveiksle. Nustatyta, kad judančios atramos vamzdžio suirimo tikimybė yra $3,05e^{-4}$ esant eksploatacijos slėgiui, kai sienelės storis 0,5 mm.

4. IŠVADOS

Straipsnyje pateikta centralizuotų šilumos tinklų patikimumo vertinimo metodika. Aptartos pagrindinės tokią metodiką sudarančios dalys: sistemos termohidraulinis modelis, stipruminis-tikimybinis vamzdinių modelių ir tinklo patikimumo matematinis modelis. Straipsnyje pristatyta metodika buvo praktiškai pritaikyta Kauno centralizuotai šilumos tiekimo sistemai. Šiame straipsnyje pateikti du patikimumo vertinimo metodikos taikymo pavyzdžiai: išnagrinėti termofikacinio vandens tiekimo į Kauno miesto centrą patikimumo aspektai bei atliktas termofikacinių magistralinių tinklų vamzdinių judančios atramos stiprumo tikimybinis įvertinimas. Atliekant atramos stiprumo tikimybinį įvertinimą buvo nustatyta judančios atramos vamzdžio suirimo tikimybės priklausomybės nuo slėgio ir nuo vamzdžio sienelės storio korozijos pažeistoje vietoje. Šie pateikti analizės pavyzdžiai demonstruoja aptartos centralizuotų šilumos tinklų patikimumo vertinimo metodikos tinkamumą realioms užduotims spręsti.

Gauta 2007 12 10
Priimta 2008 02 12

Literatūra

1. <http://www.7t.dk/TERMIS/>
2. The RELAP5 Code Development Team. RELAP5/MOD3.3 Code Manual, NUREG/CR-5535, INEL-95/0174. 1995.
3. Kulak R. F., Fiala C. NEPTUNE – a System of Finite Element Programs for three-dimensional nonlinear analysis // Nuclear Engineering and Design. 1988. Vol. 106. P. 47–68.
4. Cesare M. A., Sues R. H. PROFES Probabilistic Finite Element System – Bringing Probabilistic Mechanics to the Desktop. American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 99-1607, 1999. P. 1–11.
5. Kulak R. F., Marchertas P. 2003. Development of a Finite Element Based Probabilistic Analysis Tool // Transaction 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Prague, Czech Republic, August 17–22, (CD-ROM), Paper B215.
6. ADLPIPE 10 User Manual, Revision 10. Research Engineers, Inc. June, 2000.
7. Pavaras A. Konstrukciniai plienai. Vilnius, 1978.
8. Augutis J., Ušpuras E. Technologijų rizika. Kaunas, 2006.

Algirdas Kaliatka, Mindaugas Valinčius, Juozas Augutis,
Ričardas Krikštolaitis, Sigitas Rimkevičius, Gintautas Dundulis,
Rimantas Bakas

RELIABILITY ASSESSMENT METHOD OF DISTRICT HEATING NETWORK

Summary

A reliability assessment method of district heating systems, which covers thermohydraulic, strength-probabilistic and mathematical models, is presented. Methods of finite elements, first row reliability and response surface, failure trees, and Monte Carlo simulation were used in creation of the model. The reliability assessment of thermal water (hot water) supply to the centre of the Kaunas city is suggested as an application example of the proposed method. Evaluating reliability possible ways were analysed how thermal water reaches the town centre, and possible places of pipeline accidents were identified. Probabilistic and thermohydraulic calculations were carried out in determined units.

Key words: district heating system, reliability, thermohydraulic model, strength-probabilistic model, mathematical model

Альгирдас Калятка, Миндаугас Валинчюс,
Йозас Аугутис, Ричардас Крикштолайтис,
Сигитас Римкявичюс, Гинтаутас Дундулис,
Римантас Бакас

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СЕТЕЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Резюме

Представлена методика оценки надежности централизованного теплоснабжения, объединяющая термогидравлическую, прочностно-вероятностную и математическую модели. В качестве примера применения предложенной методики представлена оценка снабжения термофикационной воды в центр города Каунас.

Ключевые слова: централизованное теплоснабжение, надёжность, термогидравлическая модель, прочностно-вероятностная модель, математическая модель