

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(21) Paraiškos numeris:	2022 518
(22) Paraiškos padavimo data:	2022-04-29
(41) Paraiškos paskelbimo data:	2022-11-10
(45) Patento paskelbimo data:	2023-01-25

(73) Patento savininkas:
**Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g.
73, 44029 Kaunas, LT**

(72) Išradėjas:
**Renaldas RAIŠUTIS, LT
Vyktas SAMAITIS, LT
Liudas MAŽEIKA, LT
Audrius JANKAUSKAS, LT
Egidijus ŽUKAUSKAS, LT**

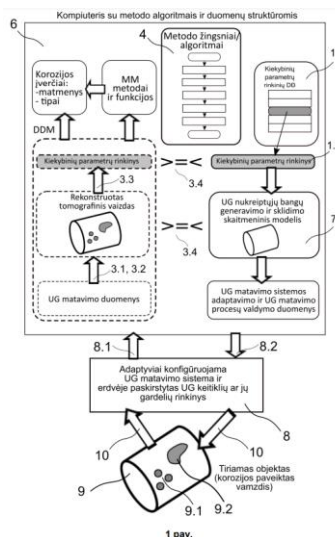
(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
**Otilija KLIMAITIENĖ, 35, AAA Law, A. Goštauto g.
40B, Verslo centras „Dvyniai“, LT-03163 Vilnius, LT**

(54) Pavadinimas:

Ultragarsinēs tomografijas būdas ir sistēma vamzdynu korozijai jvertinti

(57) Referatas:

Išradimas atskleidžia ultragarsinės (UG) tomografijos sistemą ir būdą, skirtus aptikti ir įvertinti pramoniniuose vamzdynuose bendrąją ir lokalią vamzdžio paviršiaus ar sienelės koroziją. Išradimas priklauso pramonės ir energetikos diagnostinės įrangos sričiai. Tai UG tomografija ir mašininių mokymų pagrįsta UG matavimo sistema ir kompleksinės duomenų analizės būdas, skirti vamzdynų bendrajai ir lokaliai korozijai įvertinti. Išradimo objektas apima adaptyviai konfigūruojamą UG matavimo sistemą ir erdvinę paskirstytą UG keitiklių ar jų gardelių rinkinį, specializuotą programinę įrangą, specializuotų kiekybinių parametrų rinkinių duomenų bazę, specialius algoritmus (metodus) atrinkti parametrus, apdoroti modeliavimo ir matavimo duomenis, palyginti juos tarpusavyje, klasifikuoti kiekybinius parametrus taikant mašininio mokymosi metodus, ir nustatyti aptiktos korozijos tipą. Taip pat, pateiktas UG nukreiptųjų bangų generavimo, sklaidimo ir sąveikos su tipiniais korozijos tipo defektais skaitmeninis modelis.



TECHNIKOS SRITIS

Išradimas priklauso pramonės ir energetikos diagnostinės įrangos sričiai, konkrečiau, atskleidžia pramoninių vamzdynų ultragarsinio (UG) tyrimo būdą ir sistemą. Tai UG tomografija bei mašininiu mokymusi pagrįsta UG matavimo sistema ir matavimo duomenų analizės būdas, leidžiantys efektyviai aptikti ir įvertinti lokalizuotą ir bendrąją vamzdynų koroziją.

TECHNIKOS LYGIS

Korozija yra vienas labiausiai paplitusių ir probleminių mechaninės degradacijos reiškinių inžinerinės infrastruktūros komponentuose, pavyzdžiui, metaliniuose vamzdžiuose ir konstrukcinėse plokštėse. Naftos, chemijos ir dujų pramonės vamzdynais transportuojami produktai, kurių sudėtyje yra koroziją sukeliančių ir skatinančių medžiagų. Tai lemia korozijos ir korozinių defektų atsiradimą vamzdynų sienelėse bei, atitinkamai per ilgesnį laikotarpį, įvairius vamzdynų infrastruktūros gedimus. Laiku nesiėmus prevencinių priemonių, minėtų korozinių defektų didėjimas ir plėtimasis tęsiasi, kol pagaliau įvyksta rimti inžinerinės infrastruktūros gedimai, o neretai jų rezultate ir ekologinės taršos įvykiai.

Siekiant išvengti tokių gedimų sukeltų aplinkos užterštumo ir ekonominių padarinių, yra būtina periodiškai arba nuolat stebėti vamzdynų infrastruktūros korozinių pažeidimų lygį, bei atitinkamai, užtikrinti ilgalaikį vamzdynų infrastruktūros komponentų vientisumą ir funkcionalumą.

Prasidėjus vamzdžio korozijai, dėl jos poveikio įvyksta vamzdžio sienelės storio sumažėjimas, tai yra, vamzdžio sienelėje atsiranda defektas. Tokiems defektams tirti pritaikius nukreiptąsias ultragarso bangas (*angl. „guided ultrasonic waves“*), šios bangos sklinda išilgai tiriamos struktūros (pavyzdžiui, vamzdžio sienelės) dideliais atstumais ir sąveikauja su vamzdžio sienelėje ar konstrukcinėje plokštėje esančiais įvairiais defektais. Šios sąveikos metu įvyksta ultragarso bangų sklindančių modų atspindys, lokalinis išbarstymas, bei transformacija ties tiriamo objekto defektais ir struktūriniais nehomogeniškumais. Taip pat, dėl vamzdžio sienelės ar plokštės storio pokyčių, pakinta ir sklindančių ultragarso bangų fazinis ir grupinis greičiai. Panaudojus nukreiptąsias ultragarsines bangas, galima perdengti artimas ir tolimas tiriamojo vamzdžio sienelių sritis.

Keletas žinomų patentinių dokumentų atskleidžia vamzdžių korozijos aptikimo ir įvertinimo būdus bei priemones, naudojant nukreiptąsias ultragarso bangas.

JAV patentinėje paraiškoje US2021/0310995 (prioriteto data 2009.09.18) aprašytas būdas tiksliai matuoti vamzdžių sienelių storio pokyčius. Storis nustatomas UG testavimu, kai sienelės storio daug matavimų atliekami toje pat vietoje fiksuotu jutikliu bei eliminuojant paklaidas, susijusias su triukšmo ir temperatūros pokyčiais. Labai jautrus imtuvas konvertuoja kiekvieną atspindėtą impulsą į bangas, kurios vidurkinamos su kitų impulsų matavimais. Gautoje vidutinėje bangoje, kiekviena bangos forma analizuojama, siekiant nustatyti kiekvieno atspindėto impulso kraštutinumus ir vingio taškus. Ši analizė leidžia tiksliai nustatyti laiką tarp atspindėtų impulsų. Šiuo būdu per kelias savaites galima patikimai nustatyti tikslų korozijos vaizdą vamzdžio sienelės vietoje. Tačiau, dokumente atskleistas tik vamzdžio sienelės storio lokalaus sumažėjimo (sukelto korozijos) matavimas. Tuo tarpu, esamajame išradime, nukreiptųjų UG bangų taikymas neapsiriboja vien lokaliu sienelės storio matavimu.

Europos patentinėje paraiškoje EP1698894A2 (prioriteto data 2005.03.04) aprašytas nukreiptųjų ultragarso bangų taikymas tirti vamzdžius, ir signalų apdorojimo metodų panaudojimas. Šiame dokumente siūloma naudoti ultragarso dažnius nuo 1 kHz iki 100 kHz. Teigiama, kad ilgojo nuotolio nukreiptosios bangos sklinda keliasdešimt metrų išilgai vamzdžio ir atsispindi nuo vamzdžio defektuotų sričių. Dokumente pateikta ultragarsinių keitiklių sistemos konfigūracija, išdėstyta ratu aplink vamzdį. Nurodyta, kad atliekamas signalų apdorojimas dažnių srityje, siekiant eliminuoti žadinimo signalo įtaką. Tačiau, čia atskleistos koncepcijos trūkumas yra tas, kad korozijai aptikti ir įvertinti yra reikalingas pakankamai didelis skaičius ultragarsinių keitiklių, išdėstytų ratu aplink tiriamąjį vamzdį. Pavyzdžiui, paragrafe [0055] nurodytas ultragarsinių keitiklių kiekis: 16–7,62 cm diametro vamzdžiui, ir 32–15,64 cm diametro vamzdžiui.

Dar vienoje JAV patentinėje paraiškoje US2021/0333238A1 (prioriteto data 2020.04.27) atskleista ratu aplink vamzdį išdėstytų dviejų ultragarsinių keitiklių grupių žiedų koncepcija. Šie žiedai yra nutolę vienas nuo kito tam tikru atstumu, vienas iš jų siunčia, o kitas priima nukreiptąsias išilgines arba torsines (sukimosi) ultragarsines bangas. Vamzdžio sienelės defektai aptinkami tarpe siunčiančiųjų ir priimančiųjų keitiklių, atliekant priimtų ultragarsinių nukreiptųjų bangų signalų laiko-dažnio analizę, bei sklidimo laiko matavimus. Čia aprašytos koncepcijos trūkumas, kad joje reikalingas

pakankamai didelis ultragarsinių keitiklių, išdėstytų ratu aplink vamzdį, skaičius. Taip pat, reikalinga naudoti dviejų ultragarsinių keitiklių grupių žiedų išdėstymo topologiją.

Dar viename JAV patente US11022436B2 (prioriteto data 2016.08.11) atskleistas metodas vamzdžių sienelės storiui matuoti, kuris remiasi sklindančioms nukreiptosioms bangoms apskaičiuotų laiko-dažnio dispersijos žemėlapių palyginimu defektuotoje ir nedefektuotoje tiriamosios plokštės arba vamzdžio srityje. Naudojami elektromagnetiniai akustiniai keitikliai (EMAT) sugeneruoti simetrines skersines-išilgines bangų modas (SH) ir asimetrines skersines-išilgines bangų modas (AH). Šiame dokumente atskleistas metodas turi apribojimą veikti tik su minėtomis SH- ir AH-modoms bei EMAT tipo keitikliais.

Dar vienoje tarptautinėje patentinėje paraiškoje WO2012013942A1 (prioriteto data 2010.07.28) atskleista ultragarsinių keitiklių išdėstymo aplink tiriamąjį vamzdį koncepcija. Taip pat, čia nurodyta, jog vykdoma keleto atspindžių nuo pikinių amplitudžių verčių analizė bei slopinimo analizė, atspindžio koeficiento nustatymas. Čia atskleistos techninio sprendimo koncepcijos trūkumas yra tas, kad reikalingas pakankamai didelis skaičius ultragarsinių keitiklių, išdėstytų ratu aplink vamzdį („*at least two sets of transducers*“). Taip pat, atlikti matavimo signalo analizę - reikalinga ne mažiau, negu du atspindžiai nuo vamzdžio sienelėje esančių vidinių defektų.

Apžvelgti vamzdynų korozijos aptikimo ir įvertinimo sprendimai pasižymi mažiausiai šiais trūkumais:

daugelio UG keitiklių sudėtingomis konfigūracijomis, išdėstytomis aplink tiriamą vamzdį;

žinomi sprendimai negali tirti išilgai vamzdžio esančio sektoriaus, jei UG keitikliai neišdėstyti ratu (perimetru) aplink vamzdį;

žinomi sprendimai nevertina vienu metu korozijos sukeltų vamzdžio sienelės pažeidimų ploto ir įsiskverbimo gylio.

IŠRADIMO ESMĖ

Techninė problema. Technikos lygio dokumentuose atskleisti pramoninių vamzdynų korozijos tyrimo būdai ir sprendimai apima daugelio UG keitiklių konfigūracijas, tačiau suteikia ribotas matavimo funkcijas bei taikymo galimybes.

Korozijos vertinimas žinomais techniniais sprendimais yra nepakankamas arba techniškai sudėtingas. Šio išradimo techninė problema yra vamzdynų koroziją aptikti efektyviau, paprastesnėmis UG keitiklių konfigūracijomis, o aptiktus korozijos telkinius charakterizuoti tiksliau: įvertinti jų tiek plotą, tiek gylį, klasifikuoti į tipus.

Sprendimas. Išradimu atskleidžiama UG matavimo sistema ir korozijos įvertinimo būdas, skirti aptikti ir įvertinti vamzdžio paviršiuje ar sienelėje susidariusią koroziją. Techninis sprendimas pagrįstas UG tomografija, mašininio mokymusi (MM) bei klasifikavimu, ir vykdo kompleksinę duomenų analizę, kuri automatiškai įvertina vamzdynų korozijos tipą, klasifikuodama į bendrąją ir(arba) lokalią koroziją. UG matavimo sistema apima:

Adaptyviai konfigūruojamą erdvėje paskirstytų UG keitiklių ar jų gardelių rinkinį, su UG signalų generatoriais, stiprintuvais, analoginiais-skaitmeniniais keitikliais;

Kompiuterinį įrenginį su programine įranga, vykdančia UG matavimo procesų valdymą, matavimo duomenų analizę, DB valdymą, korozijos vertinimą.

Metodas apima:

Kiekybinių parametrų rinkinius, aprašančius nukreiptųjų UG bangų žadinimo sąlygas, sklidimą bei sąveiką su korozijos defektais vamzdžiuose, bei šių rinkinių duomenų bazę;

Žingsnius išrinkti kiekybinių parametrų rinkinį pasirinktam UG nukreiptųjų bangų žadinimui konkrečiam tiriamam vamzdžiui;

Žingsnius atlikti skaitmeninį modeliavimą ir realaus matavimo duomenų apdorojimą, apimančią pirminį signalų apdorojimą, tomografinę rekonstrukciją, kiekybinių parametrų rinkinio apskaičiavimą, modeliavimo ir matavimo duomenų palyginimą;

Kiekybinių parametrų įvertinimo ir klasifikavimo žingsnius, taikant mašininio mokymosi metodus, ir korozijos tipo (lokali ar bendroji) nustatymą.

Naujumu pasižyminčios išradimo savybės yra šios:

UG matavimo rezultatus lyginti su žinomu etalonu, naudojamas skaitmeninis modelis. Tai lankstus ir efektyvus sprendimas, pakeičiantis kalibracinius vamzdžio bandinius, praktiškai naudojamus atlikti etaloninius (*angl. reference*) matavimus;

Metodo apimtyje vykdomas skaitmeninių modelių mašininis mokymas: tam numatyta ir naudojama duomenų bazė su įvairiomis sumodeliuotomis matavimo konfigūracijomis;

UG matavimo sistemoje pakanka minimalaus UG keitiklių skaičiaus: vienoje vamzdžio vietoje įrengiamas UG signalą siunčiantis keitiklis; kitoje - UG signalo priėmimo keitiklis, kurie sukonfigūruoti atlikti vamzdžio matavimą nukreiptosiomis UG bangomis. Tokiu atveju, nebūtina daugelio UG keitiklių sudėtinga sistema, kur daug UG keitiklių privalo būti išdėstyti ant vamzdžio paviršiaus tam tikra tvarka (pavyzdžiui, perimetru aplink vamzdį).

Efektai. Sprendimas pasižymi šiais techniniais efektais:

Sistemoje pakanka minimalaus UG keitiklių ar jų gardelių rinkinio. Minimalią konfigūraciją sudaro 1 siunčiantis ir 1 priimantis UG keitikliai, įrengti skirtingose pasirinktose (pvz., pasiekiamose) vamzdžio vietose. Išdėsčius erdvėje paskirstytų UG keitiklių ar gardelių rinkinį, po to matavimo sistema sukonfigūruojama (sukalibruojama) adaptyviai ir automatiškai pagal ant vamzdžio (t.y., tiriamo objekto) paviršiaus išdėstytus UG keitikius. Naudojant UG keitiklių gardeles, kiekvieną siuntimo ir priėmimo gardelę gali sudaryti nuo 1 iki 16 UG keitiklių elementų;

Sistema su minimalia UG keitiklių konfigūracija įgalina tirti korozijos pokyčius ir korozijos sritis, esančias išilgai vamzdžio esančio sektoriaus, nebūtinai UG keitikius išdėsčius perimetru aplink vamzdį;

Metodas analizuoja UG matavimo duomenis, gautus ant konkretaus tiriamo vamzdžio ir juos lygina su šį konkretų vamzdį/jo tipą atitinkančiu skaitmeniniu modeliu, aprašančiu UG nukreiptųjų bangų generavimą, sklidimą, bei sąveiką su tipiniais korozijos defektais. Todėl, atlikti matavimą ir palyginimą su etalonu, nereikalingi realaus vamzdžio kalibraciniai bandiniai;

įvertina vamzdžio sienelės korozinio pažeidimo tiek plotą, tiek gylį;

įvertina korozijos apimtį ir tipą, pagal kiekybinius parametrus bei jų rinkinius iš specializuotų kiekybinių parametrų rinkinių duomenų bazės;

atrenka esminius kiekybinius parametrus, iš atlikto modeliavimo ir matavimo rezultatų, klasifikuoja parametrus taikant mašininio mokymosi metodus, ir nustato aptiktų korozinių pažeidimų tipą (lokali ar bendroji korozija).

Taikymai. Išradimas taikytinas, siekiant atskirti lokalią koroziją (*angl. local corrosion*) pasižyminčią sparčiau progresuojančiu vamzdžio sienelės plonėjimu, ir bendrąją koroziją (*angl. general corrosion*), kurie nėra atskiriami šiuo metu žinomais matavimo metodais bei taikant ilgojo nuotolio tikrinimo sistemas. Išradimo numatytas veikimo diapazonas yra iki 5 metrų, taip pat, užtikrinamas pakankamas erdvinis ir aplink vamzdį tikslumas, esant ribotam ir optimizuotam matavimo padėčių skaičiui.

BRĖŽINIŲ APRAŠYMAS

Išradimo esminiai aspektai paaiškinti brėžiniuose ir diagramose. Brėžiniai ir diagramos yra išradimo aprašymo sudedamoji dalis ir pateikiami kaip nuoroda į galimą išradimo įgyvendinimą ar vizualų paaiškinimą, bet neturi riboti išradimo apimties. Brėžiniai yra schematiniai ir principiniai, juose pavaizduotų objektų dydžiai, proporcijos ir konkretūs realizacijos variantai gali skirtis išradimo apimtyje.

1 pav. Korozijos vertinimo tiriamajame objekte (pramoniniame vamzdyje) UG matavimo sistemos schema: 1 - kiekybinių parametrų rinkinių DB; 1.1 - kiekybinių parametrų rinkinys (vienas DB įrašas iš daugelio); 4 - metodo žingsnius realizuojantys algoritmai/programos; 6 - duomenų apdorojimo ir valdymo kompiuteris; 7 - nukreiptųjų UG bangų generavimo ir sklidimo skaitmeninis etalonas (modelis); 8 - adaptyviai konfigūruojami UG matavimo sistema ir erdvėje paskirstytas UG keitiklių ar gardelių rinkinys; 8.2 - adaptyvaus konfigūravimo valdymo duomenys (parametrai); 8.1 – registruoti ir skaitmenizuoti UG signalai; 9 - tiriamas objektas (korozijos paveiktas vamzdis), su korozijos sukeltais skirtingo tipo defektais: 9.1 - bendroji korozija, 9.2 - lokali korozija; 10 - tiriamu objektu sklindančios nukreiptosios UG bangos.

2 pav. Korozijos įvertinimo būdo (metodo) žingsniai: 2 – kiekybinių parametrų rinkinio (1.1) selektuotam nukreiptųjų UG bangų žadinimui tiriamajam vamzdžiui atrinkimo algoritmas; 3 - modeliavimas ir matavimo duomenų apdorojimas: 3.1 - pirminis UG signalų apdorojimas (filtravimas, vidurkinimas, segmentavimas laiko langais), 3.2 - tomografinė rekonstrukcija, 3.3 - kiekybinių parametrų rinkinio apskaičiavimas, 3.4 – skaitmeninio etalono ir matavimo duomenų palyginimas; 3.5 – skaitmeninio etalono modeliavimas; 3.5, 3.6 – parametrų atrinkimas UG matavimui atlikti; 5, 5.1, 5.2, 5.3 - kiekybinių parametrų klasifikavimo algoritmai, taikant mašininio mokymosi metodus, korozijos tipo nustatymas.

3 pav. Tiriamas objektas (vamzdis) su skirtingo tipo korozijos defektais:

(a) bendroji korozija 9.1;

(b) lokali korozija 9.2;

(c) vamzdis 9 su įrengtais UG keitikliais 10.1 ir 10.2 ir UG bangomis 10, sklindančiomis tarp UG keitiklių 10.1 ir 10.2 per korozijos defektus 9.1 ir 9.2.

4 pav. Ultragarsinių keitiklių išdėstymas:

(a) UG keitiklių daugiaelementės gardelės 10.1 ir 10.2, formuojančios vamzdžio 9 sienelėse nukreiptąsias UG bangas 10;

(b) vienelemenčiai siunčiantis ir priimantis kontaktiniai UG keitikliai 10.1 ir 10.2, kur UG ėmiklis 10.2 yra mechaniškai skenuojamas išilgai vamzdžio 9, kad perdengtų kelias erdvines padėtis, kuriose registruojamos nukreiptosios UG bangos 10 po jų sąveikos su defektais 9.1 ir 9.2,

(c) skirtingose erdvinėse padėtyse išdėstyti vienelemenčiai ėmikliai 10.1 ir 10.2 (1, 2, ..., N), komutuojami pagal UG matavimo sistemoje veikiančią išrinkimo algoritmą.

DETALUS IŠRADIMO APRAŠYMAS

Išradimas apima UG matavimo aparatinę sistemą ir korozijos vertinimo metodą, sudarytą iš signalų ir duomenų apdorojimo žingsnių, kur sistema su metodu sudaro vientisą techninį sprendimą. Metodo žingsniai dalinai ar pilnai realizuojami kompiuteriniais algoritmais ir atitinkamais programiniais moduliais.

Ultragarsinio matavimo sistema. UG matavimo sistema korozijai vertinti tiriamame objekte (9), pavyzdžiui, pramoniniame vamzdyje, apima šiuos aparatinius-sisteminius komponentus (1 pav.):

Adaptyviai konfigūruojamą UG matavimo posistemę, apimančią erdvėje paskirstytą (montuojamą ant tiriamo objekto (9)) UG keitiklių ar gardelių rinkinį (8), UG signalų generatorius, imtuvus-stiprintuvus, analoginius-skaitmeninius keitiklius ir kt.

Kompiuterį/kompiuterinį įrenginį (6), su bent vienu procesoriumi ir bent vienu atminties moduliu, kur

atminties modulyje talpinami parametrai, duomenų bazės, modeliai, matavimo rezultatai, užregistruoti signalai, PĮ moduliai, ir kiti duomenys, reikalingi įgyvendinti

metoda;

procesorius vykdo metodo žingsnius, valdo UG matavimo procesus, apdoroja duomenis, vykdo modeliavimą, mašininį mokymą bei klasifikavimą, ir užtikrina vykdymą visų veiksmų, kurie būtini metodui įgyvendinti.

Sistemoje nenaudojami tiriamo objekto (9) fizinis etalonas, kurio atžvilgiu būtų vertinami tiriamo objekto (9) koroziniai pažeidimai. Šis etalonas pakeistas skaitmeniniu etalonu saugomu ir modeliuojamu kompiuterio atmintyje, bei analitiškai aprašytu kiekybinių parametrų rinkiniu (1.1), saugomu duomenų bazėje (1).

UG keitikliai ir signalai. UG matavimo sistemoje naudojami vienelemenčiai UG keitikliai ar UG keitiklių gardelės, formuojantys nukreiptąsias UG bangas. Vienelemenčių UG keitiklių darbiniai dažniai ir generuojamų/priimamų signalų dažnių intervalas apima 30–200 kHz. Daugiaelemečių UG gardelių darbiniai dažniai gali siekti iki 1.5–2 MHz. Ultragarsinėse gardelėse elementų kiekis gali būti nuo 1 iki 16.

Svarbi išradimo savybė yra tiriamo objekto (9) skenavimas/matavimas nukreiptosiomis UG bangomis. UG keitikliai ar gardelės (8) tvirtinami ant tiriamo objekto (9) ir žadinami taip, kad objekto (9) numatyta regione kurtų nukreiptąsias UG bangas (10). Nukreiptųjų UG bangų ir jų modų (išilginė, lankstymosi, torsinė) taikymai korozijos tyrimuose yra žinomi, pavyzdžiui, iš dokumento [3] Guided ultrasonic wave detection in offshore riser corrosion: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/detection-of-corrosion-in-offshore-risers-using-guided-ultrasonic-waves-june-2007>, 2022.

UG keitiklių išdėstymas. Sistemą sudaro adaptyviai konfigūruojamos UG matavimo sistemos ir erdvėje paskirstyto UG keitiklių ar jų gardelių rinkinys (8). Šis rinkinys apima bent 1 siunčiantį ir 1 priimantį UG keitikius ar UG keitiklių gardeles, įrengtus ant tiriamo objekto (9), taip pat, UG signalo generatorius, stiprintuvus, analoginius-skaitmeninius keitikius ir kt.

UG keitikliai ar jų gardelės (8) turi būti išdėstyti ant tiriamo objekto (9) ir sukonfigūruoti bei valdomi taip, kad tiriamo objekto (9) numatyta regione generuotų nukreiptąsias UG bangas, sklindančias numatytomis kryptimis per tiriamą objektą ir jame esančius spėjamus ar tikrintinus korozinius pažeidimus;

Nukreiptosios UG bangos tiriamame objekte (9) gali būti generuojamos skirtingų modų, priklausomai nuo tyrimo aplinkybių ir apribojimų. Modos atžvilgiu

objekto (9) (vamzdžio) žadinimo krypties gali būti pasirenkamos išilginės (angl. *longitudinal*), lankstymosi (angl. *flexural*), arba torsinės (sukimosi, angl. *torsional*). Taip pat pavyzdžiui su dominuojančia išilgine simetrine arba dominuojančia vertikalės kryptimi asimetrine poslinkių komponente. Šių tipų modos ir jų generavimas yra žinomi iš technikos lygio dokumentų, pavyzdžiui [3], todėl nedetalizuojamos.

Nukreiptosios UG bangos gali būti generuojamos ir priimamos ir atskirų pavienių UG keitiklių pagalba. Minimalią UG keitiklių konfigūraciją sudaro 1 siunčiantis ir 1 priimantis UG keitikliai, įrengti skirtingose pasirinktose (pvz., pasiekiamose) vamzdžio vietose. Tokia minimali konfigūracija leidžia tirti išilgai vamzdžio esantį sektorių, kai UG keitikliai išdėstyti ne ratu aplink vamzdį (perimetre), bet erdvėje išretintu būdu išilgai vamzdžio, kaip parodyta paveiksluose 4 b ir c. Išdėsčius erdvėje UG keitiklių ar gardelių rinkinį, po to matavimo sistema sukonfigūruojama (sukalibruojama) adaptyviai ir automatiškai pagal ant vamzdžio paviršiaus išdėstytus UG keitikius. Paveiksle 4b parodyti vienelemenčiai siunčiantis ir priimantis kontaktiniai UG keitikliai (10.1, 10.2), kur UG ėmiklis (10.2) mechaniškai skenuojama išilgai vamzdžio 9, kad perdengtų kelias erdvines padėtis, kuriose registruojamos nukreiptosios UG bangos (10) po jų sąveikos su defektais 9.1 ir 9.2. Paveiksle 4c parodyti skirtingose erdvinėse padėtyse išdėstyti vienelemenčiai ėmikliai 10.1 ir 10.2 (1, 2, ..., N), komutuojami pagal UG matavimo sistemoje veikiančią išrinkimo algoritmą.

Papildomai, UG matavimo sistema apima priemones (metodinius žingsnius) adaptyviai konfigūruoti erdvėje paskirstytą UG keitiklių ar jų gardelių rinkinį (8).

Korozijos vertinimo metodas. Korozijos vertinimo metodas (4), įgyvendinamas UG matavimo sistemoje, apima šiuos žingsnius ir duomenų modulius, kurie pavaizduoti ir 2 paveiksle:

kiekybinių parametrų rinkinius (1.1) ir jų duomenų bazę (1), talpinančią daugiau nei vieną tokį rinkinį (1.1);

kiekybinio parametrų rinkinio (1.1) pasirinktam nukreiptųjų UG bangų žadinimui tiriamajame objekte (vamzdyje) išrinkimo algoritmą (2);

skaitmeninio etalono (7) sudarymą iš pasirinkto kiekybinio parametrų rinkinio (1.1)

UG matavimą tiriamame objekte (9), su parinktais kiekybiniais parametrais:

Nukreiptų UG bangų generavimą ir UG matavimo signalų registravimą;

Registruotų UG matavimo signalų pirminį apdorojimą,

Tiriamo objekto (vamzdžio) tomografinę rekonstrukciją iš UG matavimo signalų,

kiekybinių parametrų rinkinio apskaičiavimą iš matavimo signalų ir/arba rekonstruoto tomografinio vaizdo,

skaitmeninio modeliavimo ir UG matavimo duomenų palyginimą (3), palyginimo rezultate gaunamas daugiamatis duomenų modulis (DDM);

Kiekybinių parametrų klasifikavimo, taikant mašininį mokymąsi (MM), ir korozijos tipo nustatymą (5) iš DDM modulio;

Kiekybinių parametrų rinkiniai. Korozijos vertinimo metode yra naudojami kiekybinių parametrų rinkiniai. Išradime numatyta tokių parametrų rinkinių duomenų bazė (DB), talpinanti daug skirtingų rinkinių. Šie parametrų rinkiniai, tai konstrukciniai (geometriniai-medžiaginiai) aprašai įvairių galimų (praktiškai naudojamų) ir matuojamų vamzdžių variantų.

Parinkus iš DB (1) tinkamiausią kiekybinių parametrų rinkinį (1.1) (atitinkantį realų tiriamą vamzdį), po to pagal šį parinktą parametrų rinkinį:

sudaromas analitinis (ar dalinai analitinis) vamzdžio modelis, kuriuo identifikuojamos tos pačios konfigūracijos vamzdžiu sklindančių nukreiptųjų UG bangų modos, pavyzdžiui: išilginės (*angl. longitudinal*), lankstymosi (*angl. flexural*), arba torsinės (sukimosi, *angl. torsional*). Taip pat pavyzdžiui su dominuojančia išilgine simetrine arba dominuojančia vertikalės kryptimi asimetrine poslinkių komponente,

ir nustatomi atitinkamų pasirinktų modų dažniai, faziniai ir grupiniai greičiai.

Sekančiu žingsniu, sudaromas vamzdžio baigtinių elementų modelis, kuriame modeliuojamas parinktos modos nukreiptųjų UG bangų sklidimas, o modeliavimo rezultate gaunamas UG nukreiptųjų bangų sklidimo skaitmeniniame vamzdžio modelyje virtualus 3D-tūris. Minėtas virtualus 3D-tūris gali būti lyginamas su realaus vamzdžio tomografiniu 3D vaizdu, gautu išmatavus vamzdį su realiai prasklidusiomis UG nukreiptosiomis bangomis ir užregistruotais UG signalais.

Modeliavimo ir UG matavimų rezultatų palyginimas gali būti atliekamas prieš

UG tomografinę rekonstrukciją, arba po jos:

pirmu atveju, lyginami pagal kiekybinių parametrų rinkinį sumodeliuoti UG signalai su realiaame vamzdyje išmatuotais UG signalais;

antru atveju, lyginami baigtiniais elementais sumodeliuotas virtualus 3D-tūris su realaus objekto (vamzdžio) tomografiniu 3D-vaizdu.

Palyginimų rezultate gauti skaitmeninio modelio ir matavimo rezultatų tarpusavio skirtumai atvaizduojami daugiamačiu duomenų moduliui (DDM). Šis DDM modulis gali apimti paklaidas tarp išmatuoto vamzdžio ir jo skaitmeninio modelio, kurias galima minimizuoti, optimizavus skaitmeninio modelio parametrus. Taip pat, DDM modulyje atvaizduojami ir išmatuoto vamzdžio nehomogeniškumai, pavyzdžiui, naujai atsiradę koroziniai defektai ar įtrūkimai, kurių nėra skaitmeniniame modelyje.

Jei pirmą kartą matuojamas nežinomas vamzdis, kuriam duomenų bazėje nėra tinkamo kiekybinių parametrų rinkinio, tada pradinis kiekybinių parametrų rinkinys gali būti sudaromas iš pirmojo UG matavimo rezultatų, pagal juos įvertinus pradines kiekybinių parametrų reikšmes, tokias kaip vamzdžio matmenys, medžiagos ir pažeidimų charakteristikos, ir įrašius jas į kiekybinių parametrų rinkinių DB.

Parametrų rinkinio išrinkimas. Kiekybinių parametrų rinkinys (1.1) gali būti išrenkamas keliais būdais. Vienu atveju, į sistemą rankiniu būdu įvedamas konkretus vamzdžio tipas, nurodoma vamzdžiu transportuojamas skystis, vamzdžio eksploatacijos amžius: pagal šiuos parametrus, paieškos algoritmas duomenų bazėje (1) suras artimiausią kiekybinių parametrų rinkinį. Kitu atveju, sistema atlieka pirmąjį UG matavimą, suformuoja parametrų rinkinį, ir pagal minimalius matavimo ir DB parametrų rinkinių skirtumus, išrenka iš DB artimiausią kiekybinių parametrų rinkinį. Dar kitu atveju, kai DB nesama tinkamo kiekybinių parametrų rinkinio, sistema atlieka pirmąjį matavimą, ir automatiškai iš matavimo rezultatų suformuoja pradinį parametrų rinkinį, kurį įrašo į DB (1).

Korozijos tipai. Tiriamame objekte (vamzdyje) gali susiformuoti skirtingų tipų korozija (3 pav.), pasižyminti skirtinga korozinio pažeidimo struktūra, sąveika su UG signalais, ir kritiškumu vamzdžio tolimesnei eksploatacijai. Dokumentas [1] STONE, Mark. *Wall Thickness Distributions for Steels in Corrosive Environments and Determination of Suitable Statistical Analysis Methods*. Berlin, Germany: 4th European-American Workshop on Reliability of NDE, Jun 2009 - nurodo bent du

sąlyginius korozijos tipus: lokalią ir bendrąją koroziją (*angl. local and general corrosion*). Lokali korozija (3a pav.) reiškia nedidelio ploto pažeidimą su vamzdžio sienelės storio reikšmingu suplonėjimu, tai yra, korozinis įdubimas (suplonėjimas), duobutė sienelėje (*angl. pit, pits, pitting*), arba netgi korozinė skylė. Antrasis tipas yra sienelės paviršiuje pasklidusi bendroji korozija (3b pav.), apimanti didesnę bet negilų plotą smulkių korozinių pažeidimų sienelės paviršiuje ar tūryje. Skirtingi korozijos ir defektų tipai paaiškinti dokumente [2] ir parodyti šio dokumento 1 paveiksle. Šie tipai pasižymi skirtingomis UG signalo sklaidimo, atspindžio nuo defektų, sklaidos savybėmis. Skiriasi ir jų kritiškumas tolimesnei vamzdžio eksploatacijai. Bendroji korozija nemažina efektyvaus vamzdžio storio tiek smarkiai, kiek lokali duobutė, laike palyginti sparčiai progresuojanti link korozinės skylės. Todėl, korozijos vertinimuose svarbu atskirti šiuos korozijų tipus, kad numatyti tinkamas prevencines priemones.

Skaitmeninis etalonas. Skirtingai nuo korozijos įvertinimo UG būdų, kur gali būti naudojami etaloniniai vamzdžių bandiniai, šiame išradime etalono funkciją atlieka virtualus skaitmeninis vamzdžio modelis. Tai yra, skaitmeninėje aplinkoje paruošiamas tiriamo objekto (vamzdžio) etalonas, pakankamai tiksliai aprašantis objekto konstrukcines (geometrinės-medžiagines) savybes, UG keitiklių charakteristikas, UG keitiklių išdėstymą atžvilgiu objekto (pavyzdžiui, koordinatės ant vamzdžio sienelės), modelį sudarančių baigtinių elementų tipus, UG nukreiptųjų bangų sklaidimo ir sąveikos su modeliu charakteristikas. Modelyje gali būti įtraukiami ir virtualūs defektai, sąveikaujantys su UG signalais. Vykdam realaus objekto tyrimus, skaitmeninis modelis (7) lyginamas su UG signalų sklaidimo charakteristikomis, išmatuotomis realiame tiriamame objekte.

Skaitmeninis modelis (7) gali būti paruoštas ir pritaikytas, panaudojus specialias tokio modeliavimo priemones ir sistemas. Pavyzdžiui, gali būti naudojamas Baigtinių Elementų Metodas (*angl. Finite Element method*) bei jį realizuojančios modeliavimo sistemos. Išradimo apimtyje, būdai ir priemonės paruošti ir naudoti skaitmeninį modelį (7) neribojamos.

Tomografija. Tomografinė rekonstrukcija (*angl. Tomographic reconstruction*) atliekama iš UG nukreiptųjų bangų signalų projekcijų, užregistruotų skirtingose erdvinėse padėtyse esančiais UG keitikliais arba jų gardelėmis. UG nukreiptosios bangos, sklidusios vamzdžio sienoje numatyta kryptimi, ir sklaidimo kelyje sutikusios defektus, yra registruojamos priimančiame UG keitiklyje su UG signalo pokyčiais

(atspindžiais, slopinimais, vėlinimo laikais, fazės pokyčiais, fazinio bei grupinio greičių dispersijos sukelta įtaka). Pagal užregistruoto UG signalo pokyčius, tomografinės rekonstrukcijos pagalba, rekonstruojamos UG signalo sklidimo kelyje pasitaikiusios kliūtys, jų koordinatės bei charakteristikos, tolimesniuose žingsniuose leidžiančios įvertinti kliūties fizines savybes. Išradimo apimtyje, tomografinės rekonstrukcijos būdai ir priemonės neribojami ir laisvai pasirenkami.

Mašininis mokymasis ir klasifikavimas. Mašininis mokymasis (MM) ir korozijos įvertinimo statistiniai būdai atskleisti dokumentuose [1], ir [2] The Welding Institute. *RR16. Guidelines for use of Statistics for Analysis of Sample Inspection of Corrosion*. Cambridge, United Kingdom: HSE Books, 2002. ISBN 0 7176 2554 0. Šiame išradime, MM ir klasifikavimo būdai bei priemonės neribojamos ir gali būti pasirinktos iš eilės žinomų. Išradimo įgyvendinimo variantuose, korozijos defektai gali būti aprašyti skaitmeniniame modelyje (7), nurodžius jų geometrinius matmenis arba mašininio mokymosi (MM) būdu aprašyti regresinėmis funkcijomis, ir naudojami būsimų korozijos pokyčių prognozavimui. Pavyzdžiui, MM įgyvendinimo variantas gali būti vamzdžio sienelės storio mažėjimo laike dėsningumas, kaip parodyta dokumente [2], 13–15 paveiksluose. Kitu atveju, vamzdžio sienelės storio pasiskirstymo plote normalizuota funkcija (pavaizduota dokumento [1] 9 ir 16 paveiksluose) bei jos pokyčiai laike leidžia prognozuoti korozijos progresą ir kritiškumą vamzdžio eksploatacijai.

Dokumentuose [1], [2] paminėta, jog daugeliu atvejų korozijos atsiradimo ir progresavimo dėsningumai bei statistiniai duomenys įvairių tipų ir paskirčių vamzdžiuose yra žinomi. Kita vertus, eksploatuojant konkretų vamzdį, periodiškai jį matuojant bei kaupiant šių matavimų duomenis, atsiranda galimybė iš sukauptų istorinių duomenų (kaupiamojo pasiskirstymo funkcijų) prognozuoti korozijos progresavimą šiame konkrečiame vamzdyje, bei numatyti laiką, kada korozijos poveikis taps kritiniu tolimesnei vamzdžio eksploatacijai.

Šiais ir kitais [1], [2] atskleistais MM bei statistikos kaupimo atvejais, į kiekybinių parametrų rinkinį (1.1) gali būti įtraukiami tipiniai (dažniausiai pasitaikantys) korozijos defektai, kurių duomenys gaunami pirminio ir antrinio apdorojimo metu iš modeliavimo ir eksperimentinių matavimų.

Sistemos pradinis nustatymas. Įrengus UG matavimo keitiklius (10.1, 10.2) ant tiriamo objekto (vamzdžio sienelės) (9), sistemoje adaptyviai nustatomi matavimo parametrai: UG keitiklių koordinatės, atstumai, signalo sklidimo greičiai, slopinimai, ir

kt. Adaptyviai konfigūruojamos sistemos erdvėje paskirstyti UG keitikliai (10.1, 10.2) ar jų gardelių rinkinys (8) uždedami rankiniu būdu, pavyzdžiui, į skaitmeniniame etalone (7) nurodytas (rekomenduojamas) tiriamo vamzdžio vietas. Po to, sistema adaptuojasi tik UG daviklių iteratyviu komutavimu, žadinimo dažnio parinkimu, UG bangų žadinimu atitinkamais siuntikliais ir priėmimo atitinkamai UG ėmikliais, viskas atliekama programiniu būdu ir elektronikos komutacijomis, tai yra, atliekamas modelio ir realaus vamzdžio atitikimo patikslinimas (angl. „*fine tuning*“) – skaitmeninio modelio kalibracija su realiu vamzdžiu.

Metodo programinė įranga. Metodą realizuoja programinė įranga (PI) apimanti kompiuterinius algoritmus ir programinius modulius, vykdančius šiuos metodo žingsnius ir funkcijas:

Objekto skaitmeninio modelio (7) suformavimą iš kiekybinio parametrų rinkinio (1.1), UG nukreiptųjų bangų signalų sklidimo modeliavimą objekto modelyje (7);

UG matavimo sistemos su tiriamu objektu (9), kalibravimą su skaitmeniniu modeliu (7);

Kiekybinių parametrų rinkinio (1.1) išrinkimą iš duomenų bazės (1);

Kiekybinių parametrų rinkinių (1.1) duomenų bazės (1) suformavimą;

UG matavimo rezultatų palyginimą su skaitmeniniu modeliu (7) ir daugiamačio duomenų modulio DDM suformavimą;

Mašininio mokymosi MM funkcijas;

Korozijos pažeidimų klasifikavimo funkcijas.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Ultragarsinės (UG) tomografijos būdas, vertinantis korozinius pažeidimus tiriamame objekte (9), pavyzdžiui, pramoniniame vamzdyje, veikiantis su UG matavimo sistema, įrengta ant tiriamo objekto (9), ir apimantis šiuos žingsnius:

Įrengiami UG sistemos siunčiantys ir priimantys UG keitikliai ar jų gardelės (10.1, 10.2) ant tiriamo objekto (9) ir sukonfigūruojami skleisti nukreiptąsias UG bangas (10) numatytame tiriamo objekto (9) regione;

siunčiantys UG keitikliai (10.1) žadinami generuojamais signalais bei tiriamą objektą (9) perėję UG nukreiptųjų bangų signalai registruojami priimančiais UG keitikliais (10.2);

atliekamas registruotų UG signalų pirminis apdorojimas;

iš UG signalų rekonstruojamas tomografinis vaizdas;

palyginamas rekonstruotas tomografinis vaizdas su etalono tomografiniu vaizdu ir gaunamas skirtuminis tomografinis vaizdas;

identifikuojami koroziniai pažeidimai tomografiniame vaizde,

b e s i s k i r i a n t i tuo, kad

tiriamo objekto (9) etalonas yra skaitmeninis modelis (7), formuojamas kompiuteriniu modeliavimu iš kiekybinių parametų rinkinio (1.1), apimančio objekto (9) konstrukcines charakteristikas, UG signalų ir jų sklidimo objekte (9) charakteristikas;

skaitmeninio modelio (7) palyginimo su UG matavimų rezultatais žingsnyje suformuojamas daugiamatis duomenų modulis (DDM), apimantis skirtuminį tomografinį vaizdą ir jo kiekybinių parametų rinkinį;

būdas apima bent vieną mašininio mokymosi (MM) žingsnį, įtraukiantį etalono kiekybinių parametų rinkinyje (1.1) bent vieną korozinį pažeidimą, ar bent vieną MM regresinę funkciją, atitinkančią korozinių pažeidimų statistinį skirstinį;

būdas apima bent vieną korozinių pažeidimų klasifikavimo žingsnį, kur DDM modulyje aptikti koroziniai pažeidimai, naudojant MM funkcijas, klasifikuojami, mažiausiai, į bendrąją koroziją (9.1) ir lokalią koroziją su vamzdžio sienelės reikšmingu suplonėjimu (9.2).

2. Būdas pagal 1 punktą, *b e s i s k i r i a n t i s* tuo, kad kiekybinių parametrų rinkinys (1.1) apima, mažiausiai:

tiriamo objekto (9) konstrukcines charakteristikas;

UG keitiklių ar gardelių bei jų pozicionavimo ant tiriamo objekto (9) charakteristikas;

UG nukreiptųjų bangų generavimo ir jų signalų matavimo charakteristikas;

tiriamo objekto (9) korozinių pažeidimų charakteristikas ir/arba jas aprašančias statistines-analitines funkcijas.

3. Būdas pagal 1 ir 2 punktus, *b e s i s k i r i a n t i s* tuo, kad naudoja duomenų bazę DB (1), apimančią daugiau nei vieną kiekybinių parametrų rinkinį (1.1).

4. Būdas pagal 1 punktą, *b e s i s k i r i a n t i s* tuo, kad suformuotas daugiamačis duomenų modulis DDM, apima mažiausiai:

skirtuminį tomografinį vaizdą, gautą palyginus matuoto objekto (9) rekonstruotą tomografinį vaizdą, ir skaitmeninio modelio trimatį vaizdą;

iš skirtuminio vaizdo identifikuotą kiekybinių parametrų rinkinį, apimančią matavimo metu aptiktus objekto (9) korozinių pažeidimų geometrinius parametrus.

5. Būdas pagal 1 ir 4 punktus, *b e s i s k i r i a n t i s* tuo, kad matavimo rezultate vertinami bendrosios ir lokalsios korozijos kiekybiniai parametrai yra korozinio pažeidimo plotas, ilgis, plotis, vamzdžio sienelės pažeidimo gylis.

6. Būdas pagal 1–3 punktus, *b e s i s k i r i a n t i s* tuo, kad kiekybinių parametrų rinkiniai (1.1) ir jų DB (1) yra formuojami bet kuriuo šių būdų ar jų kombinacija:

rankiniu būdu įvedus ir koreguojant kiekybinių parametrų rinkinio (1.1) vertes;

įvedus korozinių pažeidimų statistinius duomenis ir regresines-prognostines

funkcijas iš kitų eksperimentų, matavimų bei modeliavimo rezultatų;

vykdant matavimus naujame nežinomame objekte ir kaupiant jo matavimo istorinius-statistinius duomenis.

7. Būdas pagal 1–3 punktus, *b e s i s k i r i a n t i s* tuo, kad objekto matavimui kiekybinių parametrų rinkinys (1.1) išrenkamas bet kuriuo šių būdų ar jų kombinacija:

rankiniu būdu įvedus ir koreguojant kiekybinių parametrų rinkinio (1.1) vertes;

atlikus kalibracinį objekto (9) UG matavimą, suformavus matavimo parametrų rinkinį, ir pagal jo bei DB rinkinių minimalius skirtumus, išrenkamas artimiausias kiekybinių parametrų rinkinys (1.1);

atlikus kalibracinį objekto UG matavimą, iš šio matavimo rezultatų suformuojamas kiekybinių parametrų rinkinys, kuris laikomas etaloniniu kiekybinių parametrų rinkiniu (1.1), įrašomu į duomenų bazę (1).

8. Būdas pagal 1 punktą, *b e s i s k i r i a n t i s* tuo, kad skaitmeninis modelis (7) ir UG signalų sklidimas jame yra modeliuojami Baigtinių Elementų Metodu ir šio metodo programinio modeliavimo priemonėmis.

9. Būdas pagal 1 punktą, *b e s i s k i r i a n t i s* tuo, kad apima sistemos adaptavimo žingsnį, kuriuo, pagal ant tiriamo objekto (9) įrengtais UG keitikliais atliktus kalibracinius matavimus, koreguoja skaitmeninio modelio (7) parametrus, minimizuodamas skirtumines paklaidas tarp matuojamo objekto (9) ir skaitmeninio modelio (7).

10. Būdas pagal 1 punktą, *b e s i s k i r i a n t i s* tuo, kad skaitmeninio modelio (7) palyginimas su UG matavimo rezultatu atliekamas prieš tomografinės rekonstrukcijos žingsnį ir /arba po tomografinės rekonstrukcijos žingsnio.

11. Ultragarsinio (UG) matavimo sistema, skirta įvertinti korozinius pažeidimus

(9.1, 9.2) ir vykdanči UG tomografijos būdą pagal 1-10 punktus, apimanti mažiausiai

bent 1 siunčiantį ir 1 priimančią UG keitiklius ar jų gardeles, įrengtus ant tiriamo objekto (9), UG generatorius, stiprintuvus, analoginius-skaitmeninius keitiklius;

kompiuterinį įrenginį (6), apimantį bent vieną procesorių ir bent vieną atminties modulį, realizuojančius UG tomografijos būdo duomenų struktūras, duomenų bazines, ir vykdančius programiškai būdo žingsnius;

b e s i s k i r i a n t i tuo, kad sistemoje

matavimo etaloną realizuoja skaitmeninis modelis (7), suformuotas kompiuteriniu modeliavimu atmintyje iš kiekybinių parametrų rinkinio (1.1), ir

UG keitikliai ar jų gardelės yra išdėstyti ant tiriamo objekto (9) ir sukonfigūruoti taip, kad tiriamo objekto (9) numatytame regione generuotų nukreiptąsias UG bangas, sklindančias numatytomis kryptimis per tiriamus korozinius pažeidimus.

12. Sistema pagal 11 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad nukreiptosios UG bangos tiriamame objekte (9) generuojamos išilginės, lankstymosi, torsinės (sukimosi) arba jų mišri moda su dominuojančia išilgine simetrine arba dominuojančia vertikalės kryptimi asimetrine poslinkių komponente.

13. Sistema pagal 11 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad UG keitiklių arba jų gardelių ir UG bangų dažnių efektyvus diapazonas apima nuo 30 kHz iki 1,5 MHz.

14. Sistema pagal 11 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad UG keitiklių gardelėse elementų kiekis yra nuo 1 iki 16.

15. Sistema pagal 11 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad minimalioje 1 siunčiančio ir 1 priimančio UG keitiklių konfigūracijoje, UG ėmiklis (10.1) ir/arba UG siuntiklis (10.2) yra mechanškai skenuojami, kad perdengti kelias erdvines padėtis, kuriose registruojamos nukreiptosios UG bangos po jų sąveikos su defektais.

16. Programinė įranga UG matavimo sistemoje pagal 11–15 punktus, apimanti kompiuterinius algoritmus ir programinius modulius vykdyti šiuos UG tomografijos būdo žingsnius:

suformuoti objekto skaitmeninį modelį (7) iš kiekybinių parametrų rinkinio (1.1), ir modeliuoti UG nukreiptųjų bangų signalų sklidimą suformuotame objekto skaitmeniniame modelyje (7);

kalibruoti UG matavimo sistemą su tiriamu objektu (9) pagal objekto skaitmeninį modelį (7);

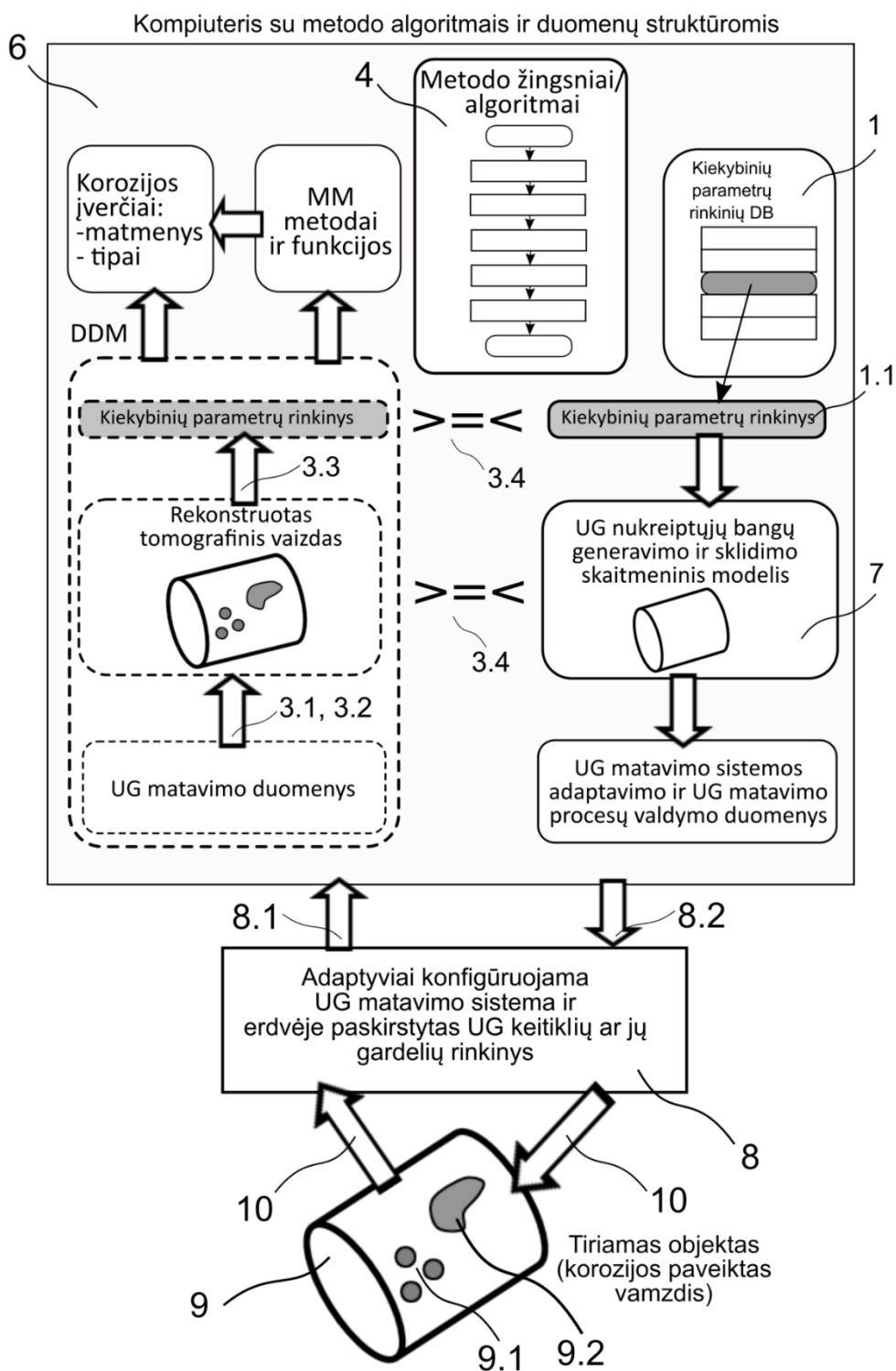
išrinkti kiekybinių parametrų rinkinį (1.1) iš duomenų bazės (1);

suformuoti kiekybinių parametrų rinkinių (1.1) duomenų bazę (1);

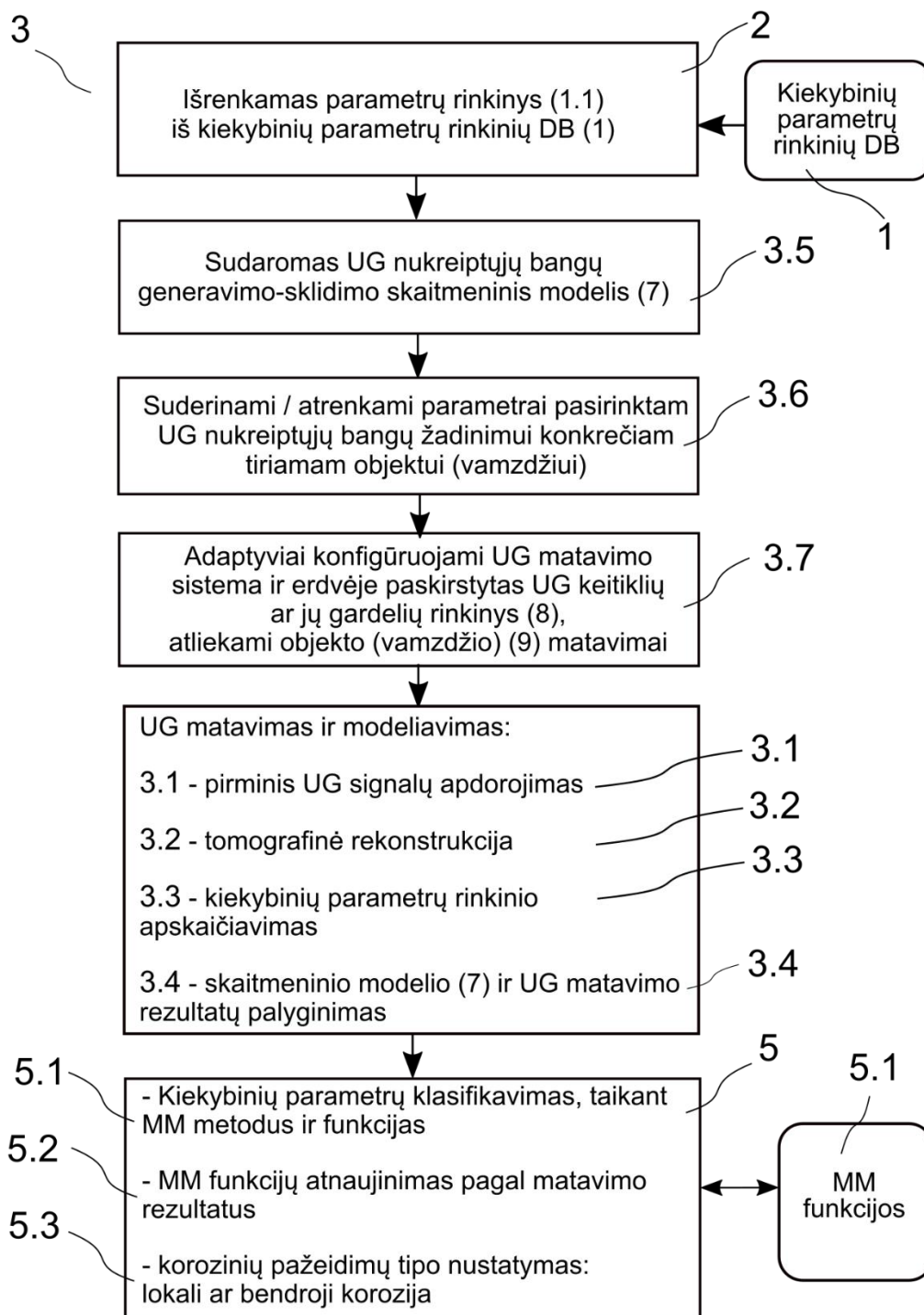
lyginti UG matavimo rezultatus su skaitmeniniu modeliu (7) ir suformuoti daugiamatį duomenų modulį DDM;

vykdyti mašininio mokymosi MM funkcijas, iš UG matavimo duomenų formuojančias ir atnaujinančias korozinių pažeidimų statistinius skirstinius;

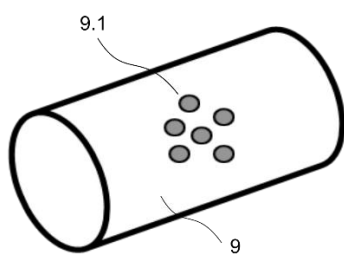
klasifikuoti korozijos pažeidimus į bendrosios ir lokalsios korozijos tipus.



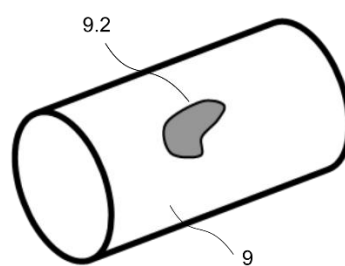
1 pav.



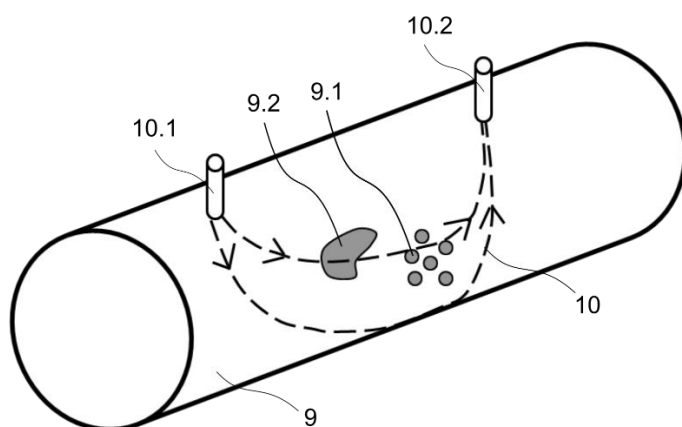
2 pav.



a)

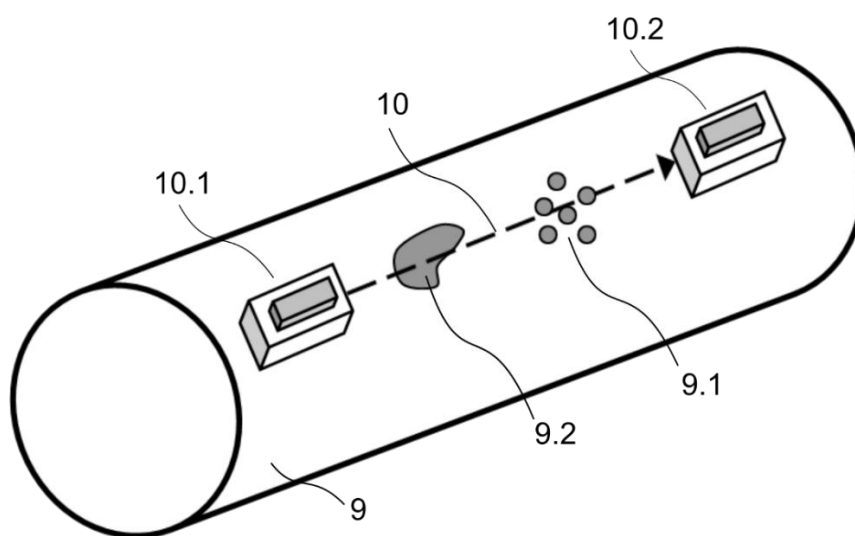


b)



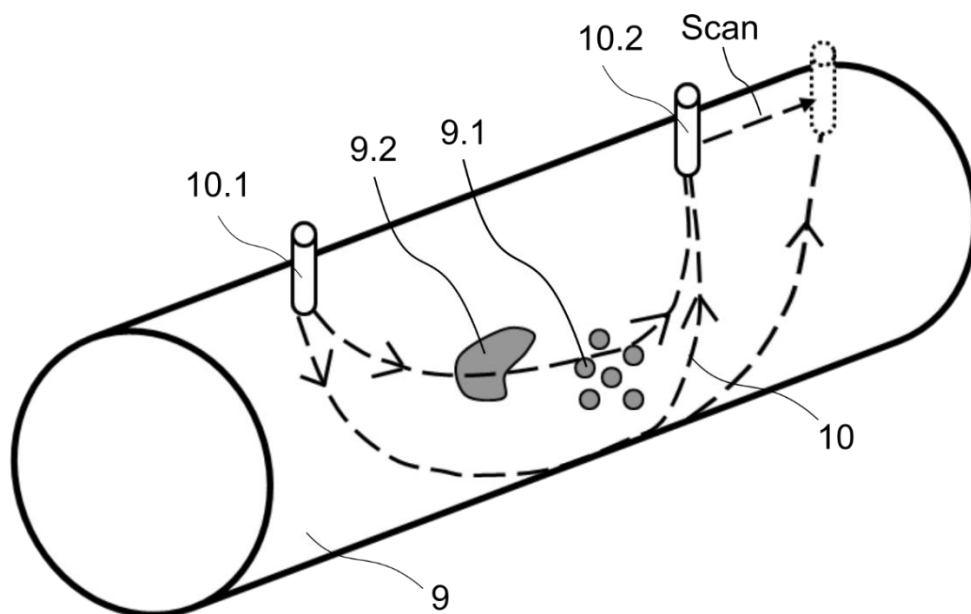
c)

3 pav.

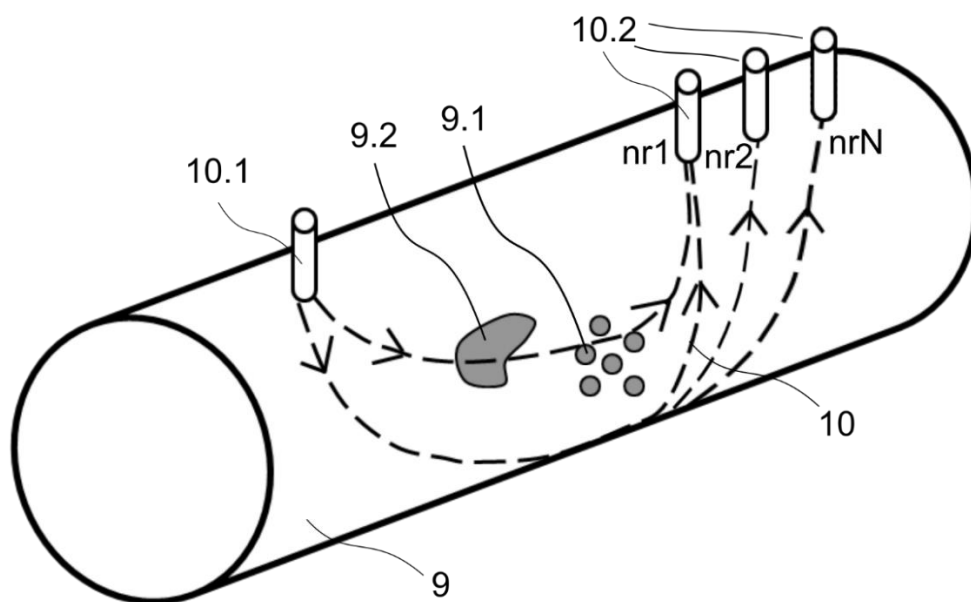


a)

4 pav.



b)



c)