

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS, FIZINIŲ IR BIOMEDICINOS MOKSLŲ
FAKULTETAS
MECHANIKOS IR STATYBOS INŽINERIJOS KATEDRA

Gytis Šegžda

LĖKTUVO C-27J „SPARTAN“ RATO STEBULĖS DEFEKTŲ
TYRIMAS TAIKANT NEARDOMĄJĄ KONTROLĘ

Magistro baigiamasis darbas

Šiauliai, 2016

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS, FIZINIŲ IR BIOMEDICINOS MOKSLŲ
FAKULTETAS
MECHANIKOS IR STATYBOS INŽINERIJOS KATEDRA

LĖKTUVO C-27J „SPARTAN“ RATO STEBULĖS DEFEKTŲ
TYRIMAS TAIKANT NEARDOMĄJĄ KONTROLĘ

Magistro baigiamasis darbas

Autorius - Gytis Šegžda (MM-14 gr.)

Vadovas - doc. dr. Dalia Čikotienė

Recenzentas – doc. dr. Artūras Sabaliauskas

Katedros vedėja – doc. dr. Loreta Kelpšienė

Šiauliai, 2016

TVIRTINU

Mechanikos ir statybos inžinerijos katedros vedėja

Loreta Kelpšienė

2014 m. spalio mėn. 14 d.

MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS

Išduota magistrantui Gyčiui Šegždai

Darbo tema: Lėktuvo C-27J „SPARTAN“ rato stebulės defektų tyrimas taikant neardomąją kontrolę.

Patvirtinta 2016 m. balandžio 4 d. katedros posėdžio protokolu Nr. TFBMSIKP-5.

1. Darbo tikslas

Pagerinti defektų aptikimo tikslumą ir jų įvertinimą pritaikant profiliuotą sūkurinių srovių keitiklį, naudojant universalų sūkurinių srovių neardomosios kontrolės prietaisą „Phasec 2D“ lėktuvo C 27-J „Spartan“ ratų stebulių tikrinime.

2. Darbo struktūra

1. ĮVADAS
2. TYRIMAI SŪKURINĖMIS SROVĖMIS
3. RATO STEBULĖS TYRIMAS
 - 3.1. Tyrimo objektas
 - 3.2. Tyrimas naudojant įprastinį sūkurinių srovių jutiklį
 - 3.3. Tyrimas naudojant profiliuotą sūkurinių srovių jutiklį
 - 3.4. Tyrimas naudojant naudojant sūkurinių srovių „WheelScan 5“ sistemą
4. SŪKURINIŲ SROVIŲ METODO PRITAIKYMO GERINIMAS
5. IŠVADOS

Darbo pateikimo terminas 2016 m. birželio mėn. 9 d.

Užduotį gavau _____
(magistranto vardas, pavardė)

_____ 2014-10-14
(parašas, data)

Vadovas _____
(pareigos, vardas, pavardė)

_____ 2014-10-14
(parašas, data)

TURINYS

SANTRAUKA	5
SUMMARY	6
LENTELIŲ SĄRAŠAS	7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
SANTRUMPŲ SĄRAŠAS	10
ĮVADAS	11
1. LITERATŪROS ANALIZĖ.....	12
1.1. Neardomos kontrolės vystymosi istorija ir metodai	12
1.2. Neardomosios kontrolės panaudojimo tikslai	12
1.3. Neardomos kontrolės metodai	15
2. TYRIMAI SŪKURINĖMIS SROVĖMIS	17
2.1. Bendrosios charakteristikos	17
2.2. Sūkurinių srovių kontrolės jutikliai	19
2.2.1. Jutiklių veikimas	19
2.2.2. Jutiklių forma	22
2.3. Universalaus sūkurinių srovių prietaiso „Phasec 2D“ pritaikymas aviacijoje.....	24
2.4. Sūkurinių srovių „Wheelscan 5“ sistema.....	25
2.5. Orlaivių ratų stebulės	28
2.6. Jutiklio atotrūkio momentas.....	29
2.7. Tikrinimo dažnis	32
3. RATO STEBULĖS TYRIMAS	35
3.1. Tyrimo objektas	35
3.2. Tyrimas naudojant įprastinį sūkurinių srovių keitiklį.....	37
3.3. Tyrimas naudojant profiliuotą sūkurinių srovių jutiklį.....	40
3.4. Tyrimas naudojant sūkurinių srovių „Wheelscan 5“ sistemą	43
4. SŪKURINIŲ SROVIŲ METODO PRITAIKYMO GERINIMAS.....	45
IŠVADOS.....	46
LITERATŪRA	47

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS, FIZINIŲ IR BIOMEDICINOS MOKSLŲ
FAKULTETAS
MECHANIKOS IR STATYBOS INŽINERIJOS KATEDRA

Gytis Šegžda. LĒKTUVO C-27J „SPARTAN“ RATO STEBULĖS DEFEKTŲ TYRIMAS
TAIKANT NEARDOMĄJĄ KONTROLĒ. Magistro baigiamasis darbas / vadovas doc. dr. Dalia
Čikotienė.

SANTRAUKA

Siekiant užtikrinti skrydžių saugos reikalavimus aviacijoje, defektų aptikimui yra kuriami ir naudojami įvairūs neardomos kontrolės metodai.

Atliekant įvairius techninės priežiūros darbus yra naudojama netgi keletas neardomos kontrolės metodų, tam kad būtų galima sumažinti nelaimingų įvykių tikimybę iki minimumo. Šiuo metu visame pasaulyje neardomajai kontrolei keliami aukšti reikalavimai.

Tarp visų neardomosios kontrolės metodų, labai svarbi vieta atitenka sūkurinių srovių metodui. Tai aukšto tikslumo ir patikimumo metodas. Šis metodas suteikia galimybę tiksliai aptikti paviršinius defektus, greitą kontrolę ir galimybę nustatyti defektą tiesiogiai nekontaktuojant su tiriamuoju objektu.

Šio darbo tikslas yra pagerinti defektų aptikimo tikslumą ir jų įvertinimą, naudojant sūkurinių srovių prietaisą „Phasec 2D“.

Darbe buvo analizuojama sūkurinių srovių jutiklių pritaikymas aviacinių detalių inspektavime. Buvo atlikti tyrimai su C-27J „Spartan“ ratų stebulėmis. Tyrimai buvo atliekami naudojant paviršinį sūkurinių srovių jutiklį. Taip pat buvo suprojektuotas profiliuotas jutiklis, kuris atitinka rato stebulės borto briaunos formą. Darbo gale pateikiamas greitesnis defektų aptikimo būdas, naudojant sūkurinių srovių „WheelScan 5“ sistemą.

Reikšminiai žodžiai: skrydžių sauga, neardomoji kontrolė, sūkurinių srovių metodas, ratų stebulė, profiliuotas jutiklis.

ŠIAULIAI UNIVERSITY
FACULTY OF TECHNOLOGY, PHYSICAL AND BIOMEDICAL
SCIENCES
DEPARTMENT OF MECHANICAL AND CIVIL ENGINEERING

Gytis Šegžda. INVESTIGATION OF THE WHEEL HUB DEFECTS OF THE PLANE C-27J “SPARTAN” USING NON-DESTRUCTIVE CONTROL. Master final work / research advisor doc. dr. Dalia Čikotienė.

SUMMARY

In order to observe flight safety requirements in aviation, several non-destructive test methods are being created and used for defect detection.

During maintenance task, even several non-destructive test methods are being used to reduce probability of disaster to the minimum. Nowadays in the whole world, NDT has to meet the high requirements.

Among the all NDT methods, significant place takes eddy current method. This method allows ability to recognize surface defect accurately, high-speed control and ability to discover the defect without a direct contact with the test object.

The objective of this work is to improve accuracy of defects detection and their assessment, using eddy current instrument “Phasec 2D”.

In this work were being analyzed eddy current probe adaptation to aviation parts inspection. Performed investigation with C-27J “Spartan” wheel hubs. Carried out research using eddy current surface probe. Created profiled probe according to special wheel bead seat profile. In the end of the work showed faster defect inspection method, using eddy current WheelScan system.

Keywords: flight safety, non-destructive test, eddy current method, wheel hub, profiled probe.

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Sūkurinių srovių skvarbos gylis į įvairias, kintant dažniams.....	34
3.1 lentelė. Orlaivis C-27J „Spartan“ techninė specifikacija.....	35
3.2 lentelė. Rato stebulės techninė specifikacija.	36

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

2.1 pav. Magnetinis laukas aplink laidininką	17
2.2 pav. Magnetinis laukas aplink ritę	17
2.3 pav. Išoriniai ir vidiniai sūkurinių srovių jutikliai	20
2.4 pav. Absoliutinio jutiklio principinė schema	20
2.5 pav. Diferencialinio jutiklio principinė schema	21
2.6 pav. Atspindžio jutiklio principinė schema	21
2.7 pav. Hibridinis jutiklis	22
2.8 pav. Paviršinis jutiklis	23
2.9 pav. Vidinio diametro jutiklis	23
2.10 pav. Išorinio diametro jutiklis	24
2.11 pav. Sūkurinių srovių prietaisas „Phasec 2D“	25
2.12 pav. Automatizuota „WheelScan 5“ sūkurinių srovių sistema	26
2.13 pav. Wheelscan stalas su bėgeliais	27
2.14 pav. Jutiklio judėjimo kelias	27
2.15 pav. Šiuolaikinė orlaivių rato stebulės konstrukcija	28
2.16 pav. Rato stebulės borto briauna [5]	29
2.17 pav. Jutiklio atotrūkio momento ir įtrūkimo signalas	30
2.18 pav. Indukuoto paviršiaus srovės tankis nuo absoliutinio keitiklio	30
2.19 pav. Kompleksinės varžos (impedanso) grafikas	31
2.20 pav. Varžos kitimas	32
2.21 pav. Sūkurinių srovių skvarbos gylis [14]	33
3.1 pav. Transporto lėktuvas C-27J „Spartan“	35
3.2 pav. C-27J „Spartan“ rato stebulė P/N 5014039	36
3.3 pav. Lėktuvų C-27J „Spartan“ rato stebulės tikrinimo schemas[28]	37
3.4 pav. Inpektavimas naudojant įprastus jutiklius	37
3.5 pav. Sūkurinių srovių kalibravimo blokas	38
3.6 pav. Prietaiso kalibravimo grafikas	38
3.7 pav. Rato stebulės išorinė ir vidinė pusės	39
3.8 pav. C-27J „Spartan“ rato stebulės įtrūkimo signalas	39
3.9 pav. Varžos priklausomybė nuo jutiklio padėties: a) įtrūkimo padėtis; b) įtrūkimo signalas	40
3.10 pav. Profilinio jutiklio, specialiai pritaikyto C-27J rato stebulei, schema	41
3.11 pav. C-27J „Spartan“ profilinis rato stebulės jutiklis	41

3.12 pav. Nuosekliai sujungta diferencialinių ričių pora.....	42
3.13 pav. Lėktuvo C-27J „Spartan“ borto briaunos inspektavimas naudojant profilinį sūkurinių srovių jutiklį.....	42
3.14 pav. WheelScan 5 sistemos išorinės rato stebulės pusės ataskaita	43
3.15 pav. WheelScan 5 sistemos vidinės rato stebulės pusės ataskaita.....	44

SANTRUMPŲ SAŖAŠAS

NDT – Neardomoji kontrolė
CAA – Civilinė aviacijos administracija
EASA – Europos aviacijos saugumo agentūra
Lift off – Jutiklio atotrūkio momentas
Log card – Agregato pasas
Bead seat – Rato stebulės borto briauna
MTOW – Maksimali kilimo masė
ABSC – Aircraft braking systems corporation
AC – Kintamoji srovė
DC – Nuolatinė srovė
IACS – Tarptautinis grynojo vario standartas
RAF – Karališkos oro pajėgos

SIMBOLIAI

Simbolis	Pavadinimas	Matavimo vienetai
E	Elektros lauko intensyvumas	[V/m]
H	Magnetinio lauko intensyvumas	[A/m]
D	Elektros srauto tankis	[C/m ²]
B	Magnetinio srauto tankis	[T]
μ	Magnetinė skvarba	[H/m]
σ	Elektrinis laidumas	[S/m]
f	Dažnis	[Hz]
ω	Kampinis dažnis	[Hz]
Z	Impendansas	[Ω]
L	Induktyvumas	[H]
R	Varža	[Ω]

ĮVADAS

Nuo aviacijos pramonės įkūrimo pradžios, saugumas yra vienas iš pagrindinių tikslų, iškeltų orlaivių projektuotojams ir gamintojams, kurie privalo laikytis tarptautinių taisyklių ir reikalavimų. Apie 1950 m., smarkiai išaugus komercinių skrydžių skaičiui, fiuzeliažo įtrūkimai dėl nuovargio, sukėlė keletą fatališkų lėktuvų katastrofų. Tikriausiai geriausiai žinomos 1953 m. ir 1954 m. paviešintos lėktuvo de Havilland DH 106 Comet katastrofos, kai 3 šio tipo orlaiviai sudužo į šipulius viduryje skrydžio. Taigi, be tinkamų saugumo ir atsargos priemonių, maži defektai gali likti nepastebėti iki tol, kol būna per vėlu.

Nuovargis gali būti apibrėžtas kaip gedimas dėl progresuojančios struktūrinės žalos, kurios atsiranda konstrukcijose, veikiamomis dinaminėmis ir kintančiomis apkrovomis. Šia prasme, nuovargis yra atsakingas už didesnę dalį metalo komponentų gedimų ir gali privesti prie nenumatytų ir netikėtų nelaimingų atsitikimų [1]. Norint išspręsti šią problemą, įtrūkimų aptikimas ir stebėseną tapo didelės svarbos klausimais: orlaivių gamintojai pradėjo komponentų patikras prieš sumontuojant į orlaivį ir techninės priežiūros personalas tikrina juos visą jų eksploatavimo laikotarpį. Šis faktas įtraukė neardomos kontrolės metodus (angl. NDT non-destructive testing) į aviacijos pramonę, kurie greitai tapo nepakeičiamais įrankiais tiek gamybai, tiek techninei priežiūrai.

DARBO OBJEKTAS: C-27J „Spartan“ aliuminio lydinio rato stebulė.

DARBO TIKSLAS: Pagerinti defektų aptikimo tikslumą ir jų įvertinimą pritaikant profiliuotą sūkurinių srovių keitiklį, naudojant universalų sūkurinių srovių neardomosios kontrolės prietaisą „Phasec 2D“ lėktuvo C27-J „Spartan“ ratų stebulių tikrinime.

DARBO UŽDAVINIAI:

1. Išanalizuoti sūkurinių srovių keitiklių pritaikymą aviacinių dalių inspektavime.
2. Sudaryti teorinius pagrindus, kurie padidintų kontrolės sūkurinių srovių metodu priemonių stabilumą esant įvairiems įtakojančioms veiksniams.
3. Patobulinti ir pritaikyti profiliuotą sūkurinių srovių keitiklį.
4. Atlikti bandymus ir nustatyti realių sūkurinių srovių keitiklio signalo pokyčius įtakojančioms defektams.
5. Apžvelgti sūkurinių srovių metodo pritaikymo gerinimo galimybes.

1. LITERATŪROS ANALIZĖ

1.1. Neardomos kontrolės vystimosi istorija ir metodai

Neardoma kontrolė yra apibrėžiama kaip patikros metodas, skirtas inspektuoti objektams, medžiagoms ar sistemoms, nepakeičiant pačios jų konstrukcijos. Šis terminas, pagrįste, yra taikomas mechaniniams medžiagų vientisumo tyrimams.

Bendrai kalbant, šis neardomos kontrolės apibrėžimas apima ir medicininės diagnostikos sritis. Ultragarsas, rentgeno spinduliai ir endoskopai yra naudojami tiek medicininėms apžiūroms, tiek ir pramoniniams tikslams. 1940 metais Amerikoje, daugelis neardomos kontrolės visuomenės narių buvo rentgeno spindulių panaudojimo specialistai.

Neardomos kontrolės metodai yra naudojami testuojamos medžiagos vientisumui tirti. Kitos technologijos, pavyzdžiui, radijo astronomija, įtampos ir srovės matavimai, tėkmės matavimai yra neardomoji kontrolė, tačiau jos negali būti naudojamos įvertinant medžiagos savybes. Neardomos kontrolės metodų pritaikymas yra susijęs su testuojamojo objekto panaudojimu. Kiek laiko tiriamasis objektas gali būti naudojamas ir kada bus sekanti patikra?

Neardomos kontrolės panaudojimo ribos yra labai plačios; tose ribose turi būti užtikrintas nepriekaištingas struktūrinių komponentų ir jų sistemų veikimas, stengiantis kuo patikimiau ir ekonomiškai efektyviau atlikti darbus. NDT technikai ir inžinieriai nustato ir įgyvendina tyrimus, nustato defektų vietas ir medžiagos sudėtį, analitiškai numato trūkumus, kurie galėtų sukelti katastrofinės nelaimės ar gedimus. NDT leidžia patikrinti detales ir medžiagas nepažeidžiant jų konstrukcijos. Dėl to, jog patikros yra atliekamos neišardant ar kitaip nepaveikiant jų, NDT suteikia puikų balansą tarp kokybės kontrolės ir sąnaudų efektyvumo.

1.2. Neardomosios kontrolės panaudojimo tikslai

Nuo 1920 metų, NDT išstobulėjo nuo laboratorinio smalsumo iki nepakeičiamo gamybos įrankio. Nuo tada vizuali apžiūra nebėra pagrindinis įrankis nustatant kokybę. Šiuolaikiški NDT įrenginiai yra naudojami užtikrinti detalių ir medžiagų vientisumą ir tuo pačiu patikimumą; neleisti susidaryti gedimams, taip pat neleisti įvykti nelaimingiems atsitikimams ir išsaugoti žmonių gyvybes; nešti pilną vartotojui; užtikrinti vartotojo pasitenkinimą ir palaikyti gamintojo reputaciją aukščiausiam lygį; gerinti galutinio produkto konstrukciją; kontroliuoti gamybos procesą; mažinti gamybos kainą.

1) Produkto vientisumo ir patikimumo palaikymas

Vartotojas kiekvieną kartą perkantis produktą tikisi, jog jis nesukels jokių papildomų rūpesčių ir išstarnaus visą jam skirtą laiką. Šiai dienai nedaug sukurtų produktų atlaiko numatytą naudojimo laikotarpį, tačiau keliami reikalavimai negendamumui yra dideli. Metai po metų, visuomenė vis labiau tikisi ilgesnio tarnavimo laiko, nepaisant to, jog didėja gamybos sudėtingumas, pritaikant elektrinius ir mechaninius įrenginius.

Šiandien: traukiniai, orlaiviai, automobiliai, autobusai ir laivai, perveža žmones į vis daugiau pasaulio vietų ir šis procesas vyksta vis sparčiau. Žmonės visada tikisi, jog pasieks savo kelionės tikslus be jokių incidentų. Tuo tarpu pramoninės gamyklos suinteresuotos pagaminti kuo daugiau produkcijos, greičiau ir geriau, viską kuo labiau automatizuojant. Šių dienų produktų ir mechanizmų sudėtingumas reikalauja didesnio patikimumo.

2) Nelaimingų atsitikimų išvengimas ir darbo sauga

Užtikrinti galutinio produkto patikimumą yra būtina, nes pagerėja vartotojų požiūris į produkto tarnybos laiką. Bet vien tik patikimumo patogumui ir ekonominei naudai neužtenka. Geležinkelio bėgiai turi atlaikyti dinamines apkrovas, kai traukinys važiuoja dideliu greičiu. Tarpmiestinio autobuso priekinė ašis turi nesulūžti, kai autobusas atlieka posūkį. Lėktuvo važiuoklė privalo atlaikyti apkrovas, kai lėktuvas paliečia kilimo-tūpimo tako dangą. Gervės trosas turi išlaikyti svorį, kai žmonės dirba apačioje. Išties, tai yra tik keletas iš milijono pavyzdžių, tačiau tokie kritiniai atvejai yra ganėtinai reti. Ir tai nėra vien tik dėl to, jog visą laiką visus lydi paprasčiausia sėkmė. Didžiausia dalis to gero rezultato yra dėl NDT panaudojimo ir tokių technologijų pasiekiamumo gamintojams ir vartotojams.

3) Vartotojų pasitenkinimo užtikrinimas

Tiesa, jog NDT pritaikymas yra dėl saugumo užtikrinimo, tačiau taip pat tiesa, kad NDT panaudojimas turi nešti pelną ir vartotojams. Šis pelnas gali būti apčiuopiamas ir neapčiuopiamas. Neapčiuopiamas pelnas užtikrina vartotojų pasitenkinimą. Dėl šios akivaizdžios naudos yra skatinamas gamintojų konkurencingumas. Bendrai kalbant, vartotojai nustato kokybės lygį. Neabejotinai, gamintojų reputacija yra tik vienas faktorius. Kiti faktoriai yra: veikimas, išvaizda, pakavimas, aptarnavimas ir kaina. Šiais kapitalistiniais laikais, aukšto konkurencingumo lygio pramonėje, kokybė ir reputacija deja yra daugiau tik klientų mintyse.

4) Produkto konstrukcijos gerinimas

NDT vienareikšmiškai padeda gerinti gaminių konstrukciją. Pavyzdžiui, metalo liejinių tvirtumas gali būti pastebimas atliekant neardomąją kontrolę tokiais metodais kaip radiografinis, dažų įsiskverbimų, sūkurinių srovių ir magnetinių dalelių. Tokie bandymai dažniausiai parodo konstruktoriui, kurias konstrukcijos vietas reikia patobulinti, kad gauti norimas savybes. Toks pavyzdys, aišku, nėra mokslinis, tačiau jis iliustruoja, kaip gamyklos dirba kiekviename pasaulio krašte. Toliau seka įvairūs eksperimentiniai įtempių bandymai, silpnųjų vietų analitinis prognozavimas – visa tai padeda palengvinti, sustiprinti konstrukciją, sumažinti gamybos kainą ir užtikrinti galutinio produkto patikimumą.

5) Gamybos proceso kontrolė

Kontrolė – bazinė pramoninės gamybos sąvoka. Inžinieriai, inspektoriai, operatoriai ir techninės priežiūros personalas žino pagrindines problemas, kontroliuojant bet kokį gamybos procesą. Procesai turi būti kontroliuojami ir naudotojas turi būti apmokytas, jo žinios kaskart atnaujinamos. Kai nors vienas gamybos elementas „išeina iš rikiuotės“, galutinio produkto kokybė automatiškai suprastėja. Beveik kiekvienas NDT metodas yra pritaikomas vienu ar kitu keliu, tam kad padėtų kontroliuoti gamybą ir atneštų pelną gamintojui.

6) Gamybos kainų mažinimas

Yra daugybė faktinių ir galimų pavyzdžių kaip galima išsaugoti kainą, taikant NDT metodus. Daugelis gamintojų gali sumažinti kainą nusprenddami patį mažinimo principą: nustačius ir identifikavus detalės defektus ankstyvoje stadijoje, taip užkertant kelią susidaryti didesniems nuostoliams, kai jau detalė bus surinkta į visą agregatą jau vėliausioje gamybos stadijoje. Kitas kainos mažinimo principas yra, kai atsiranda galimybė pasirinkti kaip patikrinti gaminį – ar jį visiškai išmontuoti ir tada patikrinti, ar patikrinti jau surinktą, tam tikrame agregate. Pavyzdžiui, norint patikrinti aviacinio turbopropelerinio variklio kompresoriaus menteles, visai nebūtina variklio išardyti, užtenka atlikti boroskopinę apžiūrą. Boroskopo kaina yra didelė, tačiau po daugelio patikrų ji atsiperka, be to, sutaupoma laiko ir darbuotojų, kurie turi atlikti tą darbą, skaičius. Taigi, pasirenkant ardomą ar neardomą kontrolę – galime sumažinti gamybos ar eksploatavimo kainą.

1.3. Neardomos kontrolės metodai

Didelis skaičius NDT metodų gali būti naudojamas ir pritaikomas, tam kad pavyktų patikrinti detales, medžiagas ir atlikti norimus matavimus. Tyrėjai toliau bando ieškoti naujų būdų kaip tai pritaikyti fiziškai, o kitos mokslo šaknys ieško naujų NDT metodų. Tačiau, yra 6 pagrindiniai labiausiai paplitę metodai, tai: vizuali apžiūra, spalviniai skverbikliai (penetrantai), magnetinės dalelės, ultragarsas, rentgeno spinduliai ir sukūrinės srovės. Šie metodai yra trumpai apibendrinti žemiau [15].

1) Vizuali ir optinė apžiūra

Vizuali apžiūra, apima ir pačio stebintojo, tikrinančiojo žmogaus akį, kuris turi įvertinti ar nustatyti pažeidimus. Apžiūrintis žmogus naudoja tokius specialius įrankius kaip: padidinimo stiklai, veidrodžiai, boroskopai, tam kad prieiti ir kuo kruopščiau apžiūrėti tiriamąjį objektą. Tokie tikrintojai susiduria su tyrimais nuo paprasčiausių iki labai sudėtingų procedūrų.

2) Kapiliarinis

Tyrimai, naudojant spalvinius skverbiklius, yra vienas iš seniausiai naudojamų NDT metodų. Bandymai skverbikliais yra paprastas, nebrangus ir patikimas patikros būdas, skirtas įtrūkimams, esantiems tikrinamo objekto paviršiuje, nustatyti. Tikrinama detalė gerai nuvaloma, ant tikrinamosios detalės paviršiaus dengiami skvarbieji dažai, po atitinkamo laiko skverbiklis pašalinamas nuo detalės paviršiaus, po to detalė padengiama medžiaga vadinama ryškalu, vėliau paviršius apžiūrimas tinkamo apšvietimo sąlygomis ir galiausiai visų skvarbiosios medžiagos likučių ir ryškalo pašalinimas.

3) Magnetinės dalelės

Tyrimai magnetinėmis dalelėmis – vienas iš neardomųjų bandymų, skirtas patikrinti, ar feromagnetinėse medžiagose nėra įtrūkimų požymių. Šio metodo esmė – naudojamų magnetinių dalelių (indikacijų) kaupimasis ant tinkamai įmagnetintos tikrinamos detalės paviršiaus. Defektas sukelia magnetinio lauko nutekėjimą, taigi prie savęs pritraukia magnetines daleles.

4) Sūkurinės srovės

Sūkurinės srovės – kintamosios elektros srovės, sukeltos kintamojo magnetinio lauko, indukuoto į elektrai laidžią medžiagą. Tyrimai sūkurinėmis srovėmis – vienas iš neardomųjų bandymų, visame pasaulyje žinomi kaip patikimas būdas patikrinti, ar įvairiose laidžiose medžiagose nėra įtrūkimų požymių.

5) Radiografija

Radiografija apima gama ir Rentgeno spindulių panaudojimą nustatant defektus. Rentgeno spindulių generatorius ir radioaktyvus izotopas yra naudojamas kaip radiacijos šaltinis. Spinduliuojama radiacija yra nukreipiama pro detalę ir rezultatas vaizduojamas ant juostos ar plėvelės. Pavaizduoti patamsinimai parodo detalės struktūros ypatybes. Identiškas Rentgeno spindulių naudojimas yra medicinoje.

6) Testavimas ultragarsu

Ultragarsiniai tyrimai – vienas iš plačiai aviacijoje naudojamų neardomųjų bandymų metodų, skirtas paviršiniam ir vidiniams pažeidimams aptikti, tokiems kaip atsiskuoksniavimai, įtrūkimai ir kiti defektai. Ultragarsinis keitiklis sukuria ultragarsinius impulsus ir siunčia juos per detalę bangų pavidalu. Jeigu siunčiamo impulso kelyje pasitaiko defektas, dalis energijos atsispindi nuo defekto paviršiaus.

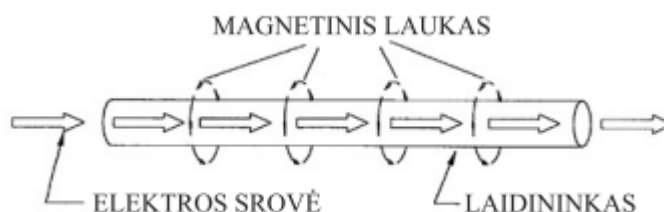
7) Skysčio pratekėjimų nustatymas

Keletas metodų yra naudojama skysčio pratekėjimų slėginiuose induose nustatymui ir identifikavimui. Pratekėjimai gali būti nustatomi naudojant elektrinius klausos įrenginius, remiantis manometrų parodymais, skysčio ir dujų įsiskverbimo metodais, arba paprasčiausiai užtepant skystą muilą.

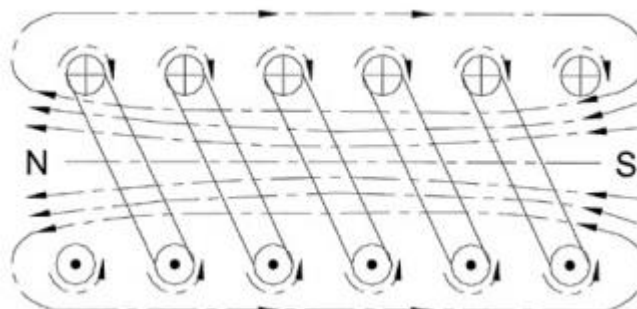
2. TYRIMAI SŪKURINĖMIS SROVĖMIS

2.1. Bendrosios charakteristikos

Sūkurinių srovių metodai grindžiami analizuojant išorinio elektromagnetinio lauko sąveiką su sūkurinių srovių keitiklio sukeltu kontroliuojamo objekto elektromagnetiniu lauku: tekant elektros srovei laidininku, aplink jį susikuria magnetinis laukas (2.1 pav.). Sūkurinių srovių koncentracija objekte priklauso nuo tiriamojo objekto geometrinių ir medžiagos elektromagnetinių parametrų, o taip pat nuo santykinio sūkurinių srovių keitiklio padėties su tiriamuoju objektu. Keitikliu paprastai naudojamos indukcinės ritės (viena ar kelios). Elektros srovė, tekanti sūkurinių srovių ritėje, sukuria magnetinį lauką (2.2 pav.), kuris veikia sūkurinėms srovėms (elektrai) laidžius objektus.



2.1 pav. Magnetinis laukas aplink laidininką



2.2 pav. Magnetinis laukas aplink ritę

Magnetinė skvarba μ išreiškiama magnetinio lauko tankio B (Tesla, Wb/m² ar Gausas) ir magnetinio lauko jėgos H (A/m, erstedas) santykiu. Magnetinės skvarbos vienetai tampa sudėtingi, todėl neardomiesiems bandymams naudojama santykinės magnetinės skvarbos μ_r sąvoka. Magnetinės skvarbos vienetai išnyksta padalijus ją iš oro magnetinės skvarbos ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$), taigi:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1)$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2)$$

Elektromagnetinio lauko sukurta elektrovaros jėga įtakoja keitiklio ritę sukeliant juose jėgą ar keičiant juose elektrinę varžą, registruodama ritės gnybtuose įtampą ar varžą, taip gaunama informacija apie objekto savybes indukuotosios ritės atžvilgiu. Keitiklio varža priklauso nuo daugelio tiriamojo objekto parametrų, informacija gauta iš keitiklio yra daugiaparametrinė. Tai nusako sūkurinių srovių metodo ir trūkumus, ir privalumus. Iš vienos pusės, sūkurinių srovių metodas leidžia įgyvendinti daugiaparametrinę kontrolę, o iš kitos pusės, šis metodas reikalauja ypatingų pastangų, tam kad surūšiuoti tiriamojo objekto atskirus parametrus. Kontroluojant, kuri nors vieną iš parametrų, kitų signalų įtaka į keitiklį tampa trukdžiais, todėl šią įtaką būtina mažinti.

Sūkurinių srovių metodo privalumas yra tame, kad kontrolę galima atlikti tiesiogiai ne kontaktuojant keitikliui su tiriamuoju objektu. Jų sąveika paprastai įvyksta atstumu tarp keitiklio ir objekto, nuo kelių iki keliolikos milimetrų. Todėl šiuo metodu galima gauti gerus bandymo rezultatus, netgi objektams judant dideliais greičiais.

Dar vienas iš privalumų yra tame, jog keitiklio ritei jokios įtakos neturi nei santykinis aplinkos drėgnumas, slėgis, užterštumas, radijo aktyvus spinduliavimas, tiriamojo objekto paviršiaus užterštumas nelaidžiomis medžiagomis.

Keitiklio konstrukcijos paprastumas, tai dar vienas šio metodo pranašumas. Daugeliu atveju ritės talpinamos į apsauginį korpusą ir užpildomos įvairiomis medžiagomis, tai daro jas atspariomis atmosferos įtakai ir mechaniniams pažeidimams; tokie keitikliai gali sėkmingai veikti agresyviose aplinkose, plačiame temperatūrų ir slėgių intervale.

Būtų daug paprasčiau, jeigu aptinkami defektai būtų vieninteliai veiksniai turintys įtakos sūkurinėms srovėms. Tačiau yra keletas veiksnių, kurie veikia testavimo metu, iš kurių yra keletas naudingų, ir keletas žalingų. Veiksniai darantys įtaką sūkurinėms srovėms yra:

- 1) Elektros laidumas (σ);
- 2) Magnetinė skvarba (μ);
- 3) Tikrinimo dažnis (f);
- 4) Keitiklio atstumas nuo paviršiaus (pakilimo momentas);
- 5) Detalės geometrija;
- 6) Keitiklio padėtis;
- 7) Defektų tipai.

Sūkurinių srovių metodas suteikia galimybę sėkmingai spręsti užduotis susijusias su objekto matmenimis. Šiuo metodu galima ganėtinai tiksliai išmatuoti vielos, strypų, vamzdžių

skersmenį, metalo lakštų ir vamzdžių sienelių storį, taip pat galvavinių ir diaelektrinio padengimo sluoksnio storį. Išmatuotas storis gali svyruoti nuo mikronų iki dešimčių milimetrų. Minimalus kontroliuojamos zonos plotas gali būti apribotas iki 1 mm^2 , kas leidžia įvertinti dangos storį ant mažų, sudėtingos konstrukcijos objektų [4].

Nepaisant daugybės šio metodo taikymo teigiamų savybių, šis metodas taip pat turi ir keletą trūkumų: jautrumas labai priklauso nuo keitiklių dydžio, kuo mažesnis keitiklio matmuo tuo daugiau yra reikalaujama žmogaus fizinių resursų, taip pat sunku atlikti objektų kontrolę, kurie pagaminti iš magnetinių medžiagų. O vienas iš svarbiausių trūkumų tai, kad kiekvienam matavimui atlikti būtina turėti kontroliuojamo objekto medžiagos pavyzdžių su dirbtiniais defektais, tam, kad tinkamai sukalibruoti turimą prietaisą.

2.2 Sūkurinių srovių kontrolės jutikliai

2.2.1. Jutiklių veikimas

Neardomąją kontrolę, pasitelkiant sūkurinių srovių metodą, galima taikyti didelei įvairovei objektų paviršių ir dydžių. Vienas iš didesnių šio metodo privalumų, yra tas, jog keitikliai gali būti plačiai pritaikomi. Jutikliai yra klasifikuojami pagal jų konstrukciją (pereinamieji) ir veikimo principą (pridėtiniai).

Pridėtinius jutiklius sudaro viena arba keletas ričių, pridėtu galu prie objekto paviršiaus. Jos pagamintos su ferito šerdimis, didinančiomis jautrumą ir lokalizuojančiomis kontrolės zoną. Elektromagnetinė banga nuo lauką užduodančios sistemos plinta kontroliuojamo objekto kryptimi. Pridėtiniai jutikliai taikomi plokščių paviršių kontrolei arba sudėtingos formos detalėms, o taip pat tais atvejais, kai reikia užtikrinti kontrolės vietą ir stiprų jautrumą.

Pereinamieji jutikliai būna išoriniai ir vidiniai (2.3 pav.). Elektromagnetinė banga šiuo atveju nuo lauką užduodančios sistemos plinta išilgai kontroliuojamo objekto paviršiaus. Pereinamieji jutikliai naudojami tiesiškai ištęstiems gaminiams ir apima kontroliuojamą objektą, judantį ritės viduje arba patys juda objekto viduje, pavyzdžiui vamzdelio. Pereinamieji jutikliai mažiau jautrūs kontroliuojamo objekto savybių pasikeitimams.

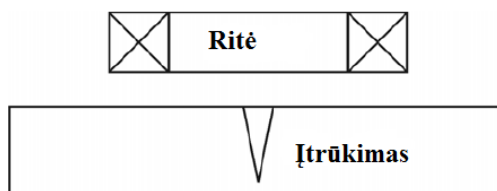


2.3 pav. Išoriniai ir vidiniai sūkurinių srovių jutikliai

Priklausomai nuo keitiklio apvijų sujungimo tipo išskiriami 4 jutiklių tipai: absoliutiniai, diferencialiniai, atspindžio ir hibridiniai.

1) Absoliutiniai jutikliai.

Absoliutiniai jutikliai (2.4 pav.) paprastai turi vieną apviją, kuri naudojama generuoti elektrines sroves. Kintamoji srovė praeina pro apviją, sukurdama magnetinį lauką aplink apviją. Matuojant absoliutinio keitiklio apvijos varžos pokytį, galima gauti daug informacijos apie testuojamą objektą.



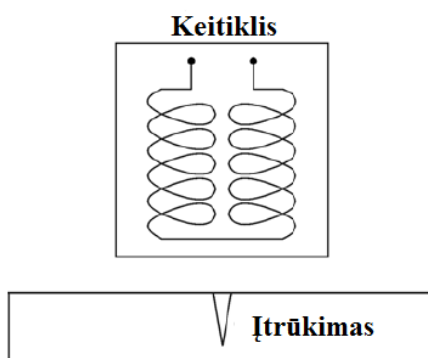
2.4 pav. Absoliutinio jutiklio principinė schema

Absoliutiniai jutikliai gali būti naudojami įtrūkimų aptikimui, elektros laidumo matavimams, medžiagos storio matavimams. Jie dažnai naudojami dėl universalumo. Kadangi absoliutiniai keitikliai yra jautrūs elektros laidumui, temperatūrai, įvairių priemonių turi būti imtasi, tam kad sumažinti greitus pasikeitimus inspekcijos metu.

2) Diferencialiniai jutikliai.

Diferencialiniai keitikliai turi dvi aktyvias rites, kurios dažniausiai apvyniotos priešingai (2.5 pav.) [16]. Kai keitiklis yra virš objekto, kuris yra be įtrūkimų, nėra jokio diferencialinio signalo tarp dviejų ričių. Tačiau kai viena ritė yra virš objekto su įtrūkimu, o kita – be įtrūkimo, gaunamas diferencialinis signalas. Šie jutikliai yra labai jautrūs defektams, tai yra didelis

privalumas, priedo prie to, jie yra santykinai nejautrūs lėtai keičiančiomis savybėmis, tokiomis kaip laipsniškas matmenų kitimas ar temperatūrų šuoliai.

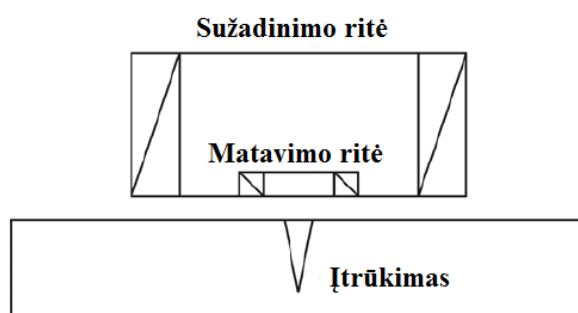


2.5 pav. Diferencialinio jutiklio principinė schema

Taip pat reikia paminėti šio tipo jutiklių ir trūkumus. Tikriausiai labiausiai pastebimas trūkumas, jog gaunamus signalus sunku suprasti. Pavyzdžiui, jeigu įtrūkimas yra didesnis negu tarpelis tarp abiejų ričių, tik priekinė ir galinė įtrūkimo briauna bus pastebima dėl signalo atšaukimo, nes abi ritės supras įtrūkimą lygiai taip pat.

3) Atspindžio jutikliai.

Atspindžio jutikliai (2.6 pav.) turi dvi rites panašiai kaip ir diferencialiniai jutikliai, bet viena ritė yra naudojama sukurinių srovių sužadinimui, o kita naudojama pokyčių pajautimui testuojamoje medžiagoje [17].



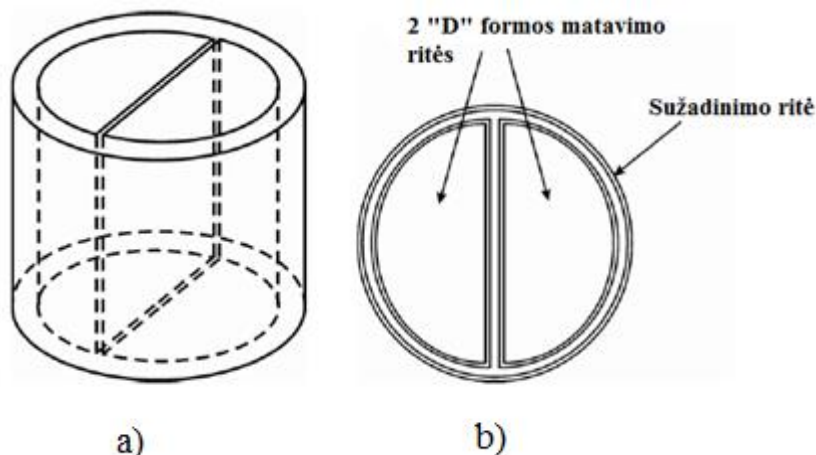
2.6 pav. Atspindžio jutiklio principinė schema

Pagrindinis šių jutiklių privalumas tame, jog sužadinimo ir matavimo ritės gali būti tobulinamos atskirai. Sužadinimo ritė gali būti gaminama, kad sukurtų stiprų ir vienalytišką magnetinį lauką, o matavimo ritė gali būti gaminama maža, tam kad galėtų pajusti mažiausius įtrūkimus ar medžiagos nevienalytiškumus.

4) Hibridiniai jutikliai.

Hibridiniai jutikliai yra dvejų atsikrų „D“ formos (2.7 pav.). Jutiklis turi sužadinimo rites, kurios yra apvyniotos apie 2 „D“ formos matavimo rites. Jutiklis veikia atspindžio veikimo

principu, bet papildomai, matavimo ritės veikia ir diferencialiniu veikimo principu. Šio tipo jutikliai yra labai jautrūs medžiagos nevienalytiškumams. Hibridinio jutiklio pavyzdys yra Hall'o (angl. Edwin Hall) efekto sensorius, kuris naudojamas užfiksuoti magnetinio lauko nutekėjimą nuo inspektuojamo paviršiaus. Hibridiniai jutikliai yra dažniausiai specialiai projektuojami konkrečioms neardomos kontrolės atvejams.



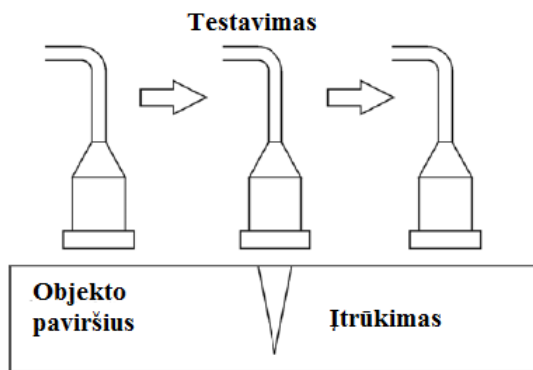
2.7 pav. Hibridinis jutiklis: a – jutiklis sudarytas iš sužadinimo ritės ir 2 „D“ formos matavimo ričių; b – jutiklio pjūvis

2.2.2. Jutiklių forma

Kaip jau buvo minėta anksčiau, sukūrinių srovių jutikliai gali būti klasifikuojami ir pagal formą. Jutiklių forma paprastai priklauso nuo inspektuojamos vietos. Keletas iš dažniausiai naudojamų jutiklių yra: paviršiniai jutikliai, varžto skylių jutikliai, vidinio diametro jutikliai ir išorinio diametro jutikliai.

1) Paviršiniai jutikliai.

Paviršiniai jutikliai (2.8 pav.) yra paprastai suprojektuoti tam, kad būtų patogūs rankiniam naudojimui ir lengvai prieinamose paviršių vietose. Paviršiniai jutikliai paprastai susideda iš labai plonos apvijos, įtvirtintos apsauginiame sluoksnyje. Ritės dydis ir tvirtinimo forma priklauso nuo to kur bus naudojamas jutiklis. Dauguma ričių yra apvyniotos apie ašį statmeną į tiriamąjį paviršių. Ši jutiklio forma yra tinkama aptikti paviršiaus nevienalytiškumus, kurie yra orientuoti statmenai į testuojamą paviršių. Nevienalytiškumai, tokie kaip atsisluoksniavimai, kurie yra lygiagrečioje plokštumoje testuojamo paviršiaus atžvilgiu, gali būti nepastebimi su tokia jutiklių konstrukcija.



2.8 pav. Paviršinis jutiklis

Plačių paviršių ritės yra naudojamos kai yra inspektuojamos dideli plotai, kuriuose yra santykinai dideli defektai.

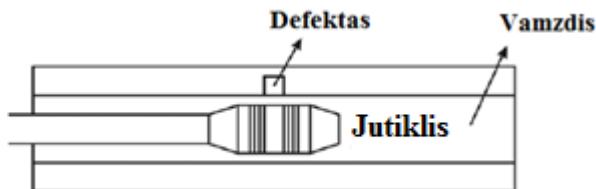
Pieštuko formos jutikliai yra siauro ričių paviršiaus formos, kurios yra įtvirtintos į ploną korpusą, kuris leidžia atlikti kontrolę apribotose, sunkiai prieinamose vietose. Tokios formos jutikliai yra jautrūs rankų staigiems judesiams dėl jų plonos formos konstrukcijos.

2) Varžtų skylių jutikliai.

Varžtų skylių jutikliai yra specialaus paviršinio tipo keitikliai, kurie yra suprojektuoti, tam kad būtų naudojami kartu su varžtų skylių inspektavimo įrenginiu. Jutiklis turi paviršinę ritę, kuri yra sumontuota į tvirtinimo korpuso vidų, ir tas korpusas sutampa su tikrinamo varžto skylė. Jutiklis yra įstatomas į varžtos skylės vidų ir įrenginys suka jutiklį skylės viduje.

3) Vidinio diametro jutikliai.

Vidinio diametro jutikliai, arba kitaip vadinami Bobbin'o jutikliai, yra įstatomi į ertmes, pavyzdžiui vamzdžių vidus, inspektuoti juos iš vidaus (2.9 pav.). Jutikliai turi tvirtinimą, kuri užfiksuoja ir palaiko jį tiesų tiriamame objekte, ir ritė yra visada santykinai vienodai testuojamo paviršiaus atžvilgiu.

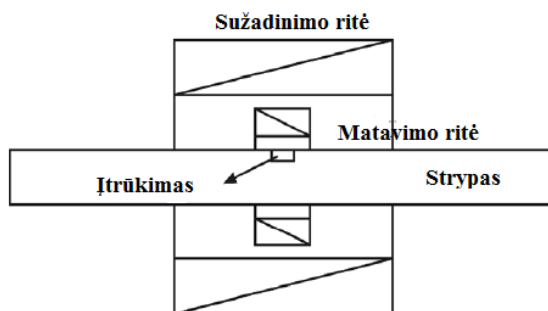


2.9 pav. Vidinio diametro jutiklis

4) Išorinio diametro arba gaubiantieji jutikliai.

Išorinio diametro jutikliai (2.10 pav.) yra dažnai vadinami gaubiančiais jutikliais. Jie yra tokie pat kaip ir vidinio diametro jutikliai tik skiriasi viena savybe - jų pagalba galima

inspektuoti objektą iš išorės. Jie naudojami inspektuoti kietuosius objektus tokius kaip įvairūs strypai [6].



2.10 pav. Išorinio diametro jutiklis

2.3 Universalus sūkurinių srovių prietaiso „Phasec 2D“ pritaikymas aviacijoje

Neardomoji kontrolė aviacijoje yra svarbus veiksnys užtikrinantis skrydžių saugą. Aviacinės technikos eksploatacijos ir techninės priežiūros metu yra plačiai naudojami sūkurinių srovių prietaisai. Anksčiau naudoti indikatoriniai kontrolės prietaisai veikė aukštais darbiniais dažniais ir negalėjo išspręsti didelės apimties orlaivių ir sraigtasparnių neardomosios kontrolės problemų aviacijoje.

Neardomosios kontrolės sūkurinių srovių prietaisas „Phasec 2D“ (2.11 pav.) veikia plačiame darbo dažnių diapazone ir leidžia naudoti įvairių tipų sūkurines sroves, o tai praplečia neardomosios kontrolės galimybes aviacinių detalių eksploatacijoje. Universalų sūkurinių srovių prietaisų privalumas eksploatacijos sąlygomis yra žemų darbinių dažnių galimybė, o tai padeda išaiškinti aviacinės technikos jėginių mazgų, daugiasluoksnių neišardomų vidinių elementų defektus. Didelės galimybės, dėl tyrimų rezultatų supratimo, leidžia defekto signalą pateikti monitoriaus ekrane. Be to, prietaisas „Phasec 2D“ leidžia tyrimą vykdyti vienu metu dviem dažniais ir užtikrina prietaiso suderinimo ir tyrimo rezultatų atminties režimą [2].



2.11 pav. Sūkurinių srovių prietaisas „Phasec 2D“

Sūkurinių srovių prietaiso „Phasec 2D“ pagrindiniai techniniai duomenys:

- Darbinis dažnių diapazonas nuo 10 Hz iki 10 MHz;
- Signalų stiprumo reguliavimas nuo 0 iki 88 dB;
- Galimybė keisti elektros laidumą;
- Tiriamojo objekto dangos storis iki 1,25 mm.

Ypatingą reikšmę dinaminis inspektavimo režimas įgauna, atliekant jėginių lėktuvų elementų, tokių kaip: sparno tvirtinimo prie liemens kronšteinų, lėktuvų ratų stebulių ir kitų elementų neardomąją kontrolę. Didelio skaičiaus ertmių tyrimas, naudojant statinius sūkurinių srovių prietaisus šiuo atveju būna neefektyvus ir negarantuoja įtrūkimų aptikimo reikiamo patikimumo. Sudėtingiausia yra aptikti įtrūkimus, susidarančius dviejų konstrukcijos elementų sudūrime – šioje zonoje jie atsiranda dažniausiai. Išspręsti tyrimo efektyvumo didinimo klausimą, tuo pat metu didinant tyrimo jautrumą ir patikimumą, galima naudojant sūkurinių srovių keitiklį su besisukančiu diferencialinio tipo sūkurinių srovių keitikliu ir viršutinių, apatinių dažnių filtrų sistemomis.

2.4. Sūkurinių srovių „Wheelscan 5“ sistema

1989 m. Hocking NDT britų kompanija pradėjo vystyti naują „WheelScan 700“ ratų patikros sistemą, visų pirma karališkoms oro pajėgoms (angl. RAF). Toks projektas buvo kuriamas, tam kad eliminuoti visus rankinio sūkurinių srovių prietaisų naudojimo trūkumus. Todėl didžiausias tikslas buvo sukurti mašiną, kuria galėtų naudotis dideli orlaivių aptarnavimo operatoriai [13]. General Electric naudoja „WheelScan 5“ technologiją (2.12 pav.). Tai yra greitas

ir patikimas inspektavimo metodas. Automatizuota sūkurinių srovių sistema leidžia aptikti įvairių dydžių defektus. WheelScan 5 leidžia operatoriui atlikti patikrą žymiai greičiau negu su paprastais nešiojamais sūkurinių srovių prietaisais. Vienas iš didžiausių šios sistemos privalumų, jog operatorius gali būti apmokytas naudotis šia sistema greičiau, nesiekiant įgyti specialių kvalifikacijos lygių.



2.12 pav. Automatizuota „WheelScan 5“ sūkurinių srovių sistema

„WheelScan 5“ techniniai duomenys:

- Absoliučių keitiklių sistema. Keitikliai yra standartinių 6 ir 9,5 mm skersmens dydžio su galimais 100, 200 (standartas), 500 kHz ir 1,5MHz dažnių pasirinkimais.
- Inspektavimo aukštis iki 415 mm. Maksimalus svoris – 100 kg.
- Ekranas – spalvotas LCD.
- Inspektavimo greitis – 2 m/s.
- Inspektavimo kryptis – nuo apačios į viršų arba atvirkščiai.
- Įrangos svoris – 250 kg.

„WheelScan 5“ suteikia daugumą informacijos įrašymo būdų. Pats didžiausias šios sistemos tikslas – suteikti patyrusiam operatoriui lankstumo atliekant svarbius, precizinius

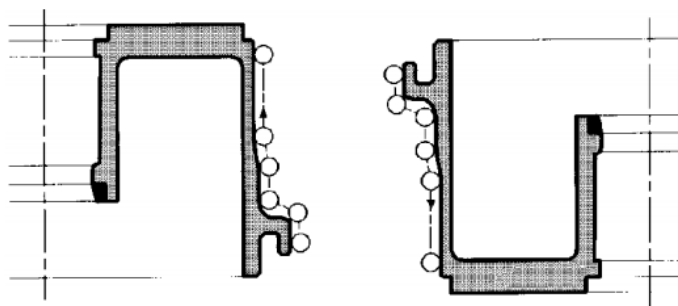
matavimus. Kai kartą inspekcija būna atlikta, sistema turi galimybę išsaugoti visą operaciją ir kartoti ją ateityje.

Stalas su bėgeliais (2.13 pav.) padeda patogiai išstatyti rato stebulę norima pozicija. Jeigu rato stebulės defektai yra aiškiai suprantami, „WheelScan 5“ suteikia galimybę atlikti elektros laidumo matavimus tam kad padėtų operatoriui įvertinti temperatūros faktorių.



2.13 pav. Wheelscan stalas su bėgeliais

Sudėtingiausia „Wheelscan“ naujovė yra automatinio judėjimo (angl. autotrack) jutiklio sistema. Svarbiausia jutiklio judėjimo metu (2.14 pav.), jog jutiklis laisvai patektų į visas norimas ratlankio vietas.



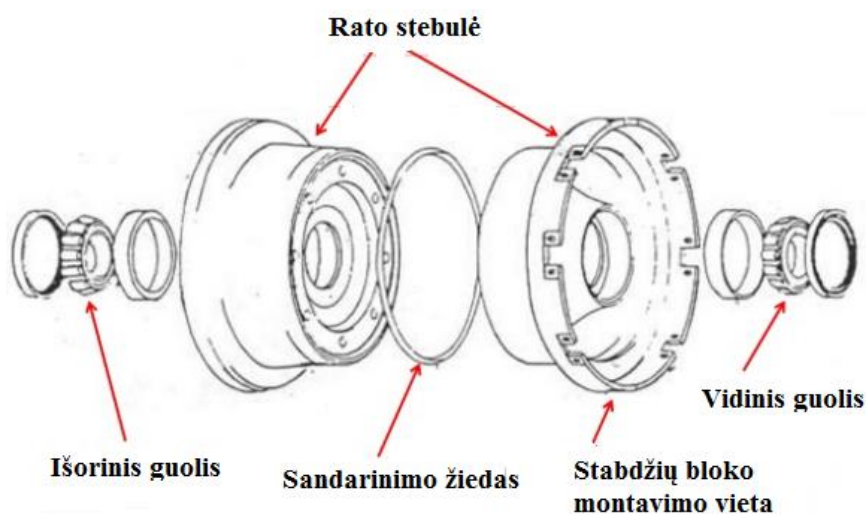
2.14 pav. Jutiklio judėjimo kelias

Toks laisvas ir tikslus judėjimas yra paremtas jutiklio į ratlankį slėgio principu. Pradžioje, jutiklis juda link rato stebulės centro kol keitiklis „pajaučia“, jog atsirėmęs į korpusą, vadinasi atsiranda slėgis į keitiklio galvutę. Tada keitiklis juda į viršų darydamas spiralės formos judesius. Jutiklis automatiškai seka rato stebulės kontūrus ir nereikalauja jokio papildomo programavimo [10].

2.5. Orlaivių ratų stebulės

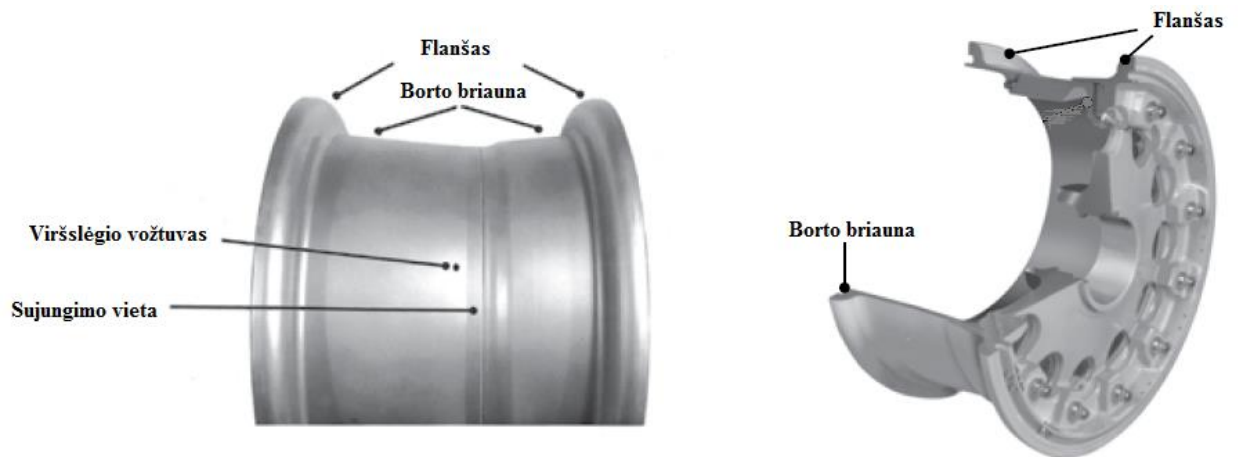
Orlaivių ratai yra bene svarbiausi važiuoklės sistemos komponentai. Su sumontuotomis padangomis, jie atlaiko visą orlaivio svorį visais skrydžio režimais, t.y. kai orlaivis rieda, kyla ir leidžiasi. Dėl pasikartojančių apkrovų, įvairūs pažeidimai gali augti įtrūkimuose. Dažniausiai tai pasibaigia padangos išsileidimu. Žymiai pavojingesnėse situacijose ratas gali suirti tūpimo metu. Ratų gedimai kai orlaivis yra ant žemės, paprastai būna daug kainuojantys ir apsunkinantys visus tolimesnius techninės priežiūros darbus. O kai orlaivis yra skrydyje, rato gedimas gali iššaukti katastrofą. Vienas tipinis pavyzdys buvo 1980 m. gruodžio 22d., kai lėktuvo L1011 padanga sprogo dideliame aukštyje. Rato stebulės dalys kiaurai perėjo per keleivių kabinos grindis ir dėl dehermetizavimo įvyko katastrofa.

Tipinis orlaivio ratas turi būti lengvo svorio, stiprus ir pagamintas iš aliuminio lydinio. Be to, egzistuoja ir keletas rūšių magnio lydinių. Senesnių orlaivių ratų stebulės yra sudarytos iš vienalytės konstrukcijos, lygiai kaip ir šių laikų automobilių ratlankiai. Šiuolaikinės ratų stebulės yra iš dviejų atskirų dalių konstrukcijos (2.15 pav.).



2.15 pav. Šiuolaikinė orlaivių rato stebulės konstrukcija

Abi stebulės pusės yra sujungtos varžtais, sujungimo vietoje yra griovelis į kurį įsistato sandarinimo žiedas, kuris apsaugo ratlankį nuo oro pratekėjimo, kadangi šiuolaikiniai lėktuvai naudoja bekameras padangas. Borto briauna (angl. bead seat) yra ta vieta kur rato stebulė faktiškai liečiasi su padanga (2.16 pav).

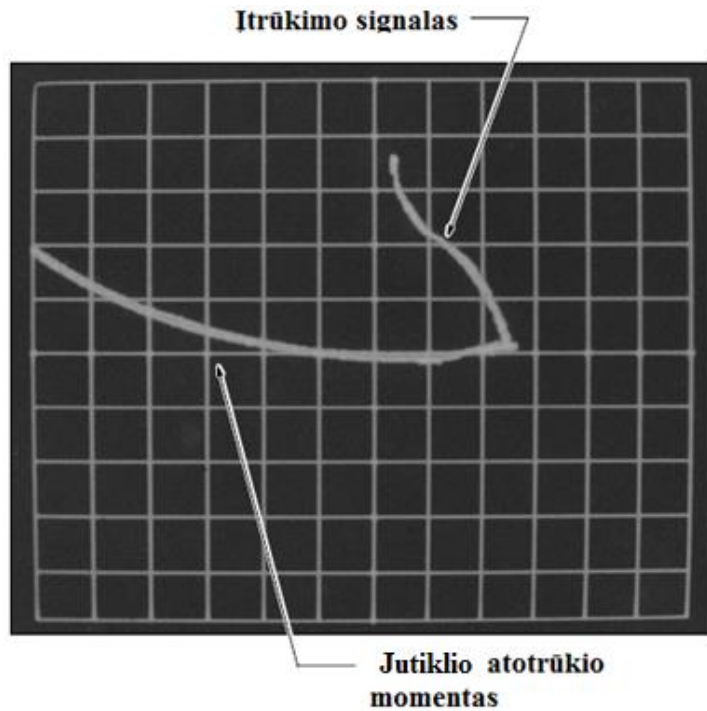


2.16 pav. Rato stebulės borto briauna [5]

Tai yra kritinė vieta, kuri priima apkrovas orlaivio nusileidimo metu. Šiuolaikiškos padangos yra kietesnės ir standesnės dėl keliamų reikalavimų guoliams, todėl ir šiuolaikinės ratų stebulės yra gaminamos iš dviejų dalių.

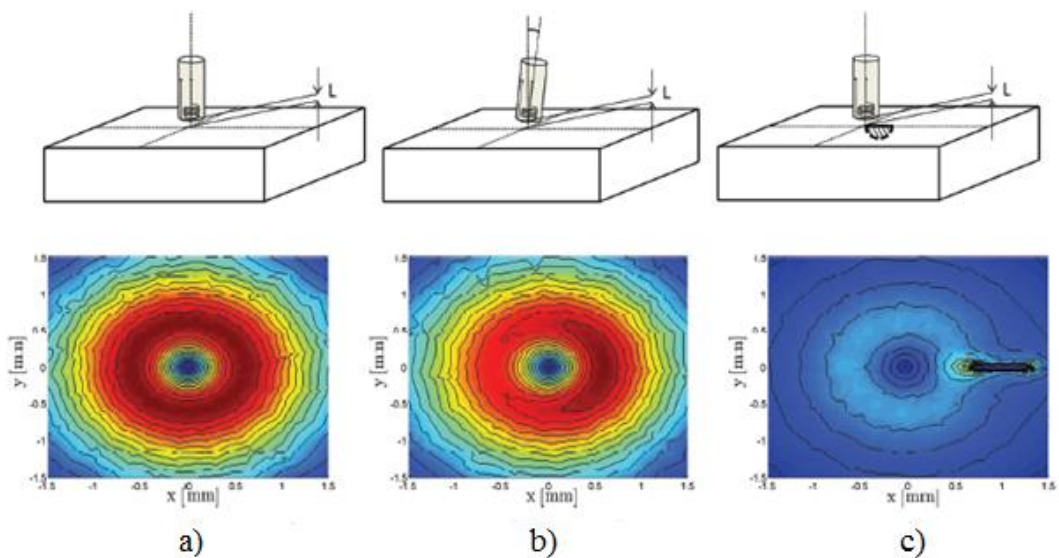
2.6. Jutiklio atotrūkio momentas

Jutiklio atotrūkio momentas (angl. lift-off) – tai staigus magnetinio lauko varžos pokytis, kuris atsiranda kintant atstumui tarp jutiklio ir bandinio paviršiaus. Tokį efektą gali sukelti kintanti paviršiaus danga, neįprasti paviršiai arba naudotojo rankos judesiai. Magnetinis laukas yra stipresnis arčiau ritės, todėl atotrūkio momentas yra stipresnes arčiau jutiklio. Daugelyje pritaikymo atvejų, atotrūkio momentas, matavimus sukurdami srovėmis veikia neigiamai. Jis yra laikomas triukšmo šaltiniu ir yra nepageidaujamas defektų aptikime. Atotrūkio momentas gali prasidėti ta pačia kryptimi kaip ir įtrūkimas, tuo pačiu užmaskuojant įtrūkimo signalą (2.17 pav.). Žemiau esančiame paveikslėlyje yra pateiktas įtrūkimo ir kampinio efekto signalo iliustruotas pavyzdys.



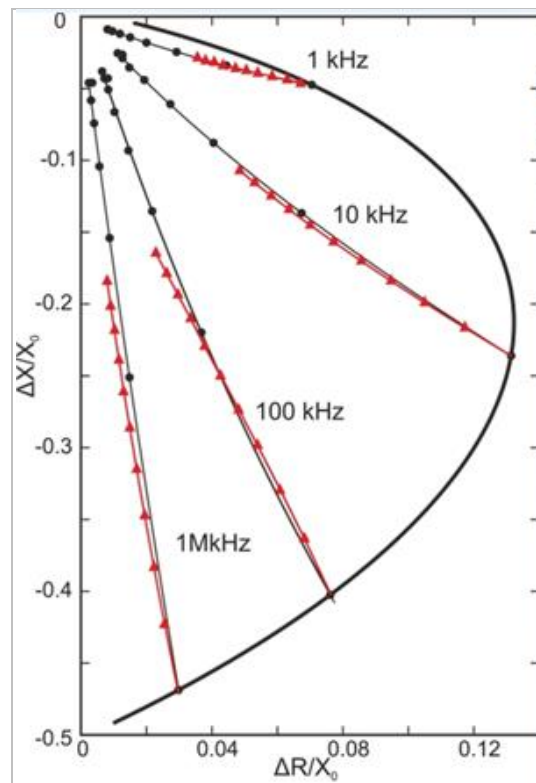
2.17 pav. Jutiklio atotrūkio momento ir įtrūkimo signalas

Kai sąlygos patikrai yra idealios, sūkurinių srovių jutiklis turi būti laikomas pastoviu 90° kampu į testuojamą paviršių, išlaikant pastovų atstumą ir slėgį. Tai yra svarbu, nes jutiklio padėtis veikia tikrinamos detalės sūkurinių srovių pasiskirstymą. Jutiklio kampo padėties efektas (2.18 pav.) gali būti sumažintas naudojant specialius spyruoklinius jutiklius, kurie palaiko jutiklį pastoviu kampu ir slėgiu į paviršių. Jie dažniausiai naudojami plokštiems paviršiams tikrinti arba medžiagos elektros laidumui, ar dažų storiui matuoti [18].



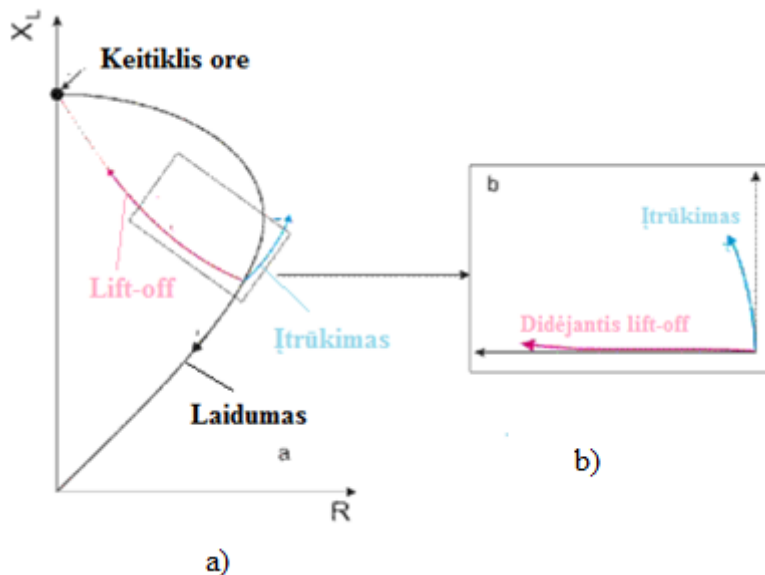
2.18 pav. Indukuoto paviršiaus srovės tankis nuo absoliutinio jutiklio: a – jutiklis statmenas; b – jutiklis su 10° pokrypiu; c – jutiklis virš įtrūkimo

Kompleksinės varžos grafike (2.19 pav.) atotrūkio momentas prasideda oro taške (0;0), kur nėra jokio inspektuojamo objekto. Grafike braižomos atotrūkio momento linijos kas 0,1 mm. Varžos dydžiai išreikšti ir pavaizduoti trikampaiais. Kai kuriais atvejais, kada atliekami nelaidžių medžiagų padengimų ant metalų storio matavimai, toks efektas veikia kaip pagalbinis įrankis. Grafike vaizduojama, kad kai inspektuojamas objektas yra gretimai jutiklio, trikampių atskirtis yra didesnė, negu kai testuojamas objektas yra toliau. Tai reiškia, kad norint išmatuoti elektrai nelaidžius metalų padengimus, raiška (rezoliucija) būna didesnė, kai tie padengimai būna plonesni.



2.19 pav. Kompleksinės varžos (impedanso) grafikas

Bandinio charakteristikos (elektrinis laidumas, magnetinė skvarba, storis ir kt.) ir jutiklio parametrai (apvijų išdėstymas ir geometrija) sunkina galutinio signalo supratimą. Apačioje yra pavaizduota varžos kitimo grafikas kur galima įžvelgti skirtumus tarp medžiagos nevienalytiškumo.



2.20 pav. Varžos kitimas: a – laidumo kitimas; b – atotrūkio momento signalas

Šiame grafike, medžiagos elektros laidumo kitimas ir parodytas 2.20 paveiksle a. Signalų kryptis iš laidumo kreivės atskleidžia galimą nevienalytiškumą. Kaip bebūtų, tokį grafiką nėra lengva suprasti ir interpretuoti. Apribojant signalo kitimą dėl atotrūkio momento, reikia išskirti tokio efekto įtrūkimo signalą, perkelti juos į atskirą grafiką (2.17 pav. b), kur atotrūkio momento signalas yra lygiagretus vienai iš ašių [9].

2.7. Tikrinimo dažnis

Keičiant srovės, tekančios rite, dažnį, keisis sūkurinių srovių skvarba. Sūkurinių srovių tankis (stiprumas) (2.21 pav.) mažėja gilyn į medžiagą. Kai jų stiprumas pasiekia 37% nuo paviršiaus stiprumo, tas gylis laikomas standartiniu skvarbos gyliu. Standartinis gylis reikalingas norint nustatyti gylį, kuriame signalo jautrumas išlieka pakankamai stiprus, kad būtų galima aptikti mažus defektus. Standartinis skvarbos gylis medžiagoje gali būti apskaičiuojamas pagal formulę:

$$D_p = \sqrt{\frac{\rho}{\mu \times f}} \quad (3)$$

Čia D_p – skvarbos gylis (mm), ρ – santykinė medžiagos varža, μ – magnetinė medžiagos skvarba, f – ritės srovės dažnis (Hz).

Santykinė varža randama nustatant medžiagos elektros laidumą:

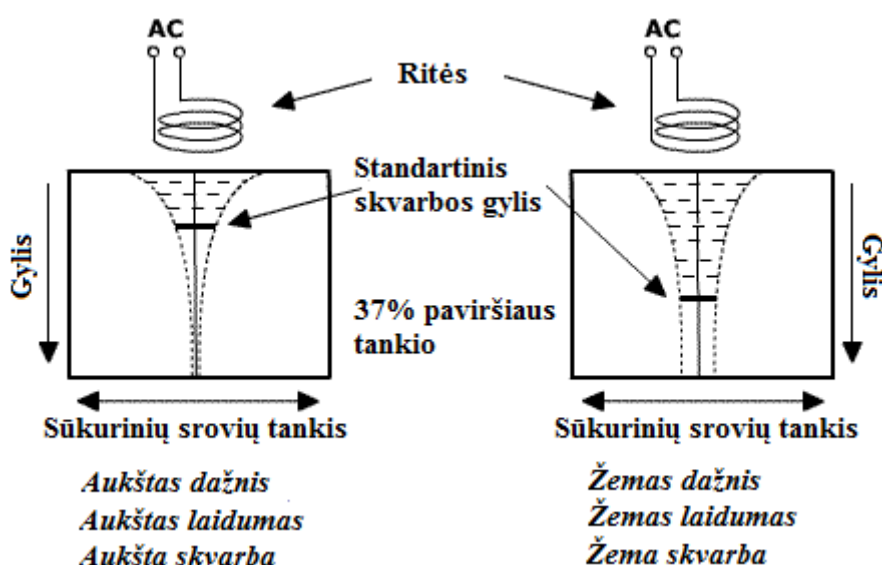
$$\rho = \frac{172,41}{\%IACS} \quad (4)$$

Tada skvarbos gylis bus lygus:

$$D_p = \sqrt{\frac{172,41}{\mu \times f \times \%IACS}} \quad (5)$$

Tikrinimo dažnis konkrečiam medžiagos storiui nustatomas iš standartinio skvarbos gylio (D_p) formulės:

$$f = \frac{4,36 \times 10^5}{D_p^2 \times \%IACS \times \mu} \quad (6)$$



2.21 pav. Sūkurinių srovių skvarbos gylis [14]

Padarius išvadas iš pateiktų formulių, pastebima, jog veiksniai, darantys įtaką sūkurinių srovių skvarbos gyliui, yra:

1. Medžiagos elektrinis laidumas (didesnis laidumas = mažesnis D_p);
2. Medžiagos magnetinė skvarba (didesnė magnetinė skvarba = mažesnis D_p);
3. Ritės srovės dažnis (didesnis dažnis = mažesnis D_p).

2.1 lentelė. Sūkurinių srovių skvarbos gylis į įvairias, kintant dažniams [4].

Medžiaga	Elektros laidumas, %IACS	Magnetinė skvarba	Skvarbos gylis (mm)			
			100Hz	1kHz	500kHz	1MHz
Varis	100	1	6,6033	2,0882	0,093	0,066
Magnis	37	1	10,865	3,433	0,153	0,108
Aliuminis	32	1	11,673	3,691	0,164	0,116
Plienas	10,7	175	1,526	0,482	0,016	0,015
Legiruotasis plienas	2,9	750	1,416	0,448	0,016	0,015
Nerūdyjantis plienas	2,5	1,02	41,352	13,077	0,585	0,413

3. RATO STEBULĖS TYRIMAS

3.1 Tyrimo objektas



3.1 pav. Transporto lėktuvas C-27J „Spartan“

3.1 lentelė. Orlaivis C-27J „Spartan“ techninė specifikacija.

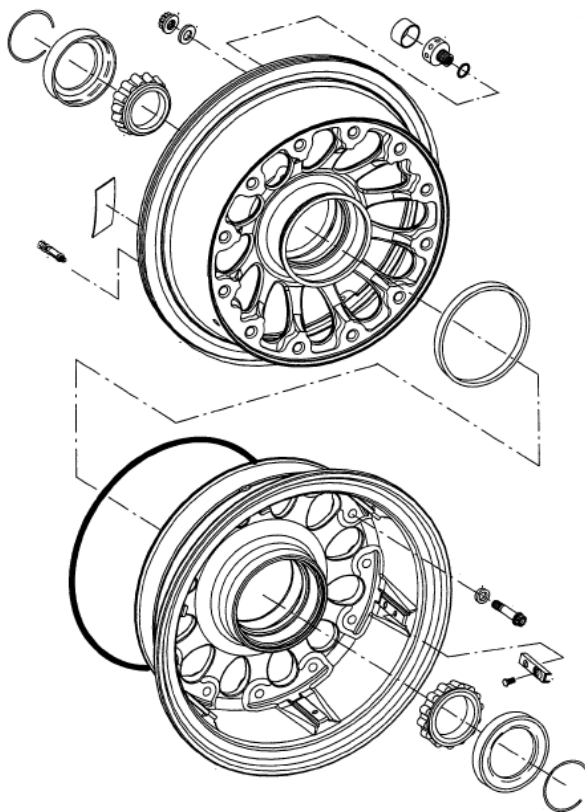
Pirminė funkcija	Taktinis ir krovinis transporto lėktuvas
Jėgainė	2 Rolls-Royce AE 2100-D2A turbopropeleriniai varikliai
Sparno mojis	28,7 m
Lėktuvo ilgis	22,7 m
Aukštis iki kylio viršaus	9,7 m
Svoris (tuščio)	17000 kg
Maksimali kilimo masė	31800 kg
Įgula	Pagrindinis pilotas, antrasis pilotas, technikas
Kuro talpa	12320 l
Greitis (su maksimaliu svoriu)	584 km/h

Lėktuvas C-27J „Spartan“ yra trijų taškų važiuoklės tipo, su 6 rato stebulėmis ir padangomis ant jų. Bendrai, 4 ratai pagrindinėje važiuoklėje ir 2 ratai priekinėje važiuoklėje.

Tyrimai buvo atliekami su skirtingomis ratų stebulėmis po 5 padangos keitimo ciklą arba 1500 skrydžio valandų. Po 5 padangos keitimo ciklą arba 1500 skrydžio valandų, rato stebulė (3.2 pav.) turi būti išsiųsta į kapitalinį remontą. Remonte atliekamos įvairios patikros, ir viena iš jų yra – inspektavimas sukūrinėmis srovėmis. Iš inspektuotų rato stebulių rasta viena su įtrūkimu, todėl tolimesniuose tyrimuose analizuosime būtent pavyzdį, kuriame yra įtrūkimas. Minėta rato stebulė turi savo pasą (angl. log card), kuriame atsispindi visa rato stebulės istorija.

3.2 lentelė. Rato stebulės techninė specifikacija.

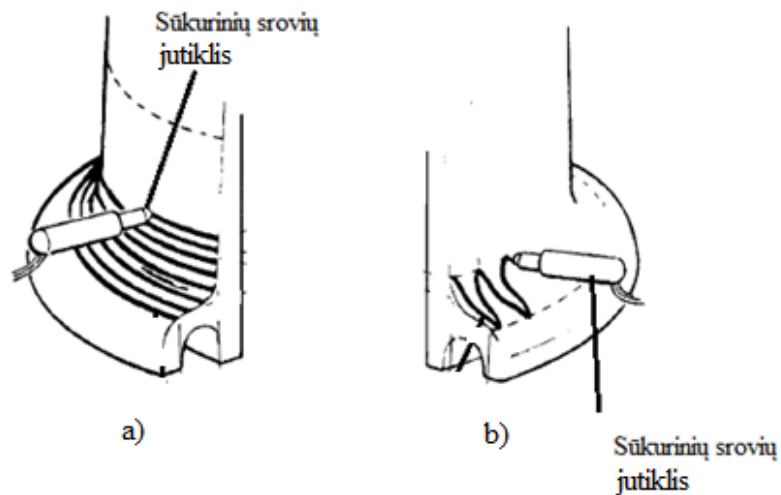
Rato stebulės numeris	5014039
Padangos gamintojas ir dydis	Goodyear Flight Leader, H39x13-18 bekaamerė
Padangos numeris	393F83-1
Skrydžio valandos	2820
Padangų keitimo ciklai	55
Rato stebulės medžiaga	Aliuminio lydinys
Svoris	24,105 kg
Skersmuo	477 mm



3.2 pav. C-27J „Spartan“ rato stebulė P/N 5014039

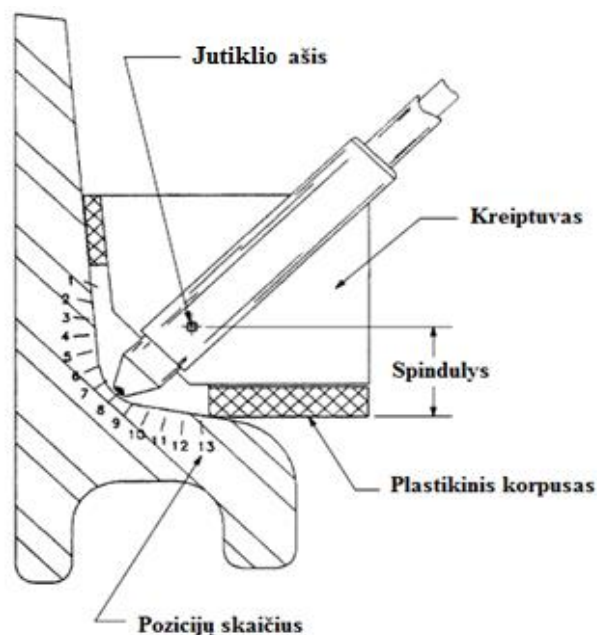
3.2 Tyrimas naudojant įprastinį sūkurinių srovių keitiklį

Tyrimo objektai buvo standartiniai pavyzdžiai - C27J „Spartan“ pagrindinės važiuoklės ratų stebulės. Lėktuvo C-27J „Spartan“ ratų tyrimas prasidėjo nuo patikros technologinio proceso sudarymo. Sudarant lėktuvo C-27J „Spartan“ ratų stebulių patikros technologiją buvo remiamasi Anglijos kompanijos „ABSC“ (Aircraft Braking Systems Corporation) ratų patikros rekomendacijomis [3]. Įvertinta tikrinimo zonos ir schemas (3.3 pav.).



3.3 pav. Lėktuvų C-27J „Spartan“ rato stebulės tikrinimo schemas [7]: a – inspektavimas apskritimu; b – inspektavimas „zigzagu“

3.4 pav. parodyta, rato stebulės svarbiausios vietos inspektavimo schema, naudojant įprastus pridedamuosius jutiklius.

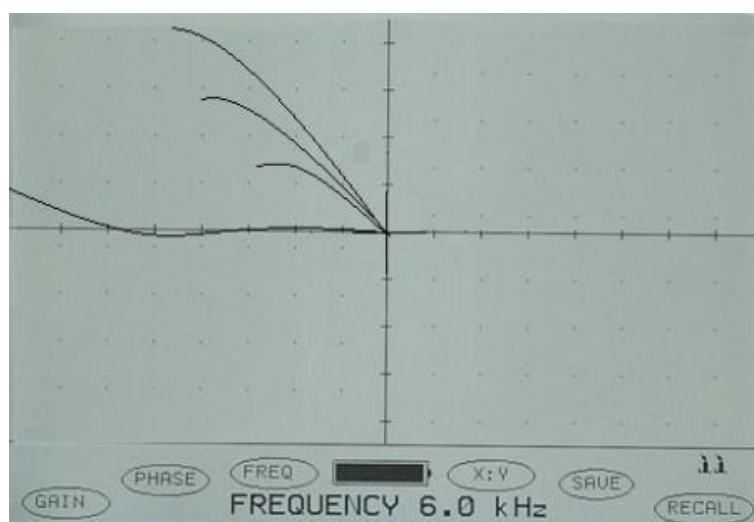


3.4 pav. Inpektavimas naudojant įprastus jutiklius

Pirmas žingsnis, norint inspektuoti objektą sūkurinių srovių metodu, yra prietaiso suregulavimas pagal standartinius kalibro blokus (3.5 pav.) su dirbtiniais defektais. Tokie blokai turi būti padaryti iš medžiagos, kurios specifikacijos (lydymo, terminio apdirbimo, laidumo) yra panašios į testuojamo objekto medžiagos specifikacijas [11]. Tyrimo metu buvo naudotas aliuminio lydinio standartinis blokas pav. su atitinkamais dirbtiniais 0,2 , 0,5 ir 1,0 mm įtrūkimais, pritaikant paviršinį jutiklį.



3.5 pav. Sūkurinių srovių kalibravimo blokas



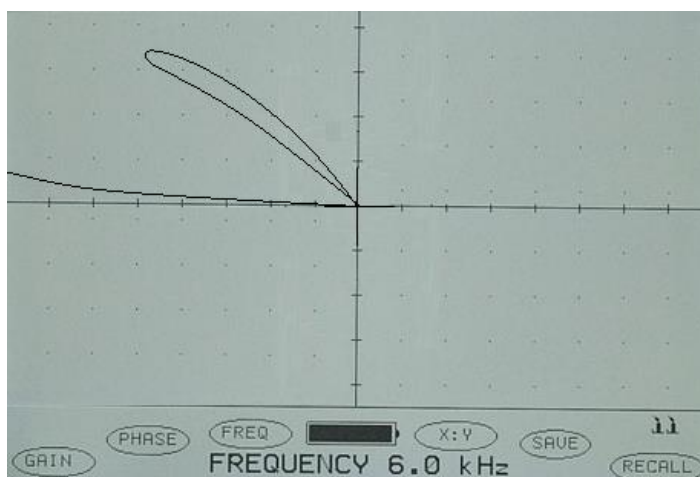
3.6 pav. Prietaiso kalibravimo grafikas

Iš gauto grafiko (3.6 pav.) prietaiso ekrane, nesunku suprasti, jog gautos kreivės yra atitinkami dirbtiniai įtrūkimai, o pradinė kreivė nepanaši į įtrūkimus yra pakilimo momento (angl.

lift-off) kreivė. Prietaisas atpažinęs įtrūkimus ir medžiagą, toliau gali būti naudojamas ieškant tikrų defektų (3.7 pav.) ant realaus bandinio.



3.7 pav. Rato stebulės išorinė ir vidinė pusės

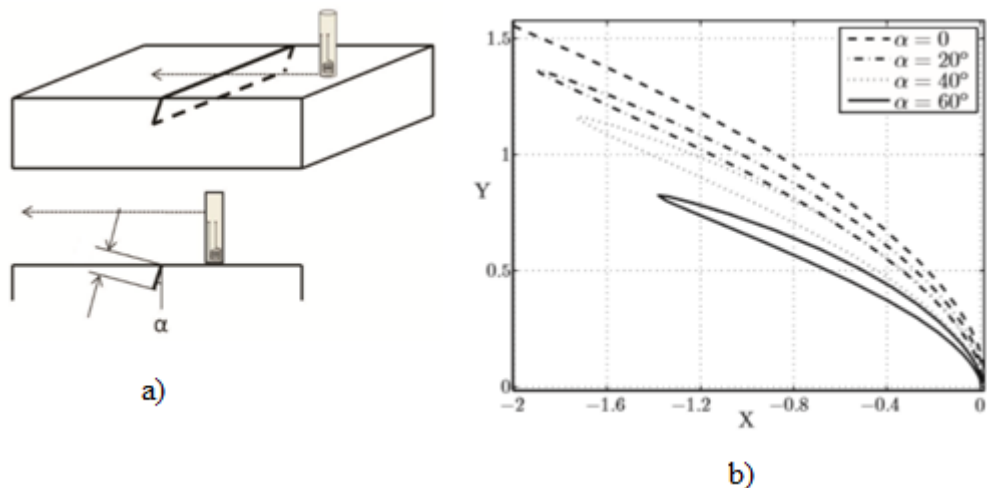


3.8 pav. C-27J „Spartan“ rato stebulės įtrūkimo signalas

Tyrimas buvo atliktas išlaikant tą patį dažnį - 6 kHz, kaip ir sukalibruojant prietaisą. 3.8 paveiksle pavaizduotas įtrūkimo signalas. Maksimali įtrūkimo reikšmė - kai keitiklio padėtis yra virš įtrūkimo centro. Tokios formos įtrūkimo signalas vaizduojamas grafike yra dėl realaus įtrūkimo ant stebulės prigimties. Gautas įtrūkimo signalas atitinka teorinį modelį, kuris pavaizduotas 3.9 paveiksle [18]. Didėjant įtrūkimo kampui grafikas plečiasi artėdamas prie X ašies (3.9 pav. b).

Nepaisant daugybės šio metodo taikymo teigiamų savybių, šis metodas taip pat turi keletą trūkumų. Toks patikros būdas labai varginantis ir ilgai trunkantis. Jautrumas priklauso nuo jutiklio dydžio, kuo mažesnis jutiklio matmuo tuo daugiau yra reikalaujama fizinių pastangų. Taip pat nėra visiškos garantijos, jog inspektuojamas plotas buvo 100% ištirtas. Išanalizavus plačias sūkurinių

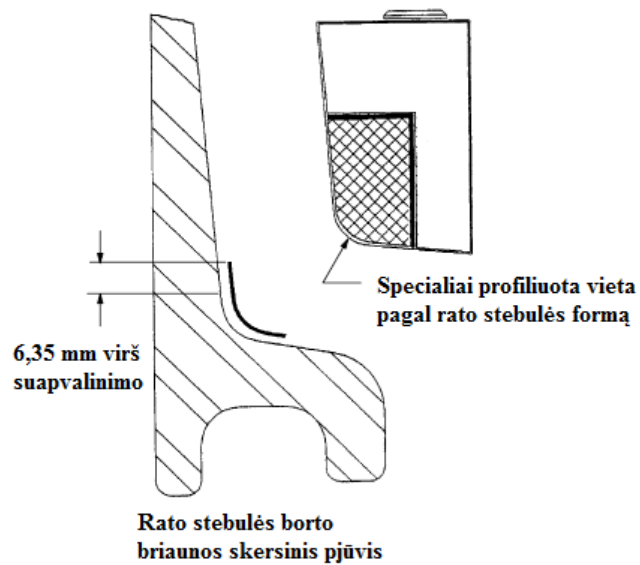
srovių metodo patikros galimybes, buvo suprojektuotas specialus profilinis jutiklis (3.10 pav.), kurio profilis atitinka lėktuvo C-27J „Spartan“ rato stebulės kontūrą.



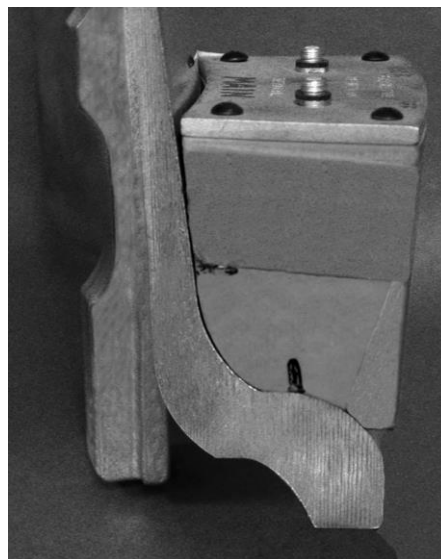
3.9 pav. Varžos priklausomybė nuo jutiklio padėties: a) įtrūkimo padėtis; b) įtrūkimo signalas

3.3 Tyrimas naudojant profiliuotą sūkurinių srovių jutiklį

Šis sūkurinių srovių jutiklis (3.11 pav.) suprojektuotas remiantis vien tik praktiniais bandymais. Pačio jutiklio gamybą galiu suskirstyti į 2 etapus: pačios formos gamyba ir ričių patalpinimas į formą. Formos gamybą taip pat galima suskirstyti į etapus: rato borto briaunos vaškavimas, gelkauto padengimas, sluoksniavimas su opoksidine derva, standumų briaunų dėjimas, formos nuėmimas nuo rato stebulės. Antrame etape į gautą formą patalpinamos dvi diferencialinės ritės, o vidus užpildomas silikonu.

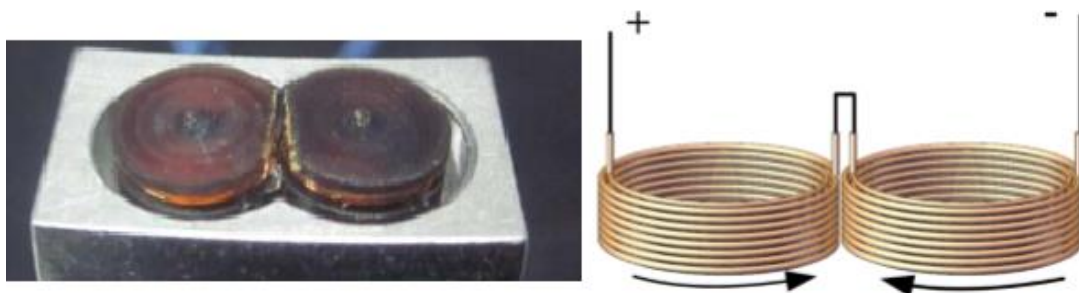


3.10 pav. Profilinio jutiklio, specialiai pritaikyto C-27J rato stebulei, schema

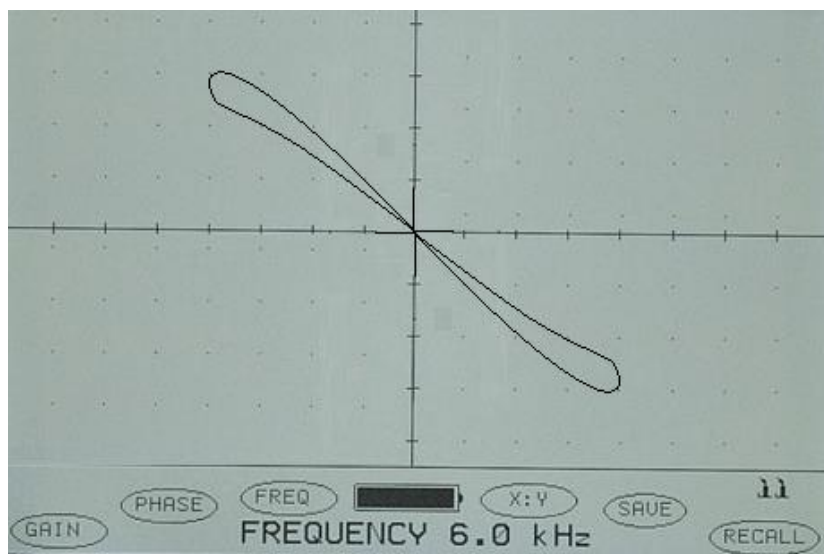


3.11 pav. C-27J „Spartan“ profilinis rato stebulės jutiklis

Dvi indukcinės ričių (3.12 pav.) poros nuosekliai sujungtos tarpusavyje. Toks jungimas garantuoja jutiklio stabilų veikimą. Ritės yra diferencialinės. Neveikiant vienai ar kitai ritei tyrimo rezultatai išlieka pakankamai tikslūs. Toks jutiklis glotniai prigludęs prie tiriamojo rato paviršiaus eliminuoja, taip vadinamą kampinį efektą ir atotrūkio momentą, kurie apsunkina inspektavimo tikslų duomenų gavimą. Toks jutiklis leidžia išlaikyti reikiamą prietaiso jautrumą.



3.12 pav. Nuosekliai sujungta diferencialinių ričių pora



3.13 pav. Lėktuvo C-27J „Spartan“ borto briaunos inspektavimas naudojant profilinį sūkurinių srovių jutiklį

Gautas įtrūkimo signalas (3.13 pav.), naudojant profilinį sūkurinių srovių jutiklį yra panašus į signalą gautą naudojant paviršinį jutiklį. Papildoma kreivė atsirado dėl antros veikiančios ritės. Taip pat nėra jutiklio atotrūkio momentų linijos.

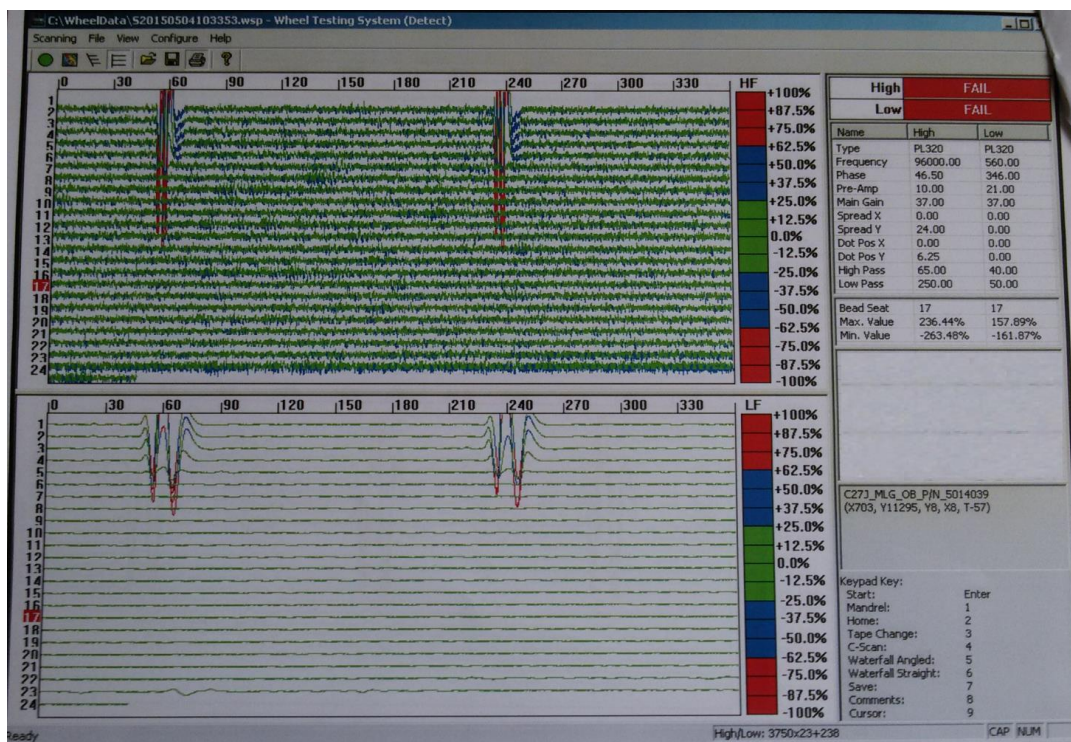
Pagrindiniai privalumai naudojant profiliuotą sūkurinių srovių jutiklį, jog visa borto briaunos vieta yra ištirta 100%, nepraleidžiant jokios vietos. Didžiausias privalumas, kad toks juiklis nevargina inspektuotojo, to pasekoje užkirsdamas kelią kampiniui efektui ir atotrūkio momentui. Didžiausias tokio profilinio jutiklio trūkumas yra toks pat kaip ir įprastinių jutiklių – kiekvienam matavimui atlikti būtina turėti inspektuojamo objekto medžiagos pavyzdžių su dirbtiniais defektais, tam, kad tinkamai sukalibruoti turimą prietaisą. Optimizuojant sūkurinių srovių prietaisus dėl minėto trūkumo, būtų gera ateities perspektyva gerinant tokių prietaisų panaudojimą.

Išanalizavus gautą signalą prietaiso ekrane, galime daryti išvadą, kad toks jutiklis yra tinkamas naudoti tiriant lėktuvo C-27J „Spartan“ ratų stebules. Pagal atliktus tyrimus reiktų sudaryti metodiką tinkančią spręsti įvairių tipų uždaviniams. Tokias metodikas sudaryti ir tvirtinti gali kvalifikuotas personalas, atestuotas pagal EN 4179/NAS 410 standartą ir turintis neardomosios kontrolės naudojimo 3 lygį [13].

3.4. Tyrimas naudojant sūkurinių srovių „Wheelscan 5“ sistemą

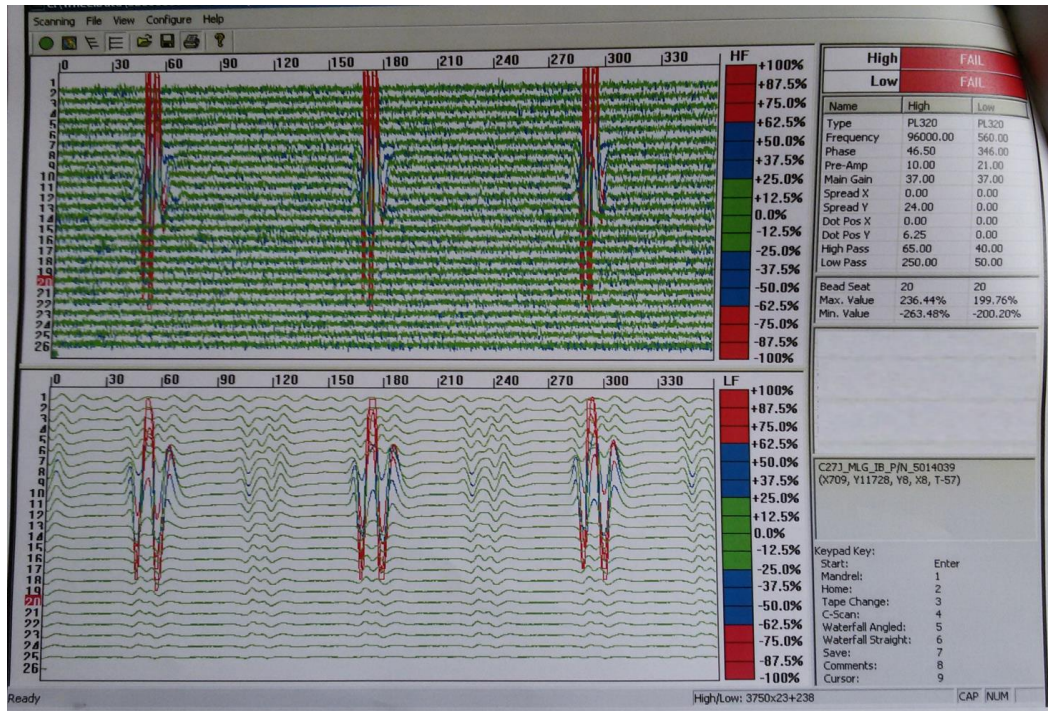
Tyrimai naudojant Wheelscan 5 sistemą buvo atlikti tikrinant pagrindinės važiuoklės ratų stebules.

3.14 pav. pavaizduoti išorinės rato stebulės tyrimo rezultatai gauti, naudojant WheelScan 5 sistemą. Viršuje ir apačioje yra, atitinkamai, aukšto ir žemo dažnio bangos. Ties 60° ir 240° esantys bangų nevientisumai žymi išorinės rato pusės oro pripūtimo – išleidimo vožtuvą ir viršslėgio vožtuvą. Raudona spalva paryškintas numeris 17 yra rato stebulės borto briauna į kurią yra labiausiai atkreipiamas dėmesys.



3.14 pav. WheelScan 5 sistemos išorinės rato stebulės pusės ataskaita

Vidinės rato stebulės pusės ataskaitoje (3.15 pav.) yra 3 bangų nevientisumai. Tai yra 3 vožtuvai, kurie stabdžių diskams perkaitus suveikia ir išleidžia orą iš padangos, tam kad išvengti padangos sproginimo.



3.15 pav. WheelScan 5 sistemos vidinės rato stebulės pusės ataskaita

4. SŪKURINIŲ SROVIŲ METODO PRITAIKYMO GERINIMAS

Pateikti tyrimai parodė, jog sūkurinių srovių metodo pritaikymas inspektuojant rato stebules yra vienas iš kertinių dalykų užtikrinant skrydžių saugą. Tačiau didžiausi iššūkiai, su kuriais buvo susidurta tyrimų metu, automatiškai kelia norą gerinti šį neardomą kontrolės metodą.

Sūkurinių srovių prietaisas „Phasec 2D“ yra patikimas, tačiau dydžiu, greičiu nusileidžia šiuolaikiniams prietaisams. Be to, programinė įranga yra pasenus, nėra atmintyje mažiau populiarių medžiagų lydinių. Įsigilinus į šią problemą, iš jos iškyla dar viena, kuri būdinga visiems prietaisams – aptikto defekto gylio įvertinimą būtina atlikti sulyginus su etalonu. Tai yra labai nepatogu, nes naudotojas turi su savimi turėti platų kalibrų pasirinkimą. Sudarant algoritmus, kurie automatiškai parinktų ir koreguotų kontrolės metu besikeičiančius parametrus, galbūt būtų didžiausias iššūkis tobulinant sūkurinių srovių metodo pritaikymą inspektuojant objektus.

Suprojektuotas profilinis jutiklis yra nešiojamas ir patogus naudoti įvairiomis aplinkos sąlygomis. Tačiau toks keitiklis gali būti naudojamas tik vienam ratų stebulių tipui. Viena iš ateities tobulinimo krypčių būtų lankstaus jutiklio kūrimas. Toks jutiklis galėtų glotniai priglusti prie objekto profilio ir galėtų būti naudojamas tirti įvairiems sudėtingiems paviršiams, tokiems kaip turbinos ir kompresoriaus mentelėms, suvirinimo sujungimams.

IŠVADOS

1. Ratų stebulės priima didžiausias apkrovas lėktuvo tūpimo metu. Jautriausia dinaminėms apkrovoms vieta yra rato stebulės briauna (angl. bead seat), todėl sūkurinių srovių pritaikymas tapo privalomas ratų stebulių patikroje.

2. Išnagrinėti įtrūkimų signalų ypatumai, pritaikant sūkurinių srovių jutiklius. Rezultatai panaudoti sūkurinių srovių jutiklių parametrų optimizavimui, sprendžiant uždavinius su paviršiniais įtrūkimais.

3. Pritaikytas profilinis sūkurinių srovių jutiklis, leidžiantis išvengti kampinio ir atotrūkio momento efektų. Profilinis jutiklis yra patogesnis už pieštukinio tipo keitiklius, o gauti rezultatai yra pakankamai tikslūs.

4. Pateikta sūkurinių srovių metodo pritaikymo praktika, panaudojant sūkurinių srovių prietaisą „Phasec 2D“ ratų stebulių tyrime, išlaikant jautrumą įtrūkimų signalams. Tai patvirtina, jog sūkurinių srovių metodas yra vienas iš patikimiausių paviršinių defektų nustatyme.

5. Pinigų išsaugojimas, patikimumas ir saugumo gerinimas yra kertiniai dalykai, dėl kurių turėtų didelės aviacinės kompanijos naudoti automatizuotus sūkurinių srovių įrenginius.

LITERATŪRA

1. HOITE, Simon; *Container cranes require structural maintenance*. [Žiūrėta 2016-02-03]. Prieiga per internetą http://www.liftech.net/wp-content/uploads/2015/10/WPD_CraneMaintenance_Article.pdf
2. PHASEC 2D. *Technical reference and operation manual*. Issue 03, 06/2005.
3. ABSC. *Component maintenance manual with illustrated parts list for main wheel assembly*. Ohio, 2002. 70 – 83 p.
4. STALEVIČIUS, Raimondas; *Orlaivių neardomųjų bandymų metodai*. Vilnius: Technika, 2012. 10-23 p.;
5. Good Year. *Aircraft tire care and maintenance manual*. 2011. 18 p.
6. HELLIER, Charles; *Handbook of non-destructive evaluation*. New York, 2003. 444 - 456 p.
7. DZHAGANIAN, A.; UCHANIN, V.; OPANASENKO, A.; *New Hand-Held Eddy Current Flaw Detector*. — In: 18th WCNDT, 16-20 April 2012, Durban, South Africa.
8. ATSB TRANSPORT SAFETY REPORT. *Aviation Occurrence Investigation AO-2009-006 Final, Main landing gear wheel failure Sydney Airport*. NSW 6 February 2009 VH-KDQ Saab 340B.
9. MANDACHE, Catalin; BROTHERS, Mike. *Time domain lift-off compensation method for eddy current testing*. Vol.10., Canada, 2005.
10. GE Measurement & Control Solutions. *WheelScan 5 Inspection Technologies*. GEIT-50003EN (03/11).
11. MOULDER, J.C.; NAKAGAWA, N. *Characterizing the Performance of Eddy Current Probes Using Photoinductive Field-Mapping*. In: Res Nondestr Eval 4, 221–236 p.
12. BUCKLEY, Joseph; *Automated eddy current Inspection of aircraft wheels*. Ferrera, 1993. 4 p.
13. LST EN 4179. *Aerospace series – Qualification and approval of personnel for non – destructive testing*. 2009. 10 p.
14. Deep Penetrating Eddy Currents and Probes. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2016-04-03]. Prieiga per internetą: < <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.3.6.2.pdf> >.
15. IAEA. *Eddy current testing at level 2: manual for the Syllabi contained in IAEA-TECDOC-628.REV.2 Training guidelines for non destructive testing techniques*. Vienna, 2011, 1-11psl.

16. SHU, Li; SONGLING, Huang; WEI, Zhao. *Development of differential probes in pulsed eddy current testing for noise suppression. Sensors and Actuators. A: Physical*, Volume 135, Issue 2, 2007. p. 675-679.
17. AULD, B. A., et al. *Eddy-current reflection probes: theory and experiment : Research in non-destructive evaluation*. Volume 1, Issue 1, 1989. p. 1–11.9
18. ZHANG, Y; LUO, F; SUN, H. *Impedance Evaluation of a Probe-Coil's Lift-off and Tilt Effect in Eddy-Current Nondestructive Inspection by 3D Finite Element Modeling*. In: 17th World Conference on Nondestructive Testing. Shanghai, 2008.
19. SABALIAUSKAS, Artūras; MINGAILIENĖ, Aušra; ČIKOTIENĖ, Dalia. *Magistro baigiamoji darbo rengimo metodiniai nurodymai*. Šiauliai, 2010.