

MECHANINIŲ DINAMINIŲ SISTEMŲ DIAGNOSTIKA

Audrius Čereška

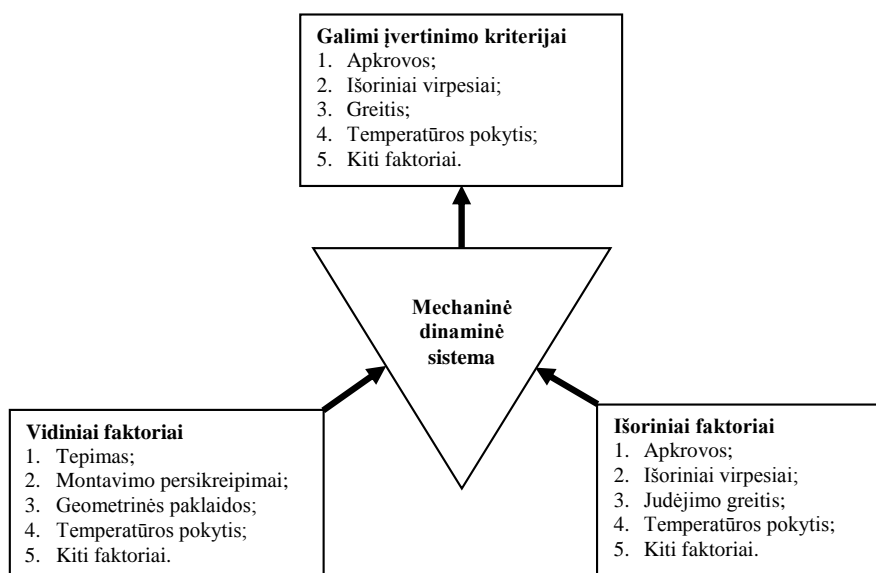
Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Anotacija. Dirbančiose mechaninėse dinaminėse sistemose pastoviai susiduriama su įvairiais veiksniais, virpesiais, temperatūros pokyčiais ir t.t. Virpesiai labai svarbūs mašinų gamyboje, technologiniuose procesuose, statyboje ir kitose srityse. Virpesiai gali būti ne tik žalingi, bet ir naudingi. Kiekvienas mechanizmas turi savo optimalų temperatūrinį lygį. Matuojant virpesius, temperatūros pokyčius ir kitus mechaninių dinaminių sistemų eksploatacijai svarbius parametrus galime įvertinti jų būklę. Gautus rezultatus galima panaudoti įvairiems technologiniams procesams atlikti, naujoms mašinoms kurti ir jas eksploatuoti. Straipsnyje nagrinėjamos mechaninių dinaminių sistemų diagnostikos galimybės. Aprašyti mechaninių dinaminių sistemų diagnostikai naudojamos priemonės matavimų bei analizės atlikimo metodika bei rezultatų tyrimų etapai. Diagnostikos rezultatai parodo tiriamos sistemos momentinę būklę bei leidžia numatyti gedimų atsiradimo priežastis bei pasekmes.

Reikšminiai žodžiai: mechaninė dinaminė sistema, metodika, diagnostika.

Įvadas

Mechaninė dinaminė sistema tai atskirų elementų kompleksas (Jonušas 2007). Mechaninių sistemų diagnostika sudėtinga ir todėl reikalinga sudėtinga kontrolės sistema (Barzdaitis 1998, Vekteris 2006.).



1 pav. Mechaninę dinaminę sistemą veikiantys faktoriai ir jų įvertinimo kriterijai

Vystantis technikai, vis dažniau susiduriama su įvairiais vienu metu techninius objektus veikiančiais žalingais ir naudingais veiksniais (virpesiais, temperatūros pokyčiais ir t.t.) (Вильфсон 1996, Žiliukas 1997).

Virpesiai labai svarbūs mašinų gamyboje, technologiniuose procesuose, statyboje ir kitose srityse. Virpesiai gali būti ne tik žalingi, bet ir naudingi.

Reikia žinoti, kaip matuoti, kaip vertinti, analizuoti ir kaip išvengti virpesių žalos arba kaip juos naudingai panaudoti mechaninės sistemos darbui (Pawlak 2007, Timofeev 2003).

Žalingieji virpesiai dažnai kelia tiesioginį pavojų svarbiems mechaniniams ir kitokiems įrenginiams, mašinoms ir jų dalims. Mechaniniai virpesiai trukdo normaliai eksploatuoti įvairias mašinas ir įrenginius, neleidžia techniškai progresuoti vienoje ar kitoje srityje. Be to virpesiai gali kenkti žmogaus sveikatai sukelti vibracinę ligą, virpesių žadinamus triukšmus – akustinį nuovargį.

Naudingieji virpesiai jau seniai naudojami žmogaus darbui palengvinti. Paskutiniiais dešimtmečiais, išsivysčius atitinkamoms taikomosios virpesių teorijos šakoms, panaudojus kompiuterius ir šiuolaikinius eksperimentų metodus buvo sukurti įvairūs vibraciniai įrenginiai ir prietaisai bei technologiniai procesai (Vekteris 2003).

Virpesiai gali ne tik trukdyti, bet ir padėti atlikti įvairius neelektrinių dydžių matavimus. Iš specialių virpančiųjų sistemų yra sukonstruoti mechaninių virpesių greičių ir pagreičių registravimo prietaisai (Pawlak 2007). Pagal mechanizmus veikiančius virpesius ir jų pobūdį sprendžiama apie mechanizmo būklę, atsiradus kokiam nors mechaninės sistemos gedimui, virpesių pobūdis keičiasi (Žiliukas 1997).

Prie tam tikrų darbo sąlygų temperatūra mechanizmo darbo zonoje gali pasiekti kritines reikšmes, tuomet sumažėja tepalo klampumas, bei tepimo plėvelės storis, tada sistema pereina prie pusiau skysto tepimo režimo.

Trinties koeficiento padidėjimas sąlygoja progresuojantį šilumos išsiskyrimą, mechaninėje dinaminėje sistemoje, iki tol, kol temperatūra pasiekia kritinę ribą (Čereška 2005, Friedlander 2003).

Gedimai gali būti susiję su mechaninės sistemos dinaminį jėgų pasikeitimu arba temperatūros pokyčiu. Dinaminį jėgų arba temperatūros pakitimas arba atsiradimas susijęs su atskiro mašinos mazgo ar visos sistemos defektais gali būti sąlygotas išorinių ir vidinių pakitimų. Dinaminės jėgos ir temperatūros pokyčiai veikia mechaninę dinaminę sistemą, jos elementus, t. y. žadina mechaninius virpesius arba keičia jų dydžius (Miyano 2004).

Diagnostikos praktika rodo, kad matuojant virpesius, temperatūrą ir kitus parametrus galima nustatyti ne tik konkretaus mazgo, jo elemento defektą bei gedimą, sekti jo vystymąsi veikiančioje mašinoje, bet ir rasti jį sukėlusias priežastis (Khalak 2005, Volkovas 2000).

Mechaninių dinaminų sistemų diagnostika

Mechanizmų pavaros su sukamojo judesio perdavimo elementais, turi tik joms būdingus virpesius, kurių šaltiniais dažniausiai būna rotorų disbalansas, rotorų sukimosi ašių sutapimo su bendrąja rotoriaus sukimosi ašimi nuokrypiai, mašinų konstrukcijos elementų mechaninis susidėvėjimas, elektros variklių ir generatorių elektrinės sistemos specifiniai defektai, tepalo, garo, skysčio sužadinti virpesiai, krumplinių pavarų defektai, turbinų, jų menčių ir ventiliatorių defektai, riedėjimo guolių defektai, slydimo trinties guolių defektai, rezonanso reiškiniai (Khalak 2005).

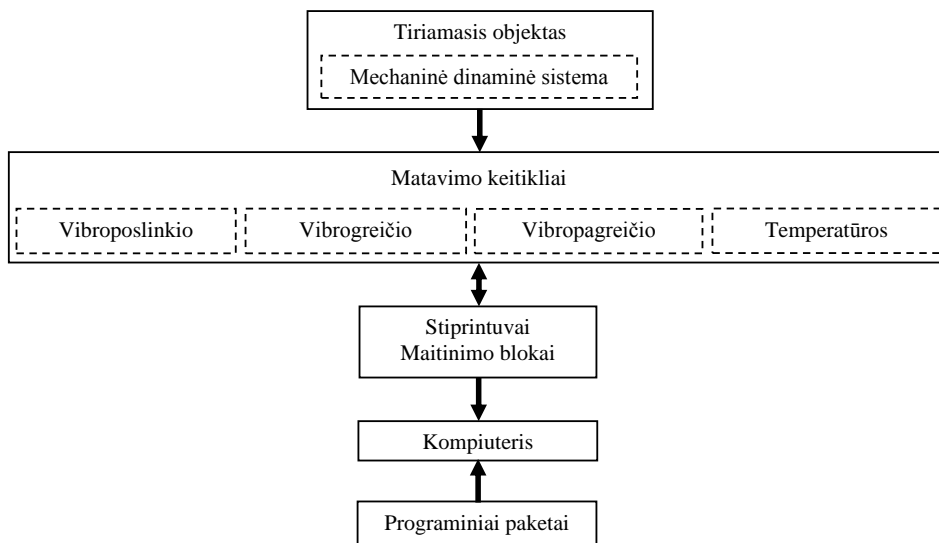
Minėti virpesių šaltiniai apibūdinami tik jiems būdingais virpesių dažniais. Pagal virpesių dažnį nustatoma, „kas vibruoja“, o pagal virpesių amplitudę nustatomas virpesių pavojingumo laipsnis. Virpesių parametrų matavimas ir jų analizės praktika bei gilus mašinos fizikinio modelio supratimas, paaiškina vibracijų atsiradimo ir perdavimo mechanizmą.

Mechaninių dinaminų sistemų monitoringas – tai periodinis, sistemingas ir nepertraukiamas virpesių, temperatūros ir kitų parametrų matavimas, matavimų rezultatų analizė, archyvavimas, duomenų bazių sudarymas ir jų taikymas praktikoje defektų nustatymui bei siekiant išvengti netikėtų gedimų. Ši technologija tapo ypač aktuali padidėjus mašinų greičiams ir automatizacijos lygiui.

Šiuolaikinė virpesių, temperatūros ir kitų parametrų matavimo ir analizės technologija pagrįsta kompiuteriniais prietaisais leidžia tiksliau įvertinti sistemos būklę, lyginant su kitais metodais, pavyzdžiui, akustiniais matavimais, tepalo tyrimu, temperatūros monitoringu, apkrovos kitimo monitoringu ir t.t. (Barzdaitis 1998, Stensson 1994).

Diagnostikos priemonės

Tiriant virpesių poveikio mašinai, prietaisui ir jų elementams intensyvumą, matuojami įvairūs parametrai, sudaromi matavimo duomenų formatai ir kartu su technologinio proceso parametrais įvertinama techninė mašinos būklė, nustatomi defektai ir sekamas jų vystymasis iki gedimo. Principinė matavimo schema pateikta 2 pav.



2 pav. Principinė matavimo schema

Poslinkis, greitis ir pagreitis lengvai išreiškiami vienas kitu integralinėmis priklausomybėmis.

Mechaninių sistemų elementų virpesių poslinkiai matuojami esant žemiems dažniams, todėl, tiriant mašinų virpesius plačiąja prasme, elementų virpesių poslinkių matavimas teikia ribotą informacijos kiekį. Virpesių poslinkiai nusako įtempimus mašinos konstrukcijos elemente. Reliatyvusis rotoriaus ar veleno virpesių poslinkis, tiesiogiai išmatuotas virpesių poslinkio keitikliu, yra tikslesnis parametras, lyginant su absoliučiuoju virpesių greičiu (pagreičiu), išmatuotu seisminiais keitikliais ant guolio korpuso.

Bekontakčiai indukciniai poslinkių matavimo keitikliai naudojami tiesiogiai matuoti besisukančio veleno virpesių poslinkius. Indukcinių keitiklių veikimo principas pagrįstas Fuko srovėmis. Keitiklis veikia kaip aukšto dažnio vibratorius, kai keitiklio apvija maitinama aukšto dažnio elektros srove ir sužadina apvijų aplinkoje magnetinį lauką.

Virpesių greitis įvertina mašinos dinamiką esant palyginti nedideliam dažnių intervalui. Virpesių greičio kvadratinis vidurkis įvertina vibracijų pavojingumą, nes virpesių greičiai tiesiogiai nusako virpesių energiją ir yra jų destruktivaus efekto matas.

Greičio keitikliai priskiriami seisminiams, nes matuoja absoliučiuosius mašinos korpuso virpesių greičius. Šie keitikliai pirmieji panaudoti mašinų dalių virpesių greičių ir dažnių matavimams, kaip pirminiai prietaisai. Greičio keitiklių trūkumai: dėvėsi judančios mechaninės dalys, dėl medžiagos nuovargio kinta spyruoklės standumas, jautrūs pašalinių magnetinių laukų veikimui, aplinkos temperatūriniais skersinių jėgų veikimui ir turi didelius gabaritų.

Prietaisai matuojantys mechanizmo arba jos elemento mechaninių virpesių pagreičius, vadinami akcelerometrais. Pagreitis nusako jėgą, veikiančią mašinos konstrukcijos elementą. Akcelerometrai matuoja mašinos elementų virpesių pagreičius plačiame dažnių intervale, viršijančiame 30 kHz.

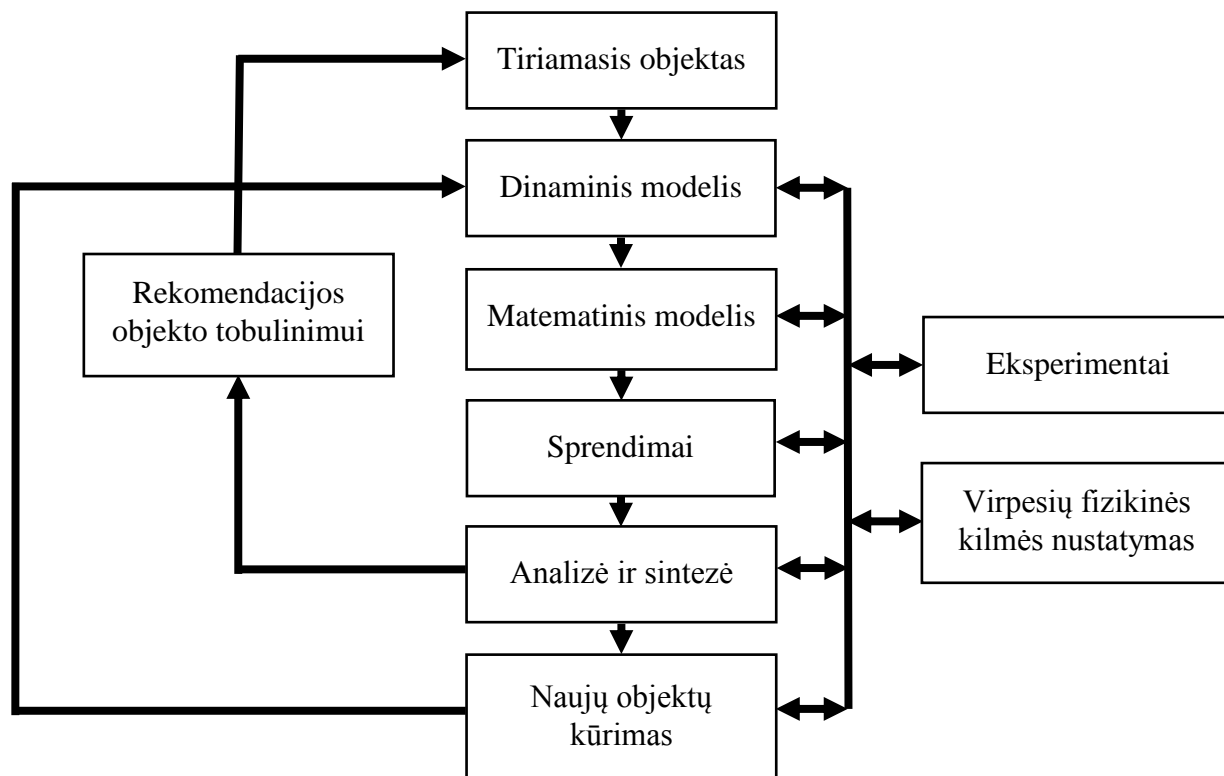
Pagreičių matavimo keitikliai, pjezoelektriniai akcelerometrai, kaip seisminiai keitikliai, naudojami matuoti absoliučiuosius virpesius plačiame dažnių intervale. Akcelerometrai – plačiai paplitę mechanizmų virpesių matavimo keitikliai, nes jie yra patikimi ir nebrangūs.

Tiriamųjų objektų temperatūra matuojama specialiais kontaktiniais arba bekontaktiais skaitmeniniais termometrais. Matavimo rezultatai kaupiami kompiuteryje.

Visi matavimo duomenys kaupiami kontroliuojami ir kaupiami kompiuteryje. Duomenų analizei atlikti naudojami specialūs programiniai paketai.

Tyrimų etapai

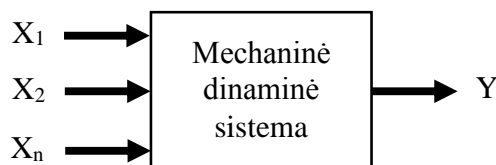
Bendroji vibrodiagnostinių tyrimų eiga pateikta (Augustaitis 2000) (3 pav.).



3 pav. Diagnostinių tyrimų principinė schema

Diagnostinių tyrimų eiga apima 9 esminius etapus:

1. Pirmiausia pasirenkamas pagamintas arba kuriamas objektas.
 2. Sudaromas tiriamojo objekto dinaminis modelis analiziniam diagnostiniam tyrimui. Suprastinama tiramoji sistema ir modelyje paliekama tik tai, ko reikia tolesniam tyrimui. Aproximuojant stengiamasi dinaminį modelį padaryti kuo paprastesnį, bet kartu ir palikti jį tokį, kad būtų įmanoma reikiamu tikslumu iširti objekto parametrus. Gali būti sudaroma ir keletas dinaminų modelių, iš kurių toliau tirti pasirenkamas vienas arba keli. Nagrinėjama atveju laikoma, kad tiriamas vienas dinaminis modelis.
 3. Sudaromas pasirinkto dinaminio modelio matematinis modelis.
 4. Atliekamas matematinio modelio sprendimas.
 5. Gauti sprendimai analizuojami, atliekama struktūrinė ir parametrinė optimizacinė sintezė (koreguojama dinaminio modelio ir paties objekto, iš kurio tas modelis sudarytas, struktūra, tikslingai keičiami dinaminio modelio parametrai taip, kad jo charakteristikos atitiktų iš anksto numatytus kriterijus).
 6. Remiantis analizės ir sintezės rezultatais, sudaromos rekomendacijos objektui tobulinti.
 7. Kuriami nauji objektai, jiems sudaromi nauji dinaminiai modeliai ir procesas kartojasi.
 8. Atliekant analizinius tyrimo etapus arba net ir anksčiau, gali būti vykdomi eksperimentai. Tiriamas virpesių pobūdis, veikimas.
 9. Nustatoma veiksnių fizikinė kilmė, išsiaiškinama ar objekte kylantys veiksniai yra priverstiniai, ar savaiminiai, tiesiniai ar netiesiniai, nustatomi veiksnių žadinimo šaltiniai ir kt.
- Eksperimentų duomenis, ypač virpesių atsiradimo priežastis, reikia žinoti visuose analitinių tyrimų etapuose, bet pirmiausia – tiriamojo objekto dinaminiam modeliui sudaryti.
- Matavimo proceso įvertinimo modelį, kuris nusako ryšį tarp matuojamojo dydžio ir kitų dydžių schema, parodyta 4 pav.



4 pav. Matematinio proceso įvertinimo modelio schema: X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) – įeinantys parametrai;
 Y – išeinantys parametrai

Matematiškai šį reiškinį galima išreikšti taip:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

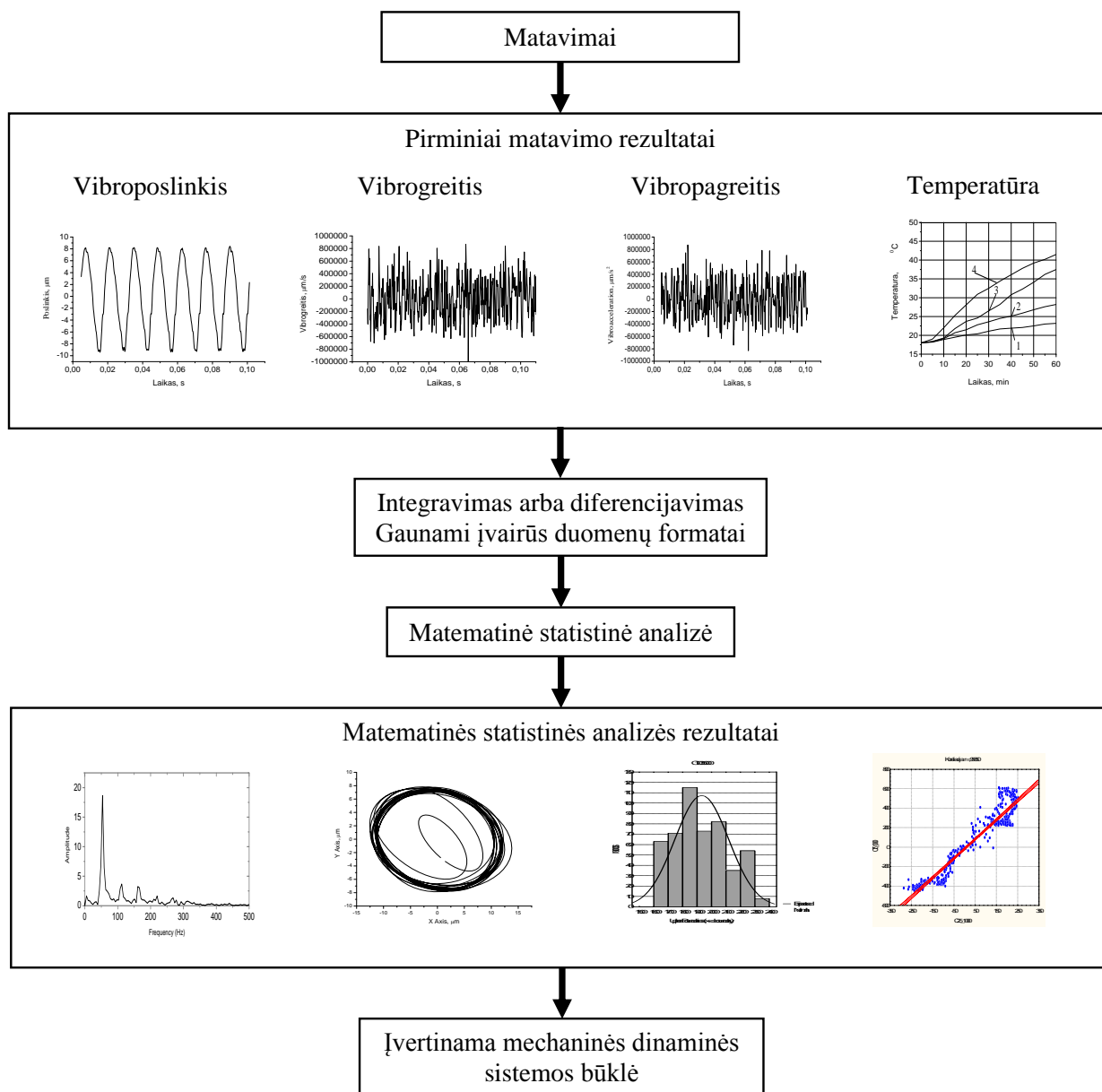
Modelio funkcija nusako matavimo procedūrą ir įvertinimo metodą. Ji aprašo, kaip išėjimo dydžio Y vertės gaunamos iš įėjimo dydžių X_i verčių.

Sudarant matavimo modelį, daroma prielaida, kad dydis Y , kurį reikia išmatuoti, matuojant išlieka pastovus. Daroma prielaida, kad n kitų dydžių X_i , nuo kurių priklauso matuojamasis dydis Y , taip pat yra stabili.

Rezultatai ir jų analizė

Panaudojus diagnostikos priemones atliekami matavimai ir gaunami pirminiai matavimų rezultatai kurie analizuojami taikant specialią metodiką pateiktą (5 pav.) ir pagal analizės rezultatus nustatoma mechaninės dinaminės sistemos techninė būklė.

Atlikus pirminių signalų integravimą arba diferencijavimą gaunami signalai (5 pav.): vibroposlinkiai, vibrogreičiai, vibropagreičiai, temperatūra o vėliau atlikus šių signalų matematinės statistikos analizę galima gauti: momentinę laiko funkciją; suvidurkintą laiko funkciją; autokoreliacinę laiko funkciją; tarpusavio koreliacijos funkciją; orbitas; momentinį spektrą; nuosavus spektrus ir tarpusavio spektrus; kepstrą; statistines funkcijas; dažnines charakteristikas H_1H_2 , koherencinį ir nekoherencinį išėjimo signalo galingumą; autokoreliacinę bei tarpusavio koreliacijos funkcijas; impulsinę charakteristiką, naudojant Hilberto transformaciją. Analizei atlikti naudojami įvairūs programiniai paketai: Origin, Master Data, Excel, Statistika ir kt.



5 pav. Matavimo rezultatų analizės schema

Išvados

1. Pateikta tyrimų metodika tinka įvairių mechaninių dinaminė sistemų diagnostiniams tyrimams atlikti.
2. Pateikta tyrimų įranga leidžia atlikti pilną mechaninės dinaminės diagnostinį tyrimą. Neturint galimybės panaudoti visų matavimo keitiklių vienu metu, gali būti panaudoti keli ar net tik vienas kurios nors rūšies keitiklis. Po atlikus gautų rezultatų transformaciją (integravimą ar diferencijavimą) galima gauti, bet kurį reikalingą rezultatą (duomenų formatą).
3. Transformuojant pirminius matavimo signalus (pvz. Iš vibroposlinkio transformuoti į vibrogreitį arba atvirkščiai ir t.t.), reikia žinoti kokia yra transformacijos metu gaunama paklaida. Tik tokiu atveju galima gauti patikimus rezultatus.
4. Mechaninės dinaminės sistemos kompleksinio veiksmių (temperatūros, virpesių, jėgos, hidrodinamikos ir kt.) įvertinimo ir analizės rezultatai parodo tiriamos sistemos momentinę būklę bei leidžia numatyti gedimų atsiradimą.

Literatūra

1. Augustaitis, V. K. 2000. Mechaninių virpesių pagrindai. Vilnius. Žiburio leidykla. 319.
2. Barzdaitis V., Činikas G. 1998. *Rotorinių mašinų monitoringas ir diagnostika*. Kaunas: Technologija. 365 p.
3. Čereška A, Vekteris V. 2005. Analytical research of hydrodynamic bearings in mechatronical systems. *Trans Tech Publications Ltd, Switzerland – UK – USA, Solid State Phenomena*, pp. 383 – 387.

4. Friedlander, D.; Chattopadhyay, I.; Ray, A.; Phoha, S.; Jacobson, N. 2003. Anomaly prediction in mechanical systems using symbolic dynamics, Annual American Control Conference (ACC 2003), Proceedings of the 2003 American Control Conference, 1-6, pp. 4275-4280.
5. Jonušas R.; Juzėnas, E.; Juzėnas K. 2007. *Vibrodiagnostics of complex rotary systems*. Kaunas University of Technology, Lithuanian Academy of Science, IFTOMM National Committee of Lithuania, Baltic Association of Mechanical Engineering. Mechanika, pp. 107-110.
6. Khalak, A.; Wemhoff, E. 2005. Multi-hypothesis estimation approach to diagnosis and prognosis of degrading systems. *Ieee Aerospace Conference Proceedings*, 1-4, pp. 3691-3701.
7. Miyano, T. 2004. Estimating noise level in dynamical behavior for detecting mechanical damage, *Materials Transactions*, 45, pp. 236-239.
8. Pawlak A.M. 2007. *Sensors and actuators in mechatronics: design and applications*. Boca raton (fla.): crc/taylor & francis, 376 p.
9. Stensson, A; Nordmark, A.B. 1994. Experimental investigation of some consequences of low-velocity impacts in the chaotic dynamics of a mechanical system. 347, pp. 439-448. Thomson William T.; Dahlen M.D. 1997. *Theory of vibration with applications*. 5 th ed. – London: Chapman and Hall.
11. Timofeev, A.V. 2003. Physical diagnostics and fault relevant feedback control, *International Conference on Physics and Control (PHYSCON 2003)*, pp. 253-258.
12. Vekteris V., Čereška A., Trumpa A. 2003. The application of measuring transducers in the diagnostics of the mechatronical system. *Journal of Vibroengineering*, 5(1), pp. 5-9.
13. Vekteris V.; Čereška A. 2006. Diagnostical measurements of elements of mechatronical system. *International conference of DAAAM baltic industrial engineering – adding innovation capacity of labour force and entrepreneur*, Tallinn, Estonia, April 20 – 22, 2006, pp. 183-187.
14. Volkovas, V. 2000. Condition monitoring and diagnostics of constructive elements of rotor systems, *7th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery, Imech Conference Transactions 2000*, 6 pp. 633-643.
15. Вильфсон И.И. 1996. *Колебания в машинах*. Санкт-петербург. Гос. Ун-т технологий и дизайна.
16. Žiliukas P.; Barauskas R. 1997. *Mechaniniai virpesiai*. Kaunas. Technologija. 308.

DIAGNOSTICS OF MECHANICAL DYNAMIC SYSTEMS

Summary

There are encounter with different factors, vibrations, temperature changes and so on constantly in mechanical dynamic systems. Vibrations are very important in the manufacture of machinery, in technological processes, in construction and in other fields. Vibrations can be not only harmful, but also and useful. Everyone mechanism has its own optimal temperature level. Measuring vibrations, temperature changes and other parameters that are important for the operation of mechanical dynamic systems, we can evaluate their condition. The obtained results can be used for various technological processes, to create new machines and to operate them. The article analyzes the possibilities of diagnostics of mechanical dynamic systems. There are described measures that used for diagnosis of mechanical dynamic systems, methodology of measurements and analysis of performance and the stages of researches results. Diagnostic results are show the instantaneous state of the research system and are allow predicting the deteriorations causes of occurrence and consequences.

Key words: mechanical dynamic systems, methodic, diagnostic.

AUTORIAUS LYDRAŠTIS

Autoriaus vardas, pavardė: Audrius, Čereška

Mokslo laipsnis ir vardas: daktaras, profesorius

Darbo vieta ir pozicija: VšĮ Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Mechanikos fakulteto, Mechanikos ir medžiagu inžinerijos katedros profesorius

Autoriaus mokslinių interesų sritys: mechaninių statinių ir dinaminių sistemų diagnostika ir monitoringas

Telefonas ir el. pašto adresas: +370 606 90514, audrius.cereska@vgtu.lt

A COVER LETTER OF AUTHOR

Author name, surname: Audrius, Čereška

Science degree and name: doctor, professor

Workplace and position: Vilnius Gediminas Technical University, Mechanics faculty, Mechanical and material engineering department professor

Author's research interests: diagnostics and monitoring of static and dynamic mechanical systems

Telephone and e-mail address: +370 606 90514, audrius.cereska@vgtu.lt