

## Geležinkelio bėgių diagnostika naudojant geometrinius klasifikatorius

V. A. Buinevičius, V. Gargasas

Valdymo technologijų katedra, Kauno technologijos universitetas

Studentų g. 48, 51367 Kaunas, Lietuva, tel. +370 37 300291, el. p. valtek@eaf.ktu.lt

Geležinkelio bėgių būklės diagnostikai bei vidiniams įtrūkimams aptikti jau seniai naudojamos ultragarsinės diagnostikos priemonės, kurių veikimas yra pagrįstas ultragarso signalo impulso, pasiūsto į tiriamąjį objektą, atspindžio signalo fiksavimu. Taikomi keli ultragarsinės geležinkelio bėgio diagnostikos metodai [1]:

- Ultragarso defektų kontrolės **aido metodas**. Jis pagrįstas trumpų ultragarso impulsų siuntimu ir nuo defekto atsispindėjusio aido signalo registravimu. Metodo teigiamos savybės: vienpusis priėjimas (kontaktavimas) prie objekto, didelis jautrumas vidiniams defektams, didelis defekto koordinatinių nustatymo tikslumas; trūkumai – mažas atsparumas paviršiaus atspindžių trukdžiams, aido signalo priklausomybė nuo defekto buvimo vietos.

- **Šešėlinis** ultragarso kontrolės metodas. Ultragarso bangų siūstuvai ir imtuvai, išdėstyti vienas priešais kitą priešingose tiriamojo objekto pusėse, sukuria „akustinį traktą“. Kontroluojamo gaminio būklė nustatoma pagal priimamo signalo lygį. Jei ultragarso bangos sklaidymo kelyje nepasitaiko kliūčių (defektų), bangos atsispindėjimų ar sklaidos, tai priimamo signalo lygis maksimalus. Šis lygis smarkiai sumažėja ar net nukrinta iki nulio, jei gaminyje pasitaiko defektų.

- **Veidrodinis-šešėlinis** metodas. Taikant šį metodą, nereikia dvipusio priėjimo prie gaminio. Čia defekto aptikimo kriterijus yra nuo priešingo paviršiaus atsispindėjusio signalo amplitudės sumažėjimas. Naudojami du PE keitikliai: siūstuvai ir imtuvai.

Net ir pačiuose moderniausiuose šiuo metu Lietuvos geležinkelių ūkyje naudojamuose defektoskopuose pagrindiniai ultragarsinės diagnostikos metodai yra tie patys, kaip ir naudotieji prieš kelis dešimtmečius, kai analizuojamos tik atsispindėjusio fizinio signalo charakteristikos ir sprendimas apie bėgio būklę bei defekto koordinatas priimamas pagal tokius kriterijus kaip amplitudė ar atspindžio laikas.

Tobulėjant duomenų įvedimo ir apdorojimo techninėms priemonėms, atsiveria naujos diagnostikos sistemų galimybės. Gautus signalus galima klasifikuoti priskiriant juos vienai iš gedimo grupių  $M_i$  naudojantis atsitikintų procesų klasifikavimo teorija ar kitais klasifikavimo algoritmais.

Norint gauti informatyvius tiriamojo signalo požymius ir išvengti sistemos priklausomybės nuo stiprinimo koeficiento, klasifikavimui naudojama vadinamoji kovariacinė metrika [5].

Priklausomai nuo atpažįstamų objektų (procesų ar situacijų) prigimties, taikomi įvairūs klasifikavimo metodai. Dažniausi yra šie [3]:

- statistiniai klasifikavimo metodai (Bajeso klasifikatorius, koreliacinis klasifikatorius ir kt.);
- geometrinių klasifikavimo metodai (Euklido klasifikatorius, klasifikatorius nevienodo mastelio erdvėje ir kt.);
- neuroniniu tinklu pagrįsti klasifikavimo metodai;
- lingvistiniai klasifikavimo metodai.

Visais atvejais atpažįstamus objektus (procesus, situacijas), apibūdinamus tam tikrais požymiais  $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ , siekiama priskirti vienai iš  $M$  klasių  $\{A_1, A_2, \dots, A_M\}$ .

Naudojant Bajeso klasifikatorių, tam tikra požymių kombinacija  $b_j$  aprašytos realizacijos tam tikrai klasei priskiriamos pagal Bajeso formulę:

$$p(b_j, A_i) = p(A_i / b_j) p(b_j) = p(b_j / A_i) p(A_i), \quad (1)$$

$$p(A_i / b_j) = \frac{p(b_j / A_i) p(A_i)}{p(b_j)}, \quad (2)$$

$$p(b_j) = \sum_{i=1}^M p(b_j / A_i) p(A_i). \quad (3)$$

Objektas priskiriamas tai klasei, kuriai  $p(A_i / b_j) \rightarrow \max$ .

Čia  $p(A_i)$  – iš anksto žinomos apriorinės klasių tikimybės,  $p(A_i / b_j)$  tikimybės yra sužinomos klasifikatoriaus „mokymo“ stadijoje.

Kuriant koreliacinį klasifikatorių reikalinga etalonų aibė  $E_{M-n_M} = y_{M-n_M}(t)$  – klasės  $A_M$   $n_M$  –asis etaloniškas procesas. Procesas  $x(t)$  atpažįstamas pagal koreliacijos koeficientų  $r$  vertes:

$$\max_i r_i = \max_i \frac{K(x, y_i)}{\sigma(x)\sigma(y_i)} = r_u \rightarrow x(t) \in A_u; \quad (4)$$

čia  $K(x, y_i)$  – procesų  $x(t)$  ir  $y_i(t)$  koreliacinis momentas,  $\sigma(x)$  ir  $\sigma(y_i)$  – atitinkamai procesų  $x(t)$  ir  $y_i(t)$  standartiniai nuokrypiai. Diskretine forma, kai procese matuojama  $m$  verčių,

$$K(x, y_i) = \frac{1}{n_i(m-1)} \sum_{j=k=1}^{n_i} \sum_{j=k=1}^m (x(t_k) - \bar{x})(y_{i-j}(t_k) - \bar{y}_{i-j}), \quad (5)$$

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (x(t_k) - \bar{x})^2}, \quad (6)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x(t_k),$$

$$y_i(t) = \sqrt{\frac{1}{n_i(m-1)} \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^m (y_{i-j}(t_k) - \bar{y}_{i-j})^2}, \quad (7)$$

$$\bar{y}_{i-j} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m y_{i-j}(t_k). \quad (8)$$

Taikant geometrinis klasifikavimo metodus atpažinimui naudojamas „artumo matas“:

$$S(x, y_i) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T d^2(x, y_i^j). \quad (9)$$

čia  $T$  – klasės etaloninių objektų skaičius,  $x = \{x_1, \dots, x_N\}$  – objekto  $a$ , kurį reikia atpažinti, požymiai,  $y_i^j = \{y_1^j, y_2^j, \dots, y_N^j\}$  –  $i$ -osios klasės  $j$ -ojo etaloninio objekto požymiai;  $d(x, y_i^j)$  – atstumas tarp objekto  $a$  ir  $i$ -osios klasės  $j$ -ojo etaloninio objekto.

Naudojant Euklido klasifikatorių,

$$d(x, y_i^j) = \sqrt{\sum_{k=1}^N (x_k - y_{ik}^j)^2}. \quad (10)$$

Atpažinimo taisyklė

$$\min_i S(x, y_i) \Big|_{i=1,2,\dots,M} = S(x, y_u) \rightarrow a \in A_u \quad (11)$$

Kai požymių kitimo diapazonai įvairių klasių objektams užkloja vienas kitą, o šių pločiai labai skiriasi, Euklido klasifikatorius veikia neefektyviai.

Fišerio klasifikatorius naudoja kitokią atstumą:

$$d(x, y_i^j) = \sqrt{\sum_{k=1}^N w_{ik}^2 (x_k - y_{ik}^j)^2}. \quad (12)$$

Čia  $w_{ik}$  yra  $i$ -osios klasės objektų  $k$ -ojo požymio svarbumo svorinis koeficientas. Įrodoma, kad, keliant sąlygą

$$\sum_{k=1}^N w_{ik} = 1,$$

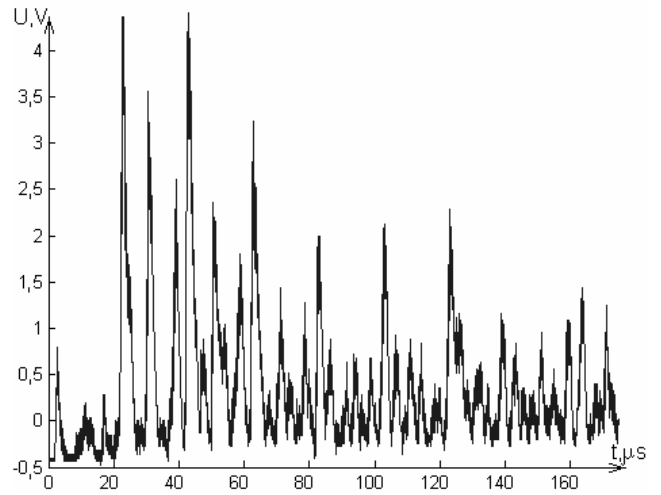
gaunama:

$$w_{ik} = \frac{1}{\sigma_{ik}^2 \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sigma_{ik}^2}}, \quad (13)$$

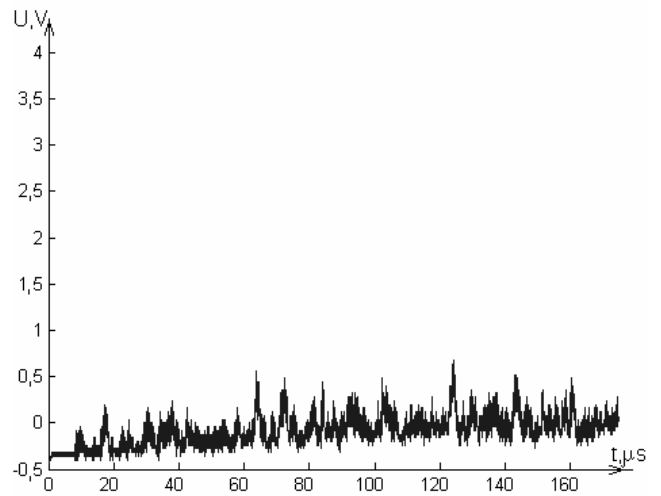
$$\sigma_{ik}^2 = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T (y_{ik}^j - \bar{y}_{ik})^2, \quad \bar{y}_{ik} = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T y_{ik}^j, \quad (14)$$

čia  $\sigma_{ik}$  –  $i$ -osios klasės etalonų dispersija.

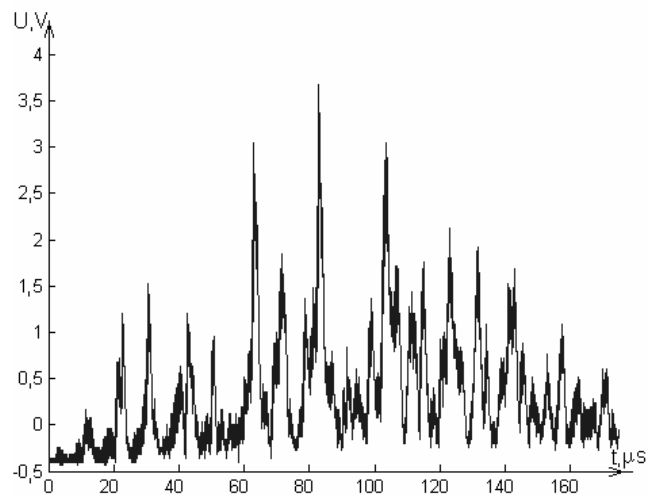
Įvedus svorinius koeficientus  $w_{ik}$ , kiekvienos klasės etalonų erdvė susispaudžia skirtingai. Norint įsitikinti, kad bėgių diagnostikoje tiriamas atsispindėjusio ultragarso impulso signalas tinka klasifikuoti spektro autokoreliacijos funkcija turi pakankamai kriterijų, atspindinčių signalo priklausymą vienai iš klasių, atliekamas eksperimentas.



a) S4



b) S2



c) S6

**1 pav.** Bėgio kokybę atspindintys signalai: S4 – sveiko bėgio, S2 – bėgio su didelių gabaritų vidiniu įtrūkimu, S6 – bėgio su mažų gabaritų vidiniu įtrūkimu, signalai

Eksperimentui naudojamas plieninis šablonas su vidiniais įtrūkiais – išgręžtomis įvairaus dydžio ir padėčių skylėmis, imituojančiomis geležinkelio bėgio

vidinį įtrūkimą. Ultragarso signalui generuoti, siūsti ir priimti naudojamas nešiojamasis bėgių ultragarsinis defektoskopas UD-13URV1P1, siunčiantis 2,5 MHz dažnio žadinantį ultragarso impulsą ir atvaizduojantis priimtą atsispindėjusios bangos signalą. Signalas registruojamas skaitmeniniu oscilografu HAMER 1507, turinčiu 8 skilčių analoginį/kodinį keitiklį, naudojamas 10 MHz keitimo dažnis.

Naudojant tiesųjį ( $\alpha=0^\circ$ ) keitiklį (ultragarso impulsas siunčiamas nuo bėgio galvutės paviršiaus vertikalia kryptimi žemyn), defektai aptinkami veidrodiniu-šešėliniu ultragarsinės defektų kontrolės metodu, t.y. defekto aptikimo kriterijus įprastu atveju būtų nuo priešingo paviršiaus atsispindėjusio signalo amplitudės sumažėjimas. Eksperimento metu užregistruoti keli „sveiko“ bėgio vietoje bei po kelis dviejų skirtingų defektų vietose fiksuojami signalai, siekiant gauti kelių atskirų klasių etaloninius signalus.

1 pav., a, pavaizduotas signalas S4 gaunamas, kai bėgis sveikas, kai ultragarso bangos sklidimo kelyje nepasitaiko kliūčių ir nuo priešingos sienelės atsispindėjusi banga grįžta atgal link keitiklio. Signale fiksuojami daugkartiniai atsispindžiai nuo priešingų sienelių paviršių. 1 pav., b, signalas S2 gautas keitikliui esant virš imituojamo bėgio vidinio įtrūkimo. Ultragarso banga atsispindi nuo įtrūkimo krašto, kurio gabaritai, palyginti su ultragarso bangos ilgiu ( $c = 1,3\text{mm}$ ), yra dideli ir atgal į iešiklį didžioji dalis siunčiamo impulso nebegrįžta. 1 pav., c, S6 signalas gautas padėtyje, kai ultragarso bangos sklidimo kelyje yra nedidelės skylės, kurios dalį spindulių atspindi kita kryptimi ir nuo priešingos sienelės paviršiaus atsispindi tik likusioji dalis.

Siekiant sumažinti klasifikuojamo signalo informatyvių požymių aibę, programiniu paketu MatLab apskaičiuojamos signalų spektrinio tankio autokoreliacijos funkcijos, kurių tinkamumą klasifikavimui tyrė ir pripažino savo darbuose prof. R. S. Petrikis ir prof. R. Gudonavičius [2]. Visų užfiksuotų signalų spektrinio tankio autokoreliacijos funkcijos turi panašią formą, tačiau skiriasi minimumų ir maksimumų vertėmis.

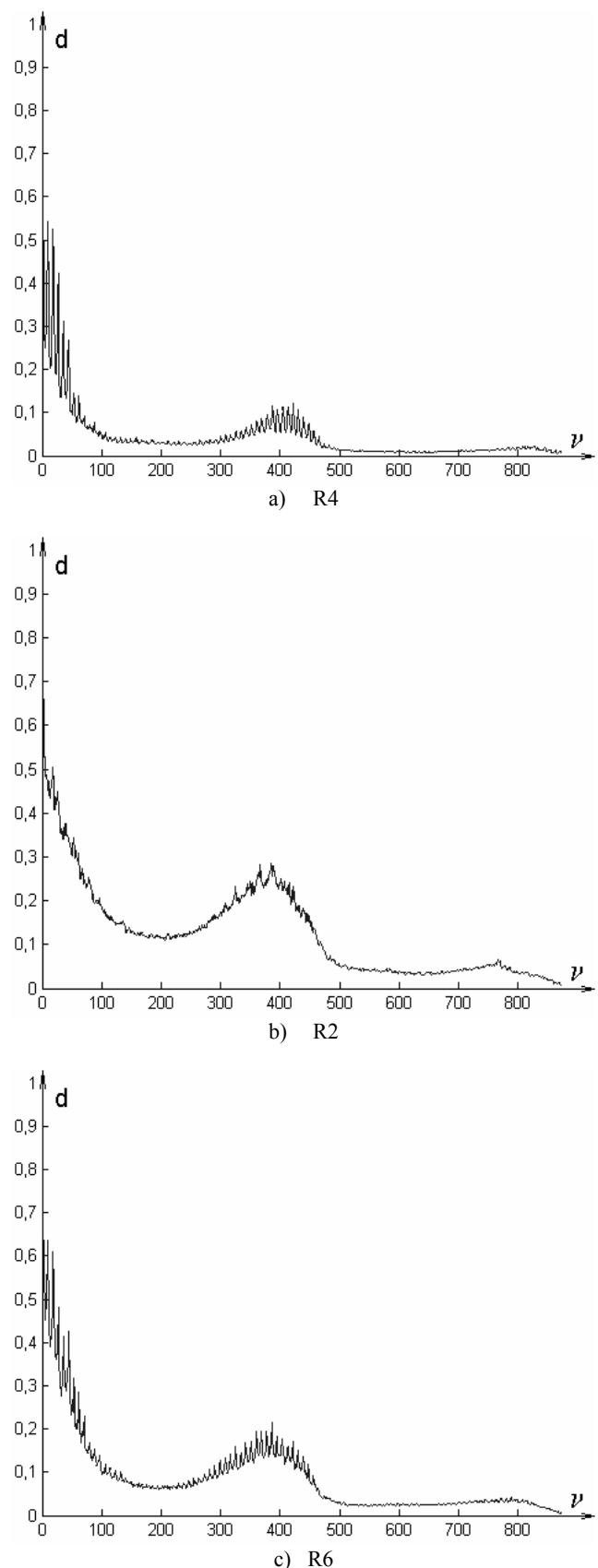
Patyrinėkime, ar spektrinio tankio autokoreliacijos funkcijų maksimumų vertės galėtų būti signalų klasifikavimo kriterijus.

1 lentelė. Funkcijų maksimumų vertės

	S1	S4	S7	S2	S3	S5	S6
max2	0,124	0,12	0,13	0,282	0,319	0,156	0,202
max3	0,021	0,023	0,021	0,043	0,041	0,032	0,039
$\frac{\text{max 3}}{\text{max 2}}$	0,169	0,167	0,162	0,152	0,129	0,205	0,193

1 lentelėje matome, kad trečiasis maksimumas keičiasi nedaug ir negali būti klasifikavimo kriterijumi. Antrojo maksimumo vertė priklauso nuo defekto. Kai gaminys nedefektuotas, max2 turi daugiau nei du kartus mažesnę vertę (nuo 0,12 iki 0,13) negu fiksuojant signalą defekto vietoje (nuo 0,282 iki 0,319). Taip pat ir signalai, fiksuoti ties nedidelio skersmens kiaurymėmis, kovariacinės funkcijos antrajame maksimume turi vertę (nuo 0,156 iki 0,202), truputį didesnę nei nedefektuoto gaminio bei aiškiai mažesnę negu defektuoto. Todėl kovariacinės funkcijos antrasis maksimumas tinka ne vien signalui

priskirti vienai iš klasių (defektuotas – nedefektuotas), bet ir klasifikuoti pagal vidinio įtrūkimo dydį.



2 pav. Signalų spektrinio tankio autokoreliacijos funkcijos: R4 – sveiko bėgio, R2 – bėgio su didelių gabaritų vidiniu įtrūkimu, R6 – bėgio su mažų gabaritų vidiniu įtrūkimu

Tačiau klasifikuojant vien pagal antrąjį maksimumą sveiko gaminio ir gaminio su nedideliu defektu (S5, S6) antrojo maksimumo vertė gali būti artimos. Šioms klasėms atskirti reikalingas papildomas kriterijus. Toks kriterijus galėtų būti  $l = \frac{\max 3}{\max 2}$ . Jis įvertina trečiojo kovariacijos

funkcijos maksimumo priklausomybę nuo gaminio būklės ir mažo defekto atveju įgyja didžiausią vertę.

Turint šiuos duomenis, nežinomos klasės objektą  $P(x_1, x_2) = (0,197, 0,208)$  galima priskirti vienai iš klasių, naudojant Euklido klasifikatorių. Signalai gauti tiriant tris skirtingus defektus, todėl yra suskirstyti į tris klases. Etaloniniais A klasės signalais laikysime S1, S4 ir S7, B klasė – S2 ir S3, C klasė – S5 ir S6.

Naudodami Euklido klasifikatorių skaičiuojame pagal (9) ir (10) formules:

$$S_E(P, A) = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \left[ (x_1 - y_{A1}^j)^2 + (x_2 - y_{A2}^j)^2 \right] = 0,00697$$

$$S_E(P, B) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \left[ (x_1 - y_{B1}^j)^2 + (x_2 - y_{B2}^j)^2 \right] = 0,01587$$

$$S_E(P, C) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \left[ (x_1 - y_{C1}^j)^2 + (x_2 - y_{C2}^j)^2 \right] = 0,001.$$

Vadovaujantis (11) taisykle galima sakyti, kad objekto P būklė priklauso klasei C.

Požymių plokštumoje atskirų klasių požymiai nesutampa ir yra gana dideli atstumai tarp atskirų klasių požymių aibių, todėl galima taikyti Euklido klasifikatorių ir sakyti, kad pasiūlytas metodas tinka geležinkelio bėgių diagnostikos sistemai.

## Literatūra

1. **Марков А. А., Шпагин Д. А.** Ультразвуковая дефектоскопия рельсов // СПб.: Образование – Культура, – 1999. – 230 с.
2. **Kajackas A., Petrikis S.R., Slanys R.** Matuojamų koreliacijos funkcijų statistinių charakteristikų analizė// Radioelektronika: Lietuvos aukštųjų mokyklų darbai/temų rinkinys. – Vilnius, 1985. –T. 21(1). – P85-89.
3. **Bagdonas V.** Intelektu modeliai ir jų taikymas valdymui, – Technologija, 2003. –104 p.
4. **Гудонавичюс Р. В.** Выбор системы информативных признаков для процедур распознавания шумовых сигналов// Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2000. – Nr. 6(29).
5. **Buinevičius V. A., Gargasas V.** Geležinkelio objektų diagnostika // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2002. – Nr. 5(40).

Pateikta spaudai 2004 02 22

**V.A. Buinevičius, V. Gargasas. Geležinkelio bėgių diagnostika naudojant geometrinius klasifikatorius // Kaunas: Technologija, 2004. –Nr. 4(53). – P. 86-89.**

Geležinkelio bėgių kontrolei naudojamos ultragarsinės diagnostikos priemonės, kurių veikimo principas ir metodai nesikeičia jau kelis dešimtmečius. Tobulėjant duomenų įvedimo bei apdorojimo techninėms priemonėms atsiveria naujos diagnostikos sistemų galimybės: gautus signalus galima apdoroti matematiškai ir klasifikuoti atsitiktinių procesų metodu ar naudoti kitus žinomus klasifikavimo algoritmus. Aprašytas eksperimentas, kurio metu realūs bėgių diagnostikoje naudojami signalai matematiškai apdorojami siekiant sumažinti informatyvių kriterijų aibę ir patikrinti, ar gauti kriterijai tinkami klasifikuoti bei geležinkelio bėgių diagnostikos sistemai. Il. 2, bibl. 4 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų, rusų k.).

**V.A. Buinevičius, V. Gargasas. Rail Diagnostics using Geometrical Classification // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2004. – No. 4(53). – P. 86-89.**

In order to control rail there are ultrasound diagnostic tools used whose essence and methods of functioning haven't changed in a few decades. While data storage and management tools develop we discover about new possibilities of diagnostic systems- received signals are processed either mathematically and classified by random method of a process or using other known methods of algorithms. Described experiment is performed as follows: actual signals received during the process of diagnostic are processed mathematically in order to reduce the number of critical factors that of the classification system. The other taken step is to double-check whether the gathered factors are appropriate for the classification itself as well as for the whole system of rail diagnostics. Ill. 2, bibl. 4 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English, Russian).

**В. А. Буйнявичюс, В. Гаргасас. Диагностика железнодорожных рельсов методом геометрической классификации // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2004. – № 4(53). – С. 86-89.**

Несколько десятков лет не меняется принцип и методы работы оборудования ультразвуковой дефектоскопии железнодорожных рельсов. При развитии технического оборудования приёма и анализа данных, открываются новые возможности систем диагностики: при математическом анализе можно провести классификацию сигналов по теории случайных процессов или по другим известным методам классификации. Описан эксперимент, где реальные сигналы, используемые в диагностике рельсов, обрабатываются математически с целью уменьшения числа информативных признаков и проверки годности этих признаков для классификации, в том числе и для системы диагностики железнодорожных рельсов. Ил. 2, bibl. 4 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).

