

(12) **PARAIŠKOS APRAŠYMAS**

(21) Paraiškos numeris: **2024 008**

(22) Paraiškos padavimo data: **2024-03-04**

(41) Paraiškos paskelbimo data: **2024-09-10**

(71) Pareiškėjas:

**Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, 2040 Vilnius, LT**

(72) Išradėjas:

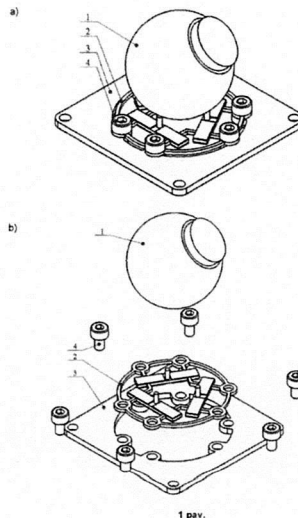
**Andrius ČEPONIS, LT
Dalius MAŽEIKAS, LT
Regimantas BAREIKIS, LT**

(54) Pavadinimas:

Inercinė keturių laisvės laipsnių pjezoelektrinė pavara

(57) Referatas:

Pjezoelektrinė pavara, sukurianti sferos formos rotoriaus (1) nepriklausomus sukamuosius judesius apie keturias ašis ir linijinį poslinkį. Pjezoelektrinę pavara sudaro sferos formos rotorius (1), patalpintas ant trijų cilindro formos atramų (5), kurios neišardomai sujungtos su stačiakampėmis pjezoelektrinės bimorfines plokštelėmis (16) sudarydamos pavaros statorių (2), kuris per įtvirtinimo zonas (8) varžtais (4) įtvirtintas įtvirtinimo plokštelėje (3). Siekiant sukurti sferos formos rotoriaus (1) sukamąjį judesį apie horizontalią sukimosi ašį, stačiakampės pjezoelektrinės bimorfines plokštelės (16) žadinamos pjūklo formos elektriniu signalu, kurio dažnis artimas arba lygus pirmos lenkimo deformacijų mados dažniui. Siekiant gauti rotoriaus (1) sukamąjį judesį apie vertikalią ašį, visos pjezoelektrinės bimorfines plokštelės (16) paveikiamos dvejais pjūklo formos signalais, kurių dažnis lygus arba artimas antros lenkimo deformacijų mados rezonansiniam dažniui, o fazių skirtumas yra π . Paveikus bimorfines plokštelės (16) nuolatinės srovės elektriniu signalu, sugeneruojamas rotoriaus (1) linijinis poslinkis vertikalia kryptimi su labai didele judesio skiriamąją geba.



INERCINĖ KETURIŲ LAISVĖS LAIPSNŲ PJEZOELEKTRINĖ PAVARA

IŠRADIMO SRITIS

Išradimas priskiriamas elektro-mechaninių, mechatroninių sistemų ir robototeknikos sritims. Pavara skirta sukurti didelio tikslumo daugelio laisvės laipsnių sukamojo judesio sistemas, įskaitant ir reversines, ir gali būti taikoma tiksliose sukamojo judesio pozicionavimo sistemose, tokiose kaip optinių filtrų, lazerio spindulio ar optinių lęšių pozicionavimo sistemose taip pat precizinėse bandinių ir kitų objektų pozicionavimo sistemose ar įrenginiuose.

TECHNIKOS LYGIS

- 10 Sparčiai vystantis precizinėms pozicionavimo, optikos ir mikroskopijos sistemoms, siekiama didinti jų skiriamąją gebą ir tikslumą. Kuriant daugiafunkcines precizines daugelio laisvės laipsnių pozicionavimo sistemas, susiduriama su problema kaip sumažinti pavarų skaičių ir jų užimamą tūrį bei pagerinti ir išplėsti jų funkcionalumą. Klasikinių elektromagnetinių pavarų taikymas daugiafunkcinėse daugelio laisvės laipsnių pozicionavimo sistemose yra apribotas dėl konstrukcinių ypatumų, susijusių su tuo, kad
- 15 elektromagnetinis vykdiklis sukuria vieno laisvės laipsnio judesį, todėl tampa komplikauta integruoti keletą vykdiklių į daugiafunkcinę daugelio laisvės laipsnių pozicionavimo sistemą. Viena iš mokslinių tyrimų kryptų yra siejama su daugelio laisvės laipsnių daugiafunkcinių pjezoelektrinių pavarų ir vykdiklių kūrimu, kuriuose varomosios grandies ar visos pozicionavimo sistemos sukamieji judesiai sukuriami ne elektromagnetiniu principu, o transformuojant elektros energiją į aukšto dažnio mechaninius virpesius, kurie užtikrina varomosios grandies ar visos pozicionavimo sistemos sukamuosius judesius. Valdant vykdiklio mechaninių virpesių modas ir amplitudes, galima pasiekti kelių laisvės laipsnių nanometrinės skyros varomosios grandies ar visos pozicionavimo sistemos judesius. Tai
- 20 leidžia supaprastinti pavaros konstrukciją, sumažinti mechatroninių sistemų gabaritus, padidinti įrenginių funkcionalumą ir kurti integruotas mechatronines pozicionavimo sistemas.

- Patente US2013038173A1 aprašoma pjezoelektrinė pavara, kuri sukuria trijų laisvės laipsnių sferos formos rotorius sukamąjį judesį. Pavara gali būti sudaryta iš tuščiavidurio stačiakampio arba cilindro formos statoriaus, ant kurių išorinių paviršių patalpintos
- 30 pjezoelektrinės plokštelės, o pačiame statoriuje suformuojamos skirtingo tipo tolygaus arba netolygaus pasiskirstymo įpjovos. Statoriaus vienas galas įtvirtinamas nejudamai, o priešingame gale patalpinamas sferos formos rotorius. Sukamasis rotorius judės aplink

vieną iš sukimosi ašių gaunamas žadinant atitinkamas pjezoelektrines plokšteles harmoniniu arba neharmoniniu elektriniu signalu, kurio dažnis parenkamas taip, kad užtikrintų statoriaus atitinkamos išilginių ir lenkimo modos superpoziciją. Siekiant keisti sferos formos rotoriaus sukimosi kryptį priešinga, žadinimo signalų fazės pakeičiamos į priešingas.

Patente CN106533254A aprašoma žiedo formos pjezoelektrinė pavara, kuri skirta sukurti sferos formos rotoriaus trijų laisvės laipsnių sukamąjį judesį. Pavaros statorių sudaro du žiedai, kurie neišardomai patalpinti vienas į kitą. Ant išorinio žiedo viršutinio ir apatinio paviršių, neišardomai, patalpinti pjezoelektriniai žiedai, kurių viršutiniai elektrodai padalinti į keturias dalis, o ant vidinio žiedo viršutinio ir apatinio paviršių patalpinti pjezoelektriniai žiedai, kurių viršutiniai ir apatiniai elektrodai padalinti į dešimt dalių. Ties vidinio žiedo vidiniu skersmeniu kas 90 laipsnių patalpintos keturios atramos, ant kurių patalpinamas sferos formos rotorius, o visa pavaros konstrukcija įtvirtinama apvalaus vamzdžio formos įtvirtinime. Siekiant gauti sferos formos rotoriaus sukamąjį judesį apie Z ašį, pavaros statoriuje, pasitelkiant du harmoninius signalus, kurių fazių skirtumas yra $\pi/2$, sinchroniškai žadinami radialiniai ir lenkimo virpesiai ko pasėkoje sukuriama kryptingai bėgančios bangos virpesiai, kurie sukuria kontaktų elipsines judesio trajektorijas. Derinant žadinimo signalų fazes ir žadinimo schemas atitinkamai sukuriama sferos formos rotoriaus judesiai apie X ir Y ašis.

Patente TW201214943A aprašoma pjezoelektrinė pavara, kurios konstrukcija užtikrina trijų laisvės laipsnių, sferos formos rotoriaus sukamąjį judesį. Pavara sudaryta iš keturių stačiakampių pjezoelektrinių bimorfinių plokštelių, kurios neišardomai sumontuotos ant disko formos statoriaus viršutinio paviršiaus jas paskirstant tolygiai statoriaus vertikaliosios ašies atžvilgiu. Prie viršutinių pjezoelektrinių bimorfinių plokštelių paviršių, paspyruokliuotai, prispaudžiamas diskas, kurio centre neišardomai suformuota tuščiavidurio cilindro formos atrama, ant kurios patalpinamas sferos formos rotorius. Siekiant gauti sukamąjį sferos formos rotoriaus judesį apie X ašį, pjezoelektrinių bimorfinių plokštelių pora, kurių ilgasis kraštas lygiagretus sukimosi ašiai, žadinamos dviem elektriniais signalais, kurių fazės skiriasi dydžiu π . Likusios dvi bimorfinės plokštelės nežadinamos ir lieka pasyvios. Siekiant gauti sferos formos rotoriaus sukimąsi apie Y ašį, žadinimo signalai perjungiami į stačiakampes pjezoelektrines bimorfines plokšteles, kurios lygiagrečios Y ašiai. Rotoriaus sukimasis judesys apie Z ašį gaunamas vienu metu žadinant visas stačiakampes pjezoelektrines bimorfines plokšteles keturiais elektriniais signalais, kurių fazių skirtumas

yra $\pi/2$ taip sukuriant bėgančios bangos virpesius. Siekiant gauti priešingą sukimąsi apie bet kurią iš ašių, žadinimo signalų fazės keičiamos į priešingas.

IŠRADIMO ĖSMĖ

Išradimo tikslas – padidinti pjezoelektrinės pavaros dinamines charakteristikas, tiksrumą bei pagerinti jos funkcionalumą.

Išradimo tikslas pasiekiamas tuo, kad pjezoelektrinėje pavaroje, kurią sudaro statorius, sudarytas iš trijų stačiakampių pjezoelektrinių bimorfinių plokštelių tarpusavyje sujungtų stačiakampėmis atramomis taip suformuojant trikampio formos konstrukciją, sujungtą su įtvirtinimo žiedu, kontakto su sferos formos rotoriumi zonoje, realizuoto kaip cilindro formos atrama ir patalpinto ant kiekvienos bimorfinės plokštelės viršutinio paviršiaus, elektrinių signalų pagalba generuojami lenkimo virpesiai, kurių amplitudės yra didinamos parenkant bimorfinių plokštelių tvirtinimo vietas taip, kad sutaptų su plokštelės pirmos lenkimo virpesių modos mazginėmis zonomis ir sumažintų konstrukcijos struktūrinį standumą, o cilindro formos atramų vieta ant plokštelės paviršiaus parenkama taip, kad sutaptų su antros lenkimo virpesių modos centrine mazgine zona bei pirmos lenkimo virpesių modos pūpsniu.

Siekiant pagerinti pjezoelektrinės pavaros tiksrumą ir dinamines charakteristikas, cilindro formos atramų ir stačiakampių tvirtinimo atramų matmenys parenkami taip, kad užtikrintų mažiausią galimą visos konstrukcijos struktūrinį standumą.

Siekiant praplėsti pjezoelektrinės pavaros funkcionalumą, stačiakampės pjezoelektrinės bimorfinės plokštelės žadinamos pjūklo formos elektriniu signalu, kurio dažnis artimas arba lygus pirmos lenkimo virpesių modos rezonansiniam dažniui taip sugeneruojant sferos formos rotoriaus kampinius posūkius apie tris ašis, kurių kryptis sutampa su žadinamos stačiakampės bimorfinės plokštelės ilgąja simetrijos ašimi. Siekiant gauti rotoriaus kampinį posūkį apie ašį, statmeną pjezoelektrinės bimorfinės plokštelės viršutiniame paviršiui, stačiakampės pjezoelektrinės bimorfinės plokštelės sinchroniškai žadinamos pjūklo formos elektriniu signalu, kurio dažnis lygus arba artimas bimorfinių plokštelių antros lenkimo virpesių modos rezonansiniam dažniui.

Kai visos pjezoelektrinės bimorfinės plokštelės žadinamo nuolatinės srovės signalu, tuomet yra sužadinamos plokštelių kvazistatinės pirmos lenkimo modos deformacijos, kurios sugeneruoja rotoriaus linijinį poslinkį statmena plokštelių viršutiniame paviršiui kryptimi su labai aukšta judesio skiriamąją geba.

BRĖŽINIŲ APRAŠYMAS

Brėžinių paveikslai yra pateikti kaip nuoroda į galimą išradimo įgyvendinimą ir neturi riboti išradimo apimtį. Nei vienas iš pateiktų brėžinių ir grafikų neturėtų būti laikomi ribojančiais, o tik kaip galimi išradimo įgyvendinimo pavyzdžiai.

- 5 **Pav. 1 a,b** Inercinė keturių laisvės laipsnių pjezoelektrinė pvara:
- (a) – izometrinis inercinės keturių laisvės laipsnių pjezoelektrinės pavaros vaizdas;
 - (b) – išskleistinis inercinės keturių laisvės laipsnių pjezoelektrinės pavaros vaizdas;
- 10 **Pav. 2 a,b** Inercinės keturių laisvės laipsnių pjezoelektrinės pavaros statorius;
- (a) – izometrinis inercinės keturių laisvės laipsnių pjezoelektrinės pavaros statoriaus vaizdas;
 - (b) – išskleistinis inercinės keturių laisvės laipsnių pjezoelektrinės pavaros statoriaus vaizdas;
- 15 **Pav. 3 a,b** Inercinės keturių laisvės laipsnių pjezoelektrinės pavaros žadinimo schema;
- (a) – inercinės keturių laisvės laipsnių pjezoelektrinės pavaros statoriaus vaizdas iš viršaus;
 - (b) – inercinės keturių laisvės laipsnių pjezoelektrinės pavaros statoriaus vaizdas iš apačios;
- 20 **Pav. 4 a,b** Inercinės keturių laisvės laipsnių pjezoelektrinės pavaros statoriaus deformacijų modos;
- (a) – pirma lenkimo deformacija moda;
 - (b) – antra lenkimo deformacijų moda;

BRĖŽINIAI – pažymėtų objektų aprašymas

- 25
- 1 – sferos formos rotorius;
 - 2 – pavaros statorius;
 - 3 – statoriaus tvirtinimo plokštė;
 - 4 – statoriaus įtvirtinimo varžtai;
 - 5 – cilindro formos atramos;
- 30
- 6 – stačiakampės atramos;
 - 7 – pjezoelektrinė plokštelė;

- 8 – statoriaus įtvirtinimo zonos;
- 9 – statoriaus įtvirtinimo žiedas;
- 10 – stačiakampė tampri plokštelė;
- 11 – cilindro formos atramų įtvirtinimo ertmės;
- 12 – pjezoelektrinių plokštelių poliarizacijų kryptys;
- 13 – pirma pjezoelektrinių plokštelių grupė;
- 14 – antra pjezoelektrinių plokštelių grupė;
- 15 – elektrinių signalų generatorius;
- 16 – stačiakampė pjezoelektrinė bimorfinė plokštelė;

5

10

DETALUS IŠRADIMO APRAŠYMAS

Čia ir toliau slenkamojo - sukamojo judesio keturių laisvės laipsnių pjezoelektrinė pavana aprašoma su nuorodomis į brėžinius, tačiau techninis pjezoelektrinės pavaros įgyvendinimas nėra ribojamas pateiktu būdu. Galimos įvairios įgyvendinimo būdo modifikacijos ir tobulinimai.

Detalus pjezoelektrinės pavaros aprašymas. Inercinę keturių laisvės laipsnių pjezoelektrinę pavara sudaro pavaros statorius (2), sudarytas iš trijų stačiakampių tamprių plokštelių (10), ant kurių viršutinio ir apatinio paviršių neišardomai patalpinama po keturias pjezoelektrines plokšteles (7), kurių poliarizacijų kryptys (12) nukreiptos pjezoelektrinių plokštelių storio kryptimi, taip suformuojant stačiakampes pjezoelektrines bimorfines plokšteles (16), kurios tarpusavyje sujungiamos stačiakampėmis atramomis (6), iš kurių vidinės atramos neišardomai sujungiamos tarpusavyje, o išorinės neišardomai sujungiamos su statoriaus įtvirtinimo žiedu (9). Stačiakampių atramų (6) ir statoriaus įtvirtinimo žiedo (9) sujungimo vietose suformuojamos statoriaus įtvirtinimo zonos (8). Stačiakampių atramų (6) tvirtinimo prie bimorfinių plokštelių (16) vietos parenkamos taip, kad sutaptų su stačiakampių pjezoelektrinių bimorfinių plokštelių (16) pirmos lenkimo virpesių modos mazginėmis zonomis. Pjezoelektrinėse bimorfinėse plokštelėse (16) suformuotos cilindrinės įtvirtinimo ertmės (11), į kurias neišardomai patalpinamos atramos (5), o jų vieta ant plokštelės (16) paviršiaus parenkama taip, kad sutaptų su bimorfinės plokštelės (16) antros lenkimo virpesių modos centrine mazgine linija ir su pirmos lenkimo modos pūpsniu. Pavaros statorius įtvirtinamas varžtais (4) įtvirtinimo plokštelėje (3) naudojant statoriaus įtvirtinimo zonas (8). Sferos formos rotorius (1) patalpinamas ant cilindro formos atramų (5) laisvųjų galų ir taip suformuojama inercinė pjezoelektrinė keturių laisvės laipsnių pavana.

Pjezoelektrinės pavaros veikimo aprašymas. Sferos formos rotoriaus (1) sukamasis judesys gaunamas kai stačiakampių pjezoelektrinių bimorfinių plokštelių (16) abi pjezoelektrinių plokštelių grupės (13,14) naudojant elektrinių signalų generatorių (15) žadinamos pjūklo formos elektriniu signalu, kurio dažnis lygus arba artimas stačiakampės pjezoelektrinės bimorfinės plokštelės (16) pirmos lenkimo virpesių modos rezonansiniam dažniui. Pirmoje žadinimo fazėje elektrinio signalo įtampa lėtai didėja, todėl stačiakampės pjezoelektrinė bimorfinė plokštelė (16) lėtai lenkiasi pagal pirmą lenkimo virpesių modą ko pasėkoje cilindro formos atrama (5) pakyla ir per trinties jėgą pasuka sferos formos rotorių (1) apie ašį, lygiagrečią žadinamos stačiakampės pjezoelektrinės bimorfinės plokštelės (16) ilgajai simetrijos ašiai. Kai pjūklo formos elektrinio signalo įtampa greitai krenta ir keičia reikšmę į priešingą, pjezoelektrinė bimorfinė plokštelė (16) dideliu greičiu lenkiasi į priešingą

pusę, ko pasėkoje trinties jėga tarp atramos (5) ir sferos formos rotoriaus (1) tampa mažesnė, nei rotoriaus inercijos jėga ir gaunamas praslydimas tarp kontaktinių paviršių, todėl rotorius (1) nepasukamas. Kartojant šį procesą gaunamas tolygus rotoriaus (1) sukamasis judesys. Siekiant gauti priešingos krypties sukamąjį sferos formos rotoriaus (1) judesį, pjūklo formos elektrinio signalo fazė keičiama į priešingą. Norint gauti rotoriaus (1) sukamąjį judesį apie ašį, lygiagrečią kitų stačiakampių pjezoelektrinių bimorfinių plokštelių (16) ilgosioms simetrijos ašims, pjūklo formos elektrinis signalas perjungiamas į atitinkamos stačiakampės pjezoelektrinės bimorfinės plokštelės (16) pjezoelektrinių plokštelių (7) grupės (13,14).

Norint gauti rotoriaus (1) sukamąjį judesį apie vertikalią ašį statmeną statoriaus paviršiui, signalų generatoriumi (15) žadinamos pjezoelektrinių plokštelių (7) grupės (13,14) dviem pjūklo formos elektriniais signalais, kurių dažnis lygus arba artimas stačiakampių pjezoelektrinių bimorfinių plokštelių (16) antros lenkimo virpesių modos rezonansiniam dažniui, o fazių skirtumas lygus π . Vienu signalu žadinama pjezoelektrinių plokštelių grupė 13, kitu signalu – grupė 14. Naudojant tokią pjezoelektrinės pavaros žadinimo schemą, sužadinami visų pjezoelektrinių bimorfinių plokštelių (16) antros lenkimo modos sinchroniniai, nesimetriniai virpesiai ir atitinkamai atramų (5) lenkimo virpesiai, kurie kontakto metu sukuria nesimetrinę trinties jėgą tarp atramų (5) ir rotoriaus (1). Kai elektrinio signalo įtampos reikšmė lėtai didėja, visos trys cilindro formos atramos (5) sinchroniškai pasisuka ir per trinties jėgą pasuka sferos formos rotorių (1) apie vertikalią ašį. Kai elektrinio signalo įtampa per trumpą laiką pakeičia reikšmes į priešingas, tuomet dideliu greičiu atramos (5) grįžta atgal ir gaunamas praslydimas tarp kontaktinių paviršių, todėl rotorius (1) nepasukamas. Kartojant šį procesą, gaunamas tolygus sferos formos rotoriaus (1) sukamasis judesys apie vertikalią ašį. Siekiant gauti priešingos krypties sukamąjį sferos formos rotoriaus (1) judesį apie vertikalią ašį, pjūklo formos elektrinių signalų fazės keičiamos į priešingas.

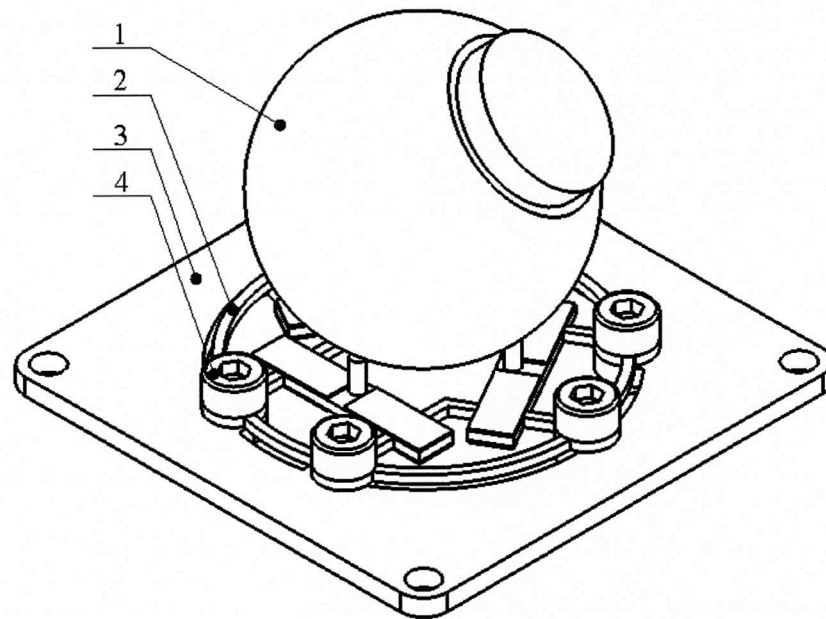
Kai visos pjezoelektrinės bimorfinės plokštelės (16) paveikiamos nuolatinės srovės elektriniu signalu, tuomet yra sužadinamos plokštelių (16) kvazistatinės pirmos lenkimo modos deformacijos, kurios pakelia cilindro formos atramas (5) vertikalia kryptimi ir sugeneruoja rotoriaus (1) linijinį poslinkį statmena plokštelių viršutinio paviršiaus kryptimi su labai aukšta judesio skiriamąją geba.

APIBRĖŽTIS

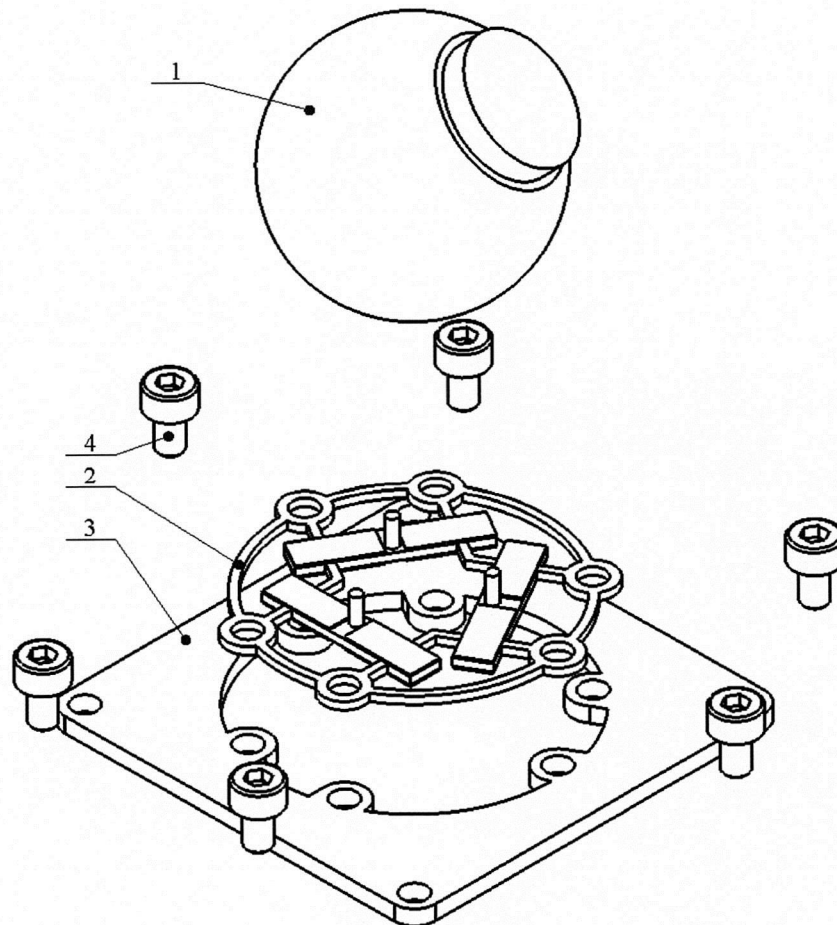
1. Pjezoelektrinė pavara, susidedanti iš statoriaus (2), kurį sudaro trys tarpusavyje sujungtos pjezoelektrinės bimorfinės plokštelės (16) su cilindro formos atramomis (5), sferos formos rotoriaus (1) ir statoriaus įtvirtinimo plokštelės (3) b e s i s k i r i a n t i
 5 tuo, kad trys stačiakampės pjezoelektrinės bimorfinės plokštelės (16) tarpusavyje sujungtos per stačiakampes atramas (6), kurios vidinėje statoriaus (2) dalyje neišardomai sujungtos tarpusavyje, o išorinėje dalyje neišardomai sujungtos su statoriaus įtvirtinimo žiedu (9).
2. Pavara pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad stačiakampių atramų (6)
 10 tvirtinimo vietos prie stačiakampės pjezoelektrinės bimorfinės plokštelės (16) parenkamos taip, kad sutaptų su stačiakampių pjezoelektrinių bimorfinių plokštelių (16) pirmos lenkimo virpesių modų mazginėmis zonomis.
3. Pavara pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad cilindro formos atramų (5)
 15 pozicijos parenkamos taip kad sutaptų stačiakampės pjezoelektrinės bimorfinės plokštelės (16) pirmos lenkimo deformacijų modos poslinkių pūpsniu ir su antros lenkimo deformacijų modos centrine mazgine linija.
4. Pavara pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad sferos formos rotoriaus (1)
 20 sukamasis judesys apie horizontaliąsias sukimosi ašis, kurių kryptis sutampa su stačiakampės pjezoelektrinės bimorfinės plokštelės (16) ilgąją simetrijos ašimi, gaunamas paveikiant stačiakampę pjezoelektrinę bimorfinę plokštelę (16) pjūklo formos elektriniu signalu, kurio dažnis lygus arba artimas pirmos lenkimo deformacijų modos rezonansiniam dažniui. .
5. Pavara pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad sferos formos rotoriaus (1)
 25 sukamasis judesys apie vertikalią sukimosi ašį gaunamas paveikiant visas stačiakampes pjezoelektrines bimorfines plokšteles (16) dvejais pjūklo formos elektriniais signalais, kurių dažnis lygus arba artimas antros lenkimo deformacijos modos rezonansiniam dažniui, o fazių skirtumas yra lygus π .
6. Pavara pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad sferos formos rotoriaus (1)
 30 didelės skyros linijinis poslinkis vertikalia kryptimi gaunamas paveikiant visas stačiakampes pjezoelektrines bimorfines plokšteles (16) nuolatinės srovės elektriniu signalu.



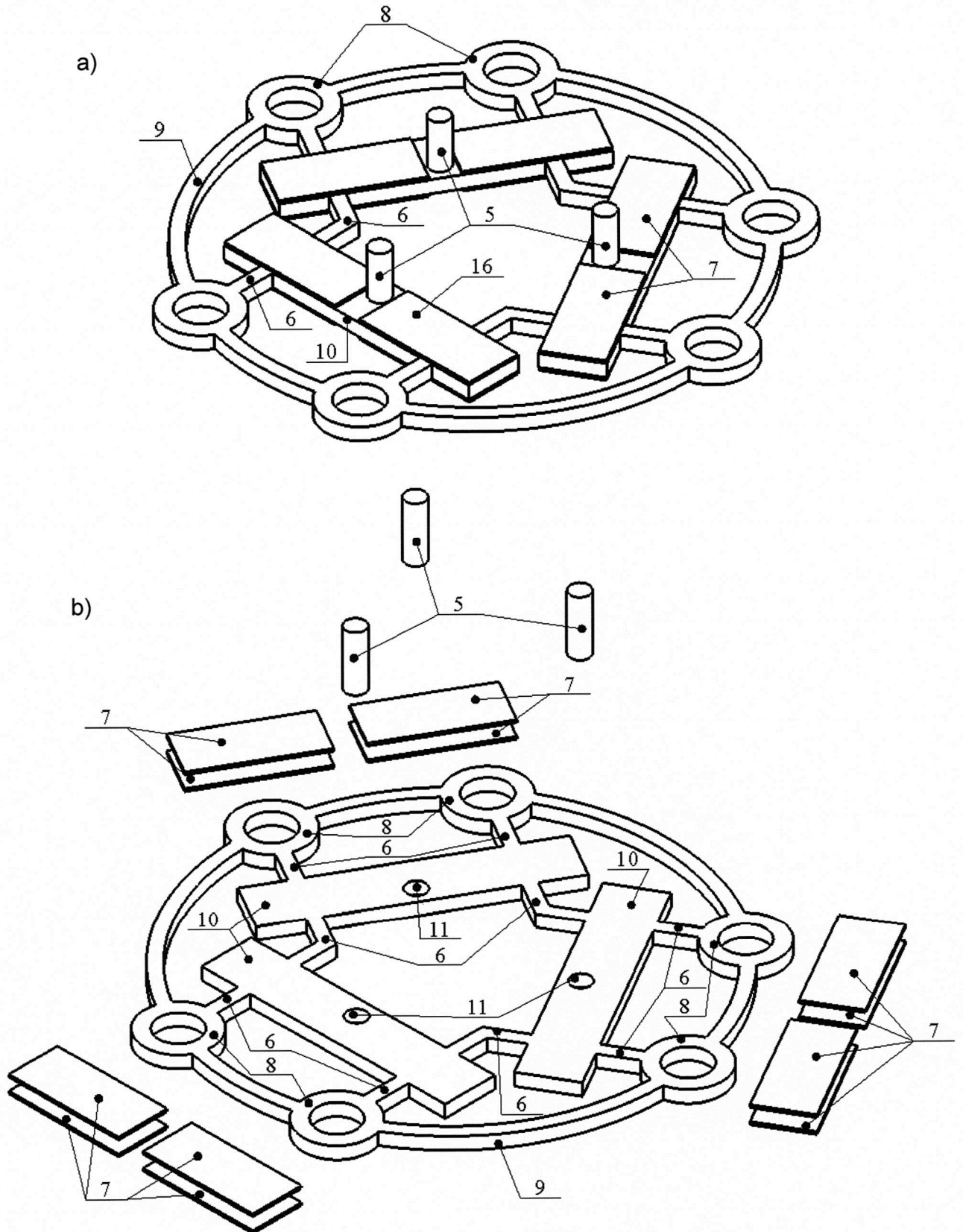
a)

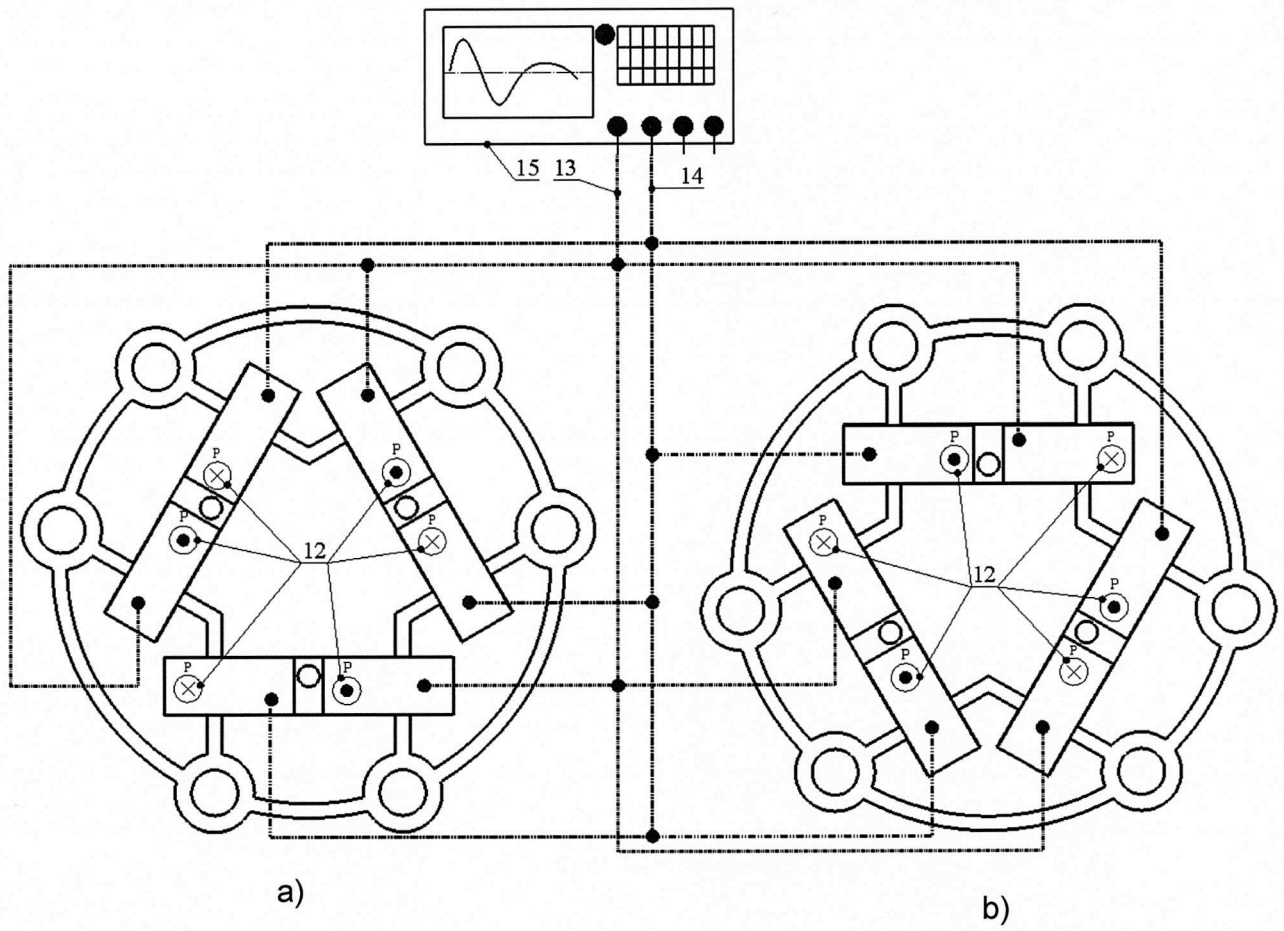


b)



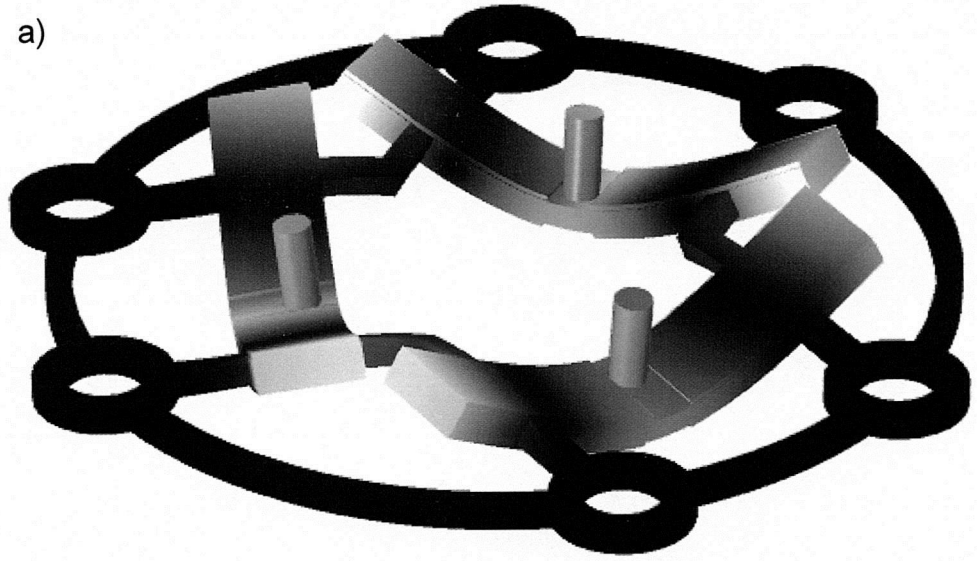
1 pav.



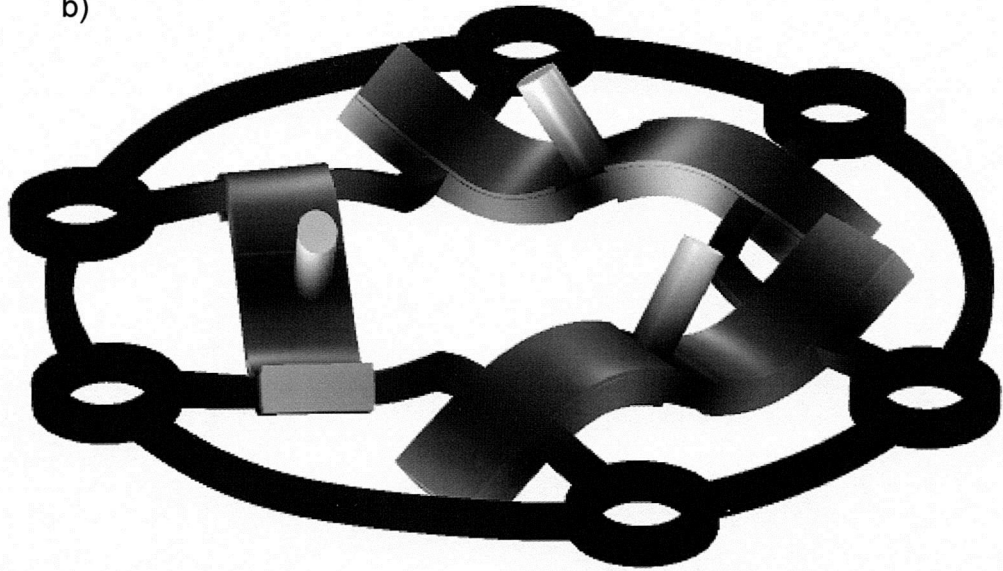


3 pav.

a)



b)



4 pav.