

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(21) Paraiškos numeris: **2022 029**
(22) Paraiškos padavimo data: **2022-12-08**
(41) Paraiškos paskelbimo data: **2023-06-26**
(45) Patento paskelbimo data: **2023-07-25**

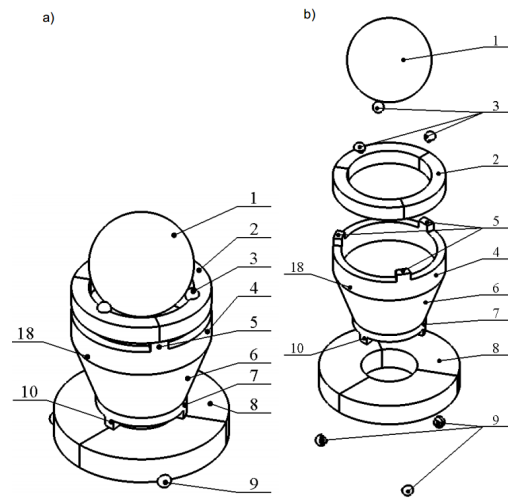
(73) Patento savininkas:
**Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius, LT**
(72) Išradėjas:
**Dalius MAŽEIKA, LT
Andrius ČEPONIS, LT**

LT 7007 B

(54) Pavadinimas:
Penkių laisvės laipsnių pjezoelektrinė pavara

(57) Referatas:

Išradimas skirtas sukurti didelio tikslumo pjezoelektrinę pavara, sukuriančią sferos formos rotoriaus nepriklausomą sukamąjį judesį apie tris ašis ir pačios pavaros slenkamąjį judesį plokštumoje bei pagerinančią dinamines pavaros charakteristikas ir valdymą. Pjezoelektrinė pavara susideda iš dviejų pjezoelektrinių žiedų (2, 8), pritvirtintų ant tamprių atramų (5,10), neišardomai sumontuotų ant tampriųjų žiedų (4,7) ir sujungtų tamprių kūgiu (6). Ant abiejų pjezoelektrinių žiedų sumontuota po tris sferos formos kontaktus (3, 9). Ant viršutinių kontaktų slystamai patalpintas rotorius (1), o apatiniiais kontaktais pavara kontaktuoja su plokščiu kietu paviršiumi. Pavaros sukamasis arba slenkamasis judesys gaunamas žadinant pjezoelektrinius žiedus nehormoniniu, nesimetriniu elektriniu signalu. Pavaros dinaminės charakteristikos didinamos, kai tamprių atramų rezonansinis dažnis sutampa su pjezoelektrinio žiedo lenkimo virpesių rezonansiniu dažniu, o atramų tvirtinimo vietos atitinka pjezoelektrinio žiedo virpesių mazgus. Pavaros sukamojo ir slenkamojo judesio valdymas gerinamas naudojant kūgio formos statorių, kas leidžia sumažinti virpesių perdavimą iš viršutinio tampraus žiedo į apatinius kontaktinius elementus ir atvirkščiai.



1 pav.

TECHNIKOS SRITIS

Išradimas priskiriamas elektro-mechaninių, mechatroninių sistemų ir robototeknikos sritims. Tai pavara, skirta sukurti didelio tikslumo daugiafunkcines sukamojo ir slenkamojo judesio sistemas, įskaitant ir reversines, ir gali būti taikoma tiksliose slenkamojo ir 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

Sparčiai vystantis precizinėms pozicionavimo, optikos ir mikroskopijos sistemoms, siekiama didinti jų skiriamąją gebą ir tikslumą. Kuriant daugiafunkcines precazines daugelio laisvės laipsnių pozicionavimo sistemas, susiduriama su problema mažinant pavarų skaičių ir jų užimamą tūrį bei gerinant ir plečiant jų funkcionalumą. Klasikinių elektromagnetinių pavarų taikymas daugiafunkcinėse daugelio laisvės laipsnių pozicionavimo sistemose yra ribotas dėl konstrukcinių ypatumų, susijusių su tuo, kad pavaros elektromagnetinis vykdiklis sukuria vieno laisvės laipsnio judesį, todėl tampa komplikotos vykdklių integravimo galimybės daugiafunkcinėse daugelio laisvės laipsnių pozicionavimo sistemose. Viena iš mokslinių tyrimų kryptių yra siejama su daugelio laisvės laipsnių daugiafunkcinių pjezoelektrinių pavarų ir vykdklių kūrimu, kuriuose varomosios grandies ar visos pozicionavimo sistemos sukamieji ir/ar slenkamieji judesiai sukuriama ne elektromagnetiniu principu, o transformuojant elektrinę energiją į aukšto dažnio mechaninius virpesius, kurie užtikrina varomosios grandies ar visos pozicionavimo sistemos slenkamąjį ir/arba sukamąjį judesius. Valdant vykdklio mechaninių virpesių modas ir amplitudes, galima pasiekti kelių laisvės laipsnių nanometrinės skyros varomosios grandies ar visos pozicionavimo sistemos judesius. Tai leidžia supaprastinti pavaros konstrukciją, sumažinti mechatroninių sistemų gabaritus, padidinti įrenginių funkcionalumą ir kurti integruotas mechatronines pozicionavimo sistemas.

Žinoma pjezoelektrinė pavara, aprašyta patente CN204505286U, kuri suteikia galimybę sukurti dviejų laisvės laipsnių sukamąjį judesį. Pavara sudaryta iš cilindro formos pjezoelektrinio vykdklio su dvejomis pjezoelektrinių žiedų grupėmis.

Ant viršutinio, cilindro formos vykdiklio, paviršiaus patalpintas sferos formos rotorius, kuris sujungtas su žiedo formos konstrukcija, kuri generuoja rotoriaus sukamąjį judesį aplink vykdiklio simetrijos ašį. Pavaros veikimo principas pagrįstas cilindro formos vykdiklio statoriaus lenkimo virpesių žadinimu paveikiant skirtingas pjezoelektrinių žiedų grupes dvejais harmoniniais signalais, kurių fazių skirtumas yra $\pi/2$. Statoriaus virpesiai generuoja rotoriaus sukamuosius judesius, panaudojant trinties jėgą, kuri reguliuojama naudojant kintamo standumo spyruoklę sumontuotą apatinėje pavaros dalyje. Atsižvelgiant į pavaros konstrukciją ir veikimo principą galima teigti, kad sukamojo judesio rezoliucija tiesiogiai priklausys nuo trinties jėgos ir elektrinių signalų amplitudžių, naudojamų žadinti pavarą, todėl pasiekiamas lankstus judesių rezoliucijos valdymas. Kita vertus, pavaros konstrukcija yra sudėtinga, jos užimamas tūris yra pakankamai didelis, todėl tokios pavaros integravimas į mažo tūrio pozicionavimo sistemas tampa sudėtingu ir komplikuoju.

Patente CN106877734B aprašoma pjezoelektrinė pavana, kuri naudojama siekiant gauti šešių laisvės laipsnių slenkamuosius - sukamuosius plokščios platformos judesius. Pavana sudaryta iš keturių vienodų pjezoelektrinių keitiklių sujungtų į vieną kryžiaus formos konstrukciją, o varomoji dalis yra patalpinta ant viršutinės, kryžiaus formos konstrukcijos dalies. Pati konstrukcija yra įtvirtinta nejudamai centrinėje apatinėje kryžiaus formos dalyje. Pjezoelektrinius keitikius sudaro cilindro formos strypas, dvi pjezoelektrinių žiedų grupės kurių elektrodai padalinti horizontaliai ir vertikalčiai ir cilindro formos atsvaras. Pavaros veikimo principas pagrįstas dvejomis pirmomis statmenomis cilindro formos strypo lenkimo virpesių modomis, kurių žadinimas gaunamas paveikiant dvi pjezoelektrinių žiedų grupes dvejais harmoniniais signalais, kurių fazių skirtumas $\pi/2$. Siekiant gauti slenkamuosius – sukamuosius plokščios platformos judesius, taikomos skirtingos, pjezoelektrinių keitiklių, žadinimo schemas ir jų žadinimo seka. Pavyzdžiui, norit gauti slenkamąjį platformos judesį Y kryptimi, sinchroniškai žadinami du priešais vienas kitą esantys pjezoelektriniai keitikius, o siekiant gauti sukamąjį platformos judesį aplink Z ašį sinchroniškai žadinami du šalimais esantys pjezoelektriniai keitikius. Atsižvelgiant į pavaros konstrukciją galima teigti kad pavaros integravimas į mažo tūrio, didelio tikslumo sistemas yra ribotas dėl ribotų galimybių masteliuoti pavarą. Taip pat, pavaros konstrukcija yra sudaryta iš keturių skirtingų pjezoelektrinių keitiklių kas įtakoja sudėtingą judesio rezoliucijos valdymą ir kontrolę ko pasėkoje atsiranda

poreikis taikyti sudėtingą valdymo ir grįžtamojo ryšio sistemą.

Patente CN109861580B aprašoma šešių laisvės laipsnių pjezoelektrinė pavara, kuri gali užtikrinti sferos formos rotoriaus sukamuosius ir plokščios platformos slenkamuosius judesius. Pjezoelektrinė pavara sudaryta iš dviejų dalių atsakingų už sukamojo ir slenkamojo judesių sukūrimą, kol šios dalys tarpusavyje susiejamos suformuojant bendrą pavaros konstrukciją. Pavaros dalis, atsakinga už sferos formos rotoriaus sukamuosius judesius, sudaryta iš pjezoelektrinių žiedų, kurių viršutiniai elektrodai padalyti į keturias lygias dalis, o žiedai sukomponuoti į vieną daugiasluksnį paketą. Sferos formos rotorius patalpintas ant viršutinio pjezoelektrinių žiedų paketo paviršiaus.

Siekiant gauti sukamuosius, sferos formos rotoriaus, judesius du priešais vienas kitą esantys elektrodai paveikiami pjūklo formos signalais, kurių fazių skirtumas yra π taip sužadinant daugiasluksnio paketo nesimetrinius lenkimo virpesius, kurie kontaktuojant su sfera transformuojami į kryptingus sferos formos rotoriaus sukamuosius judesius, kurių sukimosi ašis yra statmena daugiasluksnio paketo lenkimo virpesių kryptims. Siekiant gauti kitų kryptių sukamuosius rotoriaus judesius, žadinamos skirtingos elektrodų poros. Pavaros dalis, generuojanti slenkamąjį judesį, sudaryta iš pjezoelektrinių žiedų, kurių viršutiniai elektrodai padalyti į keturias lygias dalis, kol patys žiedai sukomponuoti į daugiasluksnį pjezoelektrinį paketą, o ant apatinio, šio paketo paviršiaus, sumontuotas kūgio formos koncentratorius, kurio smailioji dalis atremta į plokščią platformą. Siekiant gauti slenkamuosius platformos judesius, du, vienas priešais kitą esantys elektrodai, žadinami dviem pjūklo formos elektriniais signalais, kurių fazių skirtumas yra π . Tokiu būdu sužadinami paketo ir kūgio formos koncentratoriaus lenkimo virpesiai ir gaunamas kryptingas plokščios platformos slenkamasis judesys, generuojamas taikant inercinį principą. Platformos judesio kryptis sutampa su linija, jungiančia žadinamų elektrodų centrus jungiančia linija. Siekiant gauti skirtingų kryptių lenkiamuosius kūgio formos koncentratoriaus virpesius, žadinamos skirtingos elektrodų poros. Atsižvelgiant į pavaros konstrukciją ir veikimo principą galima teigti, kad konstrukcija yra sudėtinga ir turi ribotą masteliavimo galimybę, todėl jos taikymas mažo tūrio pozicionavimo sistemose yra ribotas. Taip pat, šios pavaros tvirtinimo ir apkrovos prispaudimo mechanizmo konstrukcija yra sudėtinga, kas apriboja šios pavaros taikymo galimybes.

IŠRADIMO ESMĖ

Išradimo tikslas – padidinti pjezoelektrinės pavaros tikslumą ir pavaros dinamines charakteristikas bei pagerinti judesio krypties valdymą.

Išradimo tikslas pasiekiamas tuo, kad pjezoelektrinėje pvaroje, susidedančioje iš kūgio formos tampraus tuščiavidurio statoriaus, sudaryto iš tuščiavidurio tampraus kūgio ir jo galuose patalpintų tamprių žiedų, pagamintų iš tokios pačios medžiagos kaip ir tuščiaviduris kūgis, o jų vidinis skersmuo lygus atitinkamai kūgio pagrindo ir viršūnės skersmenis. Ant abiejų žiedų viršutinio paviršiaus sumontuotos tamprios atramos, esančios neatsiejamos kūgio formos statoriaus dalys. Po tris atramas yra viršutinėje ir apatinėje statoriaus dalyje, kurios išdėstytos kas 120° . Atramų pozicija viršutinėje ir apatinėje dalyje perstumtos 60° . Ant atramų neišardomai tvirtinami skirtingo dydžio pjezoelektriniai žiedai, kurių elektrodai padalinti į tris lygias dalis. Ant viršutinio ir apatinio piezoelektrinio žiedų ties išoriniu ir vidiniu šių žiedų skersmeniu kas 120° sumontuoti trys sferos formos kontaktiniai elementai, kurių pozicijos skirtumas tarp viršutinio ir apatinio paviršiaus kontaktinių elementų yra 60° . Ant viršutinių sferos formos kontaktų slystamai patalpinamas sferos formos rotorius, o kontaktiniai elementai, esantys ant apatinio žiedo yra slystamai patalpinama ant kieto plokščio paviršiaus, kurie leidžia generuoti slenkamąjį pavaros judesį. Žadinant nesimetriniais elektriniais signalais pjezoelektrinių žiedų atitinkamą elektrodą, kontakto zonoje sugeneruojami statoriaus mechaniniai virpesiai, kurie frikcinio kontakto metu transformuojami į didelio tikslumo rotorius sukamąjį arba pačios pavaros slenkamąjį poslinkį.

Siekiant pagerinti pjezoelektrinės pavaros sukamojo ir slenkamojo judesio valdymą, statorius turi kūgio formą ir gaminamas iš tamprios medžiagos, ko pasėkoje gaunamas skirtingas viršutinės ir apatinės dalies standumas, kas leidžia sumažinti virpesių perdavimą iš viršutinio tampraus žiedo į apatinius kontaktinius elementus, kai žadinamas viršutinis pjezoelektrinis žiedas ir atvirkščiai. Kūgio formos statoriaus, viršutinės ir apatinės dalies standumo skirtumai parenkami taip kad plačioji kūgio formos statoriaus dalis atitiktų viršutinio pjezoelektrinio žiedo išorinį skersmenį, o apatinės kūgio dalies skersmuo atitiktų vidinį apatinio žiedo skersmenį ir turėtų tarpusavio santykį 2 arba daugiau, o kūgio formos statoriaus, įskaitant tampruosius žeidus, aukštis parenkamas taip kad statoriaus mechaninių virpesių dažniai nesutaptų su viršutinio ir apatinio pjezoelektrinių žiedų mechaniniais virpesiais.

Pjezoelektrinio žiedo virpesių perdavimas yra mažinamas naudojant tamprius atraminius elementus, prie kurių tvirtinamas minėtas žiedas, nes atraminių elementų ilgis ir storis parenkami taip, kad jų lenkimo rezonansinis dažnis sutaptų su piezoelektrinio žiedo rezonansiniu dažniu. Pjezoelektrinės pavaros našumas, rotoriaus sukimosi greitis ir pavaros slenkamojo judesio greitis padidėja, kai atramų geometriniai matmenys parenkami taip, kad jų rezonansinis dažnis, atitinkantis pirmą lenkimo virpesių modą sutaptų su pjezoelektrinio žiedo, tvirtinamo prie atramų, lenkimo virpesių rezonansiniu dažniu, o atramų tvirtinimo vietos atitiktų pjezoelektrinio žiedo virpesių mazgus ir tarp viršutinių ir apatinių atramų tvirtinimo vietų yra išlaikomas 60° kampinis skirtumas.

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.

Pav. 1 a,b Penkių laisvės laipsnių pjezoelektrinė pavana:

(a) – izometrinis penkių laisvės laipsnių pjezoelektrinės pavaros vaizdas;

(b) – išskleistinis penkių laisvės laipsnių pjezoelektrinės pavaros;

Pav. 2 Penkių laisvės laipsnių pjezoelektrinės pavaros žadinimo schema;

Pav. 3 Penkių laisvės laipsnių pjezoelektrinės pavaros virpesių modos, naudojamos slenkamajam – sukamajam judesiui gauti;

(a) – virpesių moda, naudojama sukamajam sferos formos rotoriaus judesiui gauti;

(b) – virpesių moda, naudojama slenkamajam pavaros judesiui gauti;

BRĖŽINIAI – pažymėtų objektų aprašymas

1 – sferos formos rotorius;

2 – viršutinis pjezoelektrinis žiedas;

3 – sferos formos kontaktai montuojami vidiniame viršutinio žiedo skersmenyje;

- 4 – viršutinis tamprus žiedas;
- 5 – viršutinės atramos;
- 6 – tamprus kūgis;
- 7 – apatinis tamprus žiedas;
- 8 – apatinis pjezoelektrinis žiedas;
- 9 – sferos formos kontaktai montuojami išoriniame apatinio žiedo skersmenyje;
- 10 – apatinės atramos;
- 11 – elektrinių signalų generatorius;
- 12,13 – elektrinių žadinimo signalų komutatoriai;
- 14 – apatinio žiedo poliarizacijos kryptis;
- 15 – viršutinio žiedo poliarizacijos kryptis;
- 16 – viršutinis elektrodas;
- 17 – apatinis elektrodas;
- 18 – pjezoelektrinė pavara.

DETALUS IŠRADIMO APRAŠYMAS

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

Detalus pavaros aprašymas. Pjezoelektrinę penkių laisvės laipsnių pavarą (18) sudaro statorius, sudarytas iš viršutinio tampraus žiedo (4), tampraus kūgio (6) ir apatinio tampraus žiedo (7) kurie tarpusavyje sujungti neišardomai. Laisvuosiuose tampriųjų žiedų (4,7) plokštumose neišardomai patalpintos viršutinės ir apatinės atramos (5,10), išdėstytos kas 120° , o kampinis skirtumas tarp viršutinių ir apatinių atramų išdėstymo yra 60° . Prie atramų (5,10) tampriai montuojami viršutinis ir apatinis pjezoelektriniai žiedai (2,8), kurių viršutinis ir apatinis elektrodai (16, 17) padalinti į tris lygias dalis, o viršutinio ir apatinio žiedo poliarizacijos vektoriai (14,15)

yra nukreiptos žiedo storio kryptimi ir yra priešingos krypties. Viršutinio pjezoelektrinio žiedo (2) vidiniame skersmenyje kas 120° tampriai sumontuoti trys sferos formos kontaktai (3) ant kurių slystamai patalpinamas sferos formos rotorius (1). Viršutinių atramų (5) ir viršutinių kontaktų (3) tarpusavio kampinis skirtumas yra 60° . Apatinio pjezoelektrinio žiedo (8) išoriniame skersmenyje tamprai sumontuoti trys sferos formos kontaktai (9), kurie išdėstyti kas 120° , o apatinių kontaktų (9) ir apatinių atramų (10) tarpusavio kampinis skirtumas yra 60° .

Pjezoelektrinės pavaros veikimo aprašymas. Sferos formos rotoriaus (1) sukamasis judesys gaunamas kai į viršutinio pjezoelektrinio žiedo (2) viršutinio elektrodo (16) vieną trečiąją dalį iš signalų generatoriaus (11) per signalų komutatorių (12) paduodamas nesimetrinis elektrinis signalas, kurio dažnis f_1 yra lygus viršutinio pjezoelektrinio žiedo (2) trečiai lenkimo virpesių modai ko pasėkoje atitinkamas viršutinis sferos formos kontaktas (3) per trinties jėgą į sferos formos rotorių (1) perduoda nesimetrinius mechaninius viršutinio pjezoelektrinio žiedo (2) virpesius, kurie transformuojami į sukamąjį sferos formos rotoriaus (1) judesį, kurio sukimosi ašis yra statmena nesimetriniams mechaniniams atitinkamo viršutinio sferos formos kontakto (3) virpesiams. Norint gauti sferos formos rotoriaus (1) sukimąsi trimis skirtingomis kryptimis, nesimetrinis elektrinis signalas iš signalų generatoriaus (11) per signalų komutatorių (12) paduodamas, į pasirinktą vieną trečiąją viršutinio elektrodo (16) dalį, kurio dėka sukuriama nesimetriniai mechaniniai virpesiai statmeni numatyta sferos formos rotoriaus (1) sukimosi ašiai. Taip perjunginėjant žadinimo signalą tarp elektrodų gaunamas trijų laisvės laipsnių rotoriaus sukamasis judesys.

Siekiant sumažinti viršutinio pjezoelektrinio žiedo (2) virpesių perdavimą į statorių ir apatinį pjezoelektrinį žiedą (8), viršutinių atramų (5) geometriniai matmenys parenkami taip, kad jų pirmas lenkimo virpesių rezonansinis dažnis sutaptų su viršutinio pjezoelektrinio žiedo (2) trečiu lenkimo virpesių rezonansiniu dažniu f_2 , kuris nesutampa su dažniu f_1 .

Slenkamasis visos pavaros (18), įskaitant sferos formos rotorių (1), judėjimas plokštumoje gaunamas kai į apatinio pjezoelektrinio žiedo (8) vieną trečiąją apatinio elektrodo (17) dalį iš signalų generatoriaus (11) per signalų komutatorių (13) paduodamas nesimetrinis elektrinis signalas, kurio dažnis sutampa su apatinio pjezoelektrinio žiedo (8) antrąją lenkimo deformacijų moda, ko pasėkoje atitinkamas apatinis sferos formos kontaktas (9), per trinties jėgą, perduoda nesimetrinius

mechaninius apatinio pjezoelektrinio žiedo (8) virpesius į kieta, plokščią paviršių taip, kad inertiniu principu sukuria kryptingą, visos konstrukcijos slenkamąjį judesį, kurio krypties vektorius yra lygiagretus apatinio sferos formos kontakto (9) neharmoninių mechaninių virpesių kryptčiai. Siekiant sumažinti apatinio pjezoelektrinio žiedo (8) virpesių perdavimą į statorių ir viršutinį pjezoelektrinį žiedą (2), apatinių atramų (10) geometriniai matmenys parenkami taip, kad jų pirmas lenkimo virpesių rezonansinis dažnis sutaptų su apatinio pjezoelektrinio žiedo (8) antruoju lenkimo virpesių rezonansiniu dažniu. Norint gauti pavaros (18) slenkamuosius judesius skirtingomis kryptimis plokštumoje, paduodamas nesimetrinis signalas iš signalų generatoriaus (11) per signalų komutatorių (13) į pasirinktą vieną trečiąją apatinio elektrodo dalį (17), kurio dėka bus sukuriami virpesiai lygiagretūs numatyta pavaros (18) poslinkio kryptčiai. .

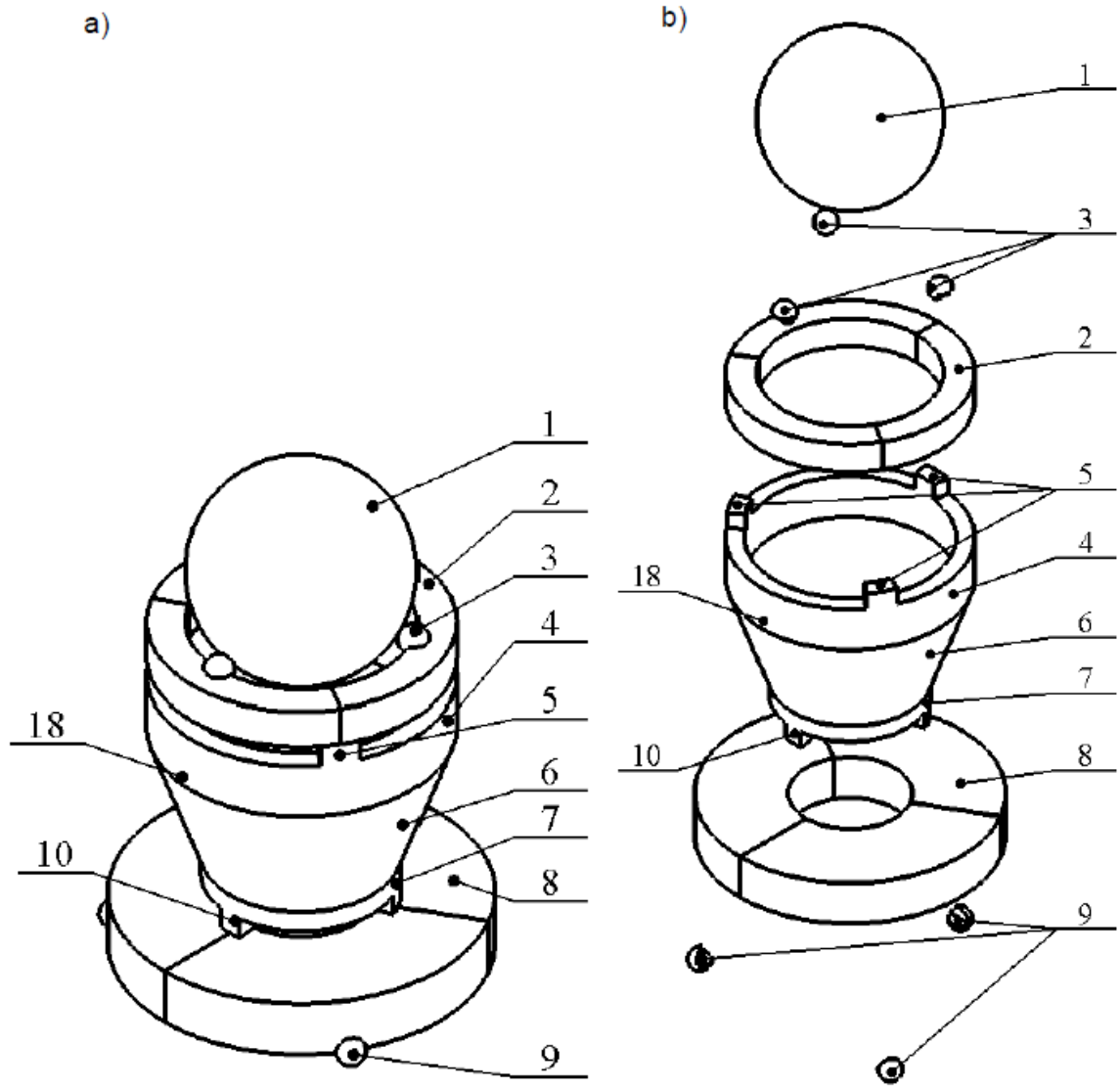
IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Pjezoelektrinė pavara (18), susidedanti iš tampraus statoriaus, dviejų pjezoelektrinių žiedų (2, 8), priklijuotų prie statoriaus, sferos formos rotorius (1) b e s i s k i r i a n t i tuo, kad statorius sudarytas iš tampraus kūgio (6) ir dviejų tamprių žiedų (4, 7), kurie neišardomai sujungti tarpusavyje ir tamprių atramų (5, 10), ant kurių pritvirtinami du pjezoelektriniai žiedai.

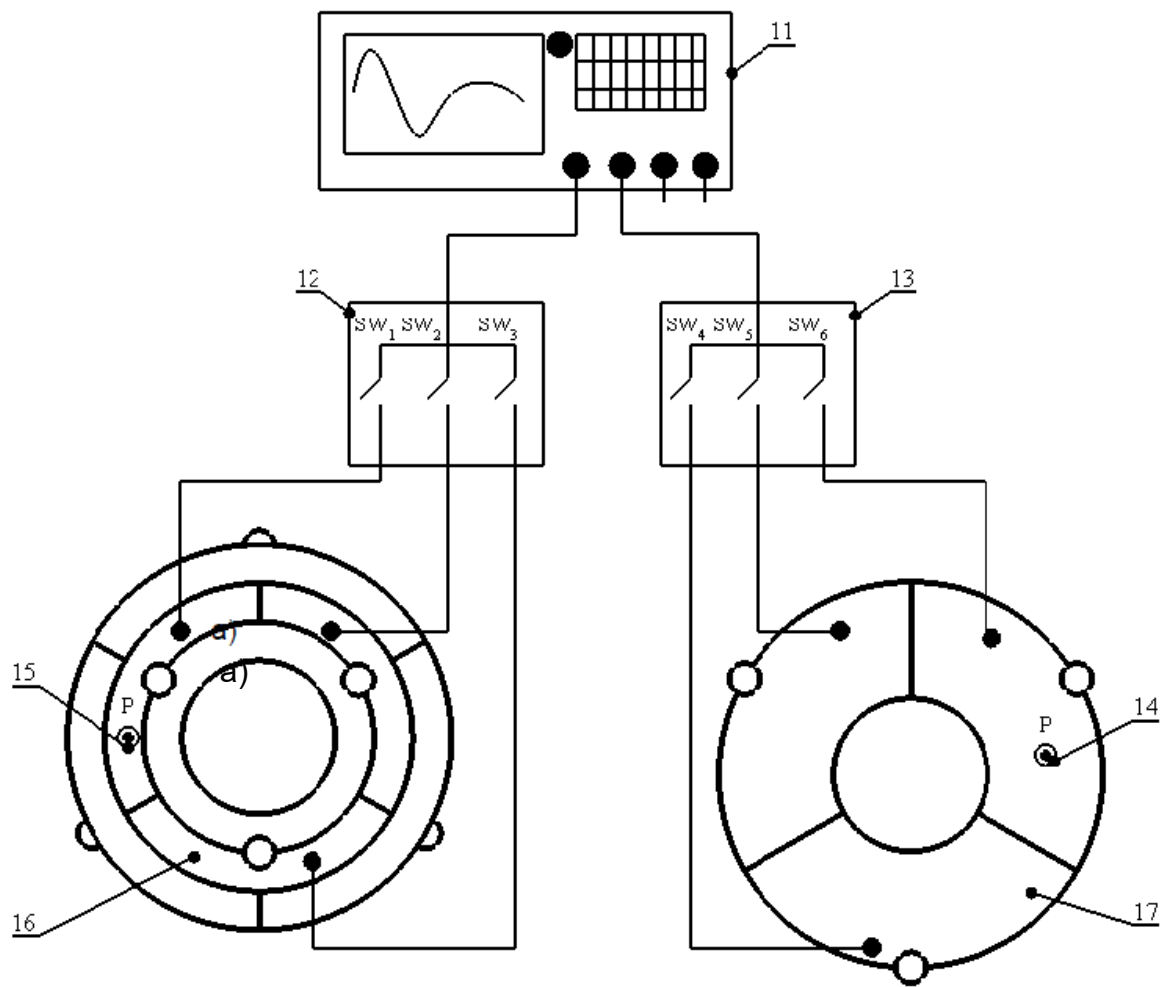
2. Pavara pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad viršutinių ir apatinių atramų (5,10) geometriniai matmenys parenkami taip, kad jų lenkimo virpesių rezonansinis dažnis sutaptų su pjezoelektrinių žiedų (2,8) rezonansinių virpesių dažniu, naudojamu gauti slenkamąjį pavaros (18) arba sukamąjį sferos formos rotorius (1) judesius.

3. Pavara pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, rotorius sukamasis ir pavaros slenkamasis judesiai gaunami atskirai žadinant viršutinį arba apatinį piezoelektrinį žiedus (4, 8) skirtingo dažnio nesimetriniu elektriniu signalu.

4. Pavara pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad viršutinių ir apatinių atramų (5,10) vietos ant tamprių žiedų (4,7) parenkamos taip, sutaptų su tamprių žiedų lenkimo virpesių modos mazgais, o atramų pozicijos skirtumas tarp viršutinio ir apatinio paviršiaus elementų yra 60 laipsnių.

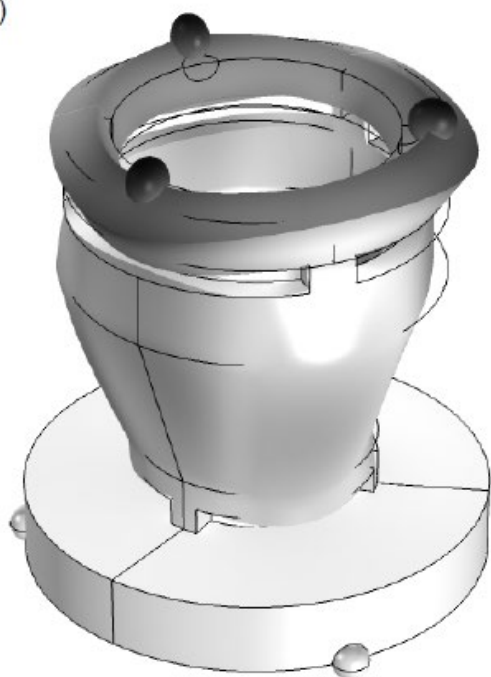


1 pav.

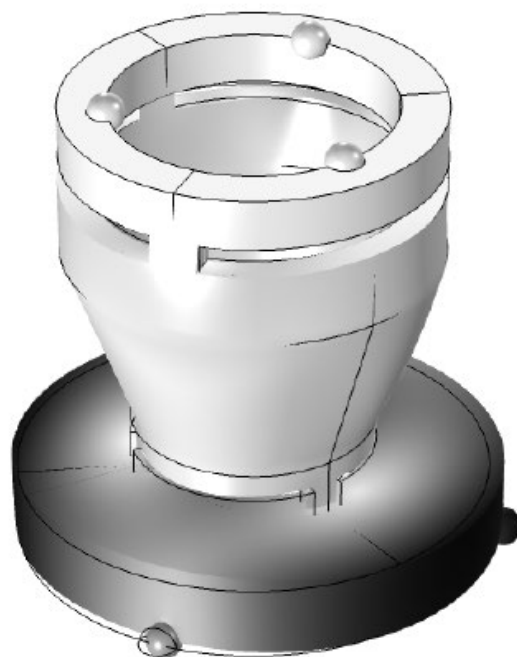


2 pav.

a)



b)



3 pav.