

# PJEZOELEKTRINIAI VIBROVARIKLIAI IR JŲ DINAMIKOS TYRIMAS

Giedrius Raštutis, Ričardas Viktoras Ulozas

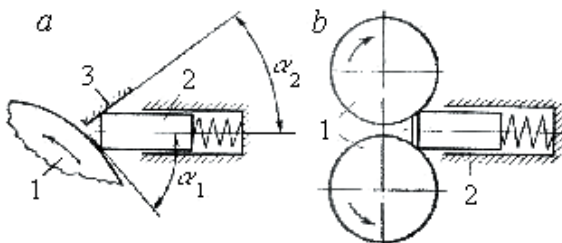
Šiaulių universitetas, Technologijos fakultetas

## Įvadas

Elektros varikliai ne visada atitinka reikalaujamas sąlygas, pavyzdžiui, mažus gabaritus, didelę greitaveiką, aukštą naudingo veikimo koeficientą, galimybę dirbti ekstremaliomis sąlygomis (vakuumė, plačiame temperatūriniame diapazone, esant aukštam radiaciniam fonui). Todėl buvo sukurti naujo tipo varikliai, kurių veikimo principas pagrįstas aukštadažnių virpesių transformavimu į kryptingą judesį. Tokie varikliai TSRS MA filialo mašinų ir mechanizmų teorijos seminare, įvykusiame Kaune 1970 m., buvo įvardyti ir patvirtinti kaip „Vibrovarikliai“ (Bansevičius, Ragulskis, 1981).

Vibrovarikliais vadinami mechanizmai, transformuojantys aukšto dažnio mechaninius virpesius (pradedant nuo 20.000 Hz) į nepertraukiamą arba žingsninį judesį. Tokiu būdu, esminis vibrovariklių skirtumas nuo žinomų mechanizmų, keičiančių svyravimo judesį į sukimo ar tiesialinijinį, – transformuojamų virpesių dažnis. Vibrovariklių virpesių keitikliams buvo panaudoti pjezoelektriniai (pjezokeraminiai) elementai, todėl ir vibrovarikliai vadinami pjezoelektriniais vibrovarikliais (PVBV).

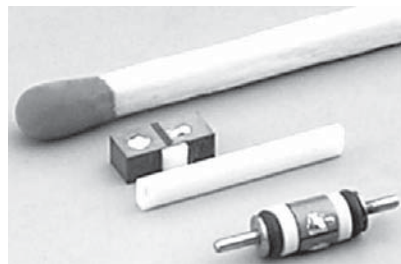
Daugumos PVBV keitiklių virpesių amplitudės gan mažos, išsidėstę  $0,1 \cdot 10^{-3} \div 10 \cdot 10^{-3}$  mm diapazone. Ribinės jų reikšmės sudaro  $0,1 \div 0,2$  mm (Bansevičius, Ragulskis, 1981). Pirmiesiems PVBV buvo panaudotas įstrižas virpesių keitiklio (VK) smūgis į judamą elementą – plokštelę, juostą ar ritinėlį (1 pav.).



**1 pav.** Vibrovariklių, kuriuose panaudojamas įstrižas virpesių keitiklio smūgis į rotorių, schemas (Bansevičius, Ragulskis, 1981): *a* – į vieną rotorių; *b* – į du rotorius; 1 – rotorius, 2 – virpesių keitiklis, 3 – antdėklas;  $\alpha_1$  ir  $\alpha_2$  priklauso nuo rotoriaus 1 ir antdėklo 3 reologinių savybių

Pirmieji vibrovariklių tyrinėjimai parodė jų ypatingas savybes – aukštą skiriamąją gebą persislinkimui, platų temperatūrinį diapazoną, bet kokios parazitinės (kaip magnetinių, elektrinių, radiacinių laukų) įtakos jų darbui nebuvimą. Be to, yra galimybė VBV pagaminti be metalinių detalių, išskyrus laidus, o tai leistų jį pritaikyti tiksluose magnetiniuose ir geodeziniuose prietaisuose. Pagrindinis PVBV privalumas tas, kad jis dirba žingsniniu režimu, o tai leidžia jį tiksliai sustabdyti, ir tai padaroma mažose pasisukimo ar pasislinkimo ribose.

PVBV turi platų pritaikomumą. Jie naudojami medicinos diagnostikoje, chirurgijos technikoje, radiotechnikoje, kompiuterių gamyboje, nes tobulinant mažinami gabaritai, o tai sunku atlikti su iki šiol esančiomis technologijomis. Pritaikant PVBV, tai daroma žymiai lengviau, nes PVBV yra mažų gabaritų ir yra labai tikslūs (2 pav.).



**2 pav.** Miniatiūriniai PVBV (Spanner ir kt., 2006) (degtukas pateiktas PVBV dydžiui palyginti)

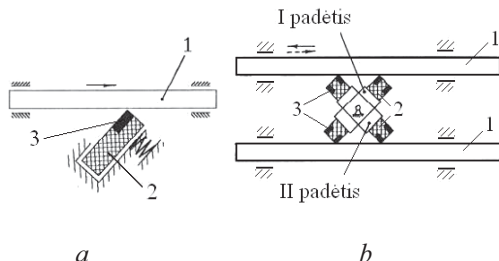
**Straipsnio tikslas** – apžvelgti pjezoelektrinių vibrovariklių veikimo principą ir jų konstrukcijas, eksperimentiškai ištirti dinaminis procesus, vykstančius pjezoelektriniame vibrovariklyje.

## Pjezoelektrinių vibrovariklių veikimo principo ir konstrukcijų analizė

Pirmieji PVBV sukurti jau prieš 40 metų ir toliau intensyviai tobulinami dėl savo plataus pritaikomumo. Jie buvo skirti tiesiaiegiam ar sukamajam darbinio organo (elemento) judesiui gauti.

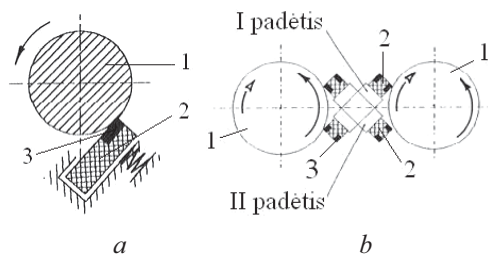
R. Bansevičiaus pateiktoje paprasčiausioje PVBV konstrukcijoje panaudotas įstrižas VK smūgis į judamą elementą – plokštelę, juostą ar ritinėlį (1 pav.). Tokį PVBV nesudėtinga pagaminti ir galima didžiulė konstrukcijų įvairovė.

3 a paveiksle pavaizduota PVBV konstrukcija, kai pjezoelektrinis VK 2 įstrižai veikia (smūgiuoja) į slankiklį 1. Šiame vibrovariklyje slankiklis 1 juda tik viena kryptimi. 3 b paveiksle pjezoelektrinis VK 2 įstrižai veikia į du slankiklius 1. Jie juda priešingomis kryptimis. Pakeitus VK laikiklio padėtį, slankiklių judėjimo kryptį galima pakeisti į priešingą.



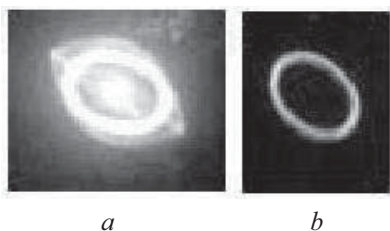
3 pav. Tiesiaeilio judesio PVBV su vienu (a) ir dviem (b) slankikliais 1, 2 – pjezoelektrinis VK, 3 – kontaktinis elementas

4 a paveiksle pavaizduota PVBV konstrukcija, kai pjezoelektrinis VK 2 įstrižai veikia (smūgiuoja) į rotorių 1. Šiame vibrovariklyje rotorius 1 sukasi viena kryptimi. 4 b paveiksle pjezoelektrinis VK 2 įstrižai veikia į du rotorius 1. Jie sukami ta pačia kryptimi. Pakeitus VK laikiklio padėtį, rotorių sukimosi kryptį galima pakeisti į priešingą.



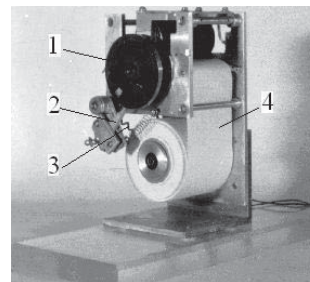
4 pav. Sukamojo judesio PVBV su vienu (a) ir dviem (b) rotoriais 1, 2 – pjezoelektrinis VK, 3 – kontaktinis elementas

„Padavus“ aukštadažnį elektrinį signalą pjezoelektrinio VK, galu tampriai prispausto prie slankiklio ar rotoriaus, elektrodams, VK kontaktinis elementas pradeda judėti elipsės trajektorija ir perstumia slankiklį arba suka rotorius (5 pav.) (Ulonas, 2007).

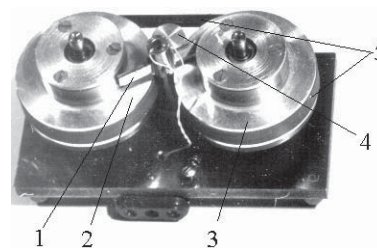


5 pav. VK kontaktinio elemento galo trajektorija: a – aukštadažnio elektrinio signalo padavimo VK elektrodams momentu; b – esant nusistovėjusiam darbo režimui

PVBV konstrukcijos schema (4 a pav.) panaudota popierinės juostos traukimo mechanizmui (6 pav.). Rotorius 1 sukamas tik į vieną pusę.



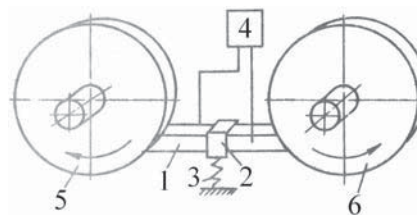
6 pav. Juostos traukimo mechanizmo su PVBV maketas: 1 – rotorius, 2 – pjezoelektrinis VK, 3 – laidas, kuriuo maitinamas pjezoelektrinis VK, 4 – popierinė juosta



7 pav. Rolamaitinio rotorinio vibrovariklio maketas: 1 – pjezoelektrinis VK, 2, 3 – rotoriai, 4 – mažesnio skersmens ritinėlis, 5 – begalinis dirželis

Rolamaitiniame dviejų rotorių PVBV rotoriai 2 ir 3 sukami į tą pačią pusę ir jų sukimosi krypties pakeisti neįmanoma. Tokia PVBV schema buvo pritaikyta juostos traukimo mechanizmuose [4, 5].

Norint dviejų rotorių PVBV suteikti rotoriams priešingas sukimosi kryptis, reikia panaudoti schemą (8 pav.), pagal kurią buvo sukurtas PVBV.



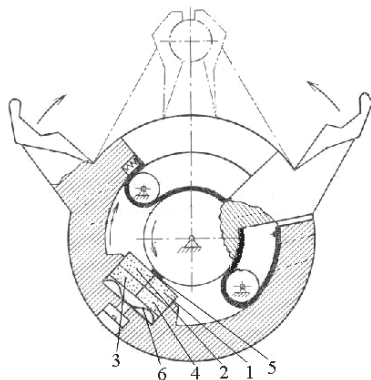
8 pav. Dviejų rotorių PVBV [6]: 1 – pjezoelektrinis VK, 2 – laikiklis; 3 – spyruoklė; 4 – aukštadažnės įtampos maitinimo blokas; 5, 6 – rotorius

Keičiant elektrinio signalo rezonansinį dažnį [7], įmanoma gauti skirtingus pjezoelektrinio VK virpesių išsilenkimus (9 pav.). Galima daryti prielaidą, kad prie jų, kitaip tariant, „stovinčios“ bangos mazginių virpesių taškų pritvirtintus kontaktinius elementus ir tampriai sulietus juos su slankikliu ar rotoriumi, gausime slenkamojo ar sukamojo judesio PVBV.



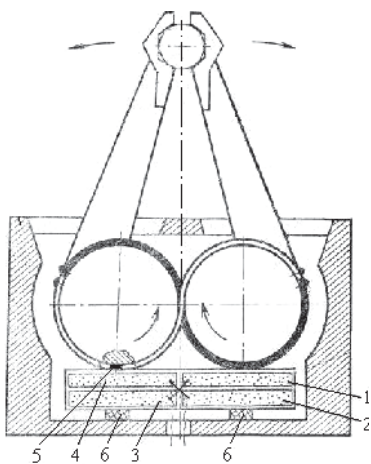
**9 pav.** Pjezoelektrinio VK, maitinamo rezonansiniais 30,19 kHz ir 63,2 kHz dažniais, virpesių išlenkimas [7]

Nė vienoje iš aukščiau pateiktų schemų negalima pakeisti slankiklio ar rotoriaus judesio krypties, nepaveikus schemos mechanškai, t. y. neperstačius pjezoelektrinio VK padėties vibrovaryklyje. Slankiklių ar rotorijų judesio kryptį keisti buvo panaudoti pjezoelektriniai VK su sudalytais elektrodais. Tokie VK gali sukuti vieną ar du rotorius, reversuodami jų sukimosi kryptis (10, 11 pav.) [8].



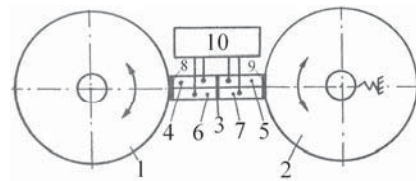
**10 pav.** Pjezoelektrinis VK su sudalytais elektrodais suka vieną rotorį [9]: 1, 2, 3, 4 – elektrodas; 5 – kontaktinis elementas; 6 – spyruoklė

Pjezoelektrinio VK elektrodai sujungti kryžmai arba kiekvienas atskirai prie valdymo bloko ir maitinami su užduotu fazės perstūmimu.



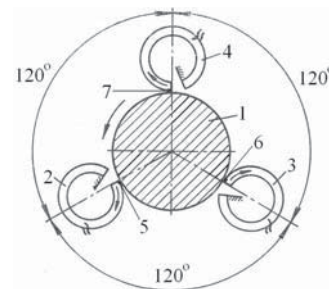
**11 pav.** Pjezoelektrinis VK su sudalytais elektrodais suka du rotorius [10]: 1, 2, 3, 4 – elektrodas; 5 – kontaktinis elementas; 6 – tamprus elementas

Panaudojus PVBV, pagamintą pagal 12 paveiksle parodytą schemą, galima gauti rotorijų sinchroninį vienakryptį ar priešingos krypties sukimąsi ir jų reversavimą.



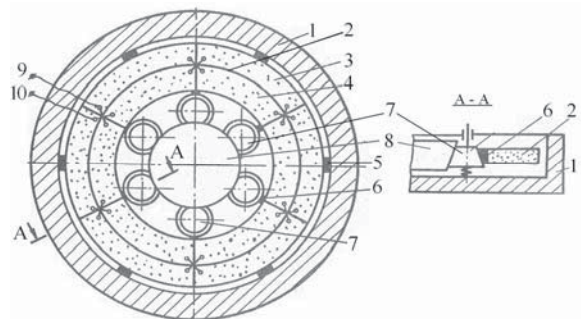
**12 pav.** Dviejų rotorijų PVBV [11]: 1, 2 – rotorius; 3 – pjezoelektrinis VK; 4, 5, 6, 7 – elektrodas; 8, 9 – kontaktinis elementas; 10 – valdymo blokas

VK pjezoelektriniai elementai gali būti plokštelės, strypo, disko, įvorės, žiedo ar pusžiedžių, sferos ar pussferės pavidalo. Gali būti ištisiniai, padalyti į segmentus arba su sudalytais elektrodais, bimorfiniai pjezoelektriniai VK.



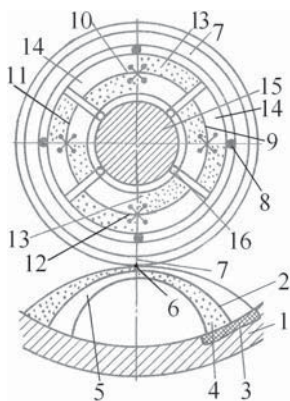
**13 pav.** PVBV su trimis perpjauto žiedo formos VK, sukančiais rotorijų [12]: 1 – rotorius; 2, 3, 4 – perpjauti žiediniai VK; 5, 6, 7 – kontaktiniai elementai

Perpjauto žiedo formos VK 2, 3, 4 kontaktiniai elementai 5, 6, 7, tampriai prispausti prie rotoriaus 1, savo galais atlieka judesį, parodytą 5-ame paveiksle, ir suka rotorijų 1.



**14 pav.** PVBV su žiediniu VK su sudalytais elektrodais [13]: 1 – korpusas; 2 – žiedinis pjezoelektrinis VK; 3, 4 – elektrodas; 5 – tamprusis elementas; 6 – kontaktinis elementas; 7 – ritinėlis; 8 – rotorius; 9, 10 – elektrinio signalo perdavimo laidai

PVBV, parodytame 14-ame paveiksle, pjezoelektrinio VK elektrodams suteikus rezonansinio dažnio įtampos elektrinį signalą, susidaro „stovinčioji“ virpesių banga, o kontaktiniai elementai, pritvirtinti prie VK mazginiuose virpesių taškuose, suka ritinėlius 7, o jie – rotorius 8.

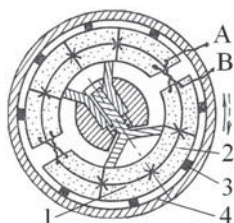


**15 pav.** PVBV su dviem pjezoelektriniais

VK – lanko formos su sudalytais elektrodais ir žiedo formos VK sudalyto į atskirus segmentus su sudalytais elektrodais [14]: 1 – korpusas; 2 – lanko formos VK su sudalytais tarpusavyje kryžmai elektriškai sujungtais elektrodais 4, 5; 3, 16 – tamprusis elementas; 6, 8 – kontaktinis elementas; 7 – rotorius; 9, 10, 11, 12 – žiedo formos VK segmentas; 13, 14 – elektrodas; 15 – nejudama ašis

Norint gauti didesnę PVBV sukimo momentą, galima panaudoti kelis pjezoelektrinius VK, sukančius rotorius (15 pav.). Vienas tokių VK yra lanko formos su sudalytais ir tarpusavyje kryžmai elektriškai sujungtais elektrodais 4, 5, kitas – žiedo formos, sudalytas į atskirus segmentus su sudalytais elektrodais.

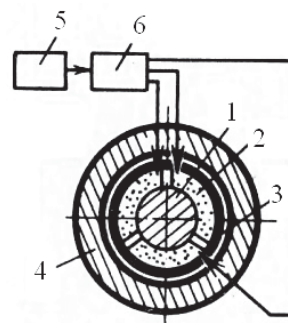
Gana efektyvus ir darbe patikimas yra PVBV su pusžiediniais pjezoelektriniais VK su sudalytais ir tarpusavyje kryžmai elektriškai sujungtais elektrodais 1, 2 (16 pav.). Pusžiedžiai per kontaktinius elementus 3 tampriai prispausti spyruoklės prie rotoriaus 4.



**16 pav.** PVBV su pusžiediniais VK su sudalytais

elektrodais [15, 16, 17]: 1, 2 – elektrodas; 3 – kontaktinis elementas; 4 – rotorius; A, B – elektrinio signalo perdavimo laidai

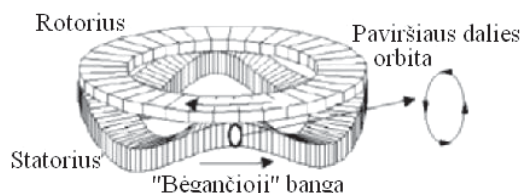
Pjezoelektrinio VK (plokštelės, žiedo, įvorės, sferos) sudalyti elektrodai gali būti maitinami per fazės perstūmimo schemą ir taip gaunama ne „stovinčioji“ virpesių banga, o „bėgančioji“. Pagal šį principą sukurtas PVBV pavaizduotas 17 paveiksle.



**17 pav.** PVBV su sudalytais į segmentus VK:

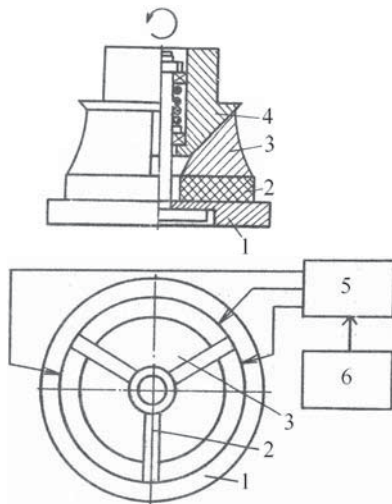
1 – nejudama ašis; 2 – pjezoelektrinis VK; 3 – elastinis frikcinis žiedas; 4 – rotorius; 5 – aukštadažnės įtampos generatorius; 6 – fazės perstūmimo schema

Tokiame PVBV įvorės formos pjezoelektrinio VK elektrodai gali būti sudalyti į segmentus [18–20], ant jų užmaunamas elastinis frikcinis žiedas (kad būtų išvengta mechaninio elektrodų išsidėvėjimo). PVBV gali būti panaudotas, pavyzdžiui, juostai traukti. Pjezoelektrinis VK gali būti bimorfinis, ant jo gali būti uždėtas rotorius [21, 22]. „Bėgančioji“ virpesių banga gali būti pritaikyta tiek linijinio, tiek ir sukamojo judesio PVBV (18 pav.).



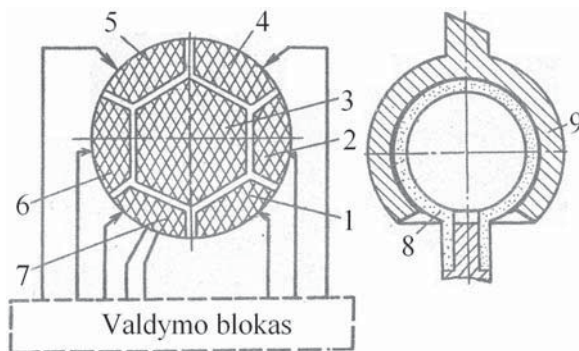
**18 pav.** „Bėgančioji“ virpesių banga VK [23]

PVBV galima sukurti ant žiedinio pjezoelektrinio VK su sudalytais elektrodais segmentų, pritvirtinant virpesių bangolaidžius su kūgine nuožula iš vidinės bangolaidžių pusės, prie kurių tampriai prispaustas rotorius (19 pav.). Tokiame PVBV pjezoelektrinio VK 2 sudalyti elektrodai maitinami per fazės perstūmimo schemą 5, o susidariusi „bėgančioji“ banga, perduodama bangolaidžio segmentams 3, suka rotorius 4.



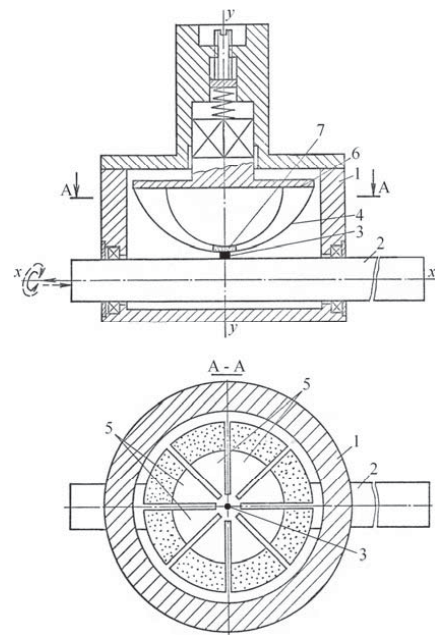
**19 pav.** PVBV su bangolaidžiais, pritvirtintais prie VK elektrodų [24]: 1 – PVBV pagrindas; 2 – žiedinis pjezoelektrinis VK su sudalytais elektrodais; 3 – bangolaidžio segmentas; 4 – rotorius; 5 – fazės perstūmimo schema; 6 – aukštadažnės įtampos generatorius

PVBV su sferiniu VK 8 su sudalytais elektrodais 1–7 rezonansinio dažnio įtampos elektrinį signalą iš valdymo bloko perduoda tam tikriems elektrodams su fazės perstūmimu, sudaroma „bėgančioji“ banga, kuri rotorių (pasukamasis elementas) 9 pasuka reikiama kryptimi (20 pav.). Tokie PVBV gali būti sėkmingai pritaikomi įvairiuose preciziniuose vykdomo organuose, medicinoje.



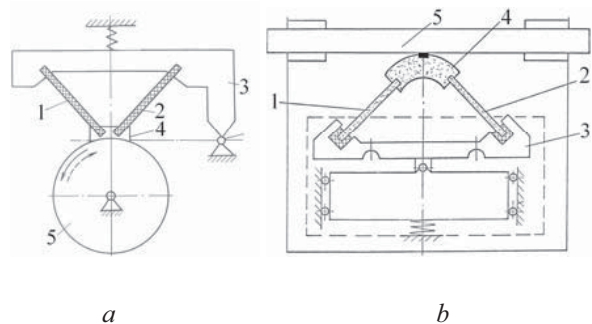
**20 pav.** PVBV su sferiniu VK su sudalytais elektrodais [25]: 1–7 – elektrodas; 8 – sferinis VK; 9 – rotorius (pasukamasis elementas)

Medicinoje, preciziniuose posūkio mechanizmuose, mikromanipuliatoriuose taikomas PVBV su pussferiniu VK, perpjautu į segmentus ties pussferės pagrindu beveik iki viršūnės, kuri paliekama ištininė (neperpjauta) ir prie kurios tvirtinamas kontaktinis elementas, sukantis ar perslenkantis judamą elementą (21 pav.) [26–28].



**21 pav.** PVBV su pussferiniu VK, perpjautu į segmentus, sujungtus pussferės viršūnėje [26]: 1 – korpusas; 2 – judamas elementas; 3 – kontaktinis elementas; 4 – perpjauta į segmentus 5 pjezoelektrinis pussferinis VK; 6 – pjezoelektrinio VK laikiklis; 7 – pussferinio VK viršūnė

Judamo elemento – rotoriaus sukamąjį ar slankiklio tiesialinį judesį galima gauti panaudojus suporintus, vienas į kitą kampu pastatytus pjezoelektrinius VK, kurių vieni galai įtvirtinti laikiklyje, o kiti – tarpusavyje sujungti kontaktiniu elementu, besikontaktuojančiu su judamu elementu (rotorium ar strypeliu) (22 pav.).

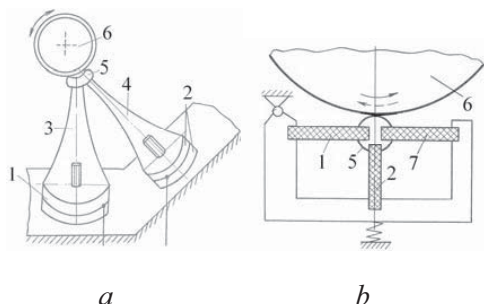


**22 pav.** PVBV su dviem vienas į kitą kampu pastatytais pjezoelektriniais VK; a – sukamajam judamo elemento (rotoriaus) judesiui gauti [29, 30]; b – slankiklio tiesialinijiam judesiui gauti [31]: 1, 2 – pjezoelektrinis plokštelinis VK; 3 – pjezoelektrinio VK laikiklis; 4 – kontaktinis elementas; 5 – judamas elementas

Pjezoelektrinių VK elektrodai gauna iš valdymo bloko rezonansinio dažnio įtampos elektrinius signalus su fazės perstūmimu, todėl vienas pjezoelementas pailgėja, o kitas – sutrumpėja; dėl to kon-

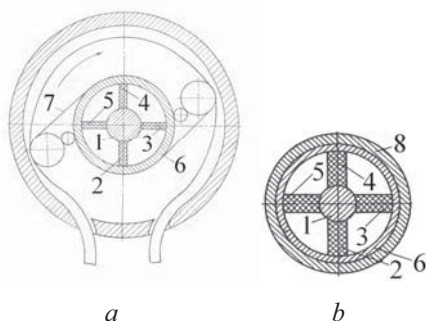
taktinis elementas atlieka elipsinį judesį (kaip kad parodyta 5-ame paveiksle) ir perstumia judamą elementą. Reversuojant judesį, elektrodai maitinami atvirkštine tvarka.

PVBV dinaminėms savybėms pagerinti, galima panaudoti ne plokštelines pjezoelektrinius VK, bet žiedinius ir kartu konstrukcijoje naudoti bangolaidžius [32], taip pat naudoti ne du, o tris pjezoelektrinius VK [33] (23 pav.).



**23 pav.** PVBV su vienas į kitą kampu pastatytais VK: *a* – su žiediniais pjezoelektriniais elementais ir bangolaidžiais [32]; *b* – su trim VK [33]: 1, 2, 7 – pjezoelektrinis VK; 3, 4 – bangolaidis; 5 – kontaktinis elementas; 6 – rotorius

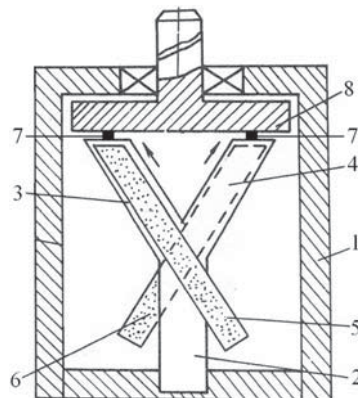
PVBV (24 pav.) ant nejudamos ašies 1 vienais galais įtvirtinti pjezoelektriniai VK 2–5, kurių antrieji galai tvirtinami prie lankstaus žiedo 6. Pjezoelektrinių VK elektrodai gauna iš valdymo bloko rezonansinio dažnio įtampos elektrinius signalus su fazės perstūmimu, todėl lanksčiame žiede 6 susiformuoja „bėgančioji“ banga. Kai lankstų žiedą 6 gaubia begalinė juosta (24 *a* pav.), „bėgančioji“ banga perstumia begalinę juostą 7 [34], o ant lankstaus žiedo 6 uždėjus kietą žiedą – rotorį 8 (24 *b* pav.), jis pradeda sukintis [35].



**24 pav.** PVBV su lankstaus žiedo viduje išstatytais pjezoelektriniais VK [34, 35]: 1 – nejudama ašis; 2–5 – pjezoelektrinis VK; 6 – lankstus žiedas; 7 – begalinė juosta; 8 – rotorius

Galima PVBV konstrukcija, kurios korpuse 1 įtvirtinta lanksti spyruoklinė žvaigždės formos plokš-

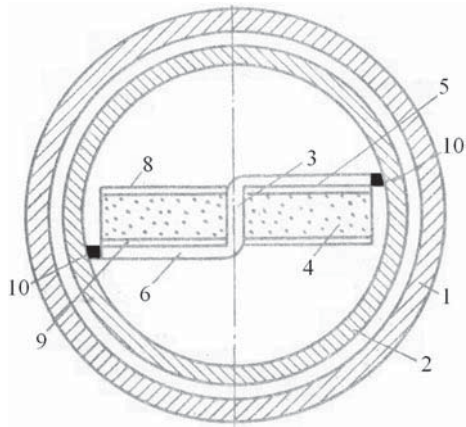
telė, sudaryta iš trijų spindulių 2, 3 ir 4 (25 pav.). Vienas plokštelės spindulys 2 įtvirtintas korpuse 1, o prie kitų dviejų plokštelės spindulių tvirtinami pjezoelektriniai VK 5 ir 6. Lanksti spyruoklinė žvaigždės formos plokštelė per kontaktinius elementus 7 susieta su rotoriumi 8.



**25 pav.** PVBV su lanksčia spyruokline žvaigždės formos plokštele [36]: 1 – korpuse; 2, 3, 4 – lanksčios spyruoklinės žvaigždės formos plokštelės spindulys; 5, 6 – pjezoelektrinis VK; 7 – kontaktinis elementas; 8 – rotorius

Suteikus pjezoelektrinių VK 5, 6 elektrodams aukštadažnės įtampos elektrinius signalus, VK pradeda virpėti aukštu dažniu ir lanksčios spyruoklinės žvaigždės formos plokštelės spinduliai 3 ir 4 atlieka sudėtingus lenkimo virpesius, o prie spindulių pritvirtinti kontaktiniai elementai 7 pradeda sukinti rotorius 8.

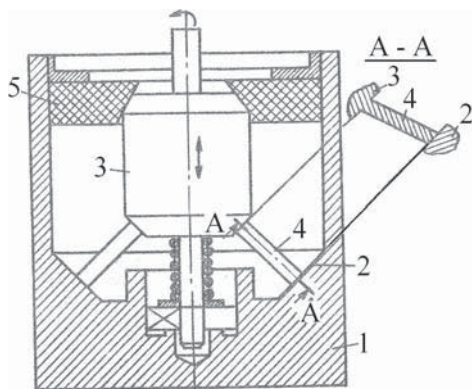
Galima PVBV konstrukcija (26 pav.), kai korpuse 1 patalpintas tuščiaviduris cilindrinis rotorius 2, kurio ertmėje patalpintas sulenktos tamprios *z* formos plokštelės 3, kurios jungėje yra prapjova, į kurią įstatytas pjezoelektrinis plokštelinis VK 4, plokščias vibratorius, ant kurio priešingų plokštumų pusių iki jungės priklijuotas minėtas VK 4. Vibratorius laikikliu pritvirtintas korpuse 1 (paveiksle neparodyta) ir savo galais per kontaktinius elementus 10 liečiasi su rotorium 2. Pjezoelektrinio VK elektrodams 8 ir 9 suteikus aukštadažnės įtampos elektrinius signalus, VK pradeda vibruoti. Kadangi pjezoelektrinis VK 4 pritvirtintas prie *z* formos plokštelės 3, tai susidaro lyg dvi bimorfines plokštelės, kurių išilginiai ir lenkimo virpesiai vyksta priešingomis kryptimis, o tai leidžia abiem vibratoriaus galams per kontaktinius elementus 10 sąveikauti su tuščiaviduriu cilindrinio rotorium 2 vienu metu ir jį sukinti.



26 pav. Pjezoelektrinis vibrovariklis [37]

PVBV galima sukurti ir nesinaudojant pjezoelektrinių VK elektrodų dalinimu ar fazių perstūmimo schemomis. Buvo sukurtos PVBV konstrukcijos, kuriose buvo panaudoti pjezoelektriniai žiediniai VK – „pasyvūs“ elementai, o „aktyviaisiais“ PVBV elementais tapo rotorai su rezonatorinėmis plokštelėmis. Daugelis aukščiau aprašytų PVBV konstrukcijų pjezoelektriniai VK su sudalytais elektrodais sukurdavo virpesių „bėgančiąją“ bangą, kuri ir perslinkdavo judamą elementą (slankiklį ar rotorių). Todėl tokius pjezoelektrinius VK būtų galima vadinti „aktyviaisiais“ PVBV elementais, o judamą elementą (slankiklį, rotorių) – „pasyvuoju“.

Galimi keli tokių PVBV variantai. Vienuose PVBV rotorius išambios rezonatorinės plokštelės veikia tik į variklio pagrindą (27 pav.), kituose – į žiedinį pjezoelektrinį VK (28 pav.) [39–42].

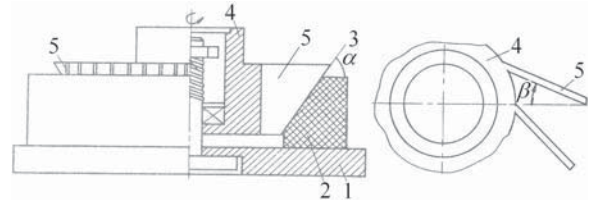


27 pav. Pjezoelektrinis vibrovariklis [38]:

- 1 – korpusas; 2 – kūginė pagrindo dalis;
- 3 – rotorius; 4 – rezonatorinė plokštelė;
- 5 – žiedinis pjezoelektrinis VK

Tiek vienu, tiek kitu atveju žiedinis pjezoelektrinis VK 5 (27 pav.) ir 2 (28 pav.) yra „pasyvusis“ elementas, o rotorius, atitinkamai 27 ir 28 pav., 3 ir 4 per rezonatorines plokšteles 4 ir 5 kampu  $\beta$  išstatytais į rotorių, tampriai spyruokle prispaustas

prie žiedinio pjezoelektrinio VK yra „aktyvusis“ elementas. Dėl žiedinio pjezoelektrinio VK virpesių ir rezonatorinių plokštelių sąveikos su PVBV kūgine pagrindo dalimi (27 pav.) ar su kūgine žiedinio pjezoelektrinio VK 2 dalimi (28 pav.) atsiranda rotorių sukandčios jėgos.

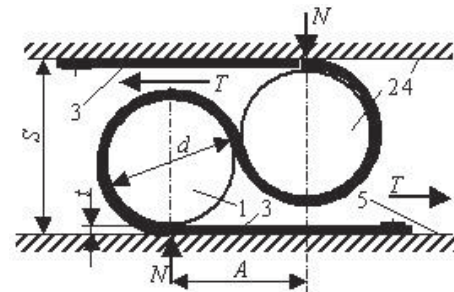


28 pav. Pjezoelektrinis vibrovariklis [39]:

- 1 – korpusas; 2 – žiedinis pjezoelektrinis VK;
- 3 – kūginė su polinkio kampu  $\alpha$  žiedinio pjezoelektrinio VK 2 dalis; 4 – rotorius;
- 5 – rezonatorinė plokštelė

### Rolamaitinių vibrovariklių veikimo principo ir konstrukcijų analizė

Klasikinė RTM konstrukcija sudaryta iš dviejų cilindrinė ritinėlių, S būdu glaudžiai (esant įtempimui) dideliu kampu (paprastai  $>180^\circ$ ) gaubiamų lanksčios juostos, kurios galai pritvirtinti prie dviejų kreipiančiųjų paviršių [43, 44] (29 pav.).



29 pav. Rolamaitinio mechanizmo schema: 1, 2 – ritinėlis; 3 – lanksti juosta; 4, 5 – kreipiantysis paviršius

RTM ritinėliai atlieka slankiojamąjį su viena laikiu sukimusi judesį. Mechanizmo statinė pusiausvyrą aprašoma lygtimi:

$$TS = NA,$$

čia:

- $T$  – juostos įtempimo jėga;
- $S$  – atstumas tarp kreipiančiųjų paviršių;
- $N$  – normalinė jėga;
- $A$  – horizontalus atstumas tarp ritinėlių centrų.

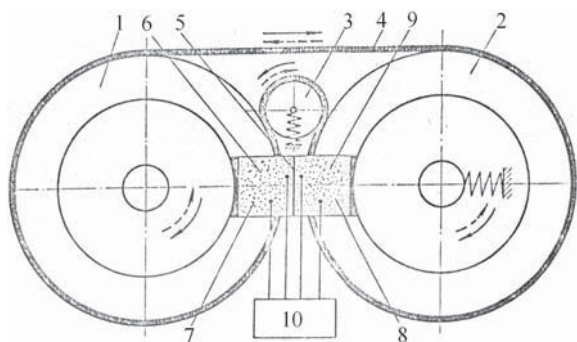
Šio mechanizmo konstrukcija labai paprasta, mažas trinties koeficientas (mažiausia gauta trinties koeficiento reikšmė 0,00004), didelis kinematinis tikslumas.

Remiantis D. F. Wilkes (1967, 1968), R. Cadman (1969), RTM – tikslus mechanizmas, kurio elementai juda vienas kito atžvilgiu neslysdami. Tačiau C. M. Percival ir F. R. Norwood (1969) nurodo, kad ritinėliai slysta esant tam tikriems mechanizmo parametrams, nors šio reiškinio teoriškai nepagrindžia.

Praslydimui tarp RTM elementų turi įtakos juostos parametrai, jos įtempimo jėgos  $T$  dydis ir ritinėlių apgaubimo juosta kampo  $\alpha$  dydis. Didinant ritinėlių apgaubimo juosta kampą, įtempimai RTM elementų susilietimo paviršiuose paskirstomi lygiau, ir apkrova, veikianti juosta, pasiskirsto vienodžiau.

Pagal rotorinio pjezoelektrinio vibrovariklio schemą pagaminto maketo foto pateiktas 7 pav. Tokiaime PVBV begalinė juosta glaudžiai gaubia du rotorius ir užtikrina jų vienpusį sukimo sinchroniškumą, o pjezoelektrinio VK įžambi sąveika su rotoriais užtikrina PVBV greitaveiką. PVBV gali būti pritaikytas juostos traukimo mechanizmuose [4, 5].

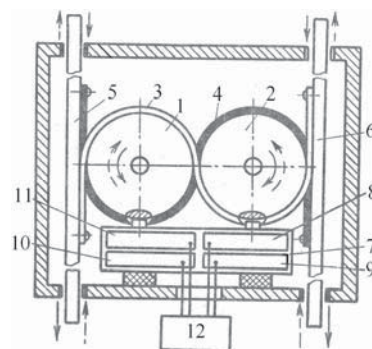
Suteikę PVBV [11] (12 pav.) begalinę juosta, glaudžiai gaubiančią abu rotorius, gausime rolamaitinį PVBV, kuris užtikrina rotorių dvikryptį aukštą sukimo sinchroniškumą ir greitaveiką (30 pav.).



**30 pav.** Rolamaitinis PVBV [47]: 1, 2 – rotorius; 3 – begalinės juostos 4 įtempimo ritinėlis; 5 – pjezoelektrinis VK su sudalytais elektrodais 6–9; 10 – valdymo blokas

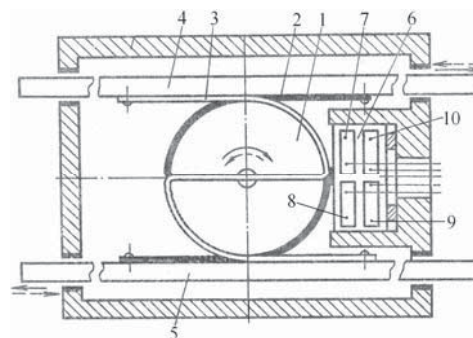
Mikromanipulatoriaus griebte (11 pav.) [10] rolamaitinis PVBV, susidedas iš pjezoelektrinio VK su sudalytais tarpusavyje elektriškai kryžmai sujungtais elektrodais, prijungtais prie valdymo bloko, suka du rotorius, kurie rolamaitiniu būdu S raidės forma glaudžiai iš priešingų pusių gaubiami dviem juostomis. Rolamaitinis juostų jungimas su rotoriais-mikromanipulatoriaus vykdomaisiais organais garantuoja rotorių aukštą sukimo sinchroniškumą, o pjezoelektrinio VK sąveika su rotoriais užtikrina mikromanipulatoriaus griebto greitaveiką.

Jei tokiaime PVBV (11 pav.) juostas prijungsi ne prie jomis glaudžiai gaubiamų rotorių, o prie įvestų į PVBV dviejų slankiklių, tai naujame pjezoelektriniame vibrovariklyje gausime dviejų rotorių priešingos sukimosi krypties ir dviejų slankiklių vienos krypties judesius (31 pav.).



**31 pav.** Rolamaitinis PVBV [48]: 1, 2 – rotorius; 3, 4 – lanksti juosta; 5, 6 – slankiklis; 7 – pjezoelektrinis VK; 8–11 – elektrodas; 12 – valdymo blokas

Norint gauti rolamaitinio PVBV slankiklių ne vienkryptį, o priešingų krypčių judesį ir supaprastinti PVBV konstrukciją, galima vietoje dviejų rotorių panaudoti vieną, kaip kad parodyta 32-ame paveiksle.



**32 pav.** Rolamaitinis PVBV [49]: 1 – rotorius; 2, 3 – lanksti juosta; 4, 5 – slankiklis; 6 – pjezoelektrinis VK; 7-10 – elektrodas

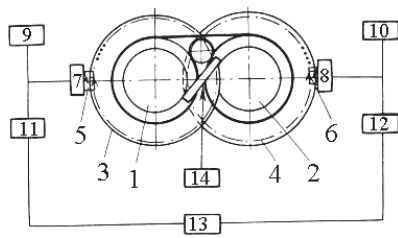
Tokią schemą galima sėkmingai panaudoti mikromanipulatoriaus griebtui konstruoti [50, 51].

### Dinaminių procesų, vykstančių rolamaitiniuose vibrovarikliuose, tyrimas

Kuriant rolamaitinius PVBV, reikėjo išsiaiškinti rolamaitinio principo taikymo įtaką rotorių sukimosi sinchroniškumui. Buvo sudarytas rolamaitinio PVBV maketas (7 pav.), o jo pagrindu – eksperimentinis stendas (33 pav.).

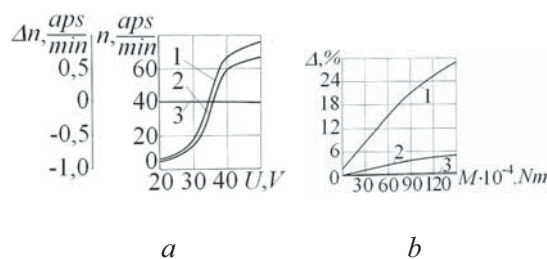
Pjezoelektrinis VK, iš maitinimo bloko 14 padavus aukštadažnį kintamos įtampos signalą ant VK elektrodų, pradeda sukti rotorius 1 ir 2. Ant rotorių velenų įtvirtinami rastriniai diskai 3 ir 4, susieti su fotojutikliais 5 ir 6. Signalo stiprintuvai – formuotojai 7 ir 8 sujungti su dažnimačiais 9 ir 10, ir per dažninius diskriminatorius 11 ir 12 – su dviejų kanalų registracijos bloku 13.





**33 pav.** Rotorių sukimosi nesinchroniškumo matavimo schema: 1, 2 – rotoriai; 3, 4 – rastriniai diskai; 5, 6 – fotojutikliai; 7, 8 – stiprintuvai – formuotojai; 9, 10 – dažnimačiai; 11, 12 – dažniniai diskriminatoriai; 13 – dviejų kanalų registracijos blokas; 14 – pjezoelektrinio VK maitinimo blokas

Pradžioje buvo tiriamas neapkrautas dviejų rotorių vibrovariklis, kurio abu rotorius suka vienas pjezoelektrinis VK (34 pav., a). Vėliau, – apkraunant vieną rotorį, dviejų rotorių PVBV, kurio abu rotorius suka vienas pjezoelektrinis VK, (34 pav., b, 1-oji kreivė) ir rolamaitinis PVBV, kuriame pjezoelektrinis VK suka vieną rotorį (34 pav., b, 2-oji kreivė) ir abu rotorius (34 pav., b, 3-oji kreivė).



**34 pav.** a – Vibrovariklio rotorių sukimosi nesinchroniškumo priklausomybių kreivės neapkrautame darbo režime: kreivės 1, 2 –  $n = f(U)$  rotoriams 1 ir 2; kreivė 3 –  $\Delta n = f(U)$  rolamaitinio PVBV rotoriams; b – PVBV rotorių sukimosi nesinchroniškumo priklausomybė nuo išorinės apkrovos vienam rotoriumi: 1–2 rotorių VBV, kurio rotorius suka vienas pjezoelektrinis VK; 2, 3 – rolamaitiniam PVBV, kuriame pjezoelektrinis VK suka: 2 – vieną rotorį, 3 – du rotorius

Priimtas optimalus pjezoelektrinio VK įžambaus lietimosi su rotoriumi kampas  $120^\circ$ – $130^\circ$ . Pirmoji ir antroji kreivės (3 pav., a) rodo rotorių sukimosi nesinchroniškumą, didinant pjezoelektrinio VK maitinimo įtampą, o kartu ir rotorių sūkius. Trečioji kreivė rodo, kad, sujungus rotorius rolamaitiniu būdu, jų sukimosi nesinchroniškumas išnyksta.

Labiausiai rotorių nesinchroniškumas išauga paprastame 2-jų rotorių vibrovariklyje (pirmoji kreivė), mažiausiai – rolamaitiniame PVBV, kuriame pjezoelektrinis VK suka abu rotorius (trečioji kreivė). Vadinasi, rolamaitinio PVBV variantas, kai pjezoelektrinis VK suka abu rotorius, yra optimaliausias.

## Išvados

1. Pjezoelektrinių vibrovariklių (PVBV) konstrukcijų ir jų veikimo principų apžvalga, išnagrinėti PVBV, kuriuose buvo panaudotas įstrižas virpesių keitiklio (VK) smūgis į judamą elementą – plokštelę, juostą ar ritinėlį, o taip pat PVBV su pjezoelektriniu VK su sudalytais elektrodais, rodo, kad PVBV turi platų pritaikomumą.
2. Eksperimentiškai tiriant rolamaitinį VBV, nustatyta, kad rotorių nesinchroniškumas labiausiai išauga paprastame 2 rotorių PVBV, mažiausiai – rolamaitiniame PVBV, kuriame pjezoelektrinis VK suka abu rotorius. Vadinasi, rolamaitinio PVBV variantas, kai pjezoelektrinis VK suka abu rotorius, yra optimaliausias.
3. Rolamaito tipo mechanizmo ir pjezoelektrinio vibrovariklio sintezė leido sukurti kokybiškai naujus mechanizmus.

## Literatūra

1. Bansevicius R., Ragulskis K., 1981, *Vibromotors* (in Russian). Vilnius: Mokslas.
2. Spanner K., Vyshnevskyy O., Wischewskiy W., 2006, Design of Linear Ultrasonic Micro Piezo Motor for Precision Mechatronic Systems. *Physik instrumente*. Prieiga per internetą: <<http://www.physikinstrumente.com>>.
3. Ulozas R. V., 2007, Teoretinė ir eksperimentinė analizė dinamike mechanizmov Rolamite. A Theoretical and Experimental Investigation of the Dynamics of Rolamite-Type Mechanisms. *Strojnicki vestnik. Journal of Mechanical Engineering*. No. 53, 1. P. 26–47.
4. *Juostos traukimo mechanizmas*. TSRS išradimas Nr. 570102.
5. *Juostos traukimo mechanizmas*. TSRS išradimas Nr. 681451.
6. *Pjezoelektrinis variklis*. TSRS išradimas Nr. 577591.
7. Bansevicius R., 2009, State-Of-The-Art And New Developments Of Multi-Degree-Of-Freedom Piezoelectric Motors For Experimental Mechanics And Measuring Devices. *XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology*. September 6–11. Lisbon, Portugal.
8. Ragulskis K., Ulozas R. V., Bakai N., Palevičius A., 1990, *Mechanisms of rolamite type* (in Russian). Vilnius: Mokslas.
9. *Mikromanipulatoriaus griebtas*. TSRS išradimas Nr. 1602735.
10. *Mikromanipulatoriaus griebtas*. TSRS išradimas Nr. 1516348.
11. *Pjezoelektrinis variklis*. TSRS išradimas Nr. 698078.
12. *Elektrovariklis*. TSRS išradimas Nr. 497633.
13. *Vibrovariklis*. TSRS išradimas Nr. 987714.
14. *Peristaltinis siurblys*. TSRS išradimas Nr. 954608.
15. *Juostos traukimo mechanizmas*. TSRS išradimas Nr. 932557.
16. *Peristaltinis siurblys*. TSRS išradimas Nr. 1010316.

17. *Peristaltinis siurblys*. TSRS išradimas Nr. 1543121.
18. *Tiesiaieigio judesio atrama*. TSRS išradimas Nr. 581336.
19. *Juostos traukimo mechanizmas*. TSRS išradimas Nr. 570103.
20. *Tiesiaieigio judesio atrama*. TSRS išradimas Nr. 634029.
21. *Juostos traukimo mechanizmas*. TSRS išradimas Nr. 617786.
22. *Juostos traukimo mechanizmas*. TSRS išradimas Nr. 720533.
23. Spanner K., 2006, Survey of the Various Operating Principles of Ultrasonic Piezomotors. *Physik Instrumente*. Actuator.
24. *Vibrovariklis*. TSRS išradimas Nr. 913483.
25. *Mikromanipulatoriaūs ranka*. TSRS išradimas Nr. 971642.
26. *Vibrovariklis*. TSRS išradimas Nr. 1032961.
27. *Precizinis posūkio mechanizmas*. TSRS išradimas Nr. 1558637.
28. *Mikromanipulatoriaūs ranka*. TSRS išradimas Nr. 1548044.
29. *Vibrovariklis*. TSRS išradimas Nr. 819867.
30. *Peristaltinis siurblys*. TSRS išradimas Nr. 846788.
31. *Ultragarsinis žingsninis variklis*. TSRS išradimas Nr. 843660.
32. *Vibrovariklis*. TSRS išradimas Nr. 771773.
33. *Vibrovariklis*. TSRS išradimas Nr. 830600.
34. *Peristaltinis siurblys*. TSRS išradimas Nr. 649882.
35. *Peristaltinis siurblys*. TSRS išradimas Nr. 775383.
36. *Vibrovariklis*. TSRS išradimas Nr. 949709.
37. *Vibrovariklis*. TSRS išradimas Nr. 968868.
38. *Vibrovariklis*. TSRS išradimas Nr. 642804.
39. *Pjezoelektrinis variklis*. TSRS išradimas Nr. 658684.
40. *Pjezoelektrinis variklis*. TSRS išradimas Nr. 656135.
41. *Magnetinės juostos traukimo mechanizmas*. TSRS išradimas Nr. 637852.
42. *Magnetinės juostos traukimo mechanizmas*. TSRS išradimas Nr. 647734.
43. Wilkes D. F., 1967, Rolamite: A New Mechanical Design Concept. *Research Report SC-RR-67-656 A*. Sandia Laboratories, December.
44. Wilkes D. F., 1968, Rolamite: A New Mechanism. *Mechanical Engineering*. April. Vol. 90. No. 4. P. 11–29.
45. Cadman R.V., 1969, Rolamite – Geometry and Force Analysis. *Journal of Engineering for Industry*. Trans. ASME, Ser.B, Feb. Vol. 91. No. 1. P. 185–191.
46. Percival C. M., Norwood F. R., 1969, A Theoretical and Experimental Investigation of the Dynamic Response of Rolamite. *Trans. ASME, Ser. B*. Vol. 91. No. 1. P. 235–239.
47. *Pjezoelektrinis variklis*. TSRS išradimas Nr. 936764.
48. *Linijinis variklis*. TSRS išradimas Nr. 1566851.
49. *Linijinis variklis*. TSRS išradimas Nr. 1559820.
50. *Mikromanipulatoriaūs griebtas*. TSRS išradimas Nr. 1703450.
51. *Mikromanipulatoriaūs griebtas*. LR patentas LT 3941B.

## PIEZOELECTRIC VIBROMOTORS AND ANALYSIS OF THEIR DYNAMICS

*Giedrius Raštutis, Ričardas Viktoras Ulozas*

### Summary

The review of piezoelectric vibromotors (PVBM) and a principle of their action is presented in this article. The object reviewed is PVBM, in which slanting impact of piezoelectric vibration converter (VC) has been applied on a moved element: plate, tape, or rotor, and also PVBM with piezoelectric VC with divided electrodes. Designs of PVBM with rotors containing resonator (such as a plate or a thin beam) were reviewed as well. It is an experimental prerequisite that the value of non-synchronicity of rotation of rotors grows the most in elementary PVBM with two rotors, the least – in rolamite PVBM, in which the converter of longitudinal fluctuations rotates both rotors. The variant of rolamite vibromotor, in which the piezoelectric VC rotates both rotors, is optimum. The synthesis of the rolamite-type mechanism and vibromotor allows designing qualitatively new, original mechanisms.

**Keywords:** piezoelectric vibromotors, rolamite-type mechanisms.

**PJEZOELEKTRINIAI VIBROVARIKLIAI IR JŲ DINAMIKOS TYRIMAS***Giedrius Raštutis, Ričardas Viktoras Ulozas***Santrauka**

Straipsnyje apžvelgtos pjezoelektrinių vibrovariklių (PVBV) konstrukcijos ir jų veikimo principas. Išnagrinėti PVBV, kuriuose buvo panaudotas įstrižas virpesių keitiklio (VK) smūgis į judamą elementą – plokštelę, juostą ar ritinėlį, o taip pat PVBV su pjezoelektriniu VK su sudalytais elektrodais. Taip pat apžvelgtos PVBV konstrukcijos, kurių rotoriai yra su rezonatorinėmis plokštelėmis ar plonais strypeliais. Eksperimentiškai nustatyta, kad rotorių nesinchroniškumas labiausiai išauga paprastame 2-jų rotorių PVBV, mažiausiai – rolamaitiniame PVBV, kuriame pjezoelektrinis VK suka abu rotorius. Vadinasi, rolamaitinio PVBV variantas, kai pjezoelektrinis VK suka abu rotorius, yra optimaliausias. Rolamaito tipo mechanizmo ir pjezoelektrinio vibrovariklio sintezė leido sukurti kokybiškai naujus mechanizmus.

**Prasminiai žodžiai:** pjezoelektriniai vibrovarikliai, rolamaito tipo mechanizmai.

Įteikta 2011-02-25