

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

TVIRTINU \_\_\_\_\_ Katedros vedėjas  
**Z. Ramonas**

**MIKROMANIPULIATORIAI**  
**IR JŲ DINAMIKOS TYRIMAI**

MAGISTRO TEZĖS

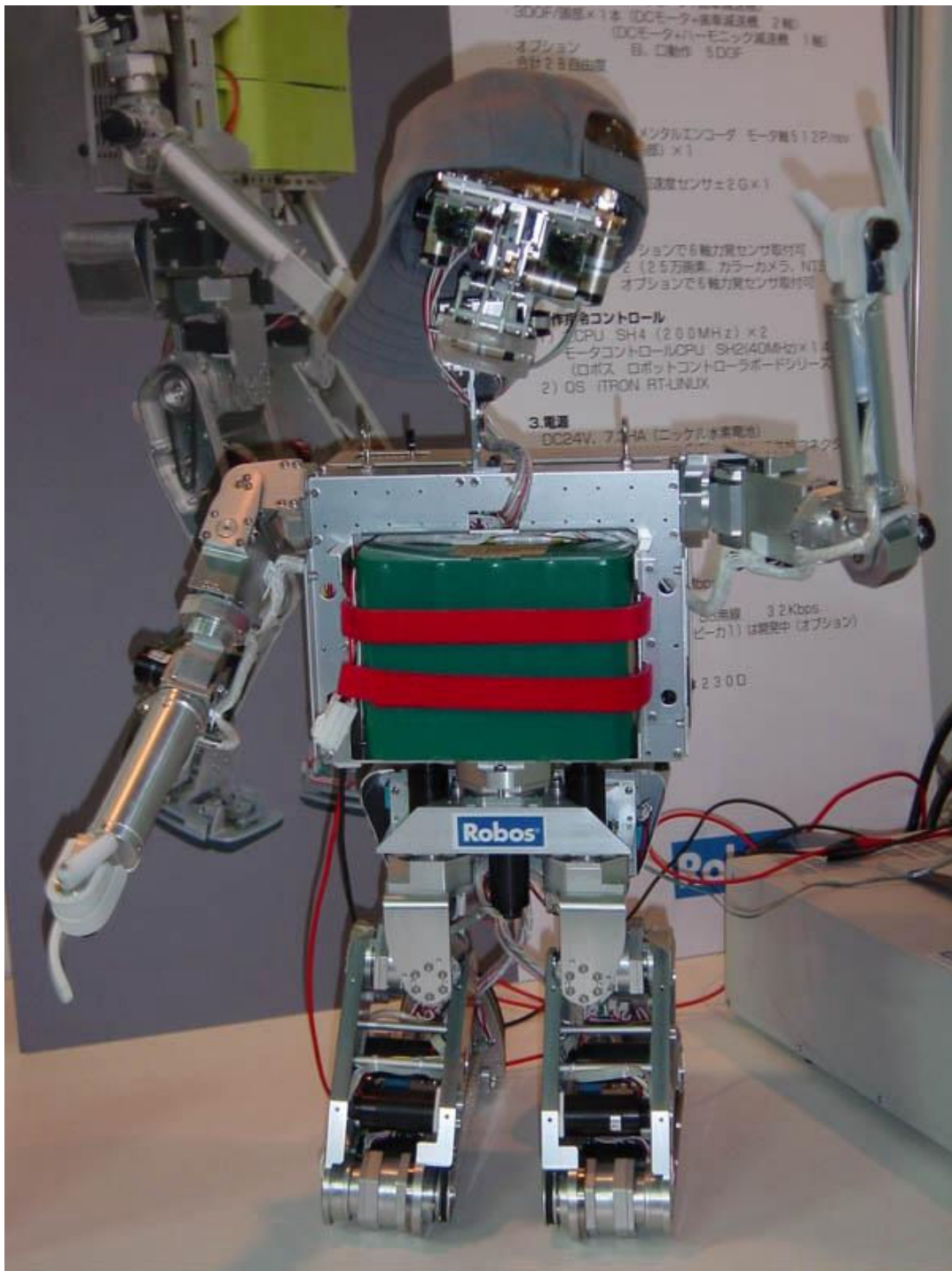
Magistrantas – Renatas ŠIMKUS  
Vadovas – prof. dr. R.V. ULOZAS

Šiauliai 2005

## TURINYS

<b>1. ĮVADAS .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Mažiausi pasaulyje robotai .....</b>	<b>6</b>
<b>2. ROLAMAITO TIPO MECHANIZMŲ KONSTRUKCINĖ ANALIZĖ .....</b>	<b>9</b>
<b>3. RTM SU VIRPANČIAIS ELEMENTAIS KONSTRUKCINĖ ANALIZĖ .....</b>	<b>27</b>
<b>4. RTM VIRPANČIŲ ELEMENTŲ KLASIFIKACIJA .....</b>	<b>30</b>
<b>5. ROLAMAITINIŲ MECHANIZMŲ SU VIRPANČIAIS ELEMENTAIS DINAMIKOS TYRIMAI .....</b>	<b>32</b>
<b>5.1. Įvadas .....</b>	<b>32</b>
<b>5.2. Dinaminių procesų, vykstančių RTM ritinėlio ir juostos sistemoje, tyrimai .....</b>	<b>34</b>
<b>5.3. Teoriniai slydimo proceso RTM tyrimai .....</b>	<b>39</b>
<b>5.4 RTM su virpančiais ritinėliais dinaminių charakteristikų tyrimai .....</b>	<b>41</b>
<b>6. MIKROMANIPULIATORIŲ KONSTRUKCIJOS .....</b>	<b>47</b>
<b>    IŠVADOS .....</b>	<b>52</b>
<b>    SUMMARY .....</b>	<b>53</b>
<b>    LITERATŪRA .....</b>	<b>54</b>

## 1. ĮVADAS



1 pav. Robotas

*Robotas* – tai mašina, kuri imituoja kai kurias žmogaus savybes ir sąveikaudama su aplinka pavaduoja žmogų (kartais – gyvūną); taip kartais vadiname bejausmį ir nemąstantį, bet tiksliai dirbantį žmogų (1 pav.).

Kad ir kokios būtų svarbios pramoninės staklės ir kiti įrenginiai, jais domisi tik šios srities specialistai. Visuomenės dėmesį patraukia nebent pramoniniai robotai, kurių atsiradimas ir tobulėjimas taip pat tiesiogiai susijęs su DSP (*Digital signal processing*) technologijomis. Jutikliai ir A/D keitikliai yra roboto jutimo organų atitikmuo - per juos jis gauna vaizdo, garso ar pavirsiu faktūros, temperatūros bei kitus duomenis. Procesoriai siunčia signalus roboto aktuatoriams, kurie sužadina variklius roboto „sąnariuose“ ir leidžia preciziškai tiksliai valdyti savo galūnes - įrankius. Pramoniniai robotai seniai pakeitė žmogų pavojingose sveikatai aplinkose, be jų būtų sunkiai įsivaizduojama ir šių dienų automobilių pramonė. Iš dalies mažą kainą ir mažas ploto bei energijos suvartojimas galbūt leis mums po 5 ar 10 metų ir namie turėti autonominius robotus.

Nuo automatiškai valdomų robotų judesių dinamikos kokybės dažnai priklauso tokių robotų praktinis pritaikymas, įdiegimas ir sėkmingas eksploatavimas. Kelių laisvės laipsnių sukamojo ir slenkamojo judesio robotų kinematikos skaičiavimo išraiškose esančios aukštos eilės netiesinės diferencialinės lygtys yra labai sudėtingos. Todėl tirti roboto judesių dinamiką dar ir šiandien labai aktualu. Roboto judesių dinamiką galima tirti ir pavaizduojant judesio dinamiką erdvėje.

Kompiuteriu atlikus parengiamuosius kinematikos ir dinamikos skaičiavimus bei sukauptus pakankamą duomenų bei specialių žinių banką, galima vizualizuoti projektuojamų objektų judesius realiame laike. Tą leistų padaryti šiuolaikinės ekspertinės sistemos, duomenų gavybos bei dirbtinio intelekto priemonės ir metodai, tačiau vieningų standartų nebuvimas bei konkrečių atvejų sudėtingumas (didelis darbo imlumas, o kartais ir kvalifikacijos trūkumas) neskatina projektuotoją imtis šio darbo.

Tarp daugybės šiuolaikinių mašinų robotai užima specifinę vietą. Robotų paskirties sąlygojamas konstrukcijų įvairumas, intelekto lygis, universalumas (daugiafunkcionalumas) arba priešingai – labai specializuota veikimo sritis reikalauja tiksliau apibrėžti vartojamus terminus. Kalbėsime apie antropomorfinių mašinų darbo įtaisus: teleoperatorius ir manipulatorius.

*Teleoperatoriai* – tai mechaninės “rankos”, kurias nuotoliniu būdu valdo žmogus arba žmogaus kontroliuojamas kompiuteris. Tie įtaisai nėra autonomiški ir dažniausiai naudojami tik sunkiems ar pavojingiems darbams atlikti, todėl robotais nevadintini.

*Manipulatoriai* – tai mašinos, darbo metu imituojančios gyvo organizmo įtaisų judesius, tai erdvinio svertinio mechanizmo ir pavarų sistemos visuma, atliekanti veiksmus (manipuliacijas) valdant programuojamam automatiniam įrenginiui arba žmogui-operatoriui, analogiškus žmogaus rankos veiksams, pritaikytiems konkrečiam darbui atlikti. Kai šie įrenginiai naudojami gamyboje, prekyboje ar žemės ūkyje, tai paprastai jie vadinami *pramoniniais manipulatoriais* arba *robotais*. Įtaisą, kuriuo robotas atlieka darbą, vadinsime *ranka*.

Dabar gaminamų robotų išvystoma rankų jėga skiriasi daugiau kaip milijoną kartų, pavyzdžiui, mikroelektronikai ir medicinai konstruojami silpnučiai, o mašinų gamybai - dešimčių  $kN$  galios robotai.

*Pramoninis robotas* – programuojama automatinė mašina, turinti manipuliatorių ir programinio jo judesių valdymo įrenginius, kuri skirta pakeisti žmogų atliekant pagrindines ir pagalbines operacijas pramoniniuose procesuose.

Pagal *judesio lygmenų* skaičių pramoniniai robotai skiriami į robotus su dvejais, trejais, keturiais judesio lygmenimis ir į robotus su daugiau negu keturiais judesio lygmenimis.

*Sudėties formulė* – matematinis struktūrinės manipulatoriaus schemos užrašas, turintis informaciją apie jo judesių skaičių, kinematinį porų vaizdą ir jų orientaciją bazinės koordinačių sistemos (sistemos, surištos su nejudria grandimi) atžvilgiu.

*Judesiai*, atliekami manipulatoriaus yra:

- *globaliniai* (robotams su judriu pagrindu) – manipulatoriaus stovo judesiai, kurie iš esmės viršija mechanizmo matmenis;
- *regionaliniai* (transportiniai) – judesiai, atliekami pirmais trejais manipulatoriaus grandimis arba jo „ranka“, kurių dydis sutapatinamas su mechanizmo matmenimis;
- *lokaliniai* (orientuojantys) – judesiai, atliekami manipulatoriaus grandimis, kurios sudaro jo „plaštaką“, kurių dydis žymiai mažesnis už mechanizmo matmenis.

Kaip žinoma iš mechanikos, kūno padėtis erdvėje apibrėžiama šešiomis apibendrintomis koordinatėmis. Laisvas kieto kūno judesys gali būti suskaidytas į pirminės eigos poslinkį, susijusį su kažkokiu laisvai pasirinktu tašku, ir į sukimąsi to taško atžvilgiu. Atitinkamai iš šešių nepriklausomų apibendrintų koordinačių, aprašančių kieto kūno judėjimą, tris koordinatės užduoda poslinkį kai kurio fiksuoto kūno taško erdvėje, o tris charakterizuoja jo sukimąsi. Erdvinis manipulatorius bendru atveju turi turėti šešis judesio lygmenis: tris regionalinių (pernešimo) ir tris – lokaliųjų (orientuojančių) judesių apdirbimui. Tuo atveju, kada tenka manipuluoti nejudriais daiktais, kurie turi papildomus ryšius, gali atsitikti, kad nurodytų judesio lygmenų mažai.

Judesio lygmenų skaičius didesnis už šešis gali tapti būtinu atliekant sunkius darbus, susijusius su papildomais apribojimais manipulatoriaus grandžių poslinkiams dirbant sujauktoje erdvėje. Pramoniniams robotams, dirbantiems organizuotoje darbo erdvėje, kur darbo zonos sutvarkytos ir, kaip taisyklė yra horizontaliose ir vertikaliose plokštumose, atliekant darbo operacijas paprastai pakanka 4-5 lygmenų (3 pernešimo ir 1-2 orientuojančių). Paprasčiausi neperprogramuojami robotai, vadinami *autooperatoriais*, gali turėti 1-2 judesio lygmenų.

*Manipulatoriaus darbo erdvė* – erdvės dalis, kurioje randasi jo darbo organas visose galimose manipulatoriaus padėtyse.

Tikimasi, kad per artimiausią dešimtmetį DSP sparta labai smarkiai padidės. Iki 2010-ųjų "Texas Instruments" ketina sukurti DSP, galintį per sekundę atlikti tris trilijonus instrukcijų. Tokie procesoriai bus 230 kartų spartesni už naudojamus šiandien. Manoma, kad jie bus naudojami namų valdymo kompiuteriams, interneto televizijai, sveikatos diagnostikos prietaisams, autonominiams namų robotams ir video telefonams.

Po dešimties metų viename luste bus integruota po keliolika DSP procesorių, kurių kiekvienas turės 500 ar daugiau milijonų tranzistorių. Tokia integracija leis šiandieninio nešiojamojo kompiuterio galią sutalpinti į rankinio laikrodžio korpusą. Naujos DSP technologijos įgalins mobiliųjų komunikacijų tinklais siųsti ir gauti ne tik garso, bet ir vaizdo informaciją. DSP mums leidžia kasdien vis didesnę realaus pasaulio dalį paversti skaitmenine. Šis virsmas vis spartėja ir yra nebesustabdomas.

Viena iš priežasčių, kodėl žiniomis pagrįsta sistema blogai tinka šio tipo užduotims spręsti, yra ribotos robotų technologijos galimybės. Nors dabartiniu metu robotai gali sėkmingai naudoti žiniomis pagrįstas sistemas analizei, jų vizualinės galimybės negali greitai gauti reikiamų duomenų ir manipulatoriai negali reaguoti reikiamu greičiu.

### **1.1. Mažiausi pasaulyje robotai**

Mažiausias pasaulyje autonomiškas robotas, lengvai telpąs ant vieno lito monetos, gali keliauti ir nelygiais paviršiais, nešdamas su savimi sensorius, kameras bei radijo siųstuvus. Jo sukūrėjai iš nacionalinės Sandia laboratorijos (JAV) tikisi, jog jis sugebės prasiropšti siaurais vamzdžiais ar įlįsti pro mažus plyšius. Vieną dieną jis galės vykdyti užduotis, kurios iki šiol buvo skiriamos tik jo didesniesiems giminaičiams: ieškos minų, cheminių ginklų ir užverstų žemės drebėjimo metu griuvėsiuose žmonių.

Edas Helleris, mokslininkų iš Albuquerque grupės narys sako, kad taip turėtų atrodyti ateities robotai. Panaudoję naujovišką elektronikos komponentų „supakavimą“, naują pavaros koncepciją ir naujas roboto korpuso medžiagas, amerikiečių inžinieriai sugebėjo pagaminti nykštuką, užimantį vos 4 cm<sup>3</sup> ir sveriantį tik 28 gramus.

Vietoje ratų minirobotas juda varomas vikšrų grandinių. Jis gali apsisukti beveik tame pačiame taške, pasiekia apie 50 cm/min greitį ir nebloggeriai susidoroja su įvairiais kliūčių ruožais, pavyzdžiui, grubiu kilimu. Trys maži elementai aprūpina energija abu roboto variklius, be to robotas neša temperatūros jutiklį ir aštuonių kB atmintinę.

Artimiausiais metais mokslininkai norėtų papildyti roboto arsenalą mikrofonu, miniatiūrine kamera bei cheminiais sensoriais. Jeigu pavyktų įtaisyti dar ir siųstuvo elektroniką - radijo diapazono ar infraraudonosios spinduliuotės - mažylis galėtų perduoti duomenis ir išoriniams

kompiuteriams. Tuomet ir į vabzdžių spiečių panašūs daugelio robotų būriai galėtų rintis tarpusavyje ir kartu vykdyti įvairias užduotis. Pasak E.Hellerio, didžiausia iki šiol kliūtis yra per dideli energijos šaltiniai. Baterijos turėtų sverti mažiau, o jų pakakti turėtų ilgesniam laikui.

Po dešimtmečiais trukusių vilčių ir nusivylimų robotai galų gale pradeda rasti kelią į mūsų namus. JT Europos ekonominė komisija (UNECE) paskelbė duomenis, iš kurių aiškėja, kad 2002 m. parduotų buitinių robotų skaičius išaugo trigubai. Šiais metais tokių robotų pardavimas pirmą kartą turėtų pralenkti pramoninių robotų skaičių.

UNECE robotais vadina autonomiškas, programuojamas ir judrias ar turinčias judančią ranką mašinas. Pramonėje, ypač automobilių gamyboje, tokios mašinos yra naudojamos jau daug metų, bet iki šiol jos buvo labai brangios ir dėl to negalėjo būti patrauklios eiliniams vartotojams, sakoma komisijos paskelbtoje ataskaitoje "World Robotics 2003". Pavyzdžiui, 1999 m. švedų būtinės technikos gamintojas Electrolux pradėjo pardavinėti pirmąjį robotinį dulkių siurblių, pavadintą *Trilobite*. Šis pyrago formos automatas galėjo judėti po namus siurbdamas nešvarumus ir sugebėdamas išvengti visų jo kelyje pasitaikiusių daiktų. Tačiau Trilobitas kainavo virš 2500 dolerių, beveik dešimteriopai brangiau už paprastą dulkių siurblių, todėl jis buvo labai prastai perkamas.

Situacija keičiasi dėl to, kad buičiai skirtų robotų, galinčių, pavyzdžiui, pjauti žolę pievelėje ar siurbti dulkes, kaina sparčiai mažėja. 2002 m. pradžioje amerikiečių firma Robot pradėjo siūlyti vartotojams dulkių siurblių *Roomba*, sugebantį beveik tiek pat kaip Trilobitas, bet kainuojantį tik 199 dolerius. Šių robotų dabar yra parduodama labai daug.

Robot įkūrėjas Colinas Angle sutinka, kad praeityje būtiniai robotai kainavo per brangiai. Kompiuterių komponentų kaina metams bėgant labai sumažėjo, bet robotų gamintojai pripakavo savo gaminamus prietaisus įvairių sensorių, todėl jų kaina liko nepakitusi. Angle sako, kad jų firmos sėkmė slypi tame, kad jiems pavyko sumažinti sensorių skaičių ir kompensuoti tai įdiegus tobulesnę programinę įrangą.

Pigesnių, ne tokių sudėtingų prietaisų kūrimo tendencija gali reikšti tai, kad mums teks pamiršti svajones apie robotus-tarnus. Vietoje jų turėtų atsirasti daugiau Sony šunį-robotą Aibo ar Honda sukurtą šokantį humanoidą *Asimo* primenančių žaisliukų.

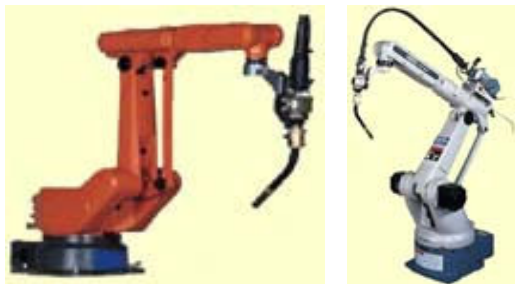
UNECE apžvalga rodo, kad pramoginių robotų yra parduodama tris kartus daugiau nei tų, kurie skirti įvairiems darbams buityje atlikti. Tokių prietaisų paskirtis yra ne taip griežtai apibrėžta, todėl ir nusiviliama jais gerokai rečiau. Be to pramoginiai robotai yra daugiau skirti vaikams, todėl tėvai perka juos siekdami pratinti savo vaikus prie ateities technologijų. Tiesa, tokia investicija į ateitį nėra pigi. Šuo-robotas Aibo kainuoja apie 2400 dolerių.



**2 pav.** Šuo-robotas Aibo

Pastaruju metu, kuriant pramoninius robotus ir manipulatorius, yra tendencija mažinti jų gabaritus, siekiant tuo pačiu padidinti gaunamos informacijos ir atliekamų veiksmų kiekį ir apimtį.

3 paveiksle pavaizduoti robotai, kurių keliamoji galia nuo 1 iki 10 kilogramų. Tai yra vienos firmos robotai, kurių konstrukcija yra panaši, tik skiriasi masės, tipai, bei darbo paskirtis.



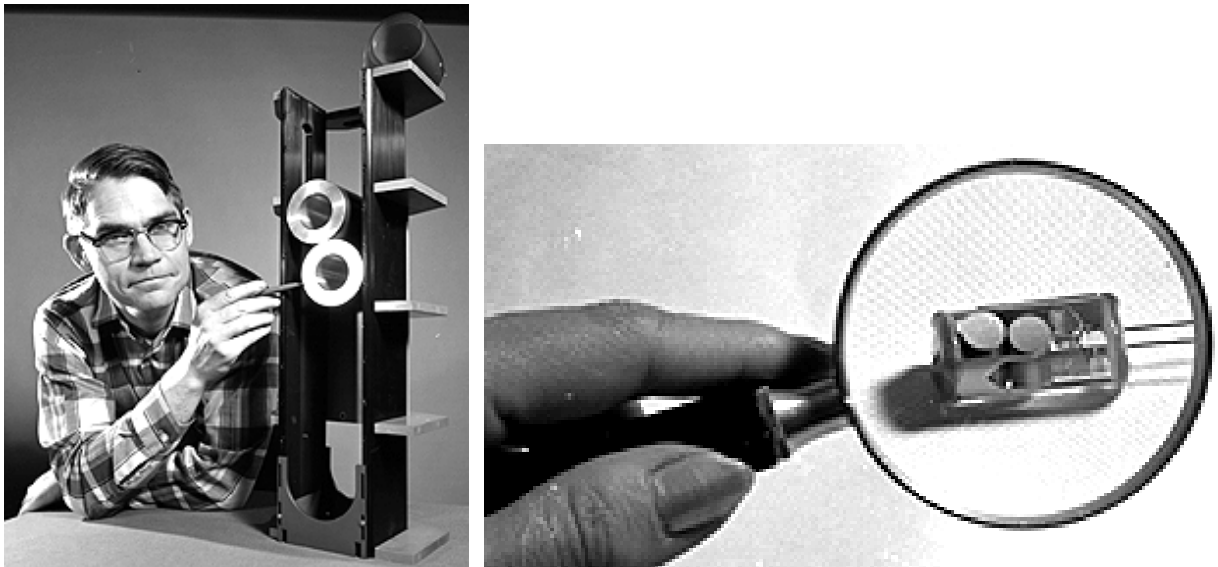
**3 pav.** OTC firmos robotai

*Šio darbo tikslas* – sukurti originalius mikromanipulatorius, naudojamus robototeknikoje, ir atlikti jų dinamikos tyrimus.



## 2. ROLAMAITO TIPO MECHANIZMŲ KONSTRUKCINĖ ANALIZĖ

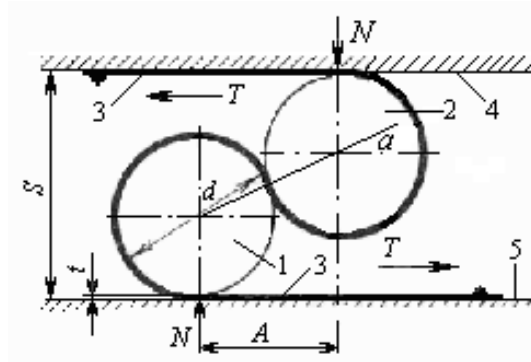
Mokslinio tyrimo centro Sandia (JAV) inžinierius D.F.Wilkes (Donaldas Uilksas), nuo 1960 m. kurdamas greitaieigį mechanizmą atominės bombos susprogdinimui, 1967 m. darbą baigė, sukūręs labai paprastą juostinį ritininį mechanizmą [1,2]. Jį pavadino Rolamaito tipo mechanizmu (RTM). ROLAMITE sudarytas iš dviejų anglų klb. žodžių *roller* – ritinėlis + *mite* – kuklus įnašas, matyt taip D.Uilksas norėjo pabrėžti savo įnašą į mechanikos mokslą (4 pav.).



4 pav. Donaldas F. Uilksas su sukurtais Rolamaito tipo mechanizmais

Šiuos mechanizmus sukūręs Uilksas nurodė RTM privalumus prieš kitus juostinius ritininius mechanizmus: labai paprastą konstrukciją, didelį kinematinį tikslumą, mažą trinties koeficientą (mažiausia gauta trinties koeficiento reikšmė 0,00004), platų funkcinį pritaikymą, ypač tiksluose prietaisuose, mažagabaritiniuose mechaniniuose ir elektromechaniniuose įrengimuose, robototeknikoje, medicinoje.

**Klasikinė RTM konstrukcija** (5 pav.) sudaryta iš 2-jų cilindrinų ritinėlių 1 ir 2, kampu, paprastai  $>180^{\circ}$ , glaudžiai apgaubiamų raidės S formos kilpose lanksčia juosta 3, savo galais pritvirtinta prie kreipiančiųjų paviršių 4 ir 5. Ritinėliai rieda juosta neslysdami, atlieka tiesialinijinį grįžtamąjį su vienalaikiu sukimusi judesį. Lanksti ir atspari tempimui juosta daroma iš plastiškų metalų, ypač berilio ir vario lydinių, plastikų ir austinių medžiagų. Ritinėliai daromi iš kaprono, politetrafluoretileno su austo stiklo pluošto užpildu, berilinės bronzos, nerūdijančio plieno.



**5 pav.** Klasikinė Rolamaito tipo mechanizmo schema

Visos RTM konstrukcijos pagal išpildymo būdą skirstomos į dvi grupes:

- 1) su kreipiančiais paviršiais – **rėminiai RTM**;
- 2) be kreipiančių paviršių – **nerėminiai RTM**.

Ritinėliai rėminiuose RTM atlieka sukamąjį (jei RTM korpusas judamas), vienalaikį žengiamąjį ir sukamąjį arba planetinį (jei RTM korpusas nejudamas) judesį.

Nerėminiuose RTM ritinėliai atlieka tik sukamąjį arba sukamąjį su vienalaikiu žengiamuoju išilgai savo ašies judesį. Nerėminiai RTM panaudojami elektromechaniniuose prietaisuose, juostos traukimo mechanizmuose ir kt.

Rėminiai RTM panaudojami kaip atramos, pritaikomos termostatuose, judesio keitikliuose, guoliuose, siurbliuose, manipuliatorių griebtuose ir kt.

Rėminių RTM grupei priskiriami mechanizmai, panaudojami kaip atramos. Paprasčiausia jų – klasikinė RTM konstrukcija, parodyta 5 pav. Ritinėliai joje atlieka žengiamąjį – grįžtamąjį su vienalaikiu sukimusi judesį.

Šios rolamaitinės atramos statinė pusiausvyra aprašoma lygtimi:

$$TS = NA \quad (1)$$

čia  $T$  - juostos įtempimo jėga;

$S$  - atstumas tarp kreipiančiųjų plokštumų;

$N$  - normalinė jėga;

$A$  - atstumas tarp ritinėlių centrų pagal horizontalę.

Didžiausią leidžiamą ritinėlių skersmenį (t.y. tam, kad ritinėliai 1 ir 2 „neiškristų“ iš juostos 3 kilpų) apsprendžia atstumas tarp kreipiančiųjų paviršių 4 ir 5:

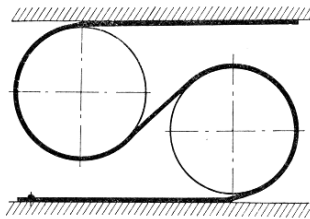
$$(d_1 + d_2 + 3t) > S; (d_1 + 3t) < S \quad (2)$$

kur  $d_1$  ir  $d_2$  – ritinėlių skersmenys ( $d_1$  – didesnio skersmens ritinėlis),  
 $t$  – juostos storis,  $S$  – atstumas tarp kreipiančiųjų paviršių.

Rolamaito tipo mechanizmas yra tikslus mechanizmas, kurio elementai, kaip pateikia D.F.Uilksas, juda vienas kito atžvilgiu be praslydimo, tačiau kiti mokslininkai kaip Persivalas ir Norvudas, o taip pat Kedmenas savo darbuose [3,4] nurodo, kad ritinėlių praslydimas egzistuoja prie tam tikrų mechanizmo parametrų, nors teorinio pagrindimo šiam reiškiniui nepateikia. Jie atkreipia dėmesį, kad labai svarbu suprasti praslydimo tarp RTM elementų esmę. Taigi, vienas pagrindinių aspektų, kuriant rolamaitinius mechanizmus, yra praslydimo tarp RTM elementų aspektas.

Praslydimui tarp RTM elementų turi įtakos juostos 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 juostą, pasiskirsto vienodžiau.*

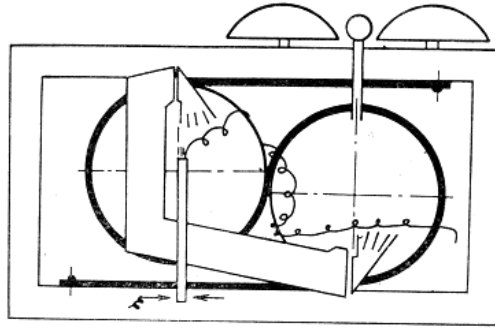
Rolamaitiniai mechanizmai pasižymi ne tik dideliu funkcinio pritaikomumu, bet ir konstrukcine įvairove. D.F.Uilksas sukūrė RTM su neįtempta juosta (6 pav.). Tokiame mechanizme



**6 pav.** RTM su neįtempta juosta

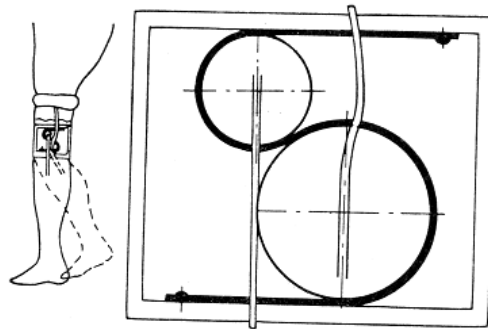
maža trintis, ritinėliai labai judrūs ir gan nejautrūs užterštam ir šiurkščiam paviršiui, kas labai svarbu kuriant mažagabaritinius įrengimus.

RTM atramas galima pritaikyti ir signalizacijai (7 pav.). Prie RTM ritinėlių prijungti elektromagneto kontaktai. Ritinėliai atlieka žengiamai – sukamąjį judesį, o RTM korpusas nejuda.



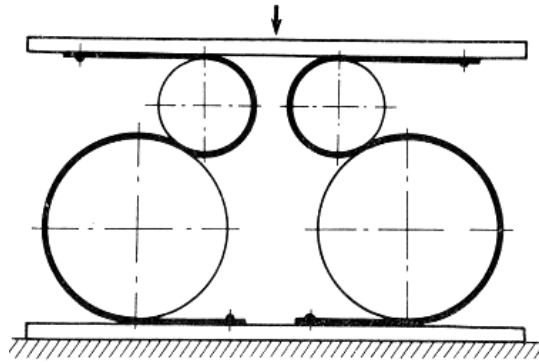
**7 pav.** RTM – signalizacijos įrenginys (JAV patentas Nr. 3592069)

Sukurtas RTM kaip kojos kelio sąnario protezas (8 pav). Jame panaudojami atitinkamu būdu sujungti su ritinėliais strypai, pritvirtinti prie kojos protezo apatinės ir viršutinės dalių. Šiame RTM korpusas nejudamas, o ritinėliai atlieka žengiamai grįžtamąjį judesį su pasisukimu apie savo ašį.

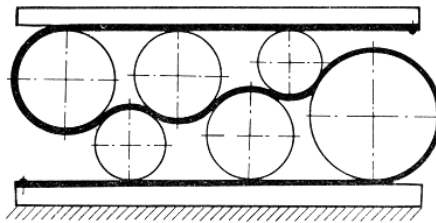


**8 pav.** RTM – kojos kelio sąnario protezas (JAV patentas Nr. 3592069)

Rolamaitiniai mechanizmai gali būti ne tik su dviem ritinėliais, bet ir su didesniu jų kiekiu, priklausomai nuo funkcinės paskirties. 9-ame paveiksle parodytas RTM su dviem porom ritinėlių, o 10-ame – pavaizduota daugiaritininė RTM konstrukcija.

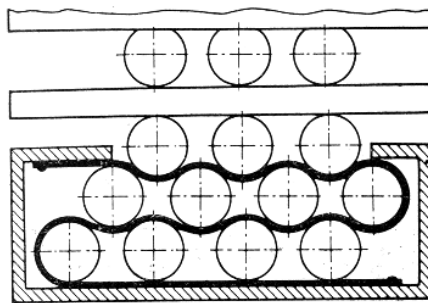


**9 pav.** RTM atrama su dviem porom ritinėlių



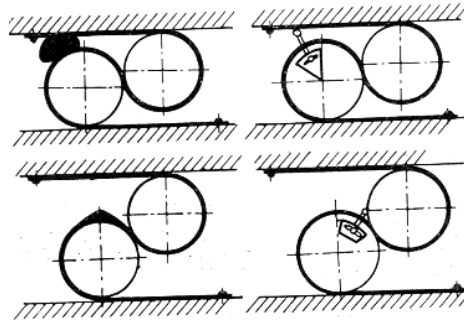
**10 pav.** Daugiaritininis RTM

RTM sunkaus krovinio palaikymui (11 pav.) susideda iš dviejų rolamaitinių mechanizmų, tarp kurių ritinėlių įstatomas sunkus krovinsys. Apatinis RTM turi keliolika porų ritinėlių ir įtemptą lanksčią juostą, galais pritvirtintą prie kreipiančiųjų paviršių, ir palaikomuosius ritinėlius, įstatytus tarp sunkaus krovinio ir lanksčios juostos. Analogiška yra ir viršutinio RTM konstrukcija.



**11 pav.** Rolamaitinio mechanizmo, skirto sunkaus krovinio palaikymui, schema (Didžiosios Britanijos patentas Nr. 1181636)

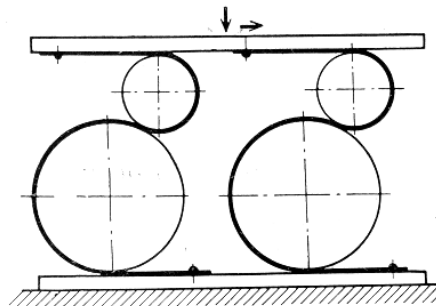
Norint sulaikyti ritinėlius tam tikroje padėtyje yra naudojami stabdžiai, kurie gali būti tvirtinami prie ritinėlių ar juostos (12 pav.).



**12 pav.** RTM su stabdžiais, pritvirtintais prie juostos ar ritinėlių

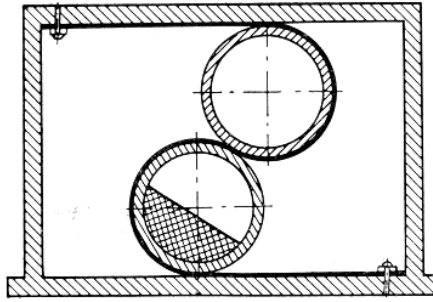
Galima praplėsti RTM funkcines galimybes, įvedus į RTM tamprius elementus ar kitokiu būdu suteikus RTM tampriąsias savybes. Tam tikslui pasiekti yra keletas būdų.

Paprasčiausias būdas – RTM konstrukcijoje panaudoti nevienodo skersmens, t.y. nesimetrinius ritinėlius (13 pav.). Tokiuose RTM susidaro pastovi jėga, nepriklausanti nuo ritinėlių padėties horizontalios ašies atžvilgiu, ir mechanizmas tampa kaip pastovaus veikimo spyruoklė.

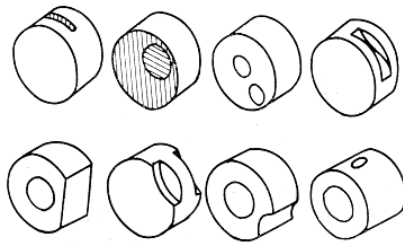


**13 pav.** RTM su nesimetriniais ritinėliais schema

Kitas būdas gauti tamprioms charakteristikoms – RTM konstrukcijoje panaudoti debalansuotus ritinėlius, t.y. ritinėlius su įvairiausiom išpjovom, nuopjovom, skylėmis, kitos medžiagos įterptimis (14, 15 pav.). Tokie ritinėliai mechanizme stengiasi grįžti į pusiausvyros padėtį.

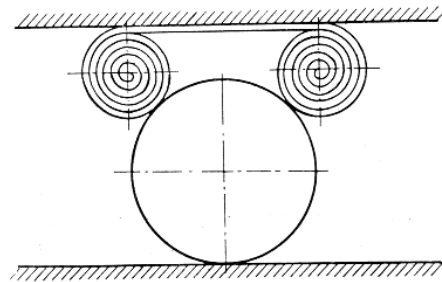


**14 pav.** RTM su debalansuotu ritinėliu



**15 pav.** RTM debalansuoti ritinėliai

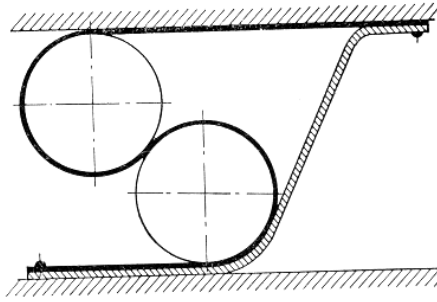
Gan įdomus konstrukciniu sprendimu RTM, kuriame lanksti juosta ne pritvirtinta prie kreipiančiųjų paviršių, o susukta į du ritinėlius, sąveikaujančius su trečiuoju – tikroju ritinėliu (16 pav.).



**16 pav.** RTM su juosta, susukta į du ritinėlius (JAV patentas Nr. 3471668)

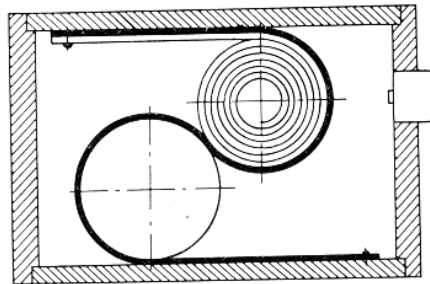
Toks mechanizmas iš tikro turi tik vieną juostą ir vieną ritinėlį. Priklausomai nuo to, kurio juostinio ritinėlio skersmuo didesnis, lanksti juosta „stengiasi“ grįžti į pusiausvyros padėtį, t.y. į mažesnio skersmens juostinio ritinėlio pusę iki to momento, kol abiejų juostinių ritinėlių skersmenys tampa vienodi.

Tampriąsias savybes galima gauti įvedant į RTM konstrukciją papildomą juostą. Tai gali būti „stumianti“ juosta (su užduota tampriąja charakteristika) (17 pav.), arba juosta, susukta į ri-



**17 pav.** RTM su papildoma („stumiančia“) juosta

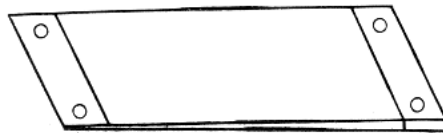
tinėlių (18 pav.). Pagalbinė juosta „stengiasi“ išsitiesinti, veikia kaip spyruoklė, ir sujungia kontaktą.



**18 pav.** RTM su papildoma juosta, susukta į ritinėlį (JAV patentas Nr. 3471668)

Gan paplitęs būdas gauti tamprioms charakteristikoms yra RTM lanksčios juostos skerspjūvio keitimas. Galimi du variantai.

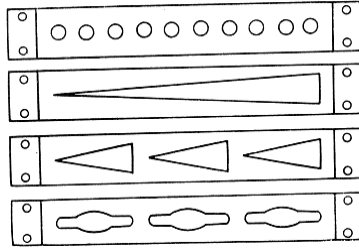
Pirmasis – juostos storio keitimas (19 pav.).



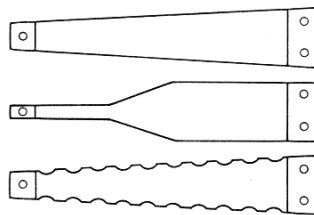
**19 pav.** RTM kintamo storio juosta

Antrasis variantas – juostos skerspjūvio ploto keitimas išpjovomis. Priklausomai nuo išpjovos formos galima gauti pastovaus ar kintamo dydžio jėgas (20, 21, 22 pav.). Išpjovos juostoje gali būti vidinės (20 pav.), išorinės (21 pav.), kombinuotos (22 pav.).

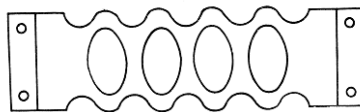




**20 pav.** RTM juostų su vidinėmis išpjovomis schema

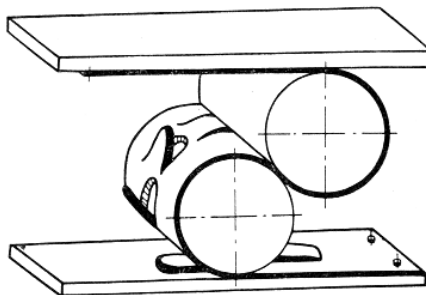


**21 pav.** RTM juostų su išorinėmis išpjovomis schema

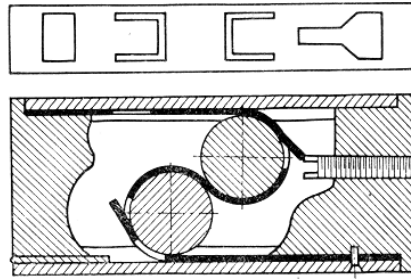


**22 pav.** RTM juostos su kombinuotomis išpjovomis schema

Žinomi RTM, kuriuose tampriųjų charakteristikų gavimui panaudojami taip vadinami standinimo „liežuvėliai“. 23-ame paveiksle parodyti RTM su užapvalintais standinimo liežuvėliais, o 24-ame paveiksle – RTM su juosta, kuri pagaminta su išpjovomis bei stačiakampiais standinimo liežuvėliais.

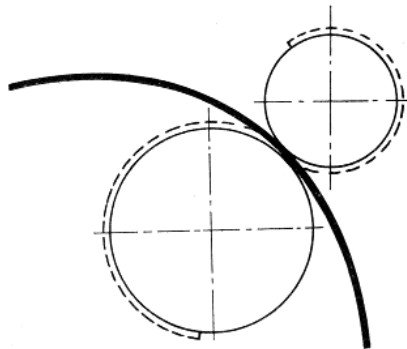


**23 pav.** RTM su juosta, pagaminta su užapvalintais standinimo liežuvėliais



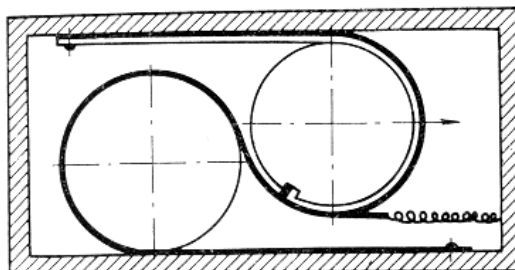
**24 pav.** RTM su juosta, pagaminta su vidinėmis išpjovomis ir stačiakampio formos standinimo liežuvėliais

Taip pat rolamaito mechanizmuose, norint gauti kintamą tamprią RTM charakteristiką, naudojamos juostos su kintamu (pagal ilgį) pradiniu kreivumo spinduliu (25 pav.).

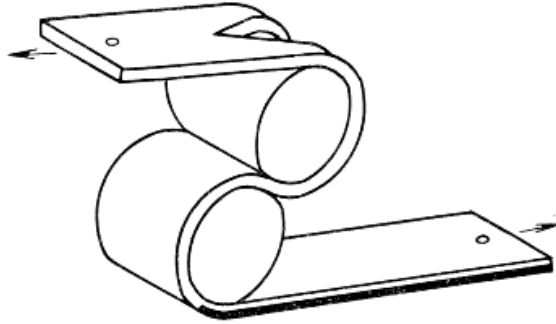


**25 pav.** RTM juosta su pradiniu kreivumo spinduliu

Jeigu juostą pagaminti bimetaline, tai RTM tamprioji charakteristika priklausys nuo aplinkos temperatūros. Šiuo atveju RTM galės būti panaudotas kaip termostatas (26 ir 27 pav.).



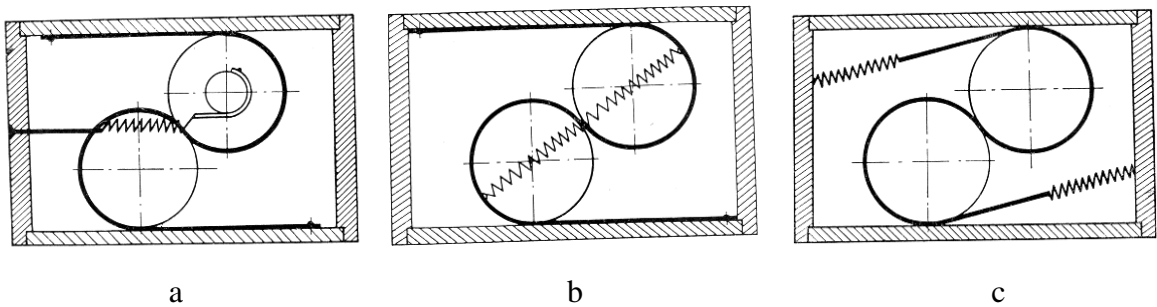
**26 pav.** RTM - termostatas



**27 pav.** RTM - termostatas

RTM, pavaizduotame 26 pav., įvesta bimetalinė juosta ir papildoma spyruoklė, pritvirtinta prie pagrindinės juostos, o RTM, pavaizduotame 27 pav., juosta pagaminta iš 2-jų dalių ir su trikampė vidine išpjova. Papildoma spyruoklė ir trikampė išpjova reikalingos gauti atsveriančiai mechanizmo spyruoklinę jėgai gauti. RTM – termostatai 4-5 kartus jautresni už paprastus plokštinius bimetalinius termostatus.

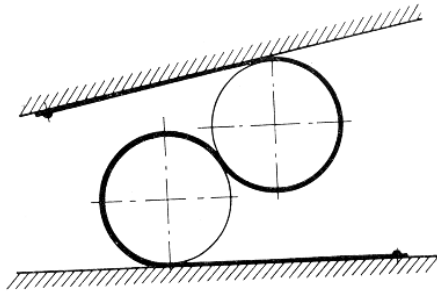
Spyruoklines charakteristikas galima gauti į RTM įvedus spyruokles (28 pav.).



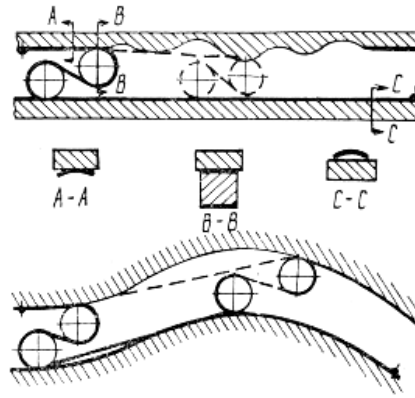
**28 pav.** RTM su spyruoklėmis schemas ( Didžiosios Britanijos patentas Nr. 1217947)

Jeigu rolamaitiniame mechanizme prie ritinėlio pritvirtinsime kumštelį, o prie jo spyruoklę, kitu galu tvirtinamą prie korpuso sienelės, tai priklausomai nuo tvirtinamo kumštelio formos galime gauti skirtingas tamprios jėgos charakteristikas (28 pav., *a*). Spyruoklė gali būti tvirtinama prie ritinėlių (28 pav., *b*) arba prie juostos galų ir korpuso sienelių (28 pav., *c*).

Tampriąsias charakteristikas galime gauti, keičiant kreipiančiųjų paviršių lygiagretumą (29, 30 pav.).



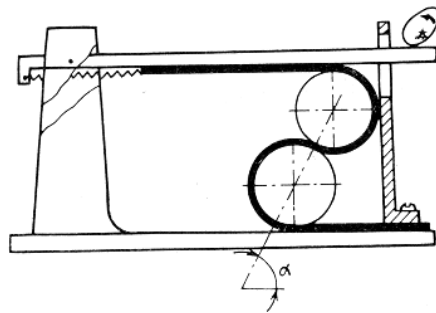
**29 pav.** RTM su nelygiagrečiomis kreipiančiosiomis



**30 pav.** RTM su nelygiagrečiomis kreipiančiosiomis

Tokiuose RTM juosta neįtempta, „susilpninta“ ir skerspjūvyje išsiritusi lanku. Kreipiančieji paviršiai RTM gali būti banguoti, su įpjovom, barjeriais ir kt. formų, priklausomai nuo funkcinės paskirties. Bet kuriame tokių RTM ritinėliai „stengiasi“ nuriedėti į mažesnio pasipriešinimo zoną ir toks RTM, priklausomai nuo kreipiančiųjų paviršių tipo, tampa panašus į spyruoklę su pastovia ar kintama tampriąja charakteristika.

Sukurtas RTM, kuriame vieno iš kreipiančiųjų paviršių lygiagretumas keičiamas kumšteliu, o juostos įtempimą užtikrina spyruoklė (31 pav.).

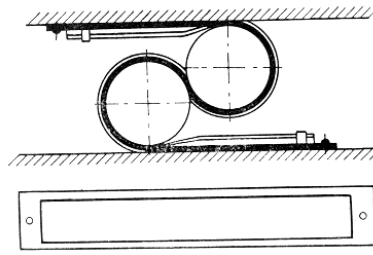


**31 pav.** RTM su keičiamu kreipiančiųjų paviršių lygiagretumu (JAV patentas Nr. 3739648)

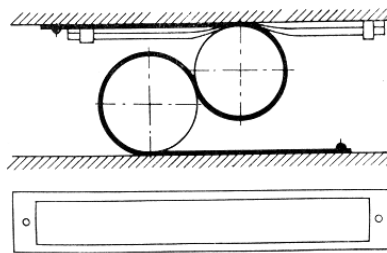
Sukantis kumšteliui, keičiasi vieno iš kreipiančiųjų paviršių lygiagretumas kito atžvilgiu, o spyruoklės įtempta juosta verčia ritinėlius riedėti į tą padėtį, kur atstumas tarp kreipiančiųjų didžiausias. Tokį RTM galima priskirti grupei RTM su valdoma tampriąja charakteristika.

Donaldas F. Uilksas sukūrė rolamaitinius siurblius į RTM įveddamas papildomą elementą – elastinę perspaudžiamą žarnelę, kuri gali būti pagaminta iš gumos, plastmasės ar metalo.

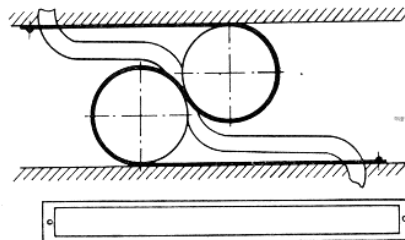
Vienuose RTM - siurbliuose žarnelė, įstatyta į stačiakampės formos juostos išpjovą, gaubia abu ritinėlius (32 pav.), kituose – žarnelė tvirtinama prie kreipiančiosios plokštumos (33 pav.), dar kituose – žarnelė (34 pav.).



**32 pav.** RTM – siurblys su gaubiančia abu ritinėlius žarnele



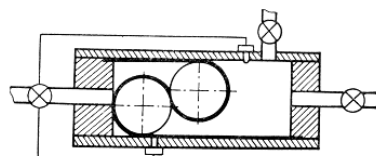
**33 pav.** RTM – siurblys su tvirtinama prie kreipiančiosios plokštumos žarnele



**34 pav.** RTM – siurblys su įstatoma tarp ritinėlių žarnele

Visose pateiktose RTM – siurblių konstrukcijose juosta yra gaminama su stačiakampės formos išpjova žarnelei.

RTM gali atlikti ir siurblio stūmoklio funkciją (35 pav.).

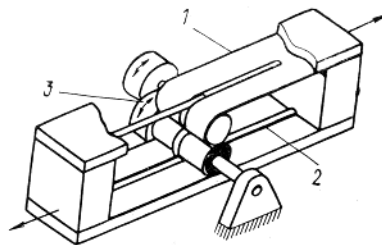


**35 pav.** RTM – siurblio stūmoklis (JAV patentas Nr. 3452175)

Šiame siurblyje ritinėlių pora patalpinta juostos S formos kilpose tarp kreipiančiųjų sienelių, kurių tarpusavio atstumas mažesnis už ritinėlių skersmenų sumą; lanksti juosta įtempta ir jos galai įtvirtinti korpuse. Ritinėliai su juosta korpuse sudaro dvi atskiras kameras. Mikrojungėjai yra paveikiami ritinėlių, jiems judant juosta iš vieno korpuso galo į kitą, valdo vožtuvą, įleidžiant darbo skystį į kamerą, o taip pat jo išleidimą į atmosferą. Šio RTM ritinėliai atlieka žengiamai grįžtamąjį judesį.

Visose anksčiau pateiktose RTM konstrukcijose ritinėliai judami, atlieka sukamąjį ir sukamai žengiamąjį judesį, o RTM korpusas lieka nejudamas.

Tam, kad RTM korpusas būtų judamas ir RTM būtų galima panaudoti kaip tiesialinijinę atramą, D.F.Uilksas sukūrė RTM (36 pav.), kuriame ritinėlių ašys nejudamai pritvirtintos prie pa-

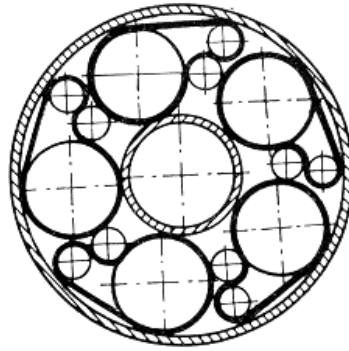


**36 pav.** RTM – tiesialinijinio judesio atrama: 1 – juosta su išpjova kabeliui; 2 – kabelis; 3 - ritinėlis

grindo, o ritinėliai atlieka tik sukamąjį judesį, t.y. tik sukasi apie savo ašis, riedėdami juosta ir kabeliu, gaubiančiu ritinėlius iš priešingos nei juosta pusės. Kiekvienas ritinėlis yra gaubiamas juosta ir kabeliu suminiu  $360^\circ$  kampu.

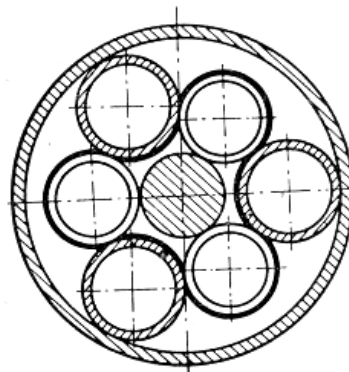
Įdomūs konstrukciniai sprendimai RTM, turintys žiedinę kreipiančiąją. Tokiuose RTM ritinėliai atlieka planetinį judesį. RTM su žiedine kreipiančiąja gali būti naudojami kaip guoliai ar guolinės atramos (37 pav.), frikciniai perdavimo mechanizmai (38 pav.), sukamųjų virpesių sužadintojai (39 pav.).

RTM – guolinė atrama (37 pav.) susideda iš išorinės ir vidinės kreipiančiųjų, su kuriomis kontaktuojasi penkios begalinės juostos; jų vidiniame žiede yra du skirtingo skersmens ritinėliai, o išorine puse kiekviena iš gretimų juostų kontaktuojasi per ritinėlį, kurio skersmuo parinktas taip, kad juostos nesusiliestų.



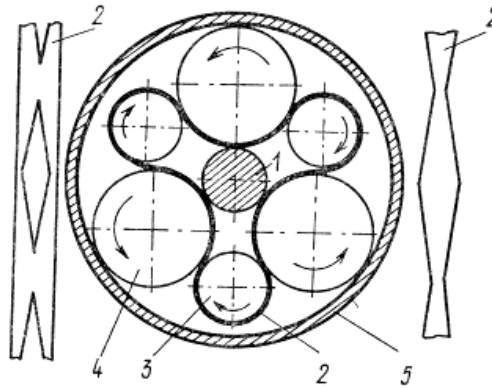
**37 pav.** RTM – guolinė atrama (VFR patentas Nr.1750417)

RTM – frikcinis perdavimo mechanizmas (38 pav.) susideda iš išorinės ir vidinės sienelių, lanksčios begalinės juostos, kurios vidinėje pusėje yra trys ritinėliai, besikontaktuojantys su vidine sienele – velenu ir besilaikantys dėl juostos įtempimo, o išorinėje juostos pusėje yra trys ritinėliai, besikontaktuojantys su išorine sienele. Šio perdavimo mechanizmo ritinėliai atlieka planetinį judesį. Mechanizmas gali atlikti ir guolio funkciją. Kaip šio mechanizmo trūkumą reikėtų pažymėti žemą kinematinį tikslumą, nes galimi praslydimai tarp ritinėlių ir išorinės sienelės, bei ritinėlių ir vidinės sienelės - veleno dėl kontakto tarp jų mažo ploto.



**38 pav.** RTM – frikcinis perdavimo mechanizmas (Didžiosios Britanijos patentas Nr. 1181636)

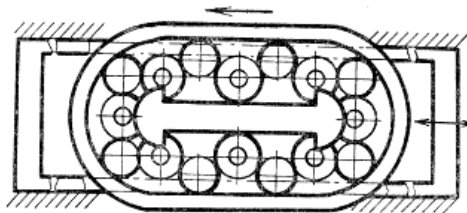
Sukamųjų virpesių jutiklių taravimui sukurtas RTM - sukamųjų virpesių sužadintojas (39 pav.). Didesnio skersmens ritinėliai 4 kontaktuoja betarpiškai su cilindrinio korpusu 5 ir per be



**39 pav.** RTM - sukamųjų virpesių sužadintojas (TSRS išradimas Nr 474360)

galinę juostą 2 su velenu 1 ir mažesnio skersmens ritinėliais 3. Begalinė juosta 2 turi tam tikros formos išpjovas ar nuopjovas, charakterizuojančias virpesių formą. Sukant veleną 1, gaunantį judesį nuo tiriamojo mazgo, jėga, reikalinga juostos deformacijai, keičiasi kintant juostos skerspjūviui. Ši kintanti jėga per ritinėlius 3 ir 4 perduodama cilindriniam korpusui 5. RTM ritinėliai atlieka planetinį judesį.

Donaldas F. Uilksas sukūrė konstruktyviniu požiūriu įdomų “žingsniuojantį” guolį (40 pav.).

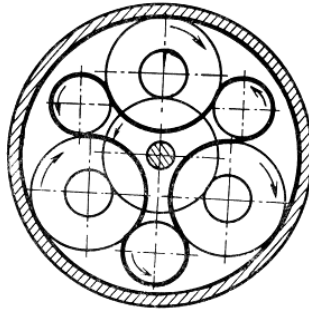


**40 pav.** RTM – “žingsniuojantis” guolis

Šis RTM turi rėmelį, kietą vidinę ir lanksčią begalinę išorinę kreipiančiąsias, grupę ritinėlių, besikontaktuojančių tarpusavyje per lanksčią begalinę juostą. Paveikus mechanizmą išorine jėga, vieni ritinėliai per juostą rieda tik kieta vidine kreipiančiąja, o kiti – tik lanksčia išorine kreipiančiąja. Toks guolinis RTM galėtų būti pritaikytas staklių suporte.

Donaldas F. Uilksas naudoja ir laiptuotus ritinėlius kinematinio tikslumo padidinimui. Pavyzdžiui, jie panaudoti RTM, skirtame judesio perdavimui (41 pav.).

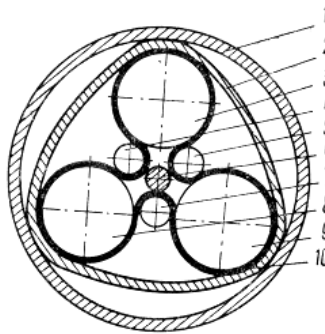




**41 pav.** RTM, skirtas judesio perdavimui

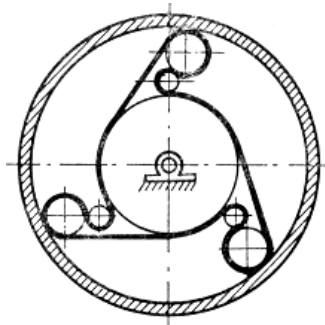
Šiame RTM begalinė lanksti juosta dideliu kampu gaubia mažesnio skersmens ritinėlius ir liečiasi mažesniu kampu su laiptuotais ritinėliais, kurie savo ruožtu kontaktuojasi ir su centru vienu. Šio RTM ritinėliai atlieka planetinį judesį. Įtaisą galima naudoti ir kaip guolį.

Sukurtas RTM – banginis frikcinis perdavimo mechanizmas (42 pav.), užtikrinantis per-



**42 pav.** RTM – banginis frikcinis perdavimo mechanizmas (TSRS išradimas Nr. 544791)

davimo santykį virš 10000. RTM susideda iš išorinio kieto žiedo 1, lankstaus žiedo 2, didesnio skersmens ritinėlių 3,8,9, mažesnio skersmens ritinėlių 4,5,7 ir ritinėlius gaubiančios lanksčios



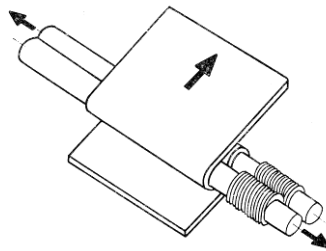
**43 pav.** RTM, skirtas judesio perdavimui (JAV patentas Nr. 3691871)

begalinės juostos 10, besikontaktuojančios su centriniu velenu 6. Kadangi judesio perdavimas iš centrinio veleno 6 lanksčiam žiedui 2 vyksta praktiškai be praslydimo tik per juostą 10, kurios kilpose randasi ritinėliai, tai mechanizmui užtikrinamas aukštas kinematinis tikslumas. Ritinėliai atlieka planetinį judesį. Šis mechanizmas atlieka bangų generatoriaus funkciją ir gali būti panaudotas automatinųjų reguliavimo sistemų reduktoriuose.

Kinematiniai tikslūs yra RTM mechanizmai, kuriuose visi elementai liečiasi tik su begaline juosta (43 pav.). RTM, pavaizduotame 43 paveiksle, ritinėliai gaubiami juosta dideliu kampu. Visi RTM elementai liečiasi tik su juosta, ritinėliai atlieka planetinį judesį, o juosta persislenka, atsiremndama į cilindrinį kreipiantįjį paviršių.

**Nerėminiai RTM** esminiai skiriasi nuo rėminių, t.y. turinčių kreipiančiuosius paviršius. Nerėminių RTM ritinėlių ašys nejudamos, ritinėliai atlieka sukamai – žengiamąjį ar sukamąjį judesį, o juosta daugelyje konstrukcijų yra pratraukiama (tempiama).

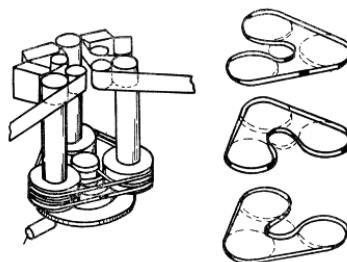
Žinomas elektromechaniniame įrenginyje panaudotas srieginis RTM (44 pav.), kuriame ritinėliai atlieka sukamai – žengiamąjį judesį išilgai savo ašies.



**44 pav.** RTM, kurio elementai atlieka vienalaiškį judesį trejomis kryptimis

Traukiant juostą, ritinėliai pradeda sukstis, o sriegis priverčia juos judėti išilgai ašies priešinga kryptimi. Tokiu būdu šio RTM elementai atlieka vienalaiškį judesį trejomis kryptimis.

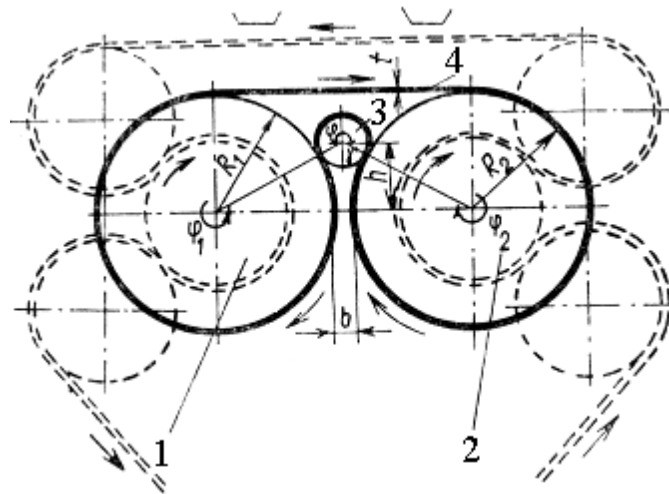
Rolamaitinį darbo principą išvelgiame ir 45-ame paveiksle pavaizduotame juostos traukimo mechanizme (JTM).



**45 pav.** Juostos traukimo mechanizmas (JAV patentas Nr.3741564)

RTM pavaros mazge yra net trys begaliniai dirželiai, glaudžiai su įtempimu dideliu kampu gaubiantys variklio veleną ir tris traukiančius juosta-informacijos nešėją velenėlius, gaunančius judesį nuo variklio veleno per jų gaubiančius dirželius. Šio JTM privalumas – greitas darbines eigos reversas bei aukštas informacijos nešėjo traukimo tolygumas.

Sukurtas rolamaitinis JTM (46 pav.), kurio pavaros mazgas susideda iš dviejų didesnio skersmens ritinėlių 1,2 ir mažesnio skersmens ritinėlio 3, glaudžiai, su įtempimu gaubiamų begaliniumi dirželiu 4. Ritinėlių 1,2 gaubimo dirželiu 4 kampas yra virš  $270^\circ$ , ritinėlio 3 – virš  $180^\circ$ . Dideli ritinėlių gaubimo dirželiu kampai užtikrina didelį ritinėlių sukimosi sinchroniškumą vienas kito atžvilgiu.



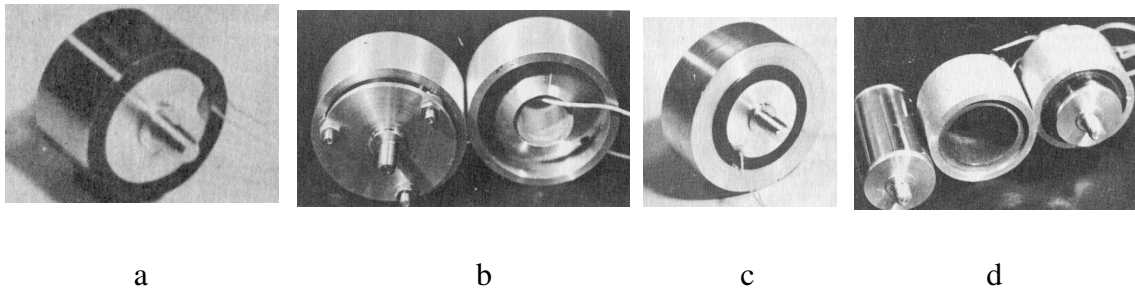
46 pav. Rolamaitinis JTM (TSRS išradimas Nr. 426239)

Reikia pastebėti, kad rolamaitiniai JTM, lyginant juos su kitokiais JTM, pasižymi dideliu juostos – informacijos nešėjo traukimo tolygumu, bei pavaros mazgo elementų sukimosi sinchroniškumu, nes išvengiama praslydimo tarp pavaros dirželio ir ritinėlių.

### 3. RTM SU VIRPANČIAIS ELEMENTAIS KONSTRUKCINĖ ANALIZĖ

Klasikiniuose RTM negalima valdyti tokių parametru kaip traukimo jėga arba pasipriešinimo judesiui jėgų momentas, išskyrus tik tampriųjų charakteristikų priklausomybę nuo RTM grandžių padėties.

Įtaisius RTM virpančius elementus, t.y. suteikus kryptingus aukštadažnius virpesius kontaktuojantiems kūnams, buvo praplėstos RTM funkcinės galimybės – atsirado galimybė valdyti juose trintį bei traukimo jėgą, padidinti darbo startstopiniu režimu greitaeigiškumą.



**47 pav.** RTM ritinėlių su vibroelementais tipai: *a* – virpantis nejudamas ritinėlis (Nr.1), *b* – virpantis nejudamas ritinėlis su bangolaidžiu (Nr.2), *c* - sukamas ritinėlis su PEK, sumontuotu ant nejudamos ašies (Nr.3), *d* - sukamas ritinėlis su PEK, įmontuotu į sukamą ritinėlio dalį – išorinį žiedą (Nr.4).

Labiausiai paplitusi RTM virpančių elementų sudėtinė dalis yra pjezoelektriniai keitikliai (PEK) – pjezokeraminiai elementai. Keičiant maitinimo signalo parametrus, galima gauti labai tikslų pozicionavimo režimą, todėl RTM su virpančiais elementais ypač tinka naudoti robototeknikoje, judesio atramose, siurbliuose, juostos traukimo mechanizmuose, griebtuose, tikslaus pozicionavimo mechanizmuose.

Daugelyje RTM konstrukcijų PEK yra ritinėlių, kurių ašys nejudamai tvirtinamos prie nejudamo pagrindo, sudėtinė dalis (47 pav.). RTM korpusas, veikiamas išorinių jėgų ar vidinių jėgų, kylančių kinematinėje ritinėlio ir juostos poroje, atlieka tiesiaieigį judesį. Tokių RTM ritinėliai atlieka vibracinių atramų ar vibrovariklių (VBV) funkcijas.

Kitose RTM konstrukcijose PEK gali būti panaudoti kaip rolamaitinių rotorinių VBV varančioji grandis.

47-ame *a* paveiksle matome virpantį nejudamą ritinėlį, susidedantį iš pjezokeraminio žiedo, užmauto ant ašies, tvirtinamos prie įrenginio nejudamo pagrindo. Kad išvengtų mechaninio pjezokeraminio žiedo išsidėvėjimo, ant jo užmaunamas elastinis frikcinis žiedas.

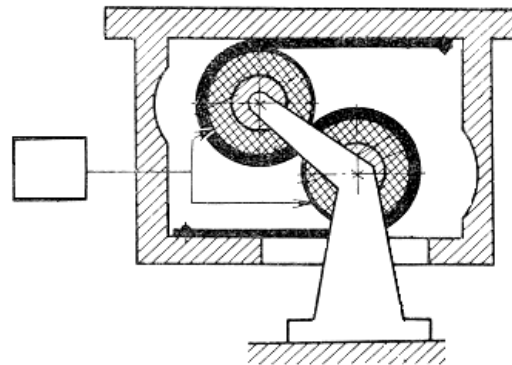
Norint padidinti virpesių amplitudę, ritinėliai gali būti gaminami su bangolaidžiais (47 *b* pav.). Ritinėliai, pavaizduoti 47 *a* ir *b* paveiksluose, yra nejudami ir juosta, gaubianti tokius ritinėlius, yra tempiama ir jais slysta.

Kad ritinėlis riedėtų juosta, ant ritinėlio elastinio frikcinio žiedo ar ritinėlio bangolaidžio užmaunamas kietas žiedas (47 *c* pav.).

Pjezokeraminis žiedas gali būti įmontuotas į ritinėlio sukamą dalį – išorinį žiedą (47 *d* pav.). Vidinėje pjezokeraminio žiedo dalyje įmontuojamas elastinis frikcinis žiedas, kuris kontaktuojasi su nejudama ritinėlio ašimi.

RTM korpusas, veikiamas išorinių ar vidinių jėgų, kylančių kinematinėje ritinėlio ir juostos poroje, atlieka tiesiaieigį judesį.

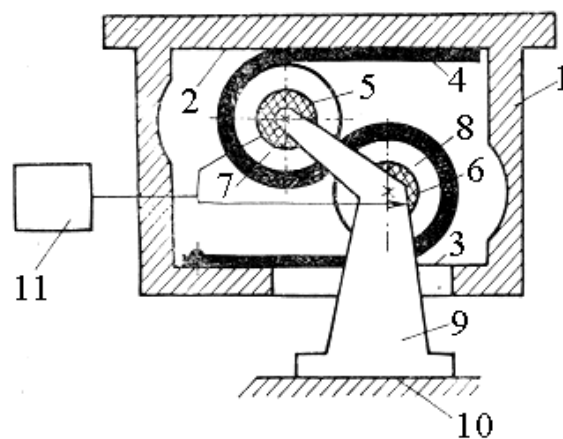
Tokių RTM ritinėliai atlieka vibroatramų (48, 49, 50 pav.) funkcijas.



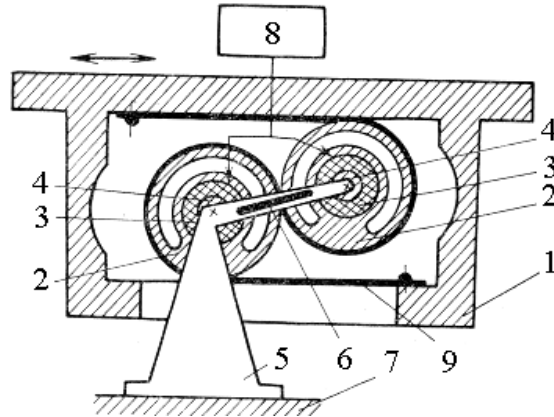
**48 pav.** RTM – tiesiaeigio judesio atrama su virpančiais nejudamais ritinėliais (TSRS išradimas Nr. 550498)

49–ame paveiksle pavaizduota tiesiaeigio judesio atrama turi virpančius nejudamus ritinėlius, kuriuose ant žiedinių PEK 5 ir 6 užtvirtinti bangolaidžiai 7 ir 8. Tarp juostos 4 ir bangolaidžių 7 ir 8 sukuriama virpesių plėvelė (VP) su mažesnėmis energijos sąnaudomis nei RTM su ritinėliais be bangolaidžių.

RTM panaudoti virpantys sukami ritinėliai, kurie susideda iš disbalansuotų žiedų 2, užmautų ant pjezokeraminių elementų 3, kurie užtvirtinti ant nejudamų ašių 4. Padavus aukštadažnį elektrinį signalą PEK elektrodams, susidaro virpesių suspausta dujinė plėvelė (VSDP) tarp PEK ir disbalansuoto žiedo ir ritinėliai gali pasisukti apie savo ašis. Jei RTM korpusą perslinksime, pvz., į kairę, tai apatinis ritinėlis pasisuks pagal laikrodžio rodyklę, viršutinis – prieš ją. Veikiant ritinėlių 2 svorio centrui, dėl ritinėlių disbalanso, jie stengsis grįžti į pradinę padėtį ir RTM korpusas svyruos apie pusiausvyros padėtį, stengdamasis į ją grįžti. Keičiant maitinimo įtampą ir dažnį galima valdyti sudaromos virpesių plėvelės parametrus, tuo pačiu valdyti linijinius korpuso svyravimus.



**49 pav.** RTM – tiesiaeigio judesio atrama su virpančiais nejudamais ritinėliais (TSRS išradimas Nr. 621909): 1 – korpusas; 2,3 – kreipiančiosios plokštumos; 4 – juosta; 5,6 – žiediniai PEK; 7,8 – bangolaidžiai; 9 – laikiklis; 10 – pagrindas



**50 pav.** Rolamaitinis dinaminis virpesių slopintuvas su virpančiais sukamais ritinėliais (TSRS išradimas Nr. 806930): 1 – korpusas; 2 – disbalansuoti žiedai; 3 – PEK; 4 – nejudamos ašys; 5 – laikiklis; 6 – laikiklio išima; 7 – pagrindas; 8 – aukštadažnės įtampos šaltinis; 9 - juosta

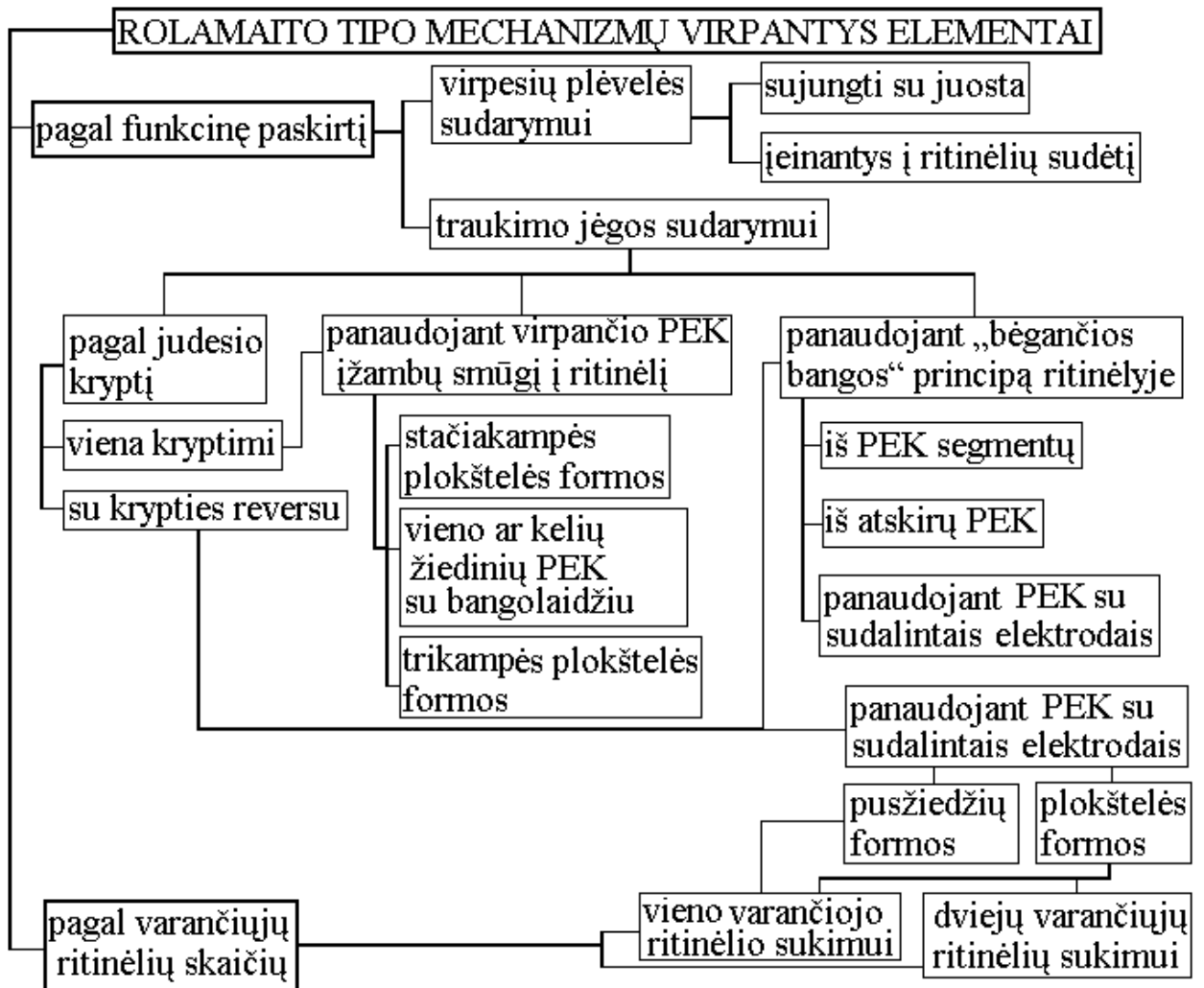
#### 4. ROLAMAITO TIPO MECHANIZMŲ VIRPANČIŲ ELEMENTŲ KLASIFIKACIJA

Rolamaito tipo mechanizmai yra mechanizmai su žema trintimi ir gali būti klasifikuojami pagal įvairius požymius, pirmiausia, su nevaldoma ir valdoma trintimi. Kaip matėme pateiktoje 2-ame skyrelyje medžiagoje, PEK įvedimas į RTM konstrukcijas leido valdyti trintį šiuose mechanizmuose bei sukurti traukiančiąsias RTM juostą jėgas. Žemiau pateikiama rolamaito tipo mechanizmų klasifikacija.



Iš aukščiau pateiktos RTM-ų klasifikacijos matyti, kad valdomos trinties ar traukimo jėgos rolamaitiniuose mechanizmuose naudojami PEK gali būti tvirtinami prie juostos, įeiti į ritinėlių sudėtį arba būti įstatomi tarp ritinėlių, kontaktuodamiesi su jais ir tapdami VBV varančiais elementais.

Žemiau pateikiama RTM virpančių elementų klasifikacija.



## 5. ROLAMAITINIŲ MECHANIZMŲ SU VIRPANČIAIS ELEMENTAIS DINAMIKOS TYRIMAI

### 5.1. Įvadas

Mechanizmų trinties sumažinimo tyrimai atliekami jau seniai. Vienas iš būdų trinčiai sumažinti – suteikti kryptingus virpesius kontaktuojantiems kūnams.



Jau 1959 m. H. D. Fridman ir P. Levesque tyrinėjo virpesių įtaką trinties sumažėjimui, panaudodami nuo 6 iki 41 kHz dažnių virpesius, ir 100 % sumažino statinės trinties koeficientą [5]. Kūnui sąveikaujant su virpančiu paviršiumi, kontaktas tarp jų periodiškai trūkinėja.

Trinties jėgą galima sumažinti veikiant slydimo plokštumą kryptingais tangentiniais ar jai statmenais virpesiais. Tangentinių virpesių poveikis slydimo plokštumai turi tą trūkumą, kad trinties kūnai gali išsidėvėti ar net šaltai susivirinti [6]. Panaudojant tangentinius virpesius elektroniniuose mikroskopuose, staliuko su objektyvu virpesiai gali sumažinti vaizdo ryškumą. Norint to išvengti, reikia sužadinti virpesius, statmenus trinties plokštumai. Kai virpesiams suteikiamas pagreitis, didesnis už laisvojo kritimo pagreitį, gerokai sumažėja trinties jėga [7]. Tyrinėjant kontakto pasipriešinimą, nustatyta, kad trinties jėga sumažėja, kai iš dalies išnyksta kontaktas tarp abiejų plokštumų. Sužadinant dviejų lygiagrečių plokštumų – pagrindo ir judamo kūno arba virpesių žadintuvo ir masės – virpesius, galima gauti virpesių plėvelę [8].

W. Weishaupt disertaciniame darbe aprašomi trinties jėgos tyrinėjimai, sužadinant nerezonansinius žemojo dažnio virpesius nuo 10 Hz iki 10 kHz, kai maitinimo įtampos amplitudė yra nuo 0 iki 1200 V [9]. Nustatyta, kad trinties jėgos sumažėjimas susijęs su realaus kontaktinio ploto sumažėjimu, nors tarp trinties kūnų ir nesusidaro VP. Todėl šį metodą galima pritaikyti darbui vakuume. Darbe aprašyta galimybė pritaikyti pjezokeraminius elementus trinties jėgai sumažinti.

Tikrasis dviejų virpančių kūnų kontakto plotas yra 2-4 eilėmis mažesnis nei geometrinis mikrokonto plotas [10]. Didinant apkrovimo jėgą, padidėja mikrokonto skaičius, tuo tarpu vieno mikrokonto vidutinis plotas nepriklauso nuo apkrovimo jėgos.

Gana išsamūs šios srities tyrinėjimai aprašyti darbe [11], kur išanalizuoti kietų slystančių kūnų trinties mechanizmai. Ypatingą reikšmę trinties turi kontakto plotas. Darbe pateiktas trinties jėgų sumažinimo aukštadažniais virpesiais modelis ir šio reiškinio matematinis aprašymas.

Kaip matyti iš pateiktos trinties mažinimo virpesiais analizės, sumažėja realus virpančio elemento ir judamo kūno paviršiaus kontakto plotas. Didinant virpančio elemento virpesių amplitudę, tarp sąveikaujančių kūnų susidaro virpesių plėvelė.

Toks darbo režimas rolamaitiniams mechanizmomis yra labai naudingas, nes išplečiamos jų funkcinės galimybės, padidėja mechanizmų jautrumas, pagerėja jų dinaminės charakteristikos, pailgėja atskirų mazgų naudojimo trukmė.

Kuriant precizinius rolamaitinius mechanizmus su valdoma trintimi, skirtus objektams pozicionuoti ar lanksčios juostos įtempimui reguliuoti, taip pat precizinius juostos traukimo mechanizmus su rolamaitiniu vibraciniu varikliu (RVBV), reikia ne tik teoriškai, bet ir eksperimentiškai tirti dinامينius procesus, vykstančius RTM ir RVBV [9].

Piezokeraminiai vibraciniai varikliai gali būti panaudoti rolamaitiniuose mechanizmuose – tiesiaieigio judesio atramose, juostos traukimo mechanizmuose, peristaltiniuose siurbliuose, mikromanipuliatorių griebtuvuose ir kt. Prie tokių VBV priskirtini RTM elementai – ritinėliai-vibraciniai varikliai, gaubiami judamo elemento – lanksčios juostos. Šių VBV trūkumas – maža traukimo jėga ir jų sudėtinga konstrukcija.

## 5.2. Dinaminių procesų, vykstančių RTM ritinėlio ir juostos sistemoje, tyrimai

Tiriame RTM ritinėlių, skirtingais kampais gaubiamų skirtinga jėga įtempta juosta, sužadynamų poslinkių dydžius.

RTM virpančių ritinėlių konstrukcijoje yra ir piezokeraminių elementų ir tokius ritinėlius galime laikyti rezonansinėmis virpančiomis sistemomis. Aukštadažnių RTM ritinėlių tyrinėjimai siejami su jų poslinkių matavimais, jų paviršių virpesių greičių ir pagreičių nustatymu.

Matuoti rolamaitinių mechanizmų virpesius gana sudėtinga, ir ne tik dėl to, kad ritinėliai virpa maža amplitude, bet daugiausia dėl to, kad kartu su virpesiais matuojami ir dideli triukšmai. Jie kyla dėl pagrindo virpėjimo, dėl pagamintų detalių geometrinio netikslumo ir dažniausiai yra atsitiktiniai.

Virpesių matavimo ir triukšmo išskyrimo metodų kūrimui skiriama daug dėmesio. Kontaktinio tyrimo metodai yra riboti, nes sukeliamas triukšmas dažnai iškraipo matavimo rezultatus ir iš esmės paveikia eksperimento sąlygas. Perspektyvūs yra nekontaktiniai optiniai tyrimo metodai, visiškai tenkinantys eksperimento reikalavimus, t.y. nekontaktavimo, didelio matavimo tikslumo, didelės erdvinės skyros. Šie metodai ir buvo panaudoti RTM ritinėlių virpesių parametrams tirti.

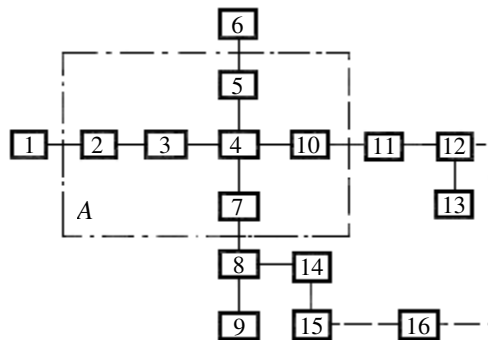
Optiniai RTM virpančių ritinėlių tyrimai turi savitumą. Pirma, RTM elementų konstrukcijoms yra būtinas didelės erdvinės skyros (net iki 50  $\mu\text{m}$ ) optinis zonduojantis pluoštelis. Antra, daugeliu atvejų galima taikyti tik difuziškai sklaidančių paviršių matavimo metodus, nes dėl konstrukcinių RTM ypatumų neįmanoma panaudoti papildomų veidrodžiškai atspindinčių elementų.

Dėl plataus matavimo diapazono, optinių schemų paprastumo ir palyginti nesudėtingos optinių signalų apdorojimo sistemos aukštadažniams virpesiams tirti plačiausiai taikoma lazerinė interferometrija.

Šiuolaikinėse interferometriniuose sistemose naudojami du optinių signalų sudarymo principai: vienadažnis (homodininis) ir dvidažnis (heterodininis). Homodininės sistemos yra paprasčiau, todėl plačiau pritaikomos. Tokių sistemų veikimo principas pagrįstas dviejų šviesos spindulių, ateinančių nuo atraminio ir matuojamo pečių, fazės fotoelektriniu palyginimu. Elektrinis

signalas, gaunamas fotopriėmimo įtaiso išėjime, pateikia visą informaciją apie tiriamojo objekto padėtį ir poslinkį  $x(t)$ .

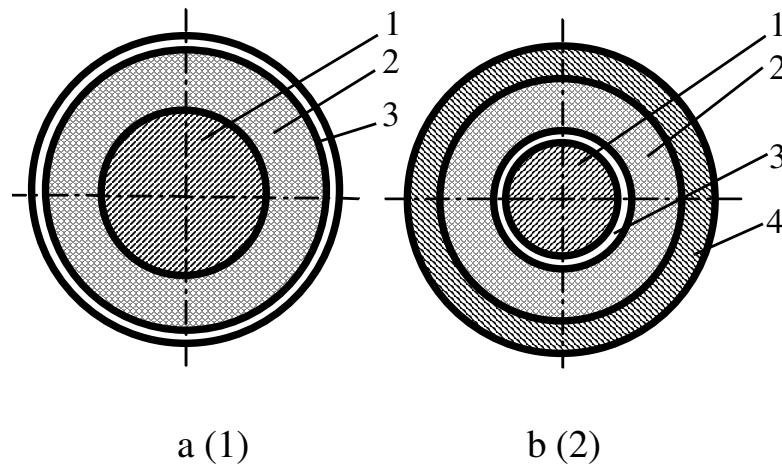
Panagrinėkime lazerinio interferometrinio įrenginio, skirto RTM virpančių ritinėlių, gaubiamų lanksčios juostos, dinaminėms charakteristikoms tirti, struktūrinę schemą (58 pav.). Interferometro optinėje galvutėje  $A$  formuojasi du spinduliai: atraminis ir zonduojantysis. Lazerio spindulys iš He-Ne lazerio  $1$  pereina optinį ventilių  $2$ , sudarytą iš  $\lambda/4$  banginės plokštelės (lazerio šviesos bangos ilgis  $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ ) ir poliario, fokusuojantįjį lęšį  $3$  ir dalijimo elementą  $4$  ir dalijasi į du vienodo intensyvumo spindulius. Atraminis spindulys atsispindi nuo veidrodžio  $5$ ,



**51 pav.** Lazerinio interferometrinio įrenginio, skirto RTM virpančių ritinėlių, gaubiamų lanksčios juostos, dinaminėms charakteristikoms tirti, struktūrinė schema

įtvirtinto ant pjezokeraminio pagrindo (turint tikslą moduluoti ir keisti interferometro matuojamo peties optinį ilgį), kuris maitinamas iš šaltinio  $6$ , antrą kartą pereina dalijimo elementą  $4$ , lęšį  $7$ , reikalingą interferencinio vaizdo parametrams pagerinti fotoelektrinio daugintuvo  $8$  katodo plokštumoje, interferuoja su zonduojamu spinduliu ir patenka į fotoelektrinio prietaiso  $8$ , maitinamo iš labai stabilizuoto šaltinio  $9$ , įėjimą. Antrasis – zondavimo spindulys iš dalijimo elemento  $4$  pereina lęšį  $10$ , skirtą erdvinei skyros jėgai padidinti, ir patenka ant tiriamojo objekto  $11$ , maitinamo iš aukštadažnės įtampos šaltinio  $12$ , kurio dažnis kontroliuojamas dažnimačiu  $13$ , antrą kartą pereina lęšį  $10$  ir dalijimo elementą  $4$  ir, interferuodamas su atraminiu spinduliu, patenka į fotoelektrinio prietaiso  $8$  įėjimą. Gautas elektrinis signalas sustiprinamas stiprintuvu  $14$  ir registruojamas oscilografu  $15$ . Dinaminio proceso, vykstančio kinematinėje ritinėlio ir juostos poroje, ir išėjimo signalo pradinių momentų registraciją sinchronizuoja prietaisas  $16$ . Poslinkio dydžio jautrumo slenkstis nustatomas pagal  $1/4$  lazerio šviesos bangos ilgi ir šiuo atveju sudaro  $0.15 \mu\text{m}$ .

Tiriame du RTM virpančių ritinėlių tipus (52 pav.).

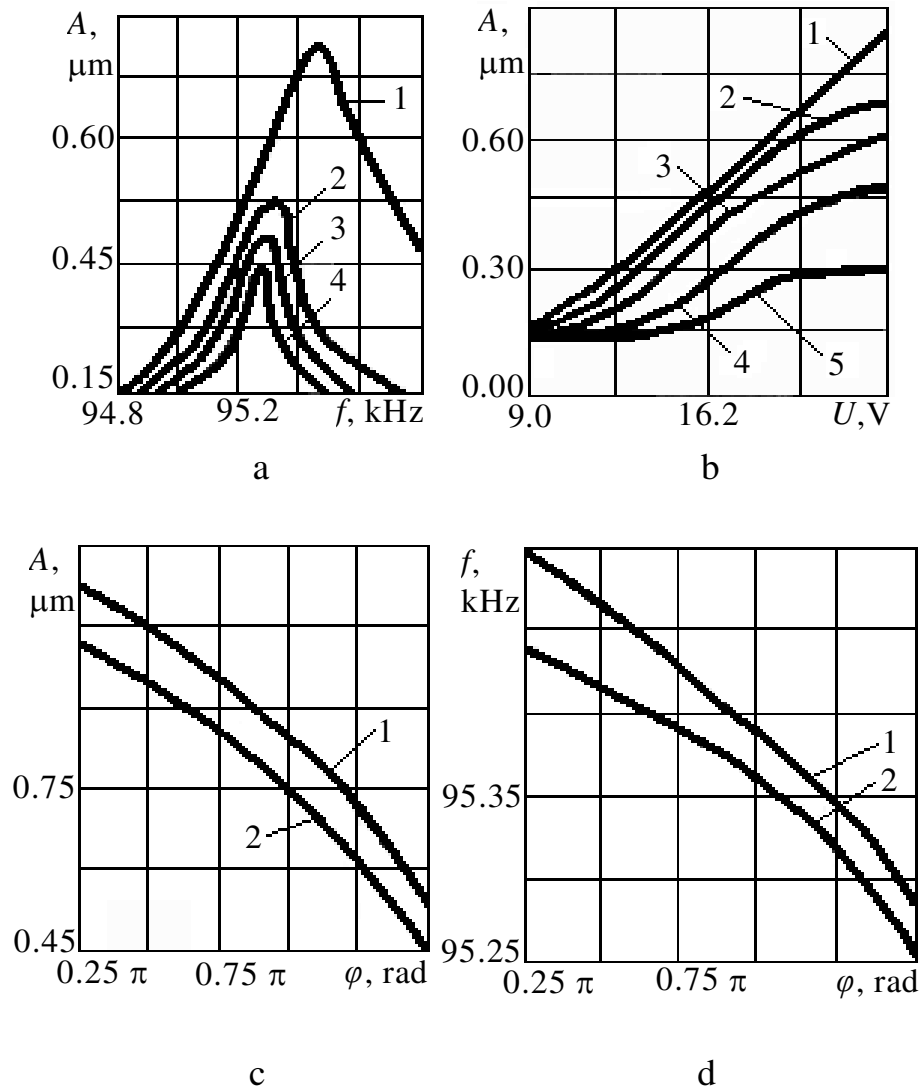


**52 pav.** RTM virpantys ritinėliai: *a* – nejudamas (1); *b* – sukamas (2); *1* – ašis, nejudamai tvirtinama prie pagrindo; *2* – pjezokeraminis žiedas; *3* – elastinis frikcinis žiedas; *4* – standus žiedinis apdangalas, gaubiamas lanksčia juosta

Kai lanksčios juostos gaubiamo nejudamo RTM ritinėlio 1 (52 pav., a) pjezokeraminio žiedo elektrodams duodamas aukštadažnis elektrinis signalas, ritinėlis pradeda virpėti. Tarp ritinėlių 1 gaubiančios lanksčios juostos ir pjezokeraminį žiedą 2 apgaubusio elastinio frikcinio žiedo 3 sumažėja tikrasis kontakto zonos plotas ir susidaro VP. Ritinėlis 1 skirtas trinčiai sumažinti įtaisuose, į kuriuos įeina RTM. Ritinėlio 1 ašis tvirtinama prie pagrindo nejudamai, o tokio tipo RTM ritinėliai ne rieda lanksčia juosta, o slysta.

Tiriamasis ritinėlis 2 (52 pav., b) taip pat skirtas trinčiai sumažinti įtaisuose, į kuriuos įeina RTM. Tačiau tokių RTM ritinėliai rieda lanksčia juosta. Ritinėlis 2 susideda iš ašies *1*, nejudamai tvirtinamos prie pagrindo, ir ant jos užmaunamo surinkto žiedinio pjezokeraminio elemento. Šis susideda iš pjezokeraminio žiedo 2, kurio vidinėje pusėje pritvirtintas elastinis frikcinis žiedas 3, kuris kontaktuoja su ašimi *1*, o išorėje žiedą 2 gaubia nejudamai prie jo pritvirtintas standus žiedinis apdangalas 4, kuris kontaktuoja su jį gaubiančia lanksčia juosta. Tokiame ritinėlyje tarp užmaunamo surinkto žiedinio pjezokeraminio elemento elastinio frikcinio žiedo 3 ir nejudamos ašies *1* susidaro virpesių suspausta dujinė plėvelė.

Tiriame ritinėlių virpesius radialine kryptimi neapkrautu ir apkrautu darbo režimais (53 pav.). Esant apkrautam darbo režimui, ritinėlis gaubiamas lanksčia juosta kampu nuo  $\pi/4$  iki  $3/2 \pi$ . Vienas juostos galas tvirtinamas prie nejudamo pagrindo, o prie kito jos galo pakabinamas svarmuo.



**53 pav.** RTM virpančio ritinėlio 1, gaubiamo įtemptos (apkrautos) juostos, eksperimentinio tyrimo kreivės: *a* -  $A = f(f)$ , kai  $U = 40$  V;  $\varphi = 3/2\pi$ ;  $P$  lygi: 1 – 0 N; 2 – 0.5 N; 3 – 1.0 N; 4 – 2.0 N; *b* -  $A = f(U)$ , kai  $\varphi = \pi$ ;  $P$  lygi: 1 – 0.5 N; 2 – 1.0 N; 3 – 1.5 N; 4 – 2.0 N; 5 – 2.5 N; *c* -  $A = f(\varphi)$ , kai  $U = 40$  V;  $P$  lygi: 1 – 1.0 N; 2 – 2.0 N; *d* -  $f = f(\varphi)$ , kai  $U = 40$  V;  $P$  lygi: 1 – 1.0 N; 2 – 2.0 N

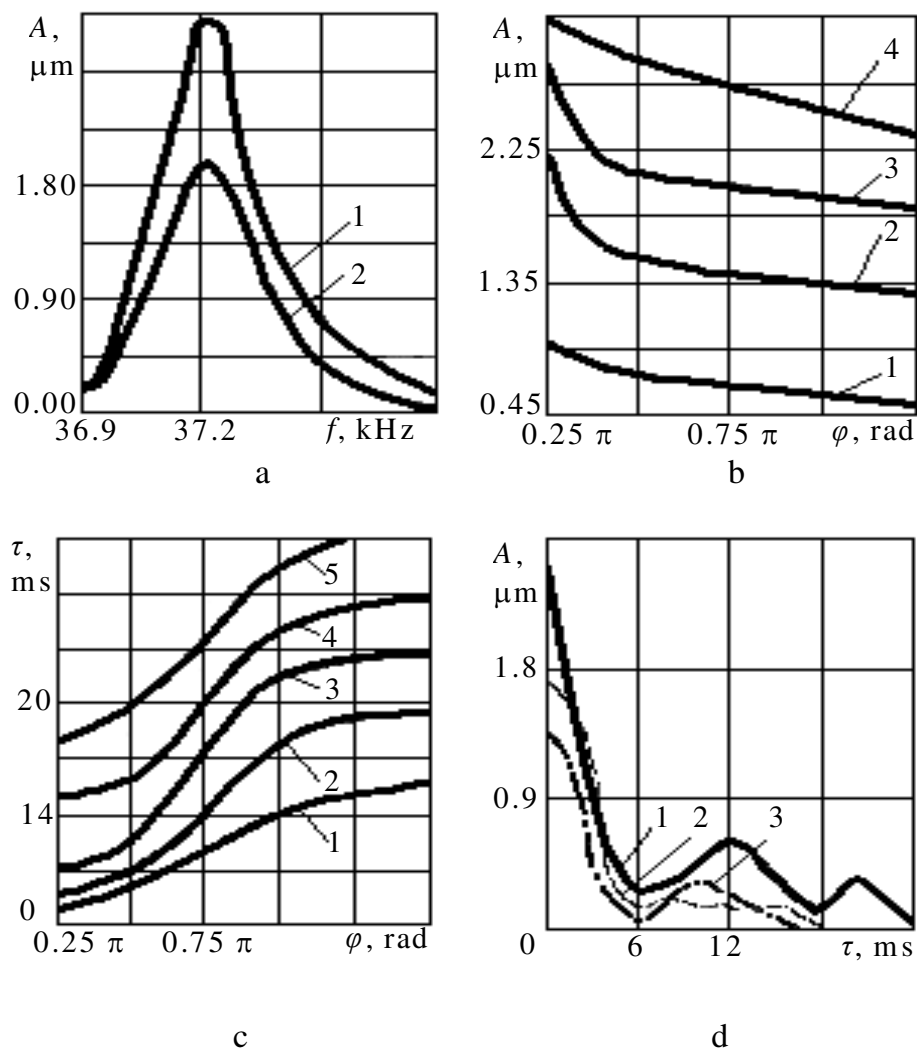
Kaip matyti iš atlikto eksperimento duomenų, ritinėlio, vienodu kampu gaubiamo skirtingu dydžiu apkrautos juostos, virpesių amplitudė ir rezonansinis dažnis mažėja didinant juostos apkrovos laipsnį (53 pav., *a*).

Analizuojant ritinėlio virpesių amplitudės priklausomybę nuo maitinimo įtampos dydžio, esant pastoviam rezonansiniam dažniui ir skirtingam juostos apkrovimo laipsniui, galima padaryti išvadą, kad didinant juostos apkrovą mažėja ritinėlio virpesių amplitudė (53 pav., *b*). Kai juos-

tos apkrovos yra mažos, ritinėlio virpesių amplitudės priklausomybė beveik tiesinė. Didinant maitinančios įtampos amplitudę didėja ritinėlio virpesių amplitudė.

Iš pateiktų grafikų (53 pav., *c*, *d*), apibūdinančių ritinėlio virpesių amplitudės ir dažnio pokyčių priklausomybę nuo ritinėlių gaubiančios juostos gaubimo kampo kitimo, esant skirtingam jos apkrovimo laipsniui, galima daryti išvadą, kad, didinant ritinėlio gaubimo juosta kampą, mažėja jo virpesių amplitudė ir dažnis.

64-ame paveiksle pateikta RTM tiriamojo ritinėlio 2 eksperimentinio tyrimo kreivės. Ritinėlio 2, sudaryto iš žiedinio pjezokeraminio elemento pjezokeraminio žiedo 2 darbinio



**54 pav.** RTM virpančio ritinėlio 2, gaubiamo įtemptos (apkrautos) juostos eksperimentinio tyrimo kreivės: *a* -  $A = f(f)$  surinktam žiediniam pjezokeraminiam elementui (59 pav., *b*), kai  $U = 60 \text{ V}$ ; 1 – pjezokeraminio žiedo darbiniam paviršiui; 2 – standaus žiedinio apdangalo 4 išoriniam paviršiui; *b* -  $A = f(\varphi)$ , kai  $P = 1.0 \text{ N}$ ;  $U$  lygi: 1 – 10 V; 2 – 20 V; 3 – 30 V; 4 – 40 V; *c* -  $\tau = f(\varphi)$ , kai  $U = 30 \text{ V}$ ;  $P$  lygi: 1 – 0.5 N; 2 – 1.0 N; 3 – 1.5 N; 4 – 2.0 N; 5 – 3.0 N; *d* -  $A = f(\tau)$ , kai  $U = 40 \text{ V}$ ;  $\varphi = \pi$ ;  $P$  lygi 1 – 0 N; 2 – 1.0 N; 3 – 2.0 N

(vidinio) paviršiaus ir standaus žiedinio apdangalo 4 išorinio paviršiaus (52 pav., *b*) virpesių dažninės amplitudės charakteristikos pateiktos 54 pav., *a*. Iš kreivių matyti, kad surinkto žiedinio pjezokeraminio elemento standaus žiedinio apdangalo 4 išorinių (parazitinių) virpesių amplitudė yra gana aukšta palyginti su pjezokeraminio žiedo 2 darbinio paviršiaus virpesių amplitude, t.y. veikia trinties tarp ritinėlio 2 ir jį gaubiančios juostos jėgos dydį.

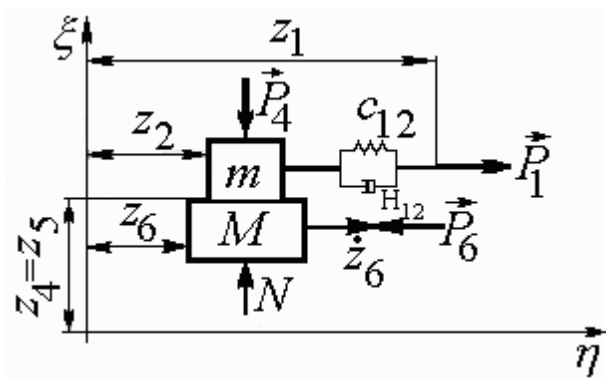
54 pav., *b*, pateiktos surinkto žiedinio pjezokeraminio elemento virpesių amplitudės priklausomybės nuo ritinėlio 2 gaubimo lanksčia juosta kampo esant skirtingiems maitinimo įtampos dydžiams. Iš kreivių matyti, kad gaubimo kampams kintant nuo  $\pi/4$  iki  $\pi/2$  virpesių amplitudė ženkliai mažėja. Toliau didinant gaubimo kampą iki  $3/2 \pi$  virpesių amplitudė tik šiek tiek mažėja pagal tiesinį dėsnį. Didinant maitinimo įtampą, virpesių amplitudės didėja visuose ritinėlio gaubimo juosta kampo diapazonuose.

Didinant ritinėlio 2 gaubimo apkrauta lanksčia juosta kampą, didėja VSDP susidarymo trukmė. Analogišką išvadą darome, kai, esant vienodam gaubimo kampui, didiname juostos apkrovos laipsnį (54 pav., *c*).

Išjungus įtampą, prijungiamą prie pjezokeraminio žiedo 2 elektrodų, VSDP slopimo trukmė priklauso nuo ritinėlio gaubiančios juostos apkrovos dydžio (54 pav., *d*). Kuo labiau juosta apkrauta, tuo sparčiau slopsta VSDP.

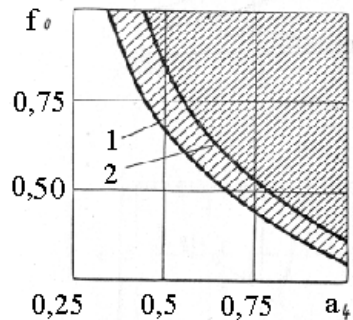
### 5.3 Teoriniai slydimo proceso RTM tyrimai

Buvo sudarytas ir aprašytas diferencialinėmis lygtimis supaprastintas RTM sistemos „juosta – ritinėlis“ dinaminis modelis (55 pav.).



**55 pav.** RTM sistemos „juosta – ritinėlis“ dinaminis modelis:  $m$  – juostos masė;  $M$  – ritinėlio masė;  $N$  – normalinė jėga;  $P_1$  – juostos traukimo jėga;  $P_4$  – juostos prispaudimo prie ritinėlio jėga;  $P_6$  – pasipriešinimo judesiui jėga;  $c$  – tamprusis elementas;  $H$  – slopinimo elementas

Teoriškai tiriant išsiaiškinta, kad, veikiant tiriamos sistemos elementus, virpesiais galima valdyti slydimo tarp jų procesą (2 pav.) [4,5,6].



**56 pav.** RTM supaprastinto dinaminio modelio sistemos “juosta - ritinėlis” teorinis tyrimas. Sistema: 1 - virpesiais neveikiama, 2 - paveikta virpesiais. Užbrūkšniuota sistemos elementų tarpusavio nepraslydimo zona.

Rolaimaitiniuose machanizmuose virpėti gali ir juosta, ir ritinėlis, todėl reikia nustatyti virpesių įtaką praslydimui tarp lanksčios juostos ir ritinėlio. Tačiau RTM dinaminiai modeliai yra labia sudėtingi ir jų teotinis tyrimas yra sudėtingas todėl ir šis modelis yra supaprastintas. Čia:  $m$  – kontakto zonos tarp ritinėlio ir juostos viduryje sukonzentruota juostos masė, o likusi juostos dalis išilgine kryptimi pakeista tampriu ( $c$ ) ir kompensuojančiu ( $H$ ) elementais, sujungtais lygiagrečiai.  $M$  – ritinėlio masė.  $P_1$  – sistemą veikianti jėga;  $P_6$  – pasipriešinimo judėjimui jėga;  $P_4$  – masės  $m$  prispaudimo prie masės  $M$  jėga, kuri iššaukia normalinio pasipriešinimo jėgą  $N$ . Šiuo atveju kontaktas tarp juostos ir ritinėlio yra nedeformuojamas, o elementai  $c$  ir  $H$  nusako reologines juostos savybes. Jėgų sumą taške A aprašo lygtis (3):

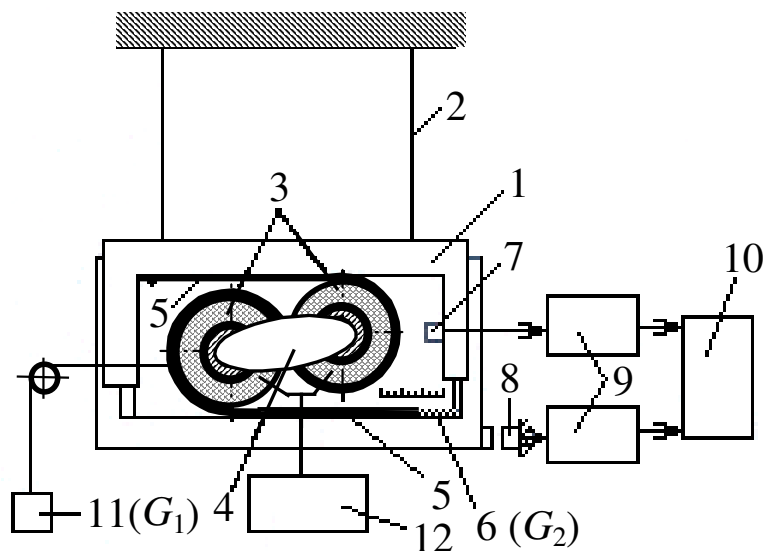
$$H(z_1-z_2)+c(z_1-z_2)=P_1 \quad (3)$$

Kaip matyti iš pateiktos medžiagos, nepraslydimo zona, paveikus sistemą virpesiais, nutolsta. Tai turėtų reikšti, kad realioje sistemoje virpesiais būtų galima valdyti praslydimą tarp RTM elementų, t.y. valdyti pasipriešinimo judesiui jėgų momentą, kas ypač svarbu kuriant naujas RTM konstrukcijas su kokybiškesnėmis dinaminėmis charakteristikomis.



#### 5.4 RTM su virpančiais ritinėliais dinaminių charakteristikų tyrimai

RTM su virpančiais ritinėliais buvo tiriami eksperimentiškai specialiai sukurtu prietaisu (TSRS išradimas Nr. 609074), kurio darbo principas remiasi trinties tarp RTM elementų valdymu, t.y. VP keitimu, sudaromos tarp virpančių ritinėlių ir juos gaubiančios juostos, parametrų.

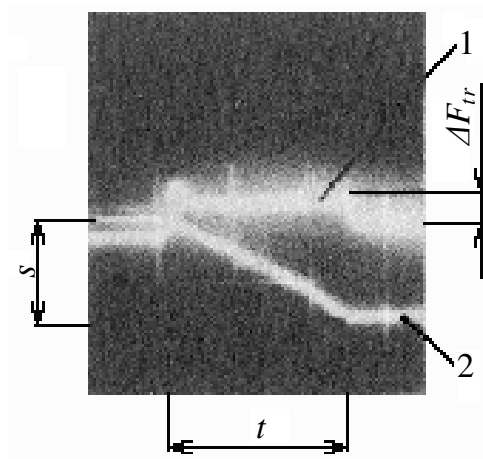


57 pav. RTM su virpančiais ritinėliais tyrimo prietaisas

Eksperimentinis prietaisas (62 pav.) susideda iš korpuso 1, kurio viršutinė dalis, įeinanti į apatinę, pritvirtinama prie dviejų plokščių spyruoklių 2, kurios savo ruožtu pritvirtinamos prie nejudamo pagrindo. Į korpuso 1 vidų įstatomi tiriamo RTM virpantys ritinėliai 3, kurių ašys nejudamai sujungtos plokštele 4. Kiekvienas ritinėlis dideliu kampu ( $180^\circ - 265^\circ$ ) gaubiamas lanksčia juosta 5, kuri vienu galu įtvirtinama prie viršutinės korpuso 1 dalies, o kitą galą tempia svoris 6 ( $G_2$ ). Ant korpuso 1 ir nejudamo pagrindo pritvirtinti poslinkio jutikliai 7 ir 8, per signalų stiprintuvus 9 sujungti su registravimo prietaisu 10. Kad ritinėlius 3 veiktų tempimo jėga  $G_1$ , prie plokštelės 4 pritvirtinamas svarmuo 11. Virpančių ritinėlių 3 elektrodai sujungti su aukš dažnės įtampos šaltiniu 12. Korpuso 1 poslinkį, sukeltą deformuojantis plokščioms spyruoklėms 2, jas paveikus svarmeniu 11, fiksuoja poslinkio jutiklis 8. Ritinėlių 3 poslinkį korpuso 1 atžvilgiu fiksuoja poslinkio jutiklis 7. Korpuso 1 viršutinės ir apatinės dalių poslinkiu (padėties pakeitimu) galima pakeisti ritinėlių 3 apgaubimo juosta 5 kampa.

Veikiant ritinėlius 3 tempimo jėga  $G_1$ , trinties jėga  $F_{tr}$  veikia spyruoklių 2 deformacijas, korpusas 1 paslenka, ir jo paslinkimą fiksuoja jutiklis 8, o registruoja prietaisas 10. Davus aukš-

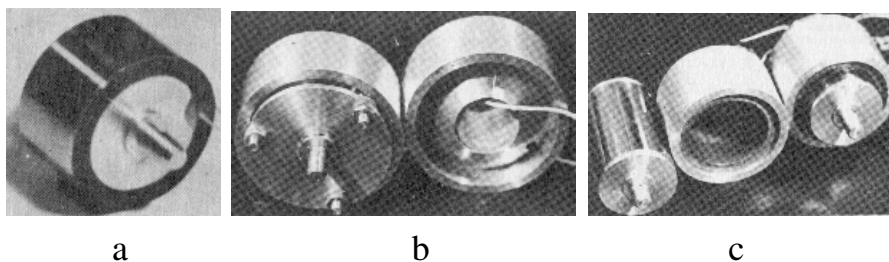
tadažnį elektrinį signalą ritinėlių 3 elektrodams, ritinėliai pradeda virpėti, trinties jėga sumažėja dydžiu  $\Delta F_{tr}$ , atsiranda slydimas tarp juostos 5 ir ritinėlių 3. Sumažėjus trinties jėgai, spyruoklės 2 grįžta pradinės padėties pusėn ir poslinkio jutiklis 8 tai fiksuoja (58 pav.). Išjungus aukštadažnį elektrinį signalą ritinėlių 3 elektrodams, trinties jėga įgauna savo pradinį dydį. Matuojamas rimties trinties jėgos  $F_0$  dydis, kurį viršijus ritinėliai pradeda judėti neduodant jiems aukštadažnių elektrinių signalų, esant duotiems ritinėlių gaubimo juosta kampams  $\alpha$  ir juostos įtempimo jėgos  $G_2$  dydžiams.



**58 pav.** Tiriomojo RTM virpančių ritinėlių ir korpuso poslinkių būdingosios oscilogramos

Iš oscilogramos 1, kuri atitinka tiriomojo RTM korpuso poslinkį, galima spręsti apie trinties jėgos  $F_{tr}$  sumažėjimą –  $\Delta F_{tr}$ , o iš oscilogramos 2, atitinkančios virpančių ritinėlių poslinkį, – apie jų nueitą kelią  $s$  ir laiką  $t$ , per kurį šis kelias nueinamas.

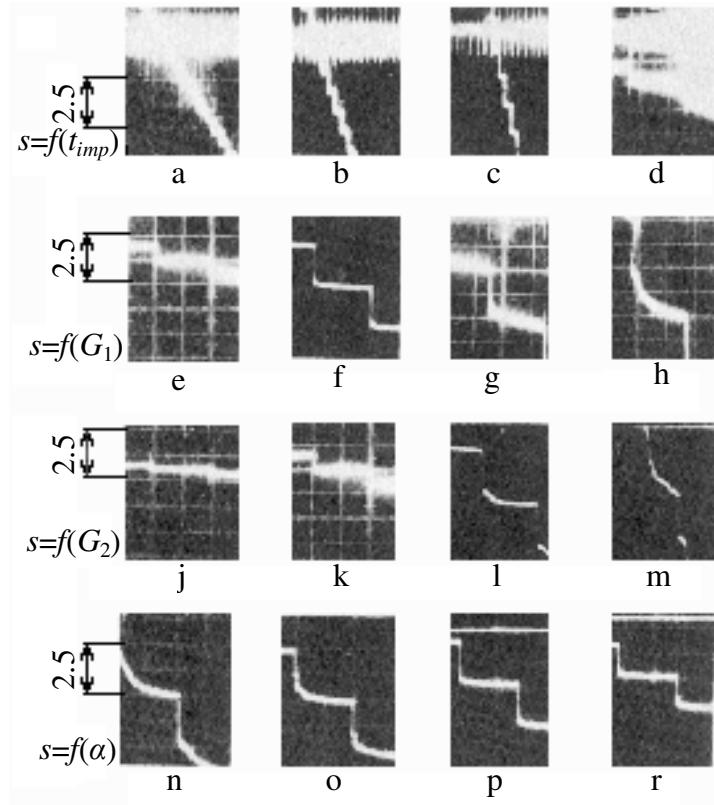
Tiriame RTM su trijų tipų ritinėliais (59 pav.). Dviejų tipų ritinėliai yra virpantys nejudami (64 pav., *a*, *b*), trečiojo tipo ritinėliai – virpantys sukami (59 pav., *c*). Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami maitinant ritinėlius aukštadažne įtampa nepertraukiamo ir startstopinio darbo režimais.



**59 pav.** RTM virpantys ritinėliai: *a* – nejudamas (1), žr. 52 pav., *a*; *b* – nejudamas (1) su bangolaidžiu; *c* – sukamas (2), žr. 52 pav., *b*

Nepertraukiamo reguliavimo signalo režimo bandymai atlikti, norint nustatyti trinties jėgos priklausomybes nuo virpesių amplitudės ir ritinėlius maitinančių elektrinių impulsų periodo, nuo ritinėlių gaubimo juosta kampo, nuo jėgos, tempiančios ritinėlius, ir nuo juostos įtempimo jėgos.

Startstopinio reguliavimo signalo režimo bandymai atlikti siekiant išsiaiškinti ritinėlio poslinkio  $s$  ilgio (kelio, kurį persislinko ritinėlis per vieną reguliavimo impulso periodą) priklausomybes nuo impulso trukmės  $t_{imp}$ , –  $s = f(t_{imp})$ , nuo ritinėlių tempimo jėgos  $G_1$ , –  $s = f(G_1)$ , nuo juostos įtempimo jėgos  $G_2$ , –  $s = f(G_2)$ , nuo ritinėlių gaubimo juosta kampo  $\alpha$  –  $s = f(\alpha)$  (60 pav.)



**60 pav.** RTM virpančių ritinėlių 1 poslinkių oscilogramos esant startstopiniam darbo režimui (parodyta poslinkio atkarpa  $s = 2.5 \text{ mm}$ )

Tiriame RTM ritinėlio 1 poslinkius esant startstopiniam darbo režimui ir duotoms reguliavimo impulso trukmės ir sekos dažnių reikšmėms (60 pav., *a, b, c, d*) šiomis sąlygomis: juostos įtempimo jėga  $G_2 = 2.0 \text{ N} = \text{const}$ ; ritinėlių tempimo jėga  $G_1 = 3.0 \text{ N} = \text{const}$ ;  $f_r = 88.5 \text{ kHz}$ ;

$U = 51 \text{ V}$ ; suminis dviejų ritinėlių gaubimo juosta kampas  $\alpha = 530^\circ$ ; impulso sekos dažniai:  $a, b, c$  atitinka  $50\text{Hz}$ ,  $d - 5 \text{ Hz}$ ; impulso trukmės:  $a - 0.5 \text{ ms}$ ;  $b - 1.0 \text{ ms}$ ;  $c - 1.5 \text{ ms}$ ;  $d - 1.0 \text{ ms}$ .

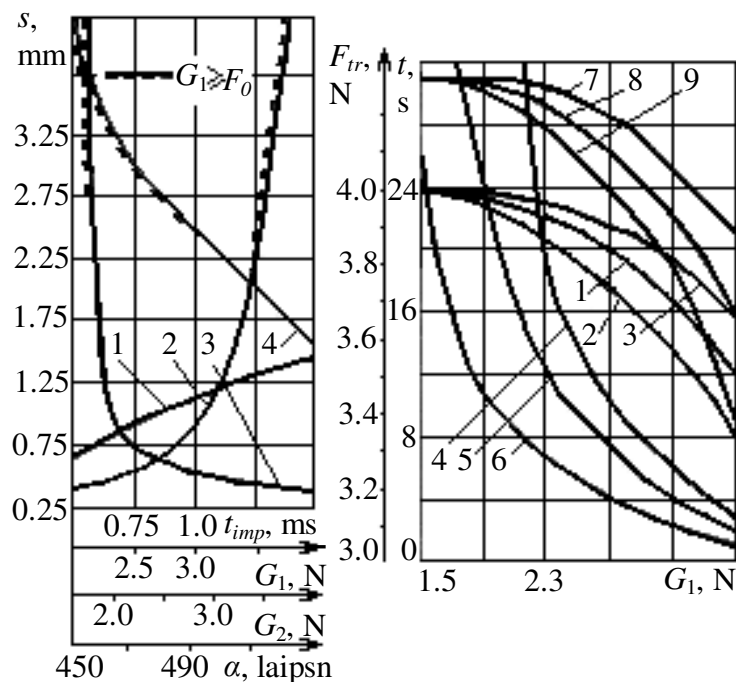
Kaip matyti iš pateiktų (60 pav.,  $a, b, c, d$ ) oscilogramų ir grafiko (61 pav.,  $a$ , kreivė 1), kuo didesnė impulso trukmė  $t_{imp.}$ , tuo ilgesnis kelias  $s$ , kurį nueina ritinėliai per vieną reguliavimo impulso periodą.

Trinties jėga  $F_{tr}$  ir laikas  $t$ , per kurį ritinėliai nuslenka reikiamą kelią  $s$ , kai juostos įtempimo jėga  $G_2 = const$ , sumažėja, jei ritinėliams suteikiama didesnė maitinimo įtampos amplitudė ir jie tempiami didesne jėga  $G_1$  (61 pav.,  $b$ ). Eksperimentą atliekame RTM virpančių ritinėlių 1 nepertraukiamo maitinimo režimu, kai  $\alpha = 530^\circ$ ,  $G_2 = 2.0 \text{ N} = const$ .

Per vieną reguliavimo impulso periodą ritinėlių nueitas kelias  $s$  pailgėja, padidinus ritinėlių tempimo jėgą  $G_1$ . Tai matyti iš 60 pav.,  $e, f, g, h$ , pateiktų oscilogramų ir grafiko (61 pav.,  $a$ , kreivė 2). Jei  $G_1 > F_0$ , kur  $F_0$  – ribinis rimties trinties jėgos dydis, tai jį viršijus ritinėliai pradeda judėti neduodant jiems aukštadažnių elektrinių signalų (60 pav.,  $g, h$ ).

Zona, kurioje  $G_1 \geq F_0$ , papildomai pažymėta punktyru (61 pav.,  $a$ ).

Eksperimento sąlygos šios: RTM darbo režimas – startstopinis;  $G_2 = 2.0 \text{ N} = const$ ;  $\alpha = 530^\circ$ ;  $f_r = 88.5 \text{ kHz}$ ;  $U = 51 \text{ V}$ ;  $f_{imp.sek.} = 5 \text{ Hz}$ ;  $t_{imp.} = 1.5 \text{ ms}$ ;  $e - G_1 = 3.0 \text{ N}$ ;  $f - G_1 = 3.5 \text{ N}$ ;  $g - G_1 = 3.6 \text{ N}$ ;  $h - G_1 = 3.7 \text{ N}$ .



a

b

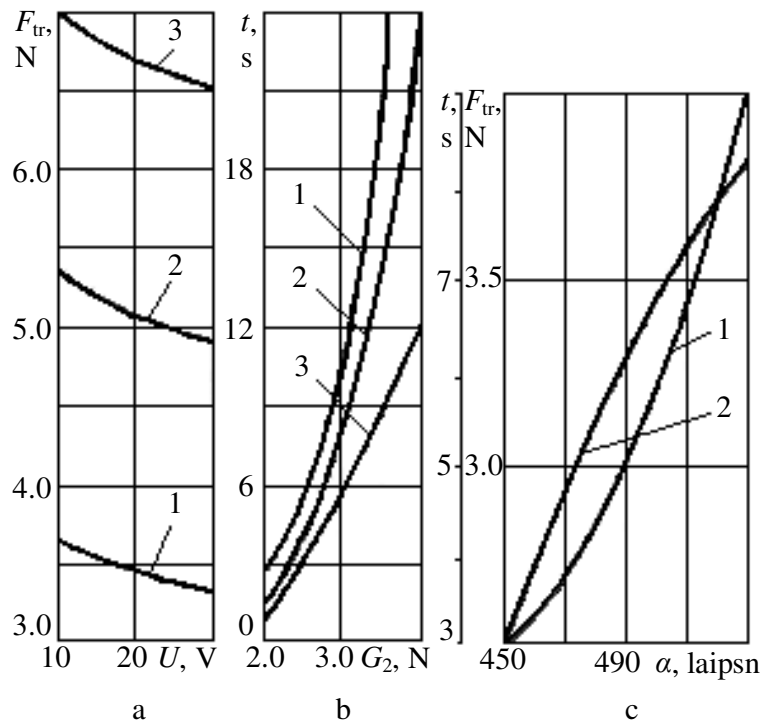
**61 pav.** Priklausomybių kreivės: *a* – RM ritinėlio 1 poslinkiai per vieną reguliuojančio impulso periodą:  $1 - s = f(t_{imp})$ ;  $2 - s = f(G_1)$ ;  $3 - s = f(G_2)$ ;  $4 - s = f(\alpha)$ ; *b* – priklausomybės  $F_{tr} = f(G_1) - 1-3$ ;  $t = f(G_1) - 4-6$  (rolamaitiniams mechanizmom su ritinėliais 1);  $F_{tr} = f(G_1) - 7-9$  (RTM su nejudamais ritinėliais, turinčiais bangolaidžius). Maitinimo įtampa  $U$  lygi:  $3, 4, 7 - 10 V$ ;  $1, 5, 8 - 20 V$ ;  $2, 6, 9 - 30 V$

Ritinėlių per vieną reguliavimo impulso periodą nueitas kelias  $s$  padidėja, mažinant juostos įtempimo jėgą (ritinėlių tempimo jėga  $G_1 = const$ ). Tai matyti iš 60 pav., *j, k, l, m*, pateiktų oscilogramų ir grafiko (61 pav., *a*, kreivė 3). Kai juostos įtempimo jėga  $G_2$  labai maža, ritinėliai pradeda judėti neduodant jiems aukštadažnių elektrinių signalų (60 pav., *l, m*). Eksperimento sąlygos šios: RTM darbo režimas – startstopinis;  $\alpha = 530^\circ$ ;  $f_r = 88.5 kHz$ ;  $U = 51 V$ ;  $G_1 = 3.0 N = const$ ;  $f_{imp.sek} = 5 Hz$ ;  $t_{imp} = 1.5 ms$ ;  $G_2$ : *j* –  $4.0 N$ ; *k* –  $2.0 N$ ; *l* –  $1.7 N$ ; *m* –  $1.5 N$ .

Ritinėlių per vieną reguliavimo impulso periodą nueitas kelias  $s$  sutrumpėja, didinant ritinėlių gaubimo juosta kampą. Tai matyti iš 60 pav., *n, o, p, r*, pateiktų oscilogramų ir grafiko (61 pav., *a*, kreivė 4). Kai gaubimo kampas labai mažas,  $G_1 \geq F_0$ , ritinėliai pradeda judėti ir ne-gaudami aukštadažnių elektrinių signalų (60 pav., *n, o*). Eksperimento sąlygos šios: RTM darbo režimas – startstopinis;  $\alpha$  lygūs: *n* –  $450^\circ$ ; *o* –  $480^\circ$ ; *p* –  $500^\circ$ ; *r* –  $530^\circ$ ;  $G_1 = 3.0 N$ ;  $G_2 = 2.0 N$ ;  $U = 51 V$ ;  $f_{imp.sek} = 5 Hz$ ;  $t_{imp} = 1.5 ms$ .

RTM nejudami (1) virpantys ritinėliai su bangolaidžiu (59 pav., *b*) esant tokioms pat maitinimo ir jų poveikio jėgomis sąlygoms, virpa didesne amplitude nei ritinėliai 1 (be bangolaidžių). Priklausomybės, būdingos ritinėliams su bangolaidžiais (59 pav., *b*), pagal savo pobūdį analogiškos ritinėlių 1 (59 pav., *a*) priklausomybėms, pavyzdžiui,  $F_{tr} = f(G_1, U)$  (žr. 61 pav., *b*, kreivės 7 – 9). Trinties jėgos sumažėjimo dydis  $\Delta F_{tr}$  tomis pačiomis darbo sąlygomis RTM su ritinėliais 1 (be bangolaidžių) yra mažesnis nei RTM su ritinėliais, turinčiais bangolaidžius.

Trinties jėga  $F_{tr}$  ir laikas  $t$ , per kurį ritinėliai nueina žinomą kelią  $s$ , kai  $G_1 = const$ , mažėja, jei ritinėliai “maitinami” padidintos amplitudės įtampa ir sumažinama juostos įtempimo jėga  $G_2$ . Tai atsispindi grafikuose (62 pav., *a, b*). Eksperimentas atliekamas nepertraukiamu virpančių ritinėlių 1 maitinimo režimu,  $\alpha = 530^\circ$ .



**62 pav.** RTM su ritinėliais 1 priklausomybių kreivės:

*a* –  $F_{tr} = f(U)$ , kai  $G_1 = 3.5 N = const$ ;  $G_2$  lygūs: 1 – 2.0 N; 2 – 3.0 N; 3 – 4.0 N;

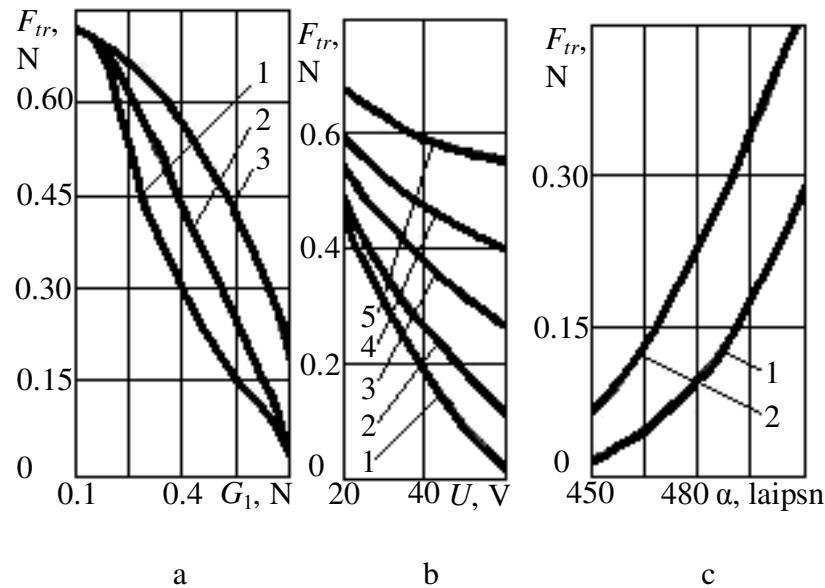
*b* –  $t = f(G_2)$ , kai  $G_1 = 3.5 N = const$ ;  $U$  lygūs: 1 – 10V; 2 – 20 V; 3 – 30 V;

*c* – 1 –  $F_{tr} = f(\alpha)$ ; 2 –  $t = f(\alpha)$ , kai  $U = 40 V$ ;  $G_1 = G_2 = 2.0 N$

Trinties jėga  $F_{tr}$  ir laikas  $t$ , per kurį ritinėliai nueina kelią  $s$ , kai  $G_1 = G_2 = const$ , didėja didinant ritinėlių gaubimo juosta kampą  $\alpha$  (62 pav., *c*). Eksperimentas atliekamas nepertraukiamu virpančių ritinėlių 1 maitinimo režimu.

Didelį susidomėjimą kelia sukamų ritinėlių 2 (žr. 59 pav., *c*) panaudojimas RTM. Iš eksperimentinių tyrimų rezultatų, pateiktų 63 pav., matyti, kad trinties jėga  $F_{tr}$  sumažėja, jeigu:

- ritinėliams prijungiamas didesnės amplitudės maitinanti įtampa  $U$ ,
- ritinėliai veikiami didesne tempimo jėga  $G_1$  (63 pav., *a*),
- sumažinama juostos įtempimo jėga  $G_2$  (63 pav., *b*),
- sumažinamas ritinėlių gaubimo juosta kampas  $\alpha$  (63 pav., *c*).



**63 pav.** RTM su ritinėliais Nr. 2 (žr. 59 pav., b; 64 pav., c) priklausomybių kreivės: a –  $F_{tr} = f(G_1)$ , kai  $\alpha = 500^\circ$ ;  $G_2 = 5.0 N$ ;  $U$  lygūs: 1 – 50 V; 2 – 35 V; 3 – 20 V; b –  $F_{tr} = f(U)$ , kai  $G_1 = 0.5 N$ ;  $\alpha = 500^\circ$ ;  $G_2$  lygūs: 1 – 4.0 N; 2 – 5.0 N; 3 – 7.0 N; 4 – 8.0 N; 5 – 9.0 N; c –  $F_{tr} = f(\alpha)$ ;  $G_1 = 0.5 N$ ;  $G_2 = 5.0 N$ ;  $U$  lygūs: 1 – 50 V; 2 – 30 V

Kaip matyti iš pateiktų eksperimentinių rezultatų, RTM su sukamais virpančiais ritinėliais 2, palyginti su kitais, pasižymi didesne laikomąja geba ir yra žymiai jautresni. Juos tikslinga naudoti ypač jautriose sistemose. Ritinėliuose 2 labai greitai susidaro VSDP, nes panaudojamas visas pjekokeraminio žiedo darbinis paviršius, kas yra neįmanoma RTM su kitokio tipo virpančiais ritinėliais būtent dėl RTM konstrukcijos. Be to, RTM su virpančiais nejudamais ritinėliais (59 pav., a, b), gaubiamais lanksčios juostos, VP susidaryti tarp virpančio ritinėlio ir juostos kliudo tai, kad lanksti juosta yra palyginti plona ir deformuojasi.

## 6. MIKROMANIPULIATORIŲ KONSTRUKCIJOS

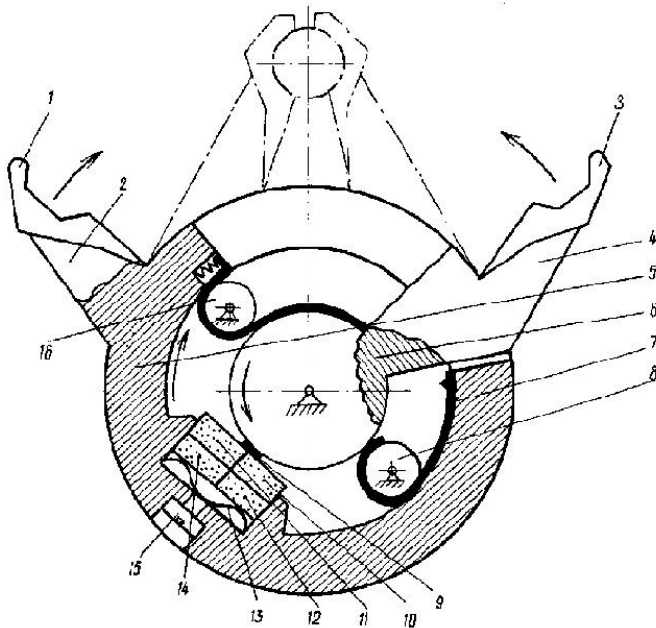
Viena iš daugelio juostinių – ritinių rolamaito tipo mechanizmų (RTM) pritaikymo sričių yra rolamaitiniai mikromanipuliatorių griebtai (RMG), pasižymintys konstrukcijų paprastumu, įvairove, be to, jiems nebūdingas tepimas. Vienas RMG privalumų yra didelis žiaunų suspaudimo ir išskėtimo tolygumas, o virpančių elementų panaudojimas leidžia jos lengvai valdyti.

RMG pagal konstrukcines savybes gali būti klasifikuojami:

1. pagal ritinėlių skaičių

- vieno ritinėlio;

- dviejų ritinėlių arba daugiaritininiai.
- 2. pagal žiaunų skaičių:
  - dviejų žiaunų;
  - daugiažiauniai.
- 3. pagal virpesių panaudojimą:
  - nenaudojant virpesių;
  - naudojant virpesius



**64 pav.** Rolamaitinis mikromanipulatoriaus griebtas

Mikromaniuliatoriaus griebtas (64 pav.) sudarytas iš dviejų žiaunų 1 ir 3, pritvirtintų prie svirčių galų

2 ir 4 vienu galu, kurių kiti, varomieji, galai 5 ir 6 išdėstyti ant vienos geometrinės ašies ir įeina vienas į kitą. Tai yra svirties 2 galo 5 viduje įtaisytas svirties 4 galas 6. Lanksti juosta 7 savo galais pritvirtinta prie vidinės svirties 2 varomojo galo 5 dalies. Vienas juostos galas 7 pritvirtintas tvirtai, o kitas – tampriai. Juosta 7 per pagalbinius ritinėlius 8 ir 16 glaudžiai gaubia svirties 4 varomąjį galą 6, su kuriuo per kontaktinę trinkelę 9 liečiasi pjezokeraminė plokštelė, kurios elektrodai vienoje jos pusėje sudalyti į keturias dalis 10,11,12, ir 14. elektrodai per komutatorių prijungti prie valdymo bloko. Pjezokeraminė plokštelė įstatyta svirties 2 varomajame gale 5, o jos prispaudimą spyruoklės 13 pagalba galima reguliuoti reguliavimo sraigtu 15.

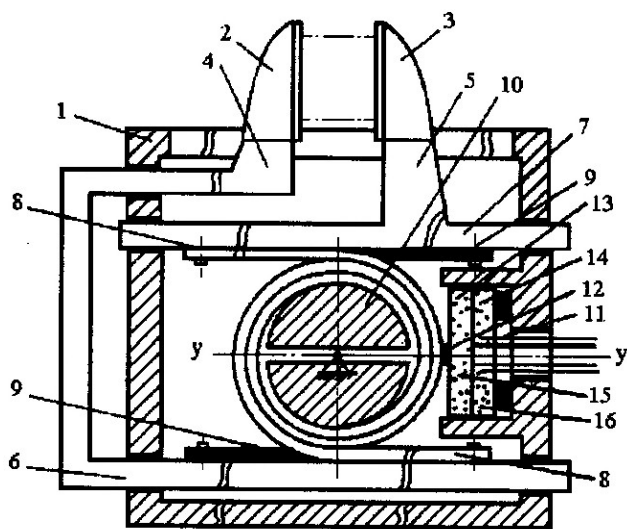




Manipulatoriaus griebta veikia taip: “Padavus” nuo valdymo bloko aukštadažnių virpesių impulsus pjezokeraminės plokštelės 10 elektrodams 12 ir 14 bei elektrodui kitoje plokštelės pusėje, pjezokeraminė plokštelė ima virpėti, o kai kuriuose jos taškuose atsiranda virpesiai elipsoidine trajektorija su skirtingomis tų taškų judėjimo kryptimis. Perjungus komutatorių, t.y. “padavus” virpesių impulsus elektrodams 11 ir 13 bei elektrodui kitoje plokštelės pusėje, plokštelės virpesių kryptis pasikeičia į priešingą. Tai leidžia reversuoti svirtis. Pjezinė plokštelė 10 liečiasi su svirčių galais 6 ir 7 tose vietose, kur atsiranda virpesiai elipsoidine trajektorija, bet judėjimo kryptys priešingos. Todėl žiaunos 2 ir 3 juda į priešingas viena kitos atžvilgiu puses. Kadangi kiekvienajuosta 8 ir 9 savo galais pritvirtinta prie svirčių 4 ir 5 galų 6 ir 7 ir juostos gaubia tuos galus kryžmai, tai vienos svirties galo sukimasis priverčia sukėti kitos svirties galą. Tai užtikrina sinchroniškumą suspaudžiant ir išskiečiant žiaunas.

Dviejų juostų panaudojimas panaikina geometrinį slydimą, be to pjezokeraminė plokštelė sukelia sukimo virpsius iš karto abiemis cilindriniam svirčių galams, kas užtikrina visišką sinchroniškumą suspaudžiant ir išskiečiant žiaunas.

66-ame paveiksle parodyta RMG veikimo principas yra analogiškas aukščiau aprašytiems.



**66 pav.** Rolamaitinis mikromanipulatoriaus griebtas

Aukštadažnė įtampa “ paduodama” pjezokeraminės plokštelės 11 kryžmai sudalintiems elektrodams 13, 16 ir elektrodui kitoje plokštelės pusėje. Plokštelės 11 aukštadažniai virpesiai sukelia kontaktinės trinkelės 12 sukimąsi elipsine trajektorija ir taip priverčia sukėti su trinkele

12 besiliečiantį ritinėlį 10. “Padavus” aukštadažnę įtampą kitiems pjezokeraminės plokštelės 11 kryžmai sudalintiems elektrodams 14, 15 ir elektrodi kitoje plokštelės pusėje, trinkelės 12 judesio kryptis pasikeičia į priešingą. Juostos 8 ir 9 juda kartu su ritinėliu 10 ir svirtimis 4 ir 5, praskečia arba suglaudžia žiaunas 2 ir 3, pritvirtintas prie jų svirčių galų.

Šiame mechanizme yra tik vienas ritinėlis, apgaubtas juostomis iš abiejų pusių, kas leidžia dirbti RMG patikimai ir sinchroniškai. Žiaunų judėjimas linijinę trajektoriją leidžia žymiai praplėsti RMG panaudojimo sritis.

## IŠVADOS

Šiame darbe trumpai apžvelgtas magistratūros studijose atliktas darbas. Dirbant kartu su vadovu prof. R.V. Ulozu, buvo atlikti eksperimentiniai vibroritinėlių tyrimai. Jų metu buvo praktiškai įsitikinta, kad mikromanipulatoriaus griebtuose, panaudojus rolamaitinį dabro principą, užtikrinamas griebtų žiaunų judesio sinchroniškumas, o panaudojus rolamaitiniuose mechanizmuose vibruojančius ritinėlius, žymiai sumažėja trintis tarp juostos ir ritinėlių, nes susidaro vibracinė plėvelė.

Panaudojant besisukančius vibruojančius ritinėlius, mechanizmo jautrumas dar labiau išauga, nes vibracinė plėvelė susidaro pačiuose ritinėliuose ir prie mažesnių energijos sąnaudų.

Atlikti dinaminių procesų, vykstančių ritinėlio ir juostos sistemoje, tyrimai su dviejų tipų virpančiais ritinėliais: nejudamu ir sukamu lazerinės interferometrijos būdu bei RTM su virpančiais ritinėliais dinaminių charakteristikų tyrimai. Taip pat išnagrinėti dinaminiai procesai vykstantys rolamaitiniuose mechanizmuose

Pateikta mechanizmų trinties jėgos mažinimo virpesiais analizė. Trinties jėga sumažėja dėl sumažėjusio paviršiaus tarp virpančio ir su juo kontaktuojančio elementų realaus kontakto ploto.

Atlikdami teorinius ir praktinius tyrimus, įsitikinome mikromanipuliatorių privalumais: paprasta konstrukcija, palyginti plačios praktinio pritaikymo galimybės, didelis kinematis tikslumas, maža trintis.

### SUMMARY

RTM based micromanipulator's grabbing devices are described in this work. The classification of them is made and some most used devices are described. The proposal is given that piezoelements are best to use in grabbing devices. This proposal is proved by researches of dynamics of RTM. Grabbing devices with piezoelements are working more precisely and synchronically, and ensures faster work of mechanism.

The research of dynamical processes of the vibrating rollers and others rolamite elements with pjezokeramika in the real rolamite constructions are described. It is established that the increase of supply voltage amplitude, decrease of the force load value of the flexible band, and decrease of the wrapping angle of the roller by flexible band may cause the increasing of amplitude of roller oscillations. If pjezokeramika element rotates two rotors in the rolamite vibromotor we have one of most optimal variant.

**Key words:** Rolamite type mechanism, micromanipulator's grabbing, sliding, roller band.

## LITERATŪRA

1. **Wilkes, D.F.** Rolamite: A New Mechanical Design Concept.-Research Report SC -RR-67-656A, Sandia Laboratories, December, 1967.-223 p.
2. **Wilkes, D.F.** Rolamite: A New Mechanism.-Mechanical Engineering, April, 1968, v. 90, N 4, p.11-29.
3. **Percival, C.M., Norwood, F.R.** A Theoretical and experimental investigation of the dynamic response of rolamite. – Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 1969/2. Ser. B. Vol. 91, N 1, p.235-239.
4. **Cadman, R.V.** Computation of force traces for the rolamite.-Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 1971/2. Ser. B. Vol. 93, N 1, p.47-52.
5. **Fridman, H.D., Levesque, P.** Reduction of Static Friction by Sonic Vibration.-J. Appl. Phys., 1959, v.30, No 10, p. 46-52.
6. **Lehfeld, S.** Beeinflussung metallischer Reibungsvorgänge durch Schall im 20 kHz-Bereich.-Dissertation TH, Aachen, 1968, s. 97.
7. **Godfrey, D.** Vibration Reduces Metal to Metal Contact and Causes an Apparent Reduction in Friction.-ASLE Transactions, 1967, v.10, p. 89-96.
8. **Fehse, W.** Anwendung von Gaslagern in Kreiselgeräten.-Feinwerktechnik, 73 (1969), H.4, s. 80-87.
9. **Weishaupt, W.** Piezokeramische Positioniereinrichtungen für den Mikrobereich mit gesteuerter Reibkraftverminderung.-Dissertation TU, Berlin, 1971, s. 112.
10. **Bowden, E.P., Tabor, D.** The Friction and Lubrication of Solids.-Oxford: Clarendon Press, 1964, Part II, p. 131-137.
11. **Jungclaus, J.** Über den Einfluss hochfrequenter Ultraschallschwingungen auf die Reib- und Tangentialkräfte sowie auf die Mikroverschiebung fester gleitender Körper.-Dissertation RW TH, Aachen, 1973, s. 95.
12. **Канапенас, Р. М.,** Виброопоры.- Вильнюс, Мокслас, 1984, 208 с.
13. **Рагульскис, К., Улозас, Р. В., Бакай, Н., Палявичюс, А.** Механизмы типа роламайт.- Вильнюс, Мокслас, 1990, 200 с.