

Elektros inžinerija T 190

MECHATRONINĖS KAMPŲ MATAVIMO SISTEMOS TYRIMAS IR TOBULINIMAS

Sigitas Šakalinis

Vilniaus Gedimino technikos universitetas  
El. paštas: s.sigita@gmail.com

**Santrauka.** Nagrinėjamas mechatroninės sistemos žingsninis variklis su nuolatinio įveržimo sliedine pavara ir valdymo bloku. Svarbiausia šio tyrimo užduotis yra disko pozicionavimo pavaros plokščių kampų matavimo stende, surinkto VGTU Geodezijos institute, tobulinimas – pozicionavimo tikslumo didinimas, triukšmo ir vibracijų mažinimas. Užduotis sprendžiama parenkant naują variklį bei jo valdymo schemas parametrus.

**Reikšminiai žodžiai:** žingsninis variklis, mechatroninė sistema, kampų matavimo sistema.

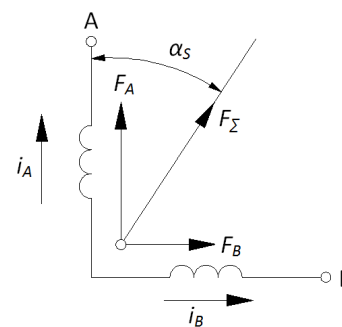
Įvadas

Žingsninis variklis – tai ryškiapolė sinchroninė mikromašina, kurioje diskretusis rotoriaus judesys arba tolydusis sukimasis gaunamas maitinant statoriaus apvijas nuolatinės įtampos impulsais. Žingsninių variklių statoriuje yra ne mažiau kaip dvi apvijos, maitinamos nuolatinė srove iš elektrinio komutatoriaus, o rotorius yra ryškiapolės konstrukcijos ir, įjungus maitinimą, pasisuka į mažiausios magnetinės varžos padėtį. Atsižvelgiant į komutavimo dažnį, žingsninis variklis gali veikti fiksuoto žingsnio režimu, kai dažnis mažas ir rotorius spėja užimti naują padėtį periodo metu, arba sukis sinchroniniu greičiu, kai nespėja užimti fiksuotos padėties. Žingsninių variklių statoriuje susidaro šuolinis magnetinis laukas, kurį seka rotorius. Žingsninių variklių rotorius yra beapvijis, neturi kolektoriaus ir kontaktinių žiedų (Smilgevičius 2005). Žingsninio variklio fazių valdymo būdai:

- viso žingsnio režimas;
- pusės žingsnio režimas;
- mikrožingsnio režimas.

Esant viso ir pusės žingsnio režimams, fazinių srovių vertės yra  $+I_s$ ,  $-I_s$ . Tačiau šiuolaikinė elektronika leidžia gauti ir tolygiai kintančias maitinimo įtampų, srovių bei magnetovarų vertes. Dvifazio variklio statoriaus A ir B apvijomis teka srovės  $i_A$  ir  $i_B$  (1 pav.). Jos sukuria fazines magnetovaras  $F_A$  ir  $F_B$ , kurių suminė amplitudė  $F_\Sigma = \sqrt{F_A^2 + F_B^2}$ .  $F_\Sigma$  erdvinę padėtį nusako kampas  $\alpha_s = \arctan(F_B/F_A)$ . Šias magnetovaras kuriančios srovės  $i_A$  ir  $i_B$  priklauso nuo kampo  $\alpha_s$ .

$$\begin{aligned} i_A &= I_s \cos \alpha_s; \\ i_B &= I_s \sin \alpha_s; \end{aligned} \quad (1)$$



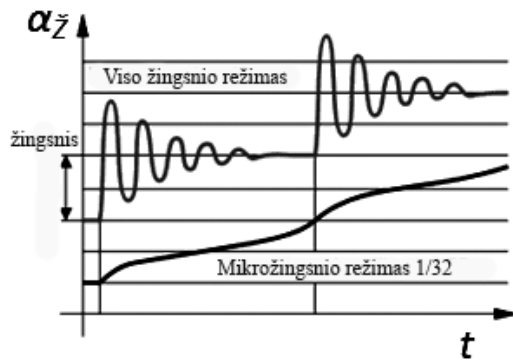
1 pav. Dvifazio variklio mikrožingsnio režimas

Fig. 1. Microstepping mode of two phase stepper motor

Fazinės srovės keičiamos taip, kad tai suminės magnetovaros amplitudė bus pastovaus dydžio. Tolydžiai keičiant sroves nurodytu dėsningumu, statoriaus laukas bus grynai apskritiminis, o minimalaus žingsnio kampas artės prie nulio.

Esant mikrožingsnio režimui, statoriaus magnetinis laukas sukasi tolygiau negu viso ar pusės žingsnio režimų atvejais: taip gaunamas beveik betriukšmis variklio darbas ir daug tikslesnis pozicionavimas. Gali būti daug mikrožingsnio režimų, kai žingsnelis sudaro  $1/3 - 1/32$  viso žingsnio ar dar mažesnis. Žingsninis variklis – sinchroninis variklis, tai reiškia, kad rotoriaus fiksacijos padėtis sutampa su statoriaus magnetiniu lauku. Pasisukus statoriaus magnetiniam laukui, rotorius taip pat pasisuks.

Mikrožingsnio režimas yra naudojamas, kai variklio sukimosi greitis nėra labai didelis (kaip tik šiuo atveju tinka šis režimas), nes norint gauti labai didelį sukimosi greitį reikalingas labai didelis valdymo impulsų dažnis, kurį ne kiekvienas valdiklis gali generuoti. Todėl mikrožingsnio režimą galima naudoti įsukos arba stabdymo metu, o kitą laiką variklis gali veikti viso žingsnio režimu.



2 pav. Rotoriaus poslinkis esant viso žingsnio ir mikrožingsnio režimams

Fig. 2. Rotor shift in full step and microstepping modes

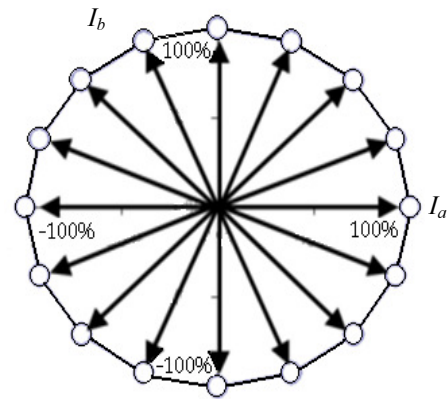
Kai kuriais atvejais, kai reikia labai tikslaus pozicionavimo ir kur maži santykiniai poslinkiai, mikrožingsnio režimas gali pakeisti mechaninį reduktorių. Dažnai sistemos paprastumas yra reikšmingas veiksnys, naudojant ir didesnių matmenų variklį. Atsižvelgiant į tai, kad mikrožingsnio režimo valdiklis daug sudėtingesnis už paprastą valdiklį, sistema gali būti žymiai pigesnė ir paprastesnė negu žingsninis variklis ir mechaninis reduktorius kartu.

Realiai po kiekvieno žingsnio rotorius sustoja naujoje fiksacijos padėtyje ne iš karto, o svyruoja apie fiksacijos ašį ir silpsta. Stabdymo trukmė priklauso nuo apkrovos charakteristikos ir valdiklio schemos. Panaikinti tokį reiškinį galima mikrožingsnio režimu.

Žingsninio variklio rotoriaus stabilios padėtyys yra sinchroniškos su statoriaus magnetiniu srautu. Kai apvijomis teka srovės, kiekviena iš jų kuria magnetinį srautą oro tarpe. Srauto tankis priklauso nuo srovės stiprio toje apvijoje. Taigi srautas oro tarpe yra tiesiogiai proporcingas apvijų srovių vektoriinei sumai arba suminio vektoriaus kryptčiai. Sukantis pilno ar pusės žingsnio režimu srovė apvijose kuria srautą, kurio sukimosi žingsnis yra 90 ir 45 elektrinių laipsnių. Mikrožingsnio režimo atveju srovė apvijose keičiama dalimis, taigi srauto krypttis taip pat keičiasi dalimis (sukimosi žingsnis mažesnis už 45 ar 90 elektrinių laipsnių). Paprastai pilnas žingsnis yra dalinamas į 4, 8, 16 ar 32 žingsnelius. Mažesnis už 1/32 žingsnio žingsnelis paprastai neturi tolimesnės reikšmės variklio dinamikai.

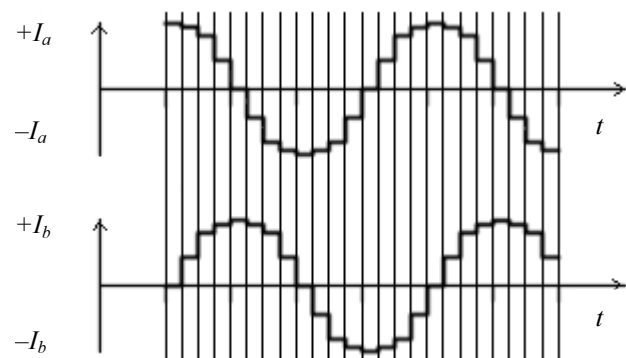
Pastovus sukimo momentas gaunamas darbo režimo metu. Šiuo atveju galima pastebėti, kad variklio sukimo momentas yra visada per  $\sqrt{2}$  mažesnis nei viso žingsnio režimu. Šio režimo vektorių diagrama pavaizduota 3 paveiksle.

Apvijų komutavimo diagrama pateikta 4 pav.



3 pav. Srovės vektorių diagrama

Fig. 3. Diagram of current vectors



4 pav. Apvijų komutavimo diagrama

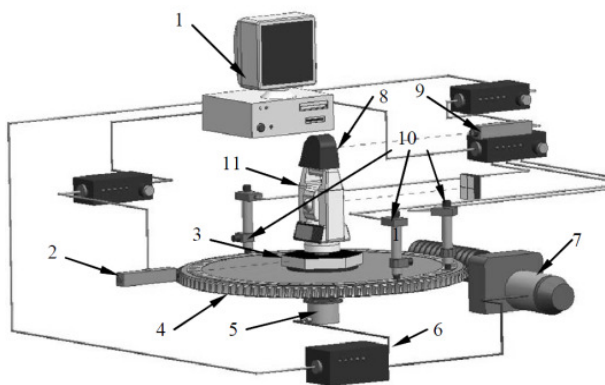
Fig. 4. Winding commutation diagram

### Mechatroninė kampų matavimo sistema

Pagrindinis šio tyrimo uždavinys yra geodezinių prietaisų kalibravimo stendo disko pozicionavimo tikslumo didinimas. Stendas yra sumontuotas Vilniaus Gedimino technikos universiteto Geodezijos institute (Bručas *et al.* 2006).

Kalibravimo stende panaudota tiksli (paklaida iki 3") ir standi apskrito dalinimo mašina, valdoma asmeniiniu kompiuteriu (5 pav.).

Apskrito dalinimo mašinoje įmontuotas precizinis kampo keitiklis, žingsninis variklis su nuolatinio įveržimo sliekine pavara bei viso stendo veikimą valdantis elektroninis blokas ir kompiuteris. Tiksliai pasukamos tikrinamojo prietaiso (teodolito, tacheometro) dalies kampinei padėčiai matuoti naudojamas veidrodis bei autokolimatoriumus. Kalibravimo stendo veikimo principas paremtas klasikiniu lyginimu. Tikrinamojo prietaiso pagrindas standžiai tvirtinamas prie stendo sukamojo stalo ir juda kartu su juo, tuo tarpu viršutinė (sukamoji) geodezinio prietaiso dalis su tam tikru laisvumu tvirtinama prie stendo korpuso ir nuolatos išlaiko apytiksliai tą pačią padėtį.



**5 pav.** Bendra kalibravimo stendo schema: 1 – kompiuteris, 2 – autokolimatorius, 3 – daugiakampė prizmė, 4 – sukamasis stalo (slietratis), 5 – fotoelektrinis kampo keitiklis, 6 – stalo pavaros valdymo blokas, 7 – žingsninis variklis su slietine pavara, 8 – tikrinamojo prietaiso pozicionavimo veidrodis, 9 – tikrinamojo prietaiso padėties nustatymo autokolimatorius, 10 – mikroskopai, 11 – tikrinamasis geodezinis prietaisais

**Fig. 5.** Schematics of calibration test bench: 1 – computer, 2 – autocollimator, 3 – prism, 4 – revolving table, 5 – angle encoder, 6 – control unit, 7 – stepper motor with a worm gear, 8 – positioning mirror of tested equipment, 9 – autocollimator for tested equipment position control, 10 – microscope, 11 – tested geodetic equipment

Stendo stalo pasukimo kampinė padėtis nurodoma kompiuteryje. Duomenys perduodami į valdymo bloką, tada jis siunčia impulsus žingsniniam varikliui tol, kol keitiklio rodmuo pasiekia kompiuteryje nustatytą rodmenį (t. y. stalas pasisuka į reikiamą padėtį). Kampo keitiklio rodmenys (stalo kampinė padėtis) lyginami su tikrinamojo prietaiso rodmenimis bei, įvertinus prietaiso sukamosios dalies kampinę padėtį, nustatomos prietaiso rodmenų paklaidos.

Siekiant tikrinti ir palyginti matavimus, prie stendo sumontuoti papildomi prietaisai – poligonas (3) su autokolimatoriumi (2) bei mikroskopai (10), naudojantys įmontuotą į sukamą stalą skalę, kai kaip kampo etaloną. Tiek autokolimatoriai (disko kampinės ir geodezinio prietaiso padėties nustatymo), tiek mikroskopai yra modernizuoti panaudojant vaizdo jutiklius, leidžiančius nustatyti skalės brūkšnio padėtį ir rodmenis perduoti į kompiuterį.

Visi stendo prietaisai prijungti prie asmeninio kompiuterio, kuriame galima saugoti matavimo rezultatus, gautus stendo darbo metu. Šis stendas gali veikti automatinu režimu be operatoriaus įsikišimo, taip eliminuojant operatoriaus sukiamas matavimų paklaidas.

Pagrindinis šio tyrimo uždavinys yra tikslumo didinimas. Pagrindinės įrangos matavimo tikslumas yra apribotas įrengto enkoderio žingsniu iki  $0,001^\circ$ , o mažiausias posūkio žingsnis (apribotas žingsninio variklio ir pavaros) buvo  $0,000248^\circ$ . Kai naudojami autokolimatoriai ir



**6 pav.** Žingsninis variklis su slietine pavara ir papildoma diržine pavara

**Fig. 6.** Mounted stepper motor with worm and belt gears

mikroskopas, pozicionavimo tikslumas nepakankamas ir būtinas jo pagerinimas. Diskas ir žingsninis variklis kelia labai didelį triukšmą ir vibracijas, taip pat yra nepakankamas sukimosi greitis. Šios problemos kalibravimo procesą daro nepatogiu. Pirminiame variante buvo panaudotas 6 polių žingsninis variklis ШД5Д1 su  $1,5^\circ$  žingsniu. Jis veikė viso žingsnio režimu. Šis variklis buvo pagrindinis vibracijos ir triukšmo šaltinis. Reikiamas sukimo momentas yra apytiksliai  $0,1\text{--}0,15\text{ N}\cdot\text{m}$  (matavimai buvo atlikti naudojantis STAHWILLE torsiomtru Nr. 760). Norint pasiekti didesnę pozicionavimo tikslumą, reikia naudoti variklį, kuris turi mažesnę žingsnį. Todėl buvo pakeistas žingsninis variklis į VEXTA PK266-02B – su mažesniu žingsnio netiesiškimu ir specialiai suprojektuotu mikrožingsnio valdikliu.

Jo pagrindiniai parametrai:

- žingsnio posūkio kampas  $1,8^\circ$ ;
- sukimo momentas  $0,88\text{ N}\cdot\text{m}$ ;
- inercijos momentas  $3\cdot 10^{-6}\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ;
- fazinė srovė  $2\text{ A}$ ;
- apvijos varža  $1,8\ \Omega$ ;
- apvijos induktyvumas  $2,5\text{ mH}$ ;
- didžiausias pradinis impulsų dažnis  $1,2\text{ kHz}$ .

Fotoelektriniu kampinių poslinkių keitikliu A36-F-3600-5V, kurio skiriamoji geba apie  $0,03^\circ$ , išmatuotos variklio žingsnių paklaidos. Tik  $26$  žingsnių paklaidos pasiekė matuoklio slenkstinę vertę. Tai patvirtino pakankamą pasirinkto variklio tikslumą.

Variklio valdymui buvo parinktas mikrovaldiklis A3979 (*Allegro Microsystems*) su mikrožingsnio galimybe. Gauti  $16$  mikrožingsnių tyrimo rezultatai:

- posūkis per vieną žingsnį –  $0,1''$ , kai disko pavaros perdavimas yra  $1:3\ 960$ ;
- didžiausias stabilus žingsnio dažnis –  $1,25\text{ kHz}$ .

Diskas 30° pasisuka per 1,5 minutės. Vibracijos lygis buvo žymiai sumažintas su naujai sumontuotu varikliu ir mikrožingsnio valdikliu. Pastebėti šie rezonansai:

- sukantis prieš laikrodžio rodyklę – po 1–2 s nuo sukimosi pradžios stebimi 445 Hz dažnio rezonansai (kai impulsų dažnis nuo 280 iki 12 500 Hz);
- sukantis pagal laikrodžio rodyklę pastebėti rezonansai:
  - a) 280 Hz, kai impulsų dažnis 280 Hz aplinkoje;
  - b) 165 Hz, kai impulsų dažnis 2 550 Hz aplinkoje;
  - c) 280 Hz, kai impulsų dažnis 4 700 Hz aplinkoje.

Nuo sukimosi krypties geodezijos prietaisų kalibravimo procesas nepriklauso. Matavimai gali būti padaryti kiekvienam 30° pasisukimui, tokiu būdu triukšmas gali būti sumažintas naudojant kelias paprastas taisykles sukimo kontrolei:

- reikia vengti sukimosi prieš laikrodžio rodyklę dažnių diapazone daugiau kaip 280 Hz, t. y. naudoti tai tik tiksliai reguliavimui;
- reikia vengti sukimosi pagal laikrodžio rodyklę rezonuojančiuose dažnio diapazonuose, naudoti didesnius arba mažesnius greičius.

Pagal aukščiau minėtas taisykles sudarytas valdymo algoritmas nesukeliantis įrangai žalingų smūginių poveikių. Impulsų dažnis padidėja lėtai pradžioje nuo 0 iki 100 Hz per 0,2 s, tada greičiau iki 12 500 Hz per 0,5 s. Kai keitiklio rodmenys priartėja prie reikiamos padėties, sukimosi greitis mažinamas atvirkščia seka, o galutinis padėties tikslumas pasiekiamas pavieniais žingsneliais. Tai yra daroma norint išvengti spyruokliavimo paklaidų.

Kasdieniniam naudojimui būtinas tikslumas buvo pasiektas, vibracijos ir triukšmas buvo sumažinti. Tolinė tikslas – greičio kontrolės algoritmo optimizavimas geresnei darbo kokybei pasiekti. Kadangi matavimo diskas nėra idealus, vibracija ir triukšmas priklauso nuo padėties kampo, ir maksimalus greitis ir pagreitis priklauso nuo esamos padėties.

Maksimalios vertės gali būti randamos naudojant paieškinės optimizacijos metodus. Pritaikyti simpleksinės paieškos metodai (Dambrauskas 1995), šiuo metu atliekami tyrimai parenkant optimalius parametrus.

Padėties tikslumas taip pat gali būti pagerintas naudojant simpleksinės paieškos metodus. Ieškomas tinkamiausias apvijų srovių santykis, atitinkantis mažiausią padėties paklaidą. Tikslų funkcija šiuo atveju yra padėties paklaidos minimizavimas matuojant mikroskopu.

## Išvados

1. Pakeitus žingsninį variklį ir jo valdiklį posūkio žingsnis sumažintas iki 0,1".
2. Parinktas valdymo režimas sumažino disko vibracijas bei keliamą triukšmą, sutrumpino posūkio laiką.

## Literatūra

- Bručas, D.; Giniotis, V.; Petroškevičius, P. 2006. Basic construction of the flat angle calibration test bench for geodetic instruments, *Geodezija ir kartografija* 32(3): 66–70.
- Dambrauskas, A. 1995. *Simpleksinės paieškos metodai*. Vilnius.
- Smilgevičius, A. 2005. *Automatikos mikromašinos*. Vilnius.

## RESEARCH AND IMPROVEMENT OF PRECISE ANGLE CONTROL SYSTEM

### S. Šakalinis

#### Abstract

The main task was investigation and precision improvement for a positioning drive, installed in a test rig for testing and calibration of the geodetic instruments at Vilnius Gediminas Technical University, Institute of Geodesy. Replacement of a stepper motor and a microstepping controller design increased positioning accuracy to 0.1". Vibrations and noise of the test rig were significantly decreased using an optimized control algorithm, where resonating step frequencies were bypassed. The time of scale rotation between measurements (every 30°) achieved less than 1.5 min. Methods of the further precision improvement were selected, and this research is in progress now.

**Keywords:** stepper motor, angle positioning system.