

Tiesiaeigių elektros variklių tyrimai Lietuvoje

A. Smilgevičius

Automatikos katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Naugarduko g. 41, LT-03227 Vilnius, Lietuva; tel. +370 5 2744754, el. paštas algirdas.smilgevicius@el.vtu.lt

Įvadas

Pramonėje ir transporte naudojami įvairūs technikos įrenginiai, kurių veikimas pagrįstas bėgamojo magnetinio lauko ir srovių laidžiuose kūnuose sąveika. Tai tiesiaeigiai asinchroniniai varikliai, magnetinės hidrodinamikos įrenginiai, stabdymo įtaisai ir kt.

Tiesiaeigiai varikliai naudojami tais atvejais, kai reikia gauti tiesiaeigį, slenkamąjį arba slankiojamąjį judesį. Tačiau kartais jie naudojami ir sukamajam judesiui gauti, kai plokščias arba lanko pavidalo induktorius yra virš besisukančio disko ar būgno arba iš abiejų jo pusių. Pirmasis darbas, susijęs su tiesiaeigio variklio panaudojimu skystiniam reostatui, buvo atliktas Kaune 1964 m. [1]. Tačiau sistemingi tiesiaeigių asinchroninių variklių tyrimai Lietuvoje buvo pradėti 1970 m. ir tęsiami iki šiol. Tiesiaeigių asinchroninių variklių teorijos ir praktinio taikymo klausimais parengta 10 daktaro disertacijų ir 3 habilitaciniai darbai.

Šių mokslo darbų rezultatai buvo pateikti ir apsvarstyti daugelyje mokslinių konferencijų: Pasauliniame elektrotechnikos kongrese, 2-joje Europos konferencijoje, keliose SSSR elektros mašinų ir elektros pavarų konferencijose, įvairių Rusijos, Lenkijos, Čekijos, Malaizijos, Kroatijos ir Lietuvos universitetų ir mokslo įstaigų konferencijose.

Taigi tiesiaeigių asinchroninių variklių tyrimus Lietuvoje galima apibūdinti kaip pajėgią ir savarankišką mokslo mokyklą.

Šiame straipsnyje aptariami per 30 metų atliktų variklinio režimo tiriamųjų ir taikomųjų darbų rezultatai: problematika, teoriniai darbai, taikymo klausimai ir tolesnių tyrimų kryptys.

Žinybinė tiesiaeigių variklių laboratorija

Tiesiaeigių asinchroninių variklių tyrimams Lietuvoje pradžią davė tuometiniame Vilniaus inžineriniame statybos institute 1970 metais įsteigta SSSR elektrotechnikos pramonės ministerijos Žinybinė tiesiaeigių asinchroninių variklių laboratorija. Oficialiuose dokumentuose ji buvo vadinama Linijinių elektros variklių laboratorija ir veikė iki 1976 m. Visais laboratorijos organizavimo ir įkūrimo klausimais rūpinasi jos mokslinis vadovas doc. dr.

V.Česonis ir šio straipsnio autorius. Sąjunginis laboratorijos pavaldumas užtikrino stabilų finansavimą, reikiamą mokslo darbuotojų skaičių ir elektrotechnikos pramonės paramą.

Žinybinėje laboratorijoje, be vadovo, dirbo Vilniaus inžinerinio statybos instituto Elektrotechnikos ir Elektros įrenginių katedrų dėstytojai, keli etatiniai mokslo darbuotojai ir aspirantai.

Tyrimai buvo pradėti tuo metu, kai užsienio šalių ir kai kurių SSSR aukštųjų mokyklų mokslininkai jau buvo sukūrę tiesiaeigių asinchroninių variklių teorijos pagrindus, skaičiavimo metodus ir konstrukcijas, praktiškai veikiančias realiuose įrenginiuose. Dėl šių mašinų teorijos sudėtingumo ir problemiško, praktinio taikymo galimybių ir vizijos anksčiau ar vėliau reikėjo spręsti tokias mokslines ir technines problemas: matematinio modelio; teorinio tyrimo metodo; iš realaus įtampos šaltinio maitinamų tiesiaeigių asinchroninių variklių darbo; elektromagnetinės galios ir jėgų skaičiavimo, atsižvelgiant į vidinę mašinos asimetriją ir baigtinius matmenis; elektrinio stabdymo; dinaminį procesų; praktinio taikymo.

Laboratorijos darbo pradžioje buvo dvi tyrimų kryptys: tiesiaeigiai asinchroniniai varikliai ir tiesiaeigiai generatoriai. Pastarosios krypties darbai tęsėsi neilgai ir, apgynus vieną kandidato disertaciją (J.Šliogeris) [2], toliau nebuvo tęsiami.

Tiesiaeigių asinchroninių variklių tyrimai, pradėti laboratorijoje 1970 m., ir dabar sudaro pagrindinę Vilniaus Gedimino technikos universiteto Automatikos katedros mokslinių tyrimų kryptį.

Variklinio režimo tyrimai

Pats terminas *tiesiaeigis variklis* nėra visiškai tikslus ir lietuviškoje bei rusiškoje terminijoje ilgainiui keitėsi. Lietuviškoje terminijoje pirmiausiai atsirado *linijinės mašinos*, kai buvo įkurta Žinybinė Linijinių elektros mašinų laboratorija. Vėliau tokias elektros mašinas imta vadinti *tiesinėmis*, o dabar jau nusistovėjo terminas *tiesiaeigės elektros mašinos*. Ankstyvojoje rusiškoje terminijoje galima rasti terminus *магнитофугальный двигатель*, *двигатель поступательного движения*, bet vis dėlto nusistovėjo dabartinis pavadinimas *линейный двигатель*. Verta paminėti, kad anglų ir vokiečių kalbose

šis terminas nekito ir visą laiką buvo *linear motor* (angl.) ir *Linearmotor* (vok.).

Visais atvejais tokių variklių induktoriai kuria bėgamąjį, o ne sukamąjį magnetinį lauką. Mokslinėje literatūroje pasitaiko kitokių tokio judesio pavadinimų: angl. *translatory movement*, vok. *translatorische Bewegung*, kurie atitiktų lietuvišką terminą *slenkamasis judesys*. Tačiau varikliai, kurių veikimas pagrįstas bėgamuoju magnetiniu lauku, dabar vadinami *linear motor* (angl.) ir *Linearmotor* (vok.). Todėl toliau vartojamas terminas *tiesiaeigis variklis*, kuris jau įsigalėjo lietuviškoje terminijoje ir nėra pagrindo dabar jį keisti.

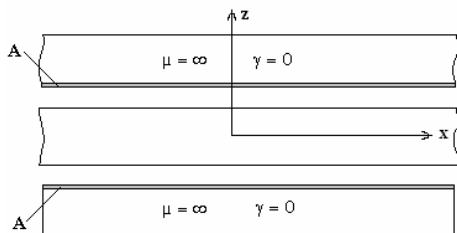
Tiesiaeigiai elektros varikliai priklauso prie tų technikos idėjų, kuriomis buvo susidomėta dar 19 a. pabaigoje ir domimasi iki šiol.

Kuriant tiesiaeigių asinchroninių variklių teorijos pagrindus dalyvavo įvairių šalių mokslininkai, nagrinėję įvairaus sudėtingumo teorinius klausimus ir matematinius modelius: E. Laithwaite, S. Yamamura, A. Voldek, I. Boldea, P. Budig, J. Lielpeter, N. Ochrenenko ir kt.

Pagrindinis tiesiaeigių asinchroninių variklių teorijos klausimas, nuo kurio priklauso naudotini teorinių tyrimų metodai ir gautų rezultatų tikslumas, yra variklio matematinis modelis.

Tiesiaeigio asinchroninio variklio modeliai

Paprasčiausias ir teoriškai idealus yra toks tiesiaeigio asinchroninio variklio modelis, kuriame induktoriai yra be galo ilgi ir be galo platūs, nėra griovelių, o srovė sutelkta be galo ilgame ir ploname paviršiaus sluoksnyje. Toks modelis iš esmės atitinka įprastinės konstrukcijos asinchroninį variklį, kurio induktoriuje kuriamas magnetinis laukas oro tarpe turi tik vieną bėgamąją dedamąją. Taigi idealus dvipusio tiesiaeigio asinchroninio variklio modelis yra dvi lygiagrečios plokštumos, kuriose sutelktos paviršinės srovės kuria bėgamąjį magnetinį lauką (1 pav.).



1 pav. Idealaus tiesiaeigio asinchroninio variklio modelis su be galo ilga aktyviaja zona

Realiose tiesiaeigių variklių konstrukcijose toks laukas yra susijęs su induktoriais ir atskirai nuo jų neegzistuoja. Todėl magnetinio lauko tapatinimas su magnetine banga, kuri gali egzistuoti atskirai nuo jį sukūrusio šaltinio, nėra tikslus. Idealiame tiesiaeigio asinchroninio variklio modelyje negalima atsižvelgti į esminius tiesiaeigių asinchroninių variklių ypatumus – galų ir kraštų reiškinius, kurie juos ir skiria nuo tradicinių asinchroninių variklių. Antra vertus, realiai negali egzistuoti magnetinis laukas, turintis tik vieną dedamąją.

Idealaus induktoriaus su sluoksniu antriniu elementu teoriniai klausimai nagrinėjami L. Radzevičiaus

disertacijoje [3]. Šio darbo ypatumas – antrinis elementas, kurį sudaro du skirtingo storio laidūs nemagnetinės medžiagos sluoksniai ir tarp jų esantis feromagnetikas. Be to, šis sluoksninis elementas tarp induktorių užima nesimetrišką padėtį.

Elektromagnetinio lauko lygtys užrašytos vektoriniam magnetiniam potencialui A ir gauta tokia antrosios eilės diferencialinė lygtis:

$$\frac{\partial^2 A_{ym}}{\partial z^2} - \lambda^2 A_{ym} = 0; \quad (1)$$

čia A_{ym} – pirminio magnetinio lauko vektorinio potencialo kompleksinė amplitudė; λ - kompleksinis skaičius, apibūdinantis elektromagnetinio lauko sklaidimą oro tarpe.

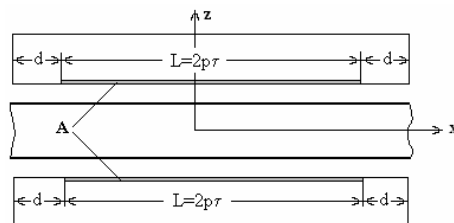
Sprendžiant šią lygtį gauti magnetinio lauko sprendiniai atskiroms modelio sritims ir atskiriems atvejams: simetriška ir nesimetriška antrinio elemento padėtis; vienalytis feromagnetinis ir neferomagnetinis antrinis elementas.

Galų ir šonų reiškiniai įvertinami koeficientais, kurie apskaičiuoti pagal atitinkamas A. Voldeko koeficientų išraiškas [7]. Naudojant lauko teorijos ir grandinių teorijos metodus gauta nagrinėjamo modelio nuoseklioji atstojamoji schema ir jos parametrai.

Šiame darbe pirmąkart pasiūlyti nauji tiesiaeigių asinchroninių variklių valdymo būdai perstumiant vieną induktorių kito atžvilgiu ir maitinant induktorius skirtingų fazių srovėmis.

Panašus modelis tuo pačiu būdu buvo nagrinėtas ir O.N. Veselovskio disertacijoje [4]. Šio modelio antrinis elementas yra vienalytis ir simetriškas induktorių atžvilgiu, tačiau išsprendus tokį idealizuotą uždavinį vėliau analiziškai atsižvelgta ir į šonų reiškinį.

Kita tiesiaeigių asinchroninių variklių modelių grupė skiriasi nuo idealaus modelio baigtiniu pirminio srovės tankio ilgiu ir šuntuojančiomis dalimis, kurių ilgis d (2 pav.).



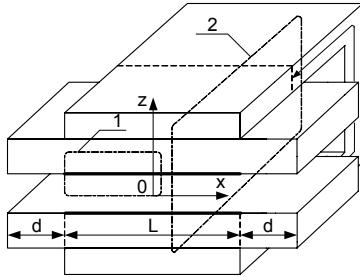
2 pav. Modelis su baigtinio ilgio aktyviaja zona

Šiuose modeliuose induktoriai yra baigtinio ilgio, kurių sudaro aktyvioji zona $L=2p\tau$ ir iš abiejų galų šuntuojančios dalys d ; čia p – pirminio lauko polių porų skaičius, τ – poliaus žingsnis. Šuntuojančios dalys įvertina pirminį lauką ir yra už induktorių galų. Be šių dalių, tiesiaeigiuose asinchroniniuose varikliuose dar susidaro šuntuojančios srutai per induktorių šonus ir jungus. Teoriniai S. Bugenio [5] ir V. Česonio [6] tyrimai parodė, kad dėl to atsiranda papildoma pulsuojamoji pirminio lauko dedamoji:

$$B_{puls} = -(-1)^n \frac{J_1 \mu_0}{\delta \alpha_1} \sin \omega t + (-1)^n \frac{J_1 \mu_0 \frac{L}{2}}{\delta \alpha_1 (d + \frac{L}{2})} \sin \omega t. \quad (2)$$

Iš (2) išraiškos matyti, kad pulsuojamoji magnetinio lauko dedamoji egzistuoja ir tada, kai $d \rightarrow \infty$. Tai reiškia, kad pulsuojamieji magnetiniai laukai oro tarpe susidaro ne dėl baigtinio induktorių ilgio, o dėl baigtinio ilgio srovinės apkrovos. Nustatyta, kad parenkant skirtingo ilgio induktorių dalis, kuriose nėra apvijų, negalima gauti grynai bėgamojo magnetinio lauko aktyviojoje mašinos dalyje netgi esant dideliems šuntuojančiesiems srautams.

Sudėtingiausias modelis (3 pav.) nagrinėtas V. Česonio disertacijoje [6]. Šis modelis nuo kitų skiriasi tuo, kad induktoriai yra baigtinio pločio ir ilgio, antrinis elementas platesnis už induktorius, egzistuoja šuntuojančiosios dalys ir srautai, kurių linijos pažymėtos 1 ir 2, galimas bet koks pirminio lauko polių skaičius, įskaitant trupmeninį. Svarbu paminėti, kad tai vienas iš retų atvejų, kai induktoriai maitinami ne iš srovės, o iš trifazės įtampos šaltinio.



3 pav. Modelis su baigtinio ilgio aktyviaja zona, platesniu antriniu elementu ir šuntuojančiosiomis dalimis

Teorinio tyrimo metodai

Visi tiesiaeigių asinchroninių variklių skaičiavimai yra pagrįsti elektromagnetinio lauko lygčių sprendimu. Bėgamojo lauko lygčių sprendimo būdas priklauso nuo pasirinktos problemos sudėtingumo ir ribinių sąlygų.

Galimi šie pagrindiniai tiesiaeigių asinchroninių variklių teorinio tyrimo metodai:

- tiesioginis elektromagnetinio lauko lygčių sprendimas;
- spektrinis metodas;
- skaitiniai metodai, pvz., baigtinių elementų metodas;
- kiti metodai, pvz., Fourier eilutės, srovinės apkrovos idealizacija delta funkcija arba diskrečiosiomis atkarpomis.

Taikant Maxwello lygtis kvazistacionaraus režimo atvejui, B , H ir j vektoriai yra invariantiški koordinatinių sistemos sistemos atžvilgiu. Tačiau elektrinio lauko stiprumo vektorius priklauso nuo koordinatinių sistemos. Viena jo dedamoji reiškia elektrinio lauko stiprumą statoriaus koordinatinių sistemoje. Jį galima išmatuoti nejudamais statoriaus atžvilgiu jutikliais ir vadinti transformatorinės elektrovaros elektrinio lauko stipriu. Kita dedamoji $v \cdot B$ atitinka sukamosios elektrovaros elektrinio lauko stiprį. Šių dviejų dedamųjų suma $E + v \cdot B$ yra suminė elektrovara, indukuota judamoje aplinkoje.

Dabar naudojamų mašinų dažnių diapazonas yra toks, kad beveik visada galima paneigti slinkties srovės, o matmenys yra gerokai mažesni už elektromagnetinės bangos ilgį. Tada elektros mašinų oro tarpe nėra laisvųjų krūvių ir slinkties srovių, todėl gaunama tokia magnetinio lauko stiprio oro tarpe lygtis:

$$\frac{\partial^2 H(x,y,z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H(x,y,z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H(x,y,z)}{\partial z^2} = 0. \quad (3)$$

Šią lygtį galima išspręsti tik konkrečiam elektros mašinos modeliui, atsižvelgiant į žinomas (duotas) ribines sąlygas.

Elektros mašinų teorijoje laikoma, kad magnetinis laukas, kurį kuria induktoriai, paprastai turi tik vieną dedamąją H_z , kuri nepriklauso nuo koordinatės z , o kitos dvi dedamosios H_x ir H_y yra lygios nuliui. Tokio magnetinio lauko analizinė išraiška yra tokia:

$$H = H_z = H_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x). \quad (4)$$

Tačiau realiai toks magnetinis laukas egzistuoti negali, nes netenkina Maxwello lygties $\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j}$. Esant anksčiau išvardytoms pirminio lauko sąlygoms,

$$\text{rot}_y H = \alpha H_m \cos(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x), \quad (4)$$

o kitos $\text{rot } \mathbf{H}$ projekcijos – $\text{rot}_x \mathbf{H} = \text{rot}_z \mathbf{H} = 0$.

Oro tarpe kitų magnetinio lauko šaltinių nėra ir turėtų būti tenkinama sąlyga $\text{rot } \mathbf{H} = 0$. Tačiau viena jo dedamoji $\text{rot}_y \mathbf{H} \neq 0$, todėl $\text{rot } \mathbf{H} = 0$ netenkinama [7].

Pirminis magnetinis laukas oro tarpe būtų parenkamas korektiškai, laikant kad visame oro tarpe tarp induktorių egzistuoja pirminės srovės tūrinis tankis, kurio $j_x = j_z = 0$,

$$j = j_y = \alpha H_m \cos(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x). \quad (5)$$

Tai reiškia, kad induktorių srovės sutelktos ne jų grioveluose, o tolygiai paskirstytos visame oro tarpe. Taip parinktas pirminis magnetinis laukas leido išspręsti daug įvairių elektromechanikos uždavinių [5, 6, 8].

Teiginys, kad magnetinio lauko stiprumas turi tik vieną vertikaliąją dedamąją, reiškia, jog visų harmonikų kuriamas magnetinis laukas eina per oro tarpą. Tačiau tai teisinga tik pirmajai magnetinio lauko harmonikai, o ne visoms aukštesniosioms harmonikoms. Aukštesniosios magnetinio lauko harmonikos sudaro nemažą tangentinę dedamąją ir toks atvejis neatitinka realaus magnetinio lauko pasiskirstymo oro tarpe. Aukštesniosios harmonikos galėtų būti įvertintos tuo atveju, jeigu magnetinis laukas turėtų dvi dedamąsias: H_z ir H_x . Tada galima atsižvelgti į baigtinį tiesiaeigio variklio antrinio elemento plotį ir skersines sroves.

Spektrinio metodo esmė – Fourier integralo ir transformacijų panaudojimas elektromechanikos uždaviniams spręsti, kai pirminės srovinės apkrovos tankis

yra baigtinio ilgio nagrinėjamos koordinatės atžvilgiu [5, 6, 8]. 2 ir 3 pav. modeliuose pirminė srovinė apkrova yra neperiodinė funkcija koordinatės x atžvilgiu ir laikoma vienetiniu impulsu. Taikant tiesioginę Fourier transformaciją skaičiuojama pirminio tūrinio srovės tankio elementarioji dedamoji. Taip gaunamas ištisinis pirminio magnetinio lauko stiprumo erdvinį elementariųjų dedamųjų spektras. Kiekviena dedamoji yra skirtingo erdvinio dažnio ir atitinka bėgamąjį sinusinį magnetinį lauką, egzistuojantį nuo $-\infty$ iki $+\infty$. Tokiam laukui taikytini visi idealaus modelio (1 pav.) sprendiniai.

Toliau taikant atvirkštinę Fourier transformaciją skaičiuojamos pirminio srovės tankio, magnetinio lauko stiprumo ir jėgos spektrinės charakteristikos ir integraliniai jų dydžiai. Spektrinio metodo taikymas leido išspręsti daug įvairių elektromechanikos uždavinių.

V. Česonio [6], S. Bugenio [5], E. Gurvičiaus [8] darbuose gauti nauji tiesiaeigių asinchroninių variklių mokslinio tyrimo rezultatai, kurie skiriasi nuo ankstesnių naudojamais matematiniais modeliais bei metodais ir elektromagnetinio lauko dedamųjų skaičiavimo būdais:

1. Baigtinių matmenų tiesiaeigių asinchroninių variklių teoriniams tyrimams panaudotas Fourier integralas arba spektrinis metodas. Kiti metodai neduoda patikimų rezultatų net esant vienmačiam elektromagnetiniam laukui.
2. Realių tiesiaeigių asinchroninių variklių tyrimai atlikti tam atvejui, kai induktorių apvijos maitinamos ne iš srovės, bet iš simetriško įtampos šaltinio. Tai leido vienareikšmiškai įvertinti vidinę tiesiaeigių asinchroninių variklių asimetriją – realų fazinių srovių ir magnetovarų nesimetriškumą.
3. Maitinimas iš srovės šaltinio, kai visos fazinės srovės yra lygios, gali būti korektiškas tik tais atvejais, kai pagrindinė induktyvioji varža yra maža, palyginti su skaidos induktyviosiomis varžomis.
4. Nustatyta galų ir kraštų reiškinų tarpusavio sąveika ir jos įtaka skaičiavimo rezultatams.
5. Išnagrinėta magnetinio šuntavimo įtaka magnetiniam laukui oro tarpe. Detali šio klausimo analizė patvirtina, kad pulsuojamieji magnetiniai laukai atsiranda ne dėl baigtinio magnetolaidžių ilgio, o dėl baigtinio ilgio srovinės apkrovos. Nustatyta, kad parenkant skirtingo ilgio induktorių dalis, kuriose nėra apvijų, negalima gauti grynai bėgamojo magnetinio lauko aktyviojoje mašinos dalyje netgi esant dideliems šuntuojantiems srautams.
6. Tiesiaeigių asinchroninių variklių teorinių tyrimų prielaida, kad visos fazinės srovės yra vienodo dydžio, nepakankamai korektiška, kai magnetinis Reynoldso skaičius yra didesnis už 5.

Lietuvoje prieinamoje literatūroje kol kas nėra naujesnių duomenų apie tiesiaeigių asinchroninių variklių maitinimą iš įtampos šaltinio. Šie esminiai rezultatai davė pagrindą kitiems darbams.

Specialiųjų tiesiaeigių automatinių sistemų kūrimo, tyrimo ir praktinio taikymo rezultatai apibendrinti prof. A. J. Poškos habilitaciniame darbe [9]. Pagrindinis šių darbų rezultatas – tiesiaeigių asinchroninių elektros pavarų sistemotechninio tyrimo koncepcija ir jos taikymas konkrečioms automatinėms sistemoms:

1. Ištirta galimybė transportuoti smulkias feromagnetines daleles (dispersą) bėgamuoju magnetiniu lauku. Įrodyta, kad tokios dalelės magnetinio lauko atžvilgiu juda asinchroniškai ir todėl įrenginiai, skirti joms transportuoti, gali būti prilyginti specialiesiems tiesiaeigiams asinchroniniams varikliams;
2. Sukurti lankstaus transportavimo įrenginiai, kuriuos sudaro mechaniniai, elektriniai ir elektroniniai moduliai;
3. Sukurtos ir ištirtos patikimos pneumatinio transportavimo priemonės – sklendės ir vamzdynų perjungikliai, pasižymintys technologijų valdymo lankstumu;
4. Sukurtos ir išnagrinėtos pafaziui valdomos aukštosios įtampos jungtuvų pavaros, kurios leido sukurti naujas elektros linijų gedimo vietos automatinio šuntavimo ir paieškos sistemas;
5. Atlikti platūs smulkių organinių aerosolių sproginimo grūdų perdurbimo įmonėse tyrimai. Nustatyta, kad slėgio jutikliai fiksuoja ankstesnes prasidėjusių sproginimų stadijas negu fotojutikliai. Šių tyrimų pagrindu sukurti originalūs įrenginiai sproginimams vamzdynuose lokalizuoti;

Įvairiose šių darbų ir tyrimų stadijose dalyvavo Č. Teišerskas [16,17], L. Radzevičius, Z. Savickienė ir E. Matkevičius.

Pažymėtina, kad tiesiaeigių asinchroninių pavarų teoriniams tyrimams naudota tiesiaeigių asinchroninių variklių ekvivalentinė schema su įneštinėmis varžomis, kurios įvertina kraštų ar galų reiškinų įtaką.

Atskirus šios problemos klausimus nagrinėjo Z. Savickienė, kurios disertacija [10] skirta impulsinio poveikio tiesiaeigių elektros pavarų tyrimams. Nagrinėjama tiesiaeigių variklių, dirbančių impulsiniu režimu, mechaninės ir darbinės charakteristikos, elektromechaniniai pereinamieji procesai apskaičiuoti naudojant nuosekliąją ekvivalentinę schemą ir kai kinta judamų apkrovos dalių masė. Be to, gautos analizinės induktorių virštemperatūros išraiškos, kai nagrinėjamo režimo metu šiluma į aplinką neatiduodama, o pirminė srovė mažėja tiesiškai arba pagal eksponentės dėsnį.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Automatikos katedroje susidarė nauja mokslinių tyrimų kryptis – dinaminiai procesai tiesiaeigėse elektromechaninėse ir mechatroninėse sistemose. Tokių sistemų tyrimams skirti R. Rinkevičienės ir J.Zubaičio darbai [12, 13, 14].

Tiesiaeigių asinchroninių variklių ir pavarų dinaminį režimų tyrimai [12] atlikti su greitaeigiais tiesiaeigiais asinchroniniais varikliais, neatsižvelgiant į elektromagnetinius procesus antriniame elemente. Nustatyta, kad egzistuoja optimalūs santykiniai variklio parametrai, kuriems esant pereinamųjų procesų trukmė yra minimali. Gauti nauji moksliniai rezultatai apie dinaminį jėgų, atsirandančių pereinamojo proceso pradžioje, skaičiavimą: kol antrinio elemento judėjimo greitis yra mažas ir galima paneigti galų reiškinio įtaką, bet būtina atsižvelgti į elektromagnetinę variklio inerciją.

R. Rinkevičienės habilitaciniame darbe [13] gauti moksliniai rezultatai ir rekomendacijos apima naujus tiesiaeigių mechatroninių sistemų statinių ir dinaminį

režimų klausimus, skaičiavimo metodus ir praktinį tokių sistemų taikymą:

1. sukurta mažo greičio tiesiaiegių asinchroninių variklių statinių, dinaminių ir reguliavimo charakteristikų ir jų aibių tyrimo metodika;
2. išnagrinėti tiesiaiegių mechatroninių sistemų valdymo klausimai;
3. sudaryti matematiniai ir kompiuteriniai modeliai, algoritmai ir programos tiesiaiegių mechatroninių sistemų impulsiniam valdymui.

Atskiri tiesiaiegių mechatroninių įrenginių klausimai nagrinėti E. Matkevičiaus disertacijoje [11]. Čia pagrįstas tiesiaiegių elektros pavarų kombinuoto tyrimo metodas, siejantis elektromagnetinio lauko sprendinius ir grandinių teoriją. Eksperimento planavimo metodu gauta tiesiaiegio variklio magnetinio srauto kitimo diapazono analizinė išraiška ir nustatytos srauto kitimo ribos, priklausančios nuo pagrindinių variklio parametrų, kuriose dažninio valdymo atveju galima stabilizuoti magnetinį srautą.

Taikomieji darbai

Galima nurodyti šias pagrindines tiesiaiegių asinchroninių variklių taikymo sritis, kuriose panaudoti atliktų mokslinių tyrimų rezultatai ir sukurti nauji įrenginiai:

- 1) aukštosios įtampos jungtuvų pavaros, naujos elektros linijų gedimo vietos automatinio šuntavimo ir paieškos sistemos;
- 2) lankstaus transportavimo įrenginiai, kuriuos sudaro mechaniniai, elektriniai ir elektroniniai moduliai;
- 3) originalūs įrenginiai dulkių ir smulkių organinių aerosolių sprogimams vamzdynuose lokalizuoti;
- 4) lankstaus transportavimo įrenginiai, kuriuos sudaro mechaniniai, elektriniai ir elektroniniai moduliai;
- 5) birių medžiagų dozavimas naudojant tiesiaiege asinchroninę pavarą, valdomą impulsiniu būdu;
- 6) presų ir liejimo mašinų apsauginės užtvartos;
- 7) specialios paskirties tiesiaiegiai varikliai ir įrenginiai;
- 8) orlaivių valdymo sistemose atsirandančių trinties jėgų kompensatoriai.

Paminėtina, kad buvo sukurta naujos tiesiaiegių variklių ir įvairių įrenginių su jais konstrukcijos, patvirtintos tuometinės SSSR išradimais, išleisti informaciniai leidiniai ir monografijos [15-18].

Išvados

1. Išnagrinėta magnetinio šuntavimo įtaka magnetiniam laukui oro tarpe. Nustatyta, kad pulsuojamieji magnetiniai laukai atsiranda ne dėl baigtinio magnetolaidžių ilgio, o dėl baigtinio ilgio srovinės apkrovos.
2. Nustatyta, kad parenkant skirtingo ilgio induktorių dalis, kuriose nėra apvijų, negalima gauti grynai bėgamojo magnetinio lauko aktyviojoje mašinos dalyje netgi esant dideliems šuntuojamiesiems srautams.

3. Nustatyta galų ir šonų reiškinii tarpusavio sąveika ir dėl to atsirandanti pulsuojamoji magnetinio lauko dedamoji.
4. Tiesiaiegių asinchroninių variklių teorinių tyrimų prielaida, kad maitinama iš srovės šaltinio ir visos fazinės srovės yra vienodo dydžio, nepakankamai korektiška, kai magnetinis Reynoldso skaičius yra didesnis už 5.
5. Realių tiesiaiegių asinchroninių variklių tyrimai atlikti tam atvejui, kai induktorių apvijų maitinamos ne iš srovės, bet iš simetriško įtampos šaltinio.
6. Sukurtos mažo greičio tiesiaiegių asinchroninių variklių statinių, dinaminių ir reguliavimo charakteristikų tyrimo ir skaičiavimo metodikos.
7. Tolesni tiesiaiegių variklių tyrimai turėtų būti orientuoti į elektromechaninių sistemų su tiesiaiegiais varikliais dinamikos, valdymo ir optimizavimo klausimus.

Literatūra

1. **Чепеле Ю.М.** Исследование герметизированного жидкостного реостата с магнитофугальным двигателем: Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук/ Белорусский политехн. и-т. -Минск, 1964. -18 с.
2. **Шлегерис Ю.** Исследование синхронного генератора с переменным магнитным сопротивлением: Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук/ Каунасский политехн. и-т им. Антанаса Снечкуса. -Каунас, 1975. - 23 с.
3. **Радзявичюс Л.Ю.** Линейный асинхронный двигатель с расслоенным вторичным элементом: Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук/ Харьковский ордена Ленина политехн. и-т им. В.И. Ленина. - Харьков, 1981. -20 с.
4. **Веселовский О.Н.** Низкоскоростные линейные двигатели: Дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук/ Новосибирский политехн. и-т. --Новосибирск, 1979. - 366 с.
5. **Бугянис С.-И. А.** Исследование линейной индукционной машины с конечным индуктором: Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук/ Каунасский политехн. и-т им. Антанаса Снечкуса. - Каунас, 1975. -23 с.
6. **Чесонис В.И.** Линейные асинхронные двигатели: Дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук.- ВНИИЭЛЕКТРОМАШ, 1982. -480 с.
7. **Вольдек А.И.** Магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. -Ленинград: Энергия. 1970, -272 с.
8. **Гурвичюс Э.И.** Продольный и поперечный краевые эффекты в линейном асинхронном двигателе с произвольным числом полюсов: Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук/ Ленинградский и-т авиационного приборостроения. -Ленинград, 1981. -20 с.
9. **Поška А. J.** Specialiosios automatinės sistemos: Habilitacinis darbas. -Vilniaus Gedimino techn. un-tas. Vilnius: Technika, 1995. -203 p.
10. **Savickienė Z.** Impulsinio poveikio tiesiaiegių elektros pavarų tyrimai: Daktaro dis. santrauka/ Vilniaus Gedimino techn. un-tas. -Vilnius: Technika, 1999. -35 p.
11. **Matkevičius E.** Mechatroninių įrenginių valdymas: Daktaro dis. santrauka/ Vilniaus Gedimino techn. un-tas. - Vilnius: Technika, 2003. -31 p.

12. **Ринкевичене Р.В.** Разработка и исследование промышленных электроприводов с линейными асинхронными двигателями: Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук/ Московский ордена Ленина и ордена Октябрьской революции энергетический и-т. - Москва, 1988. -20 с.
13. **Rinkevičienė R.** Tiesiaieigės mechatroninės sistemos: Habilitacinis darbas/ Vilniaus Gedimino techn. un-tas. - Vilnius: Technika, 2003. -136 p.
14. **Zubaitis J.** Tiesiaieigių asinchroninių elektros pavarų sistemotechninis tyrimas: Daktaro dis. santrauka/ Vilniaus Gedimino techn. u-tas. -Vilnius: Technika, 2003. -32 p.
15. **Radzevičius L.** Tiesiaieigių elektros pavarų naudojimas ir jų tolimesnio taikymo respublikos liaudies ūkyje perspektyvos: Analitinė apžvalga. -Vilnius: LIMTI, 1982. - 47 p.
16. **Poška A., Teišerskas Č.** Komutacinių aparatų elektros pavaros su tiesiniais asinchroniniais varikliais bei jų taikymas Lietuvos energetinėje sistemoje: Analitinė apžvalga. -Vilnius: LIMTI, 1983. -48 p.
17. **Poška A., Teišerskas Č.** Automatinės sistemos su tiesiaieigėmis elektros pavaromis. -Vilnius: Technika, 1993. -174 p.
18. **Poška A., Rinkevičienė R.** Tiesiaieigių elektros pavarų skaičiavimo ir valdymo algoritmai. -Vilnius: Technika, 1997. -231 p.

Pateikta spaudai 2003 09 23

A. Smilgevičius. Tiesiaieigių elektros variklių tyrimai Lietuvoje // Elektronika ir elektrotechnika. –Kaunas: Technologija, 2004. - Nr. 1(50). – P. 22-27.

Straipsnis skiriamas tiesiaieigių asinchroninių variklių tyrimų Lietuvoje 30-mečiui. Aptariami per 30 metų atliktų variklinio režimo tiriamųjų ir taikomųjų darbų rezultatai: problematika, teoriniai darbai, taikymo klausimai ir tolesnių tyrimų kryptys. Sistemingi tyrimai buvo pradėti Žinybinėje tiesiaieigių variklių laboratorijoje, kuri veikė Vilniaus inžineriniame statybos institute 1970–1976 m. Pagrindinė jos veiklos kryptis buvo tiesiaieigiai asinchroniniai varikliai. Tiesiaieigių asinchroninių variklių teorijos ir praktinio taikymo klausimais Lietuvoje iš viso parengta 10 daktaro disertacijų ir 3 habilitaciniai darbai. Šių mokslo darbų rezultatai paskelbti daugelyje mokslinių žurnalų, pateikti ir svarstyti įvairių Europos ir Azijos šalių mokslinėse konferencijose. Pagrindiniai tyrimų rezultatai: sudaryti ir išnagrinėti nauji tiesiaieigių asinchroninių variklių modeliai, kuriuose atsižvelgta į baigtinius induktorių ir antrinio elemento matmenis ir dėl to atsirandančią pulsuojamąją magnetinio lauko dedamąją. Realių tiesiaieigių asinchroninių variklių tyrimai atlikti, kai induktorių apvijoms maitinamos ne iš srovės, bet iš simetriško įtampos šaltinio, sukurtos mažo greičio tiesiaieigių asinchroninių variklių statinių, dinaminė ir reguliavimo charakteristikų tyrimo ir skaičiavimo metodikos, naujos tiesiaieigių variklių ir įvairių įrenginių su jais konstrukcijos, patvirtintos tuometinės SSSR išradimais, išleisti informaciniai leidiniai ir monografijos. Il.3, bibl.18 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų, rusų k.).

A. Smilgevičius. Investigation into Linear Electric Motors in Lithuania // Electronics and Electrical Engineering.– Kaunas: Technologija, 2004. – No. 1(50). – P. 22-27.

The paper is devoted to the 30-th anniversary of investigation of linear induction motors in Lithuania. There are discussed results of carried out research and engineering works: problems, theoretical research as well as questions of application and directions of further investigations. Scientific research was began in the Departmental laboratory of linear induction motors that was functioned in the Vilnius Civil Engineering Institute during 1970-1976 years. The main areas of its investigation were linear induction motors. It total there was made 10 PhD dissertations and 3 habilitation works in the field of theory and application of linear induction motors. Results of these research works were published in many scientific magazines, presented and discussed in various scientific conferences of Europe and Asia. The main obtained results are: designed and investigated new models of linear induction motors with consideration of limited dimensions of inductor and secondary and due to this arising pulsating component of magnetic field. There were performed investigations of real linear induction motors when inductor winding is supplied not by current source but by balanced voltage source. There were developed methods to investigate and calculate static, dynamic and regulating characteristics of low speed linear induction motors and developed new constructions of linear induction motors and equipment employing that. They were certificated by inventions of former USSR; there were published information publications and monographs. Ill.3, bibl.18 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English and Russian).

A. Смильгвичюс. Исследование линейных электродвигателей в Литве // Электроника и электротехника. –Каунас: Технология, 2003, - № 1(50). – С. 22-27.

Статья посвящена 30-летию исследований линейных двигателей в Литве. Обсуждаются основные результаты исследовательских и прикладных работ за 30 лет: проблематика, теоретические работы, вопросы практического применения и направления дальнейших исследований. Исследования были начаты в Отраслевой лаборатории линейных двигателей, которая действовала в 1970-1976 г. в Вильнюсском инженерно-строительном институте. Основное направление ее работы были линейные асинхронные двигатели. По вопросам теории и практического применения линейных асинхронных двигателей в Литве подготовлено и защищено 10 кандидатских и 3 докторские диссертации. Результаты исследований опубликованы во многих научных журналах, представлены и обсуждались в различных научных конференциях стран Европы и Азии. Основные результаты исследований: предложены и исследованы новые модели линейных асинхронных двигателей, в которых учтены конечные размеры индукторов, вторичного элемента и в связи с этим возникающая пульсирующая составляющая магнитного поля. Исследования двигателей проведены для реального случая, когда обмотки питаются от источника напряжения, а не от источника тока, созданы методики расчета и исследования статических, динамических и регулировочных характеристик. Созданы новые конструкции линейных двигателей и различных устройств с ними, на которые были получены авторские свидетельства тогдашнего СССР, изданы информационные материалы и монографии. Ил.3, библиография. 18 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).