

## Specialiųjų elektros mašinų magnetiniai laukai ir magnetinės grandinės

**E. Guseinovicė, L. Simanynienė, A. Senulis**

*Elektrotechnikos katedra, Klaipėdos universitetas*

*Bijūnų g. 17, LT-5802 Klaipėda, Lietuva*

**S. Kudarauskas**

*Baltijos g. 107-38, LT-5800 Klaipėda, Lietuva*

### Ižanga

Šiame straipsnyje nagrinėjamos kai kurios paprasčiausių konstrukcijų specialiosios elektros mašinos, turinčios vieną ar du magnetovarus šaltinius. Tokią struktūrą turi sinchroninės švytuojamosios mašinos ir nemaža dalis impulsinio judesio variklių (vieno judesio impulso) [1].

Induktyviųjų elektros mašinų struktūroje galima išskirti elektrinę, magnetinę, mechaninę dalis. Kaip ir visų tokių mašinų, nagrinėjamųjų mašinų magnetinė dalis dažniausiai yra tiriama šiais būdais:

- analizuojant mašinos magnetinį lauką baigtinių elementų metodu;
- sudarant ir tiriant mašinos sutelktųjų parametru magnetinę grandinę;
- sudarant ir tiriant ekvivalentines magnetinių grandinių schemas.

Visais atvejais mašinos magnetinės dalies analizės paskirtis – nustatyti mašinos veikos ypatybes (darbo charakteristikas), spręsti konstrukcijos optimizavimo problemą.

Straipsnio tikslas – paprasčiausios struktūros mašinų pavyzdžiu parodyti išvardytųjų magnetinės dalies tyrimo būdų ypatybes, jų tarpusavio ryšį.

### Induktyviųjų elektros mašinų principas

Induktyviųjų elektros mašinų (skirtingai nuo talpiųjų) veika grindžiama magnetinės energijos sukupimu ir keitimu. Elektromechaninis (tiksliau – magnetomechaninis) energijos keitimas vyksta, jeigu yra galimybė sukaupti ir išgauti magnetinio lauko energiją dviem skirtingos prigimties kanalais – magnetiniu ir mechaniniu. Kadangi elektros mašina, kaip konkretus įrenginys, turi turėti apibrėžtus matmenis, tai ir sukupiamoji energija koncentruojama ribotoje erdvėje. Tokiu atveju prasminga išskirti atskirus kokybiškai skirtingus mašinos elementus, dalyvaujančius energijos keitimo procese. Tokie elementai yra magnetovarus šaltiniai, susiejantys mašinos magnetinę dalį su elektros grandinėmis, ir magnetiniai laidžiai – magnetinės energijos kaupikliai. Taigi induktyvioji elektros mašina, kaip energijos keitiklis, turi būti sudaryta bent iš vieno magnetovarus šaltinio, galinčio tiekti ar

paimti sukupiamą magnetinę energiją, ir bent iš vieno energijos kaupiklio – magnetinio laidžio, kurio vertė priklausytų nuo mechaninės dalies būsenos (nuo mašinos judžiosios dalies padėties) [2].

Atskirų mašinos magnetinės grandinės elementų išskyrimas leidžia sudaryti sutelktųjų parametru magnetines grandines, jas vaizduoti, analizuoti. Todėl ir turime bent du mašinos magnetinės dalies tyrimo būdus, nurodytus išanginiame skyrelyje: magnetinio lauko ar magnetinės grandinės analizę.

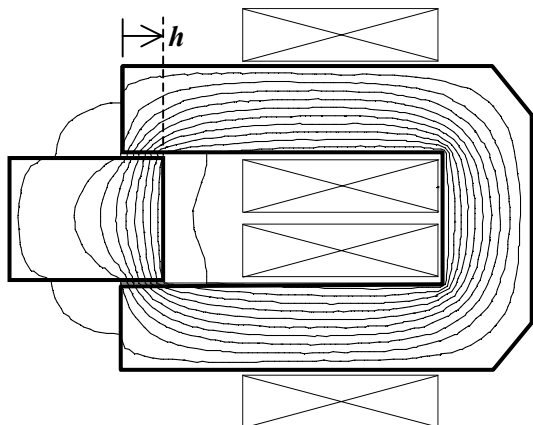
Šiuolaikinės magnetinių laukų skaičiavimo galimybės baigtinių elementų metodu yra labai plačios, galinčios duoti išsamią informaciją apie elektros mašinos savybes. Tačiau šis metodas turi ir trūkumų: būtini galingi kompiuteriai, skaičiavimai ilgai trunka (priklausomai nuo siekiamo tikslumo). Pavyzdžiui, norint tiksliau apskaičiuoti elektromagnetinės prigimties mechanines jėgas pagal magnetinių įtempimų tenzorius, būtina didinti elementų skaičių ypatingose mašinos zonose [3], o tai komplikuoja skaičiavimą. Todėl greta mašinos magnetinio lauko tyrimo metodo tikslinga naudoti ir mašinos magnetinių grandinių tyrimo metodą.

### Vieno magnetovarus šaltinio mašinos

Nesudėtingos konstrukcijos švytuojamojo tiesiaieigio sinchroninio variklio (tai galėtų būti ir impulsinio judesio variklis) schema ir magnetinis laukas (apskaičiuotas FEMM 3 programa) pavaizduoti 1 pav. Nors šioje mašinoje matome dvi rites, tačiau jose tekant vienodai srovei (pavyzdžiui, rites sujungus nuosekliai), jas galime traktuoti kaip vieną magnetovarus šaltinį. Magnetinio lauko vaizdas priklauso nuo magnetovarus vertės ir judžiosios dalies padėties.

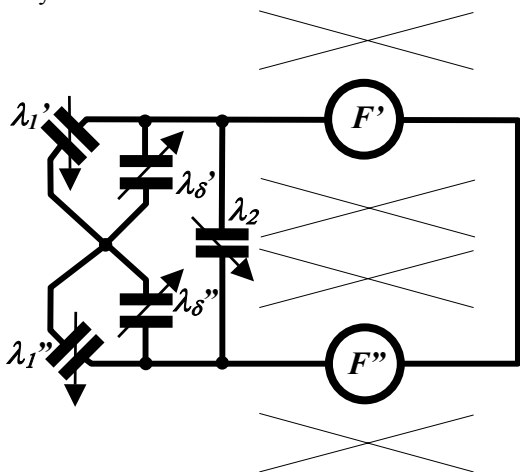
Naudojant tradicinę elektros mašinų magnetinės dalies savybių išraišką, tame pačiame variklyje (žr. 1 pav.) skirtingas magnetinio lauko zonas galime pavaizduoti sutelktųjų parametru elementais – magnetovarus šaltiniais ir magnetiniais laidžiais (2 pav.). Čia pavaizduoti tikrai oro dalių magnetiniai laidžiai (nepaisant magnetolaidžio laidžių). Be to, magnetiniai laidžiai pavaizduoti kondensatorių žymenimis, ir toks vaizdavimas turi principinę prasmę: elementuose, pasižyminčiuose

magnetiniu laidumu, t.y. magnetiniuose laidžiuose (kaip ir kondensatoriuose) gali būti sukaupiama energija [4].



1 pav. Švytuojamojo sinchroninio variklio magnetinės dalies schema ir magnetinio lauko vaizdas

2 paveiksle pavaizduotieji magnetiniai laidžiai kinta, keičiantis judžiosios dalies padėčiai. Nors bendruoju atveju magnetinėje grandinėje gali būti ir nekintamų laidžių, tačiau išskirti kintamuosius laidžius yra iš principo svarbu, nes juose keičiama energija. Be to, bendruoju atveju grandinėje turi būti vaizduojami ir disipatyvūs elementai, išskleidantys energiją, kai magnetinis srautas kinta. Realių mašinų su feromagnetinėmis dalimis laidžių savybės gali būti ryškiai netiesinės.



2 pav. Sutelktųjų parametrų elementų magnetinė grandinė (magnetinio lauko fone)

Be abejo, vaizduojamoje elektros mašinos magnetinės grandinės schemoje gali būti išskirtas įvairus elementų skaičius, nelygu kaip tiksliai sutelktųjų parametrų elementais norime atspindėti magnetinio lauko savybes. Pagaliau ir magnetinio lauko skaičiavimas baigtinių elementų metodu yra analogiškas didelio (net labai didelio) elementų skaičiaus magnetinės grandinės skaičiavimui.

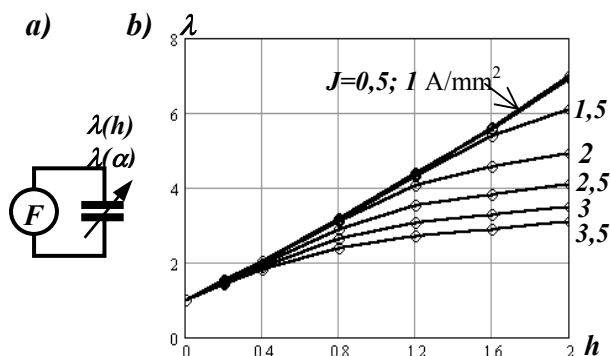
Kai mašinoje yra vienintelis magnetovaros šaltinis, nepriklausomai nuo magnetinės grandinės elementų skaičiaus, visuomet gali būti gauta ekvivalentinė magnetinės grandinės schema, susidedanti iš dviejų elementų (nepaisant galimo disipatyviojo) – magnetovaros šaltinio ir kintamo laidžio. Tokia schema pavaizduota 3 pav., a Čia parodyta, kad ekvivalentinis laidis gali

priklausyti nuo tiesiaeigės mašinos judžiosios dalies koordinatės  $h$  ar nuo sukiosios mašinos kampinės koordinatės  $\alpha$  – ekvivalentinė schema yra bendra įvairių judžiosios dalies trajektorijų mašinoms.

Taigi nuo magnetinės grandinės schemos su didesniu elementų skaičiumi (2 pav.) galime pereiti prie ekvivalentinės schemos su minimaliu elementų skaičiumi (3 pav., a). Didžiausią įtaką 2 pav. pavaizduotos mašinos ekvivalentinės schemos laidžiui, be abejo, turi oro tarpelių laidžiai  $\lambda_\delta$ .

Pagal ekvivalentinę magnetinės grandinės schemą gali būti skaičiuojamos mašinos veikos ypatybės – darbo charakteristikos, jeigu yra žinoma magnetovara ir ekvivalentinio magnetinio laidžio kitimo dėsnis. Šis dėsnis gali būti nustatomas eksperimentiškai arba randamas skaičiuojant magnetinį lauką. Pastaruoju atveju racionaliai sujungiami du magnetinės dalies analizės būdai, kadangi tiesiogiai pagal magnetinio lauko skaičiavimo rezultatus skaičiuoti darbo charakteristikas (tuo labiau jas optimizuoti) būtų sudėtingiau.

Esant ryškiai mašinos magnetinės dalies netiesinių elementų įtakai, ekvivalentinis magnetinis laidis taip pat būtų netiesinis ir priklausytų ne tik nuo judžiosios dalies koordinatės, bet ir nuo magnetovaros. Ši dviejų kintamųjų funkcija gali būti randama, skaičiuojant magnetinį lauką. 3 pav., b, matome grafinę tokios priklausomybės interpretaciją, gautą pagal FEMM 3 programą apskaičiavus 1 pav. pavaizduotos mašinos magnetinį lauką, kai keičiama judžiosios dalies padėtis ir magnetovaros (maitinimo srovės ar jos tankio apvijoje  $J$ ) dydis. Kaip matyti iš šio grafiko, kai srovės tankis yra 0,5 ir 1 A/mm<sup>2</sup>, ekvivalentinis magnetinis laidis kinta beveik vienodai, o didėjant srovės tankiams, vis labiau ryškėja netiesinės magnetolaidžio savybės (maksimalaus ir minimalaus laidžių santykis sumažėja nuo 7 iki 3). Šios priklausomybės gali būti panaudotos atitinkamoms variklio darbo charakteristikoms apskaičiuoti.

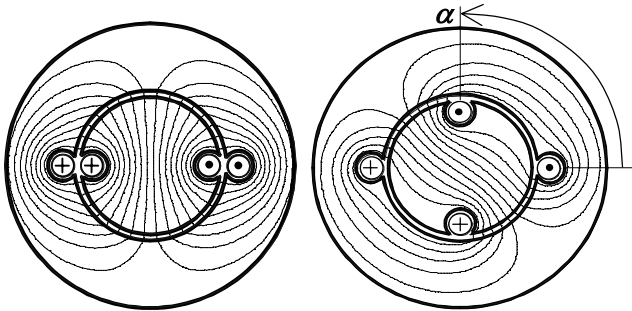


3 pav. Mašinų su vienu magnetovaros šaltiniu magnetinės grandinės ekvivalentinė schema (a) ir 1 pav. variklio ekvivalentinio magnetinio laidžio (santykiniais vienetais) priklausomybė nuo judžiosios dalies koordinatės  $h$  ir srovės tankio  $J$  (b)

### Dviejų magnetovaros šaltinių mašinos

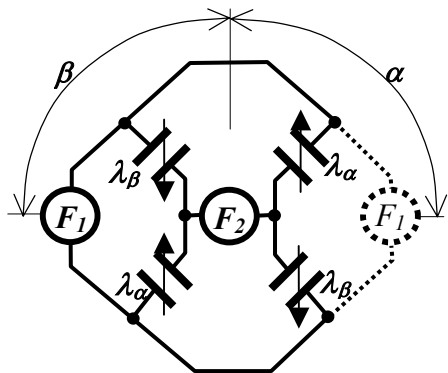
5 paveiksle pavaizduota dviejų magnetovaros šaltinių sukiosios mašinos schema (dvi skirtingos rotoriaus padėtos) ir pagal FEMM 3 programą apskaičiuotas

magnetinio lauko vaizdas. Čia nagrinėjama sukioji neryškiapolė mašina su koncentruotomis statoriaus ir rotorius apvijomis. Šiuo atveju sukioji mašina pasirinkta tyrimo metodo bendrumui pabrėžti, o neryškiapolė – norint pailiustruoti, kad ir tokioje mašinoje yra kintamieji magnetiniai laidžiai. Taigi ir šiuo atveju galioja tas pats energijos keitimo principas, gali būti taikomas tas pats nagrinėjimo metodas. Be to, pasirinktasis modelis gali būti traktuojamas kaip daugelio įprastinių elektros mašinų prototipas.



4 pav. Sukiosios mašinos su dviem magnetovaras šaltiniais schema ir magnetinio lauko vaizdas (dvi skirtingos rotorius padėties:  $\alpha = 0$  ir  $\alpha = \pi/2$ )

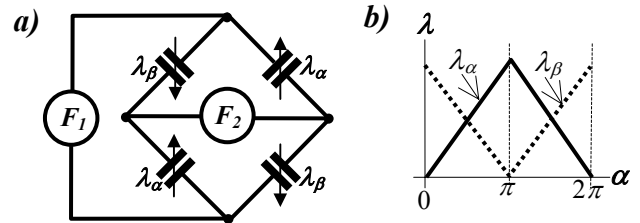
Kaip ir anksčiau nagrinėtos vieno magnetovaras šaltinio mašinos atveju, gali būti sudaryta magnetinės grandinės schema. Tokia schema magnetinio lauko fone pavaizduota 5 pav. Čia taip pat pavaizduoti tikrai oro tarpelių tarp statoriaus ir rotorius magnetiniai laidžiai, kurie yra svarbiausi (žinoma, gali būti įvertinamas ir didesnis grandinės elementų skaičius). Magnetovara  $F_1$  gali būti pavaizduota dvejopai: taip, kaip ji pavaizduota ištisine linija, arba parodyta taškine linija.



5 pav. Sutelktųjų parametrų elementų magnetinė grandinė

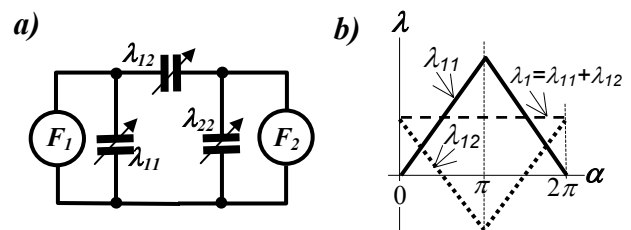
5 pav. pavaizduota magnetinė grandinė atitinka tiltelio schemą, kurios tradicinis vaizdas parodytas 6 pav., a. Šių schemų magnetiniai laidžiai yra kintamieji, priklausantys nuo rotorius koordinatės  $\alpha$ : tai oro tarpelio kampo  $\alpha$  sektoriuje esantis laidis  $\lambda_\alpha$  ir kampo  $\beta = \pi - \alpha$  sektoriuje  $\lambda_\beta$ . Jų priklausomybė nuo rotorius padėties matoma 6 pav., b. Vadinasi, ši neryškiapolė sukioji mašina gali būti traktuojama kaip kintamo magnetinio laidžio (ar kintamos magnetinės varžos) mašina. Tai labai svarbi išvada, kadangi pagal išsigalėjusių ydingą tradiciją kintamos magnetinės varžos mašinomis laikomos tikrai tokios

mašinos, iš kurių magnetolaidžio formos tiesiogiai matyti, kad keičiasi magnetinės varžos (pavyzdžiui, 1 pav. mašina arba 4 pav. mašina, jeigu ji būtų ryškiapolė). Žodžiu, visos induktyviosios elektros mašinos yra kintamo magnetinio laidžio (ar varžos) mašinos [2]. Panašią išvadą (tikrai ne taip aiškiai akcentuotą) galime rasti literatūroje (pavyzdžiui, [5], [6]).



6 pav. Magnetinės grandinės schema ir magnetinių laidžių priklausomybės nuo rotorius padėties

Bet kurios dvejų magnetovaras šaltinių mašinos magnetinės grandinės schema šių šaltinių atžvilgiu gali būti traktuojama kaip keturpolis, kuriam galioja trijų elementų ekvivalentinė schema (pavyzdžiui, II pavidalo, kaip pavaizduota 7 pav., a). Taigi visos dvejų magnetovaras šaltinių mašinos gali būti analizuojamos pagal tą pačią ekvivalentinę magnetinės grandinės schemą. Tikrai šiuo atveju reikia nustatyti ryšį tarp realios ir ekvivalentinės magnetinės grandinės elementų.



7 pav. Magnetinės grandinės ekvivalentinė schema ir magnetinių laidžių priklausomybės

Pavyzdžiui, ryšys tarp 6 pav., a, ir 7 pav., a, pavaizduotų schemų elementų gali būti nustatomas, lyginant šių schemų ribinius atvejus – kai vietoj antrosios magnetovaras  $F_2$  paliekame atvirą arba trumpai sujungtą grandinės šaką. Pirmuoju atveju gauname lygtį

$$\frac{2\lambda_\alpha \cdot \lambda_\beta}{\lambda_\alpha + \lambda_\beta} = \lambda_{11} + \frac{\lambda_{11} \cdot \lambda_{12}}{\lambda_{11} + \lambda_{12}}, \quad (1)$$

antruoju atveju –

$$\frac{1}{2}(\lambda_\alpha + \lambda_\beta) = \lambda_{11} + \lambda_{12}. \quad (2)$$

Išsprendę (1) ir (2) lygčių sistemą, gauname tokias ekvivalentinės schemos parametrų išraiškas:

$$\lambda_{11} = \lambda_{12} = \lambda_\alpha, \quad (3)$$

$$\lambda_{12} = \frac{1}{2}(\lambda_\beta - \lambda_\alpha). \quad (4)$$

Analogiškai ekvivalentiniai laidžiai gali būti randami ir tada, kai magnetinės grandinės turi daugiau elementų.

Ekvivalentinės magnetinės grandinės laidžiai taip pat yra kintamieji. Jų priklausomybė nuo rotoriaus padėties pavaizduota 7 pav., b. Pažymėtina, kad ekvivalentiniai laidžiai gali būti ir kintamo ženklo (pvz.,  $\lambda_{12}$ ), o realūs – tikrai teigiami. Nagrinėjamoju atveju apvijų induktyvumą lemiantys magnetiniai laidžiai (pvz.,  $\lambda_1$ ) yra pastovūs, nors bendruoju atveju jie taip pat gali kisti.

Išdėstytoju metodu gali būti analizuojamos ir bet kurios konstrukcijos – tiek specialiosios, tiek įprastinės – induktyviosios elektros mašinos.

## Išvados

1. Induktyviųjų elektros mašinų magnetinės dalis tikslinga analizuoti skaičiuojant magnetinį lauką, sudarant sutelktųjų parametrų magnetines grandines ir jų ekvivalentines schemas, šiems analizės būdams racionaliai papildant vienas kitą.

2. Mašinų magnetinėse grandinėse tikslinga išskirti kintamuosius magnetinius laidžius, priklausančius nuo mechaninės dalies būsenos, kadangi juose vyksta elektromechaninis energijos keitimas.

3. Visos induktyviosios elektros mašinos yra kintamo magnetinio laidžio (ar magnetinės varžos), ir gali būti tiriamos bendruoju metodu.

**E. Guseinoviėnė, L. Simanyniėnė, A. Senulis, S. Kudarauskas. Specialiųjų elektros mašinų magnetiniai laukai ir magnetinės grandinės // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr. 4(46). – P. 74-77.**

Straipsnyje nagrinėjamos paprasčiausios konstrukcijos induktyviųjų elektros mašinų magnetinės dalies analizės ypatybės. Nagrinėjamosios mašinos turi vieną ar du magnetovaros šaltinius. Tokios paprasčiausios konstrukcijos būna švytuojamosios sinchroninės mašinos ir vieno judesio impulso varikliai. Mašinos magnetinė dalis paprastai analizuojama baigtinių elementų metodu skaičiuojant magnetinį lauką, sudarant magnetines grandines iš sutelktųjų parametrų elementų ir jų ekvivalentines schemas su minimaliu elementų skaičiumi. Išnagrinėti tiesiaeigio variklio su vienu magnetovaros šaltiniu ir sukiojo neryškiapolio su dviem magnetovaros šaltiniais pavyzdžiai, iliustruojantys, kaip nurodytieji analizės metodai gali vienas kitą papildyti (pavyzdžiui, nustatant ekvivalentinių schemų parametrus). Akcentuota, kad magnetinių grandinių schemose tikslinga išskirti magnetinius laidžius, priklausančius nuo mechaninės dalies būsenos, kadangi tokiuose laidžiuose vyksta energijos keitimas. Aprašytasis analizės principas gali būti taikomas bet kokio konstrukcijos sudėtingumo specialiosioms ir įprastinėms induktyviosioms elektros mašinoms. Il. 7, bibl. 6 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

**E. Guseinoviėnė, L. Simanyniėnė, A. Senulis, S. Kudarauskas. Magnetic Fields and Circuits of Special Electrical Machines // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technology, 2003. – No. 4(46). – P. 74-77.**

The paper deals with the features of analysis of magnetic part of the simplest construction of inductive electrical machines. The analysed machines have one or two sources of magnetomotive force (mmf). Synchronous oscillating machines and motors of one impulse of movement have such the simplest structure. Usually magnetic part of machine is analysed by calculating magnetic field by the method of finite elements, by forming magnetic circuits of lumped parameters elements and their equivalent schemes with minimal number of elements. It is analysed the samples of linear motor with one mmf and non-salient poles motor with two mmf, which illustrate how indicated methods of analysis can to supplement each other (for instance, by setting the parameters of equivalent schemes). It is expedient to mark out the permeances, which depend on the state of mechanical part, since the conversion of energy takes place in these permeances. The described method of analysis may be applied for machines with different complexity of their construction, for both special and conventional inductive electrical machines. Ill. 7, bibl. 6 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English, Russian).

**Э. Гусейновене, Л. Симанинене, А. Сянулис, С. Кудараускас. Магнитные поля и магнитные цепи специальных электрических машин // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2003. - № 4(46). – С. 74-77.**

В статье рассматриваются особенности анализа магнитной цепи индуктивных электрических машин простейшей конструкции. Исследуемые машины имеют один или два источника магнитодвижущей силы (мдс). Такую простейшую конструкцию имеют синхронные колебательные машины и двигатели одноимпульсного движения. Магнитная часть двигателя обычно анализируется, рассчитывая магнитное поле методом конечных элементов, составляя магнитные цепи из элементов сосредоточенных параметров, а также их эквивалентные схемы с минимальным количеством элементов. Анализированы образцы прямолинейного двигателя с одним источником мдс и вращательного неявнополюсного двигателя с двумя источниками мдс, иллюстрирующие, как указанные методы анализа дополняют друг друга (например, определяя параметры эквивалентных схем). В схемах магнитных цепей акцентировано целесообразность выделения магнитных проводимостей, зависящих от состояния механической части, так как в таких проводимостях происходит преобразование энергии. Описанный принцип анализа может быть применен в специальных машинах любой конструктивной сложности, а также в обычных индуктивных электрических машинах. Ил. 7, библи. 6 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).

## Literatūra

1. **Kudarauskas S.** Les machines oscillatoires et leur place dans l'ensemble des machines électriques // Revue internationale de génie électrique. – Paris: Hermes, 2001. – Vol. 4, No. 3-4. – P. 391-409.
2. **Kudarauskas S.** Principe fondamental du fonctionnement et de la construction des machines électriques // Actes du Colloque «Électrotechnique du futur EF'99», Lille, 1999, - P. 280-284.
3. **Witczak P.** Magnetic Force and Stress Analysis in Electric Machinery // Proc. Int. XIII Symposium on Micromachines & Servodrives, 15-19 September 2002, Krasiczyn, Poland, - P. 169-176.
4. **Kudarauskas S.** Oscillating electrical motors, application and theory // Proc. International Conference on Electrical Machines, 28-30 August 2000, Espoo, Finland, - P. 573-577.
5. **Jufer M.** Électromécanique // Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1998. 384 p.
6. **Kuznetsov V.A., Brochet P.** A general numerical modelling of electromagnetic process in electromechanical systems // Proc. 15<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines, 25-28 August 2002, Brugge, Belgium; Paper 597 (6 p.), Book of abstracts, – P.351.

Pateikta spaudai 2003 02 28