

## **Elektromechaninių energijos keitiklių nestacionariųjų procesų tyrimai**

### **B. Karaliūnas**

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Automatikos katedra, Naugarduko g. 41,  
LT-03227 Vilnius, Lietuva, tel. +370 5 274 50 63, el. p. vgtufesto@el.vtu.lt*

#### **Įvadas**

Naujoms mechatroninėms sistemoms ir gamybos įrenginiams reikalingos elektros pavaros, veikiančios paleidimo, darbo, greičio reguliavimo ir stabilizavimo, tikslo stabdymo ir pozicionavimo režimais. Todėl jas kuriant plačiai naudojami ne tik rotaciniai, bet ir specialieji elektros varikliai, kurių veikimas pagrįstas slenkamuoju magnetiniu lauku. Pastarajai grupei priskiriami lankiniai, būgniniai ir plokštieji elektros varikliai, varikliai su diskiniu rotoriumi ar segmentiniu statoriumi, taip pat varikliai, turintys du arba daugiau diskinių ar tuščiaavidurių rotorius. Kadangi šis elementas automatinėse pavarose naudojamas ir variklio, ir stabdymo režimais, todėl čia jis nagrinėjamas kaip elektromechaninis energijos keitiklis (EMK) [1].

Automatinėse pavarose su specialiaisiais EMK dažniausiai realizuojami nestacionarieji stabdymo režimai: dinaminis, rekuperacinis, vienfazis, kondensatorinis stabdymas, stabdymas priešiniu jungimu, pulsuojančiąja srove ir inverterinis (dažninis) stabdymas. Stabdymo metu EMK judančioje dalyje, o kai kuriais atvejais ir induktoriuje vyksta gana sudėtingi tarpusavyje susiję elektromagnetiniai ir elektromechaniniai nestacionarieji procesai [2].

Literatūros šaltinių analizė rodo [3, 4], kad kol kas nėra pakankamai tvirtai mokslškai pagrįstų metodikų, kurios leistų tirti EMK nestacionariuosius stabdymo procesus ir skaičiuoti jų dinamines charakteristikas, atsižvelgiant į daugelį tokių keitiklių specifinių savybių. Dėl atviros magnetinės grandinės ir aktyviosios zonos baigtinio ilgio atsirandančio išilginio kraštų efekto specialieji EMK pasižymi vidine magnetine ir elektrine asimetrija. Tokios asimetrijos neturi įprastinės konstrukcijos rotaciniai elektros energijos keitikliai. Dėl to žinomi EMK matematiniai modeliai ir analizės metodai netinka tokiems nesimetriniams keitikliams tirti. Todėl būtina ne tik ieškoti naujų modelių, bet ir juos mokslškai pagrįsti.

Šio darbo tikslas – apžvelgti tiesiaeigių variklių ir pavarų tyrimo mokslines publikacijas, sudaryti dinaminį modelį, atsižvelgiant į stabdymo srovės ir greičio kitimą.

#### **EMK nestacionarieji procesai**

Nestacionarieji procesai – visuma elektromagnetinių

ir elektromechaninių reiškinių, susijusių ne tik su keitiklio maitinimo įtampos, srovės, apkrovos ir antrinio elemento greičio kitimu stabdymo metu (neigiamu pagreičiu), bet ir su elektromagnetinio lauko kraštų efektais. Sąvoka „nestacionarieji procesai“ platesnė už klasikinėje keitiklių teorijoje vartojamą sąvoką „pereinamieji procesai (vyksmai)“ ir apima platesnį keitiklyje vykstančių fizikinių reiškinių spektrą.

Nestacionarieji procesai būdingi ir kintamosios srovės kolektoriniams EMK. Praktikoje paplitę vienfaziai mažos galios kolektoriniai elektros varikliai, kuriuose negali būti įrengtos įprastinės komutacijos gerinimo priemonės – papildomieji poliai ir kompensavimo apvija [5, 6]. Tokiuose keitikliuose dėl nekompensuotos elektrovaros vyksta netiesiniai inkaro srovės komutavimo procesai, kurie turi įtakos ne tik keitiklio charakteristikoms, patikimumui, bet ir kibirkščiavimo bei radijo trikdžių intensyvumui.

Literatūros šaltinių apžvalga rodo, kad visus nestacionariųjų sistemų analizės metodus galima suskirstyti į tris pagrindines grupes [7 – 9]:

- a) metodai, kuriais tiriami pereinamieji procesai ir laikinės sistemų charakteristikos;
- b) metodai, pagrįsti funkciniais kintamųjų pakeitimais;
- c) skaitiniai metodai, pagrįsti specialiosiomis kompiuterinėmis programomis.

Moksliniuose tyrimuose, norint gauti analizinius sprendinius, dažniau taikomi antrosios grupės metodai, pagrįsti Laplaso, Furjė, Melino, Hankelio, Uolšo ir kitais funkciniais kintamųjų pakeitimais. Sistemoms su lėtai kintančiais parametrais tirti taikomi Furjė ir nuosekliųjų priartėjimų metodai. Impulsinių nestacionariųjų sistemų analizei taikomas diskretinis Laplaso (Z pakeitimas) ir kiti panašūs pakeitimai. Tačiau šie metodai dažniausiai taikomi nestacionariųjų sistemų su sudėtingais elektriniais kontūrais ir grandinėmis analizei. Jie nepritaikyti keitiklių su nestacionariaisiais magnetiniais laukais dinaminėms charakteristikoms tirti.

Kuriant ir diegiant naujas technologijas su specialiaisiais EMK, ypač svarbi yra nestacionariųjų stabdymo režimų, visų pirma magnetinio lauko ir dinaminė charakteristikų, tyrimo problema. Kita problema, susijusi su nepakankamai išanalizuotais stabdymo režimais, yra ta, kad be mokslškai pagrįstų metodikų neįmanoma kurti optimalių automatinio

stabdymo sistemų ir taikyti jų konkrečiose technologijose. Todėl šios tarpusavyje susijusios problemos turi būti sprendžiamos kompleksiskai, atsižvelgiant į naujausių technologijų reikalavimus. Šiuo požiūriu nemaži rezervai sukaupti moksliniuose kolektyvuose, vykdančiuose šios srities tiriamuosius darbus.

Nestacionariųjų stabdymo režimų, magnetinių laukų ir dinaminį charakteristikų analizė, įvertinant kraštų efektus bei antrinio elemento greičio kitimą, yra sudėtinga mokslinė problema. Ją sėkmingai gali spręsti tik nemažas kolektyvas, dirbdamas pakankamai ilgą laiką. Jau daugiau kaip 30 metų tiesiaiegių pavarų, jų valdymo bei stabdymo sistemų mokslo tiriamieji darbai atliekami Vilniaus Gedimino technikos universiteto (anksčiau Vilniaus inžinerinio statybos instituto) Automatikos katedroje.

### Elektromagnetinių procesų tiesiaiegiuose varikliuose ir pavarose tyrimai

Specialiųjų EMK nestacionariųjų stabdymo procesų tyrimo galimybės atsirado tada, kai buvo sukurti ir apibendrinti magnetohidrodinaminiai mašinių (MHD) ir tiesiaiegių asinchroninių variklių (TAV) teoriniai pagrindai ir išnagrinėti stacionarieji jų darbo režimai. Intensyvūs šių mašinių tyrimai buvo pradėti po Antrojo pasaulinio karo, kai prirėkė sukurti skystųjų metalų siurblius branduolinės energetikos tikslams ir naujas greitaiegio transporto sistemas. Susiformavo nemaža mokslinių kolektyvų, kurie sėkmingai sprendė ne tik teorines šios technikos srities problemas, bet ir praktinio naudojimo klausimus. Išsamūs teoriniai ir eksperimentiniai MHD mašinių ir TAV tyrimai buvo atlikti tuometiniuose Talino, Rygos, Kijevo, Permės, Novočerkasko politechnikos institutuose, Novosibirsko elektrotechnikos institute, Latvijos MA Fizikos institute, Rygos magnetinės hidrodinamikos SKB ir kitose organizacijose.

Mūsų šalyje tiesiaiegių elektros mašinių tyrimai buvo pradėti 1970 m., kai tuometiniame Vilniaus inžineriniame statybos institute (dabar Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Automatikos katedra) buvo įkurta Žinybinė tiesiaiegių elektros variklių laboratorija, kurios mokslinis vadovas buvo doc. techn. m. kand. (dabar prof. habil. dr.) V. Česonis. Šioje laboratorijoje, kuri veikė iki 1976 m., atlikti tyrimai ir parengtos mokslinės publikacijos apžvelgtos straipsniuose [10, 11]. Čia parodyta, kad mokslo tiriamieji darbai, pradėti Žinybinėje laboratorijoje, toliau tęsiasi Vilniaus Gedimino technikos universiteto Automatikos katedroje ir dabar sudaro pagrindinę šios katedros mokslinių tyrimų kryptį. Straipsnyje [11] teigiama, kad Lietuvoje susikūrė pajėgi savarankiška tiesiaiegių elektros variklių ir pavarų mokslo mokykla.

Nuo 1975 iki 1994 m. tiesiaiegių variklių ir pavarų teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami ir Sąjunginio mažųjų elektros mašinių mokslinio tyrimo instituto Vilniaus skyriuje, kuris 1986 m. buvo reorganizuotas į Sąjunginio elektros mašinių gamybos ir technologijos mokslinio tyrimo instituto Vilniaus filialą.

Specifinės TAV savybės, kurių neturi rotaciniai asinchroniniai varikliai, įgalina kurti specialiąsias automatines sistemas įvairioms technikos sritims. Ilgainiui susiformavo nauja mokslinio tyrimo kryptis – specialiųjų automatinį ir mechatroninių sistemų kūrimas ir jų tyrimas

sistemotechnikos metodais. Šios srities tyrimų rezultatai apibendrinti habilitaciniuose darbuose [12, 13] ir monografijose [14, 15].

Pastaraisiais metais tyrinėtojų dėmesys sutelktas į dar palyginti mažai nagrinėtų tiesiaiegių elektromechaninių ir mechatroninių sistemų problemų sprendimą. Klaipėdos universiteto prof. S. Kudarausko anglų kalba parašytoje monografijoje [16] apžvelgti mūsų šalyje ir užsienyje atliekami švytuojamojo judesio EMK tyrimai. Monografijoje pateikta išsami netradicinių ir specialios paskirties EMK klasifikacija pagal konstrukcijos ypatumus ir judesio pobūdį. Daug dėmesio skirta elektros mašinių ir EMK terminologijai.

### EMK stabdymo režimų tyrimai

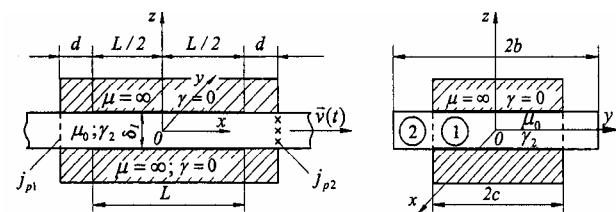
Kuriant šiuolaikinėms technologijoms naujas mechatronines sistemas su specialiaisiais EMK, reikia atsižvelgti į tai, kad tenka dažnai tų sistemų judamąsias dalis stabdyti. Stabdymo jėgą galima gauti naudojant mechaninius, hidraulinius, pneumatinius ir elektromagnetinius įtaisus arba perjungiant pavaros variklį į elektrinio stabdymo režimą. Pastarasis būdas praktikoje plačiausiai taikomas, nes tuo atveju EMK naudojamas efektyviausiai. Stabdymo teorijos ir charakteristikų skaičiavimo klausimams nagrinėti skirta nemažai mokslinių darbų, kuriuose buvo naudojami matematiniai modeliai, besiskiriantys elektromagnetinių stabdymo procesų idealizavimo laipsniu ir skaičiavimo tikslumu [17].

Tiesiaiegių EMK stabdymo režimų tyrimai atliekami ir mūsų šalyje. Jau minėtoje Žinybinėje laboratorijoje kaip atskira mokslo ir technikos problema susiformavo TAV stabdymas. Jos tyrimui vadovavo prof. A. Smilgevičius [18].

Mokslinių publikacijų analizė rodo, kad tiesiaiegių variklių ir pavarų stabdymo režimai nėra plačiai ištirti, nors tokie režimai yra neatskiriama automatinų ir mechatroninių sistemų darbo ciklo dalis. Šioje srityje dar mažai tirti nestacionarieji stabdymo procesai, kai kinta induktoriaus srovė ir antrinio elemento greitis, ir beveik netirti TAV su trumpa antrine dalimi stabdymo procesai.

### EMK nestacionariųjų procesų matematinis modelis

Visų nestacionariųjų stabdymo režimų analizei gali būti panaudotas pagrindinis ir bendriausias EMK teorinis skaičiuojamasis modelis, parodytas 1 pav. [2, 3].



1 pav. EMK stabdymo režimų teorinis skaičiuojamasis modelis:  $L$  – aktyviosios (sužadintos) zonos ilgis;  $2c$  ir  $2b$  – aktyviosios zonos ir antrinio elemento plotis;  $d$  – papildomų magnetolaidžių ilgis;  $\mu$  ir  $\gamma$  – magnetolaidžių magnetinė skvarba ir elektrinis laidis;  $\mu_0$  ir  $\gamma_2$  – antrinio elemento magnetinė skvarba ir elektrinis laidis;  $\vec{v}(t)$  – antrinio elemento greičio vektorius;  $\delta_1$  –

oro tarpo tarp magnetolaidžių dydis;  $j_{p1}$  ir  $j_{p2}$  – papildomi stabdymo srovės paviršinio tankio sluoksniai.

Staciakampėje koordinatinių sistemoje  $x y z$  stabdymo srovės tūrinis tankis vaizduojamas erdvinio vektoriumi, kuris aprašomas ne realiomis, o kompleksinėmis funkcijomis – fazoriais. Kondensatorinio stabdymo atveju aktyviosios zonos ilgyje  $L$  sukuriama srovės tūrinio tankio banga, kurios kompleksinė amplitudė išreiškiama šiuo fazoriumi:

$$\underline{j}_k(x, t) = \underline{J}_{km} e^{-\delta t} e^{i(\omega_1 t - \alpha_1 x)}, \text{ kai } |x| \leq \frac{L}{2}; \quad (1)$$

čia  $\underline{J}_{km}$  – srovės tūrinio tankio amplitudė;  $\delta$  ir  $\omega_1$  – stabdymo srovės silpimo koeficientas ir jos kampinis dažnis;  $i = \sqrt{-1}$ ;  $\alpha_1 = \frac{\pi}{\tau}$  – srovės tūrinio tankio erdvinis dažnis;  $\tau$  – srovės tūrinio tankio pusbangės ilgis arba induktoriaus poliaus žingsnis.

Vienfazio stabdymo atveju aktyviojoje zonoje  $L$  pulsuojanti kintamosios srovės tūrinio tankio banga skaidoma į dvi priešingų krypčių bėgančiąsias bangas:

$$\underline{j}_1(x, t) = \frac{\underline{J}_{1m}}{2} [e^{-i(\omega_1 t + \alpha_1 x)} + e^{-i(\omega_1 t - \alpha_1 x)}], \text{ kai } |x| \leq \frac{L}{2}; \quad (2)$$

čia  $\underline{J}_{1m}$  – srovės tūrinio tankio amplitudė;  $\omega_1$  – tinklo srovės dažnis.

Dinaminio stabdymo atveju induktoriaus laidininkais tekanti nuolatinė srovė sukuria tūrinio tankio stovinčiąją bangą, kurios kompleksinė amplitudė

$$\underline{j}_d(x) = \underline{J}_{dm} e^{-i\alpha_1 x}, \text{ kai } |x| \leq \frac{L}{2}; \quad (3)$$

čia  $\underline{J}_{dm}$  – dinaminio stabdymo srovės tankio amplitudė.

Turint anksčiau pateiktus pradinius duomenis, magnetinio lauko uždavinys sprendžiamas spektriniu metodu, pagal kurį neperiodinei laiko funkcijai (1) ir neperiodinėms koordinatės  $x$  funkcijoms (1) – (3) taikomi integralieji Furjė pakeitimai [5]. Spektrinio metodo fizikinė prasmė ta, kad 1 pav. pavaizduotas EMK modelis pakeičiamas be galo dideliu skaičiumi elementariųjų modelių, kurių aktyviosios zonos yra begalinių matmenų. Tokiuose modeliuose išilginio ir skersinio kraštų efektų nėra, todėl Maksvelo lygčių sprendiniai užrašomi harmoninių funkcijų pavidalu. Elementariajame modelyje galioja superpozicijos principas, todėl suminio magnetinio lauko stipris susideda iš dviejų dedamųjų:

$$\underline{H}_e = \underline{H}_{1e} + \underline{H}_{2e}; \quad (4)$$

čia  $\underline{H}_{1e}$ ,  $\underline{H}_{2e}$  – pirminio ir antrinio magnetinio lauko stiprio elementariosios dedamosios kompleksinė amplitudė.

Išsprendus Maksvelo lygčių sistemą vienmačiam laukui,  $\underline{H}_{1e}$  skaičiuoti gauta tokia diferencialinė lygtis:

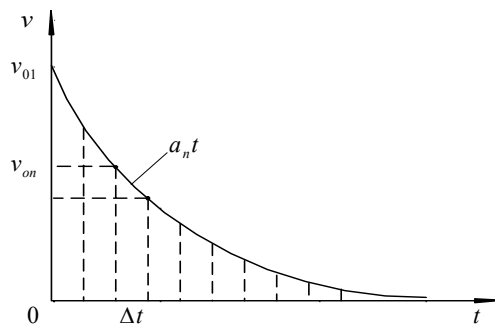
$$\frac{\partial^2 \underline{H}_{1e}}{\partial x^2} = -\frac{\partial \underline{j}_e}{\partial x}. \quad (5)$$

Sprendžiant Maksvelo lygtis, antrinio elemento greičio kitimas stabdymo metu įvertinamas nuosekliųjų intervalų metodu, pagal kurį kiek norima mažame laiko intervale greitis yra tiesinė laiko funkcija:

$$v(t) = v_{0n} + a_n t; \quad (6)$$

čia  $v_{0n}$  – greitis  $n$ -ojo intervalo pradžioje;  $a_n = \text{const}$  – neigiamas pagreitis, laikomas pastoviu  $n$ -ojo intervalo ribose.

Greičio aproksimacija tiesinėmis atkarpomis parodyta 2 pav.



2 pav. Greičio pereinamojo proceso aproksimacija tiesinėmis atkarpomis

Pirmasis straipsnis apie 2 pav. parodytą pagreičio įvertinimą TAV pereinamųjų procesų skaičiavimuose buvo paskelbtas dar 1979 metais [19].

EMK dinaminėms mechaninėms charakteristikoms skaičiuoti Maksvelo lygtyse daromas toks integravimo kintamojo pakeitimas:

$$\frac{\partial \underline{H}_{2e}}{\partial t} = \frac{\partial \underline{H}_{2e}}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial t}; \quad (7)$$

čia  $\frac{\partial v}{\partial t} = a = \text{const}$  – antrinio elemento neigiamas pagreitis stabdymo metu laikomas pastoviu.

Antriniame elemente indukuoto magnetinio lauko elementariosios dedamosios kompleksinei amplitudei skaičiuoti gauta tokia diferencialinių lygčių sistema [2, 3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \underline{H}_{2me}}{\partial t} + \left[ \frac{\alpha^2}{\mu_0 \gamma_2} + i\omega + i\alpha(v_{0n} + a_n t) \right] \underline{H}_{2me} = -i[\omega + \alpha(v_{0n} + a_n t)] \underline{H}_{1me}; \\ \frac{\partial \underline{H}_{2me}}{\partial v} + \left( \frac{\alpha^2}{\mu_0 \gamma_2 a} + i\omega + i\frac{\alpha v}{a} \right) \underline{H}_{2me} = -i \left( \omega + \frac{\alpha v}{a} \right) \underline{H}_{1me}; \\ \frac{\partial^2 \underline{H}_{2me}}{\partial y^2} - \lambda_{ot}^2 \underline{H}_{2me} = \lambda_{ot}^2 \mathcal{A}(a, \alpha t) \underline{H}_{1me}, \text{ kai } |y| \leq c; \\ \frac{\partial^2 \underline{H}_{2me}}{\partial y^2} - \lambda_v^2 \underline{H}_{2me} = \lambda_v^2 \mathcal{A}(a, v) \underline{H}_{1me}, \text{ kai } |y| \leq c; \\ \frac{\partial^2 \underline{H}_{2me}}{\partial y^2} - \lambda^2 \underline{H}_{2me} = 0, \text{ kai } c \leq |y| \leq b; \end{cases} \quad (8)$$

čia  $\underline{H}_{1me}$  – atitinkamo stabdymo režimo pirminio magnetinio lauko stiprio elementariosios dedamosios kompleksinė amplitudė;

$$\lambda_{ot}^2 = \alpha^2 + i[\omega + \alpha \mu_0 \gamma_2 (v_{0n} + a_n t)];$$

$$\lambda_v^2 = \alpha^2 + i[\omega + \alpha\mu_0\gamma_2(v - v_0)];$$

$$A(a, \omega t) = 1 - \frac{\alpha^2 \exp(-\frac{\beta_t^2}{\mu_0\gamma_2} t)}{\alpha^2 + i\mu_0\gamma_2(\omega + \alpha v_{0n})} - \frac{\alpha^2}{\mu_0\gamma_2} I(t) \exp(-\frac{\beta_t^2}{\mu_0\gamma_2} t);$$

$$A(a, v) = 1 - \frac{\alpha \exp(-\frac{\beta_v^2}{\mu_0\gamma_2 a})}{\alpha + i\mu_0\gamma_2 v_0} - \frac{\alpha^2}{\mu_0\gamma_2 a} I(v) \exp(-\frac{\beta_v^2}{\mu_0\gamma_2 a});$$

$$\beta_t^2 = \alpha^2 + i\mu_0\gamma_2[\omega + \alpha(v_{0n} + \frac{a_n t}{2})];$$

$$\beta_v^2 = \alpha^2(v - v_0) + i\frac{\alpha\mu_0\gamma_2}{2}(v^2 - v_0^2);$$

$$I(t) = \int_0^t \exp\left(\frac{\beta_t^2}{\mu_0\gamma_2}\right) dt; \quad I(v) = \int_{v_0}^v \exp\left(\frac{\beta_v^2}{\mu_0\gamma_2 a}\right) dv;$$

$\lambda^2$  – apibendrintoji kompleksinė funkcija, vietoj kurios skaičiuojant pereinamuosius procesus imama  $\lambda_{\omega t}^2$  vertė, o skaičiuojant dinamines charakteristikas, imama  $\lambda_v^2$  vertė.

Pirmosios dvi (8) sistemos lygtys yra tiesinės diferencialinės lygtys su kintamaisiais koeficientais, kurios negali būti išspręstos elementariosiomis matematinėmis funkcijomis. Jų sprendimo rezultatuose egzistuoja integralai  $I(t)$  ir  $I(v)$ , priklausantys Frenelio tipo integralams [3].

Pateikto modelio privalumas yra tas, kad, panaudojus specialiąsias matematinės funkcijas – Frenelio tipo integralus, (8) sistemos lygtis galima išspręsti analiziškai.

## Išvados

Paskelbtoje mokslinėje literatūroje yra nemaža darbų, skirtų specialiųjų EMK stabdymo problemoms tirti. Tačiau daugelyje iš jų nagrinėjami tik nusistovėję (stacionarieji) stabdymo režimai. Pagal literatūroje žinomas išraiškas galima skaičiuoti ir tirti tik statines keitiklio charakteristikas ir mechaninius pereinamuosius procesus, nes šiuo atveju keitiklio būseną stabdymo metu visiškai atitinka nusistovėjusio režimo sąlygas.

[11] parodyta, kad Vilniuje susikūrė pajėgi ir savarankiška tiesiaeigių elektros variklių ir pavarų mokslo mokykla. Iš variklinio režimo ir tiesiaeigių pavarų teorijos Vilniaus mokykloje apginti trys habilitaciniai darbai ir septynios daktaro disertacijos, o iš tiesiaeigių variklių ir pavarų stabdymo režimų šioje mokykloje apgintas tik vienas habilitacinis darbas ir trys daktaro disertacijos.

Tai rodo, kad tiesiaeigių variklių ir pavarų stabdymo režimai dar nėra pakankamai ištirti, nors jie yra neatskiriama mechatroninių sistemų darbo ciklo dalis.

Nestacionariųjų procesų analizei sudarytas teorinis skaičiuojamasis modelis ir gautos EMK stabdymo režimų dinamikos diferencialinės lygtys, kuriose įvertintas stabdymo srovės ir antrinio elemento greičio kitimas ir išilginio bei skersinio kraštų efektų tarpusavio sąveika.

## Literatūra

1. **Boldea I., Nasar A.** Linear electric actuators and generators // IEEE Int. Conf. on Electric Machines and Drives. Conference record. – 1997. – P. MA1/1.1 – MA1/1.5
2. **Darulienė O., Karaliūnas B.** Mathematical Model of Non-Stationary Braking Processes of Electromechanical Power Converters // Proc. of 11-th Int. Conf. On Power Electronics and Motion Control. EPE-PEMC 2004. – Riga, Latvia. – 2004. – Vol. 3. – P. 3-415 – 3-419.
3. **Karaliūnas B.** Tiesiaeigio variklio stabdymo režimų matematinis modelis // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija. – 1997. – Nr. 2(11). – P. 30 – 35.
4. **Karaliūnas B.** Specialiųjų elektros variklių stabdymo režimų pereinamieji procesai // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija. – 1998. – Nr. 2(15). – P. 68 – 73.
5. **Puternicki P.** Silniki komutatorowe malej mocy. – Warszawa: Instytut Elektrotechniki. – 2000. – 371 p.
6. **Karaliūnas B.** Vienfaziai kolektoriniai elektros varikliai ir jų skaičiavimo metodai // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija. – 2000. – Nr. 4(27). – P. 17 – 21.
7. **Пухов Г. Е.** Дифференциальные спектры и модели. – Киев: Наукова Думка. – 1990. – 184 с.
8. **Бергевенко Г. Я., Пухов Г. Е.** Численные операторные методы решения дифференциальных уравнений и анализа динамических систем. – Киев: Наукова Думка. – 1993. – 384 с.
9. **Ефименко Е. И.** Новые методы анализа электрических машин переменного тока и их приложения. – Москва: Энергоатомиздат. – 1993. – 280 с.
10. **Smilgevičius A., Poška A., Rinkevičienė R., Teišerskas Č.** Specialiosios automatinės sistemos su tiesiaeigėmis elektros pavaromis // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija. – 2001. – Nr. 5(34). – P. 76 – 87.
11. **Smilgevičius A.** Tiesiaeigių elektros variklių tyrimai Lietuvoje // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija. – 2004. – Nr. 1(50). – P. 22 – 27.
12. **Poška A. J.** Specialiosios automatinės sistemos: Habilitacinis darbas. – Vilnius: Technika. – 1995. – 203 p.
13. **Rinkevičienė R.** Tiesiaeigės mechatroninės sistemos: Habilitacinis darbas. – Vilnius: Technika. – 2003. – 136 p.
14. **Poška A., Teišerskas Č.** Automatinės sistemos su tiesiaeigėmis elektros pavaromis. – Vilnius: Technika. – 1993. – 174 p.
15. **Poška A., Rinkevičienė R.** Tiesiaeigių elektros pavarų skaičiavimo ir valdymo algoritmai. – Vilnius: Technika. – 1997. – 232 p.
16. **Kudarauskas S.** Introduction to Oscillating Electrical Machines. – Klaipėda, Lithuania. – 2004. – 184 p.
17. **Smilgevičius A.** Tiesiaeigių asinchroninių variklių stabdymo tyrimai Lietuvoje // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija. – 2005. – Nr. 1(57). – P. 42 – 47.
18. **Smilgevičius A.** Tiesiaeigių asinchroninių variklių stabdymas. – Vilnius: Technika. – 1992. – 56 p.
19. **Каралюнас Б. С., Смильгвичюс А. Ю.** Об учете ускорения в расчетах переходных процессов линейных асинхронных двигателей // Электротехника: Темат. сб. научн. тр. вузов Лит. ССР. – 1979. – Т. 5 (14). – С. 75 – 79.

Pateikta spaudai 2005 05 18

**B. Karaliūnas. Elektromechaninių energijos keitiklių nestacionariųjų procesų tyrimai // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2006. – Nr. 1(65). – P. 68 – 72.**

Pateikiama mokslinių publikacijų, kuriose nagrinėjamos tiesiaeigių ir sukamojo judesio elektromechaninių energijos keitiklių nestacionariųjų procesų problemos, apžvalga. Tokie procesai – visuma elektromagnetinių ir elektromechaninių reiškinių, susijusių ne tik su keitiklio maitinimo įtampos, srovės, apkrovos ir antrinio elemento greičio kitimu stabdymo metu (neigiamu pagreičiu), bet ir su elektromagnetinio lauko galų bei šonų efektais.

Literatūros šaltinių analizė rodo, kad šiuo metu nėra pakankamai giliai mokslškai pagrįstų metodikų, įgalinančių tirti nestacionariusius stabdymo ir srovės komutavimo procesus keitikliuose bei skaičiuoti jų dinamines charakteristikas, atsižvelgiant į daugelį tokių keitiklių specifinių savybių. Dėl atviros magnetinės grandinės ir aktyviosios zonos baigtinio ilgio atsirandančio išilginio kraštų efekto specialieji keitikliai pasižymi vidine magnetine ir elektrine asimetrija. Tokios asimetrijos neturi įprastinės konstrukcijos rotaciniai elektros energijos keitikliai. Dėl to žinomi keitiklių matematiniai modeliai ir analizės metodai netinka tokiems nesimetriniams keitikliams tirti.

Nestacionariųjų procesų analizei sudarytas teorinis skaičiuojamasis modelis ir gautos EMK dinaminio stabdymo režimų diferencialinės lygtys, kuriose įvertintas stabdymo srovės ir antrinio elemento greičio kitimas bei išilginio ir skersinio kraštų efekto tarpusavio sąveika. Il. 2, bibl. 19 lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

**B. Karaliūnas. Investigations Non-Stationary Processes of the Electromechanical Power Converters // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2006. – No. 1(65). – P. 68 – 72.**

The article presents review of the scientific published works, in which there are analysed non-stationary processes problems of the linear and rotating electromechanical power converters (EMC). These processes – are electromagnetic and electromechanical phenomena associated not only with the changes converter's supply voltage, current, load and negative acceleration of the secondary element in braking but with the edge effects of the electromagnetic field as well.

The analysis of literature on the problem has shown that in recent years there is no scientific well-founded methodics enable to study a non-stationary processes and current commutation processes in converters and calculate their dynamic characteristics. The internal magnetic and electric asymmetry distinguish oneself in special converters because of the open magnetic circuit and final length of the active zone existing longitudinal edge effect. Therefore, known mathematical models and methods there are no suitable for investigation an asymmetric converters.

Analytical computational model of EMC braking modes and differential equations for dynamic processes are received. The changes of the braking current and velocity of the secondary element and reciprocity interaction of both edge effects in these equations are estimate. Ill. 2, bibl. 19 (in Lithuanian, summaries in Lithuanian, English and Russian).

**Б. Каралиюнас. Исследования нестационарных процессов электромеханических преобразователей энергии // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2006. – № 1(65). – С. 68 – 72.**

Представлен обзор научных публикаций, в которых рассматриваются проблемы нестационарных процессов, протекающих в электромеханических преобразователях энергии линейного и вращательного движения. Такие процессы – совокупность электромагнитных и электромеханических явлений, связанных не только с изменениями напряжения, тока питания, нагрузки, изменениями скорости вторичного элемента при торможении преобразователей (с отрицательным ускорением), но и с краевыми эффектами электромагнитного поля.

Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время нет достаточно глубоко научно обоснованных методик, позволяющих исследовать нестационарные процессы, а также процессы коммутации тока и рассчитать динамические характеристики преобразователей с учетом многих специфических их особенностей. Из-за открытой магнитной системы и конечной длины активной зоны линейные преобразователи обладают внутренней магнитной и электрической асимметрией. Такой асимметрии не наблюдается у преобразователей вращательного движения. Поэтому известные математические модели и методы анализа непригодны для исследования таких несимметричных преобразователей.

Для анализа нестационарных процессов создана расчетно-теоретическая модель и для динамических тормозных режимов получены дифференциальные уравнения, в которых учтены изменения тормозного тока и скорости вторичного элемента. Ил. 2, bibl. 19 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).

DOI: 10.5755/j02.eie.10572