

## Tiesiaeigio asinchroninio variklio trifazė atstojamoji schema

**O. Darulienė, B. Karaliūnas**

*Automatikos katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas*

*Aušros Vartų g. 7a, LT-2600 Vilnius, Lietuva, tel. +370 5 2627710, el. paštas vgtufesto@el.vtu.lt*

### Įvadas

Transformatorių ir elektros mašinų teorijoje plačiai naudojamos atstojamosios schemos, pagal kurias lengvai ir vaizdžiai nustatomi ryšiai tarp įvairių elektromagnetinių dydžių. Tokios schemos naudojamos ir kai kurių elektromechaninių energijos keitiklių charakteristikoms apskaičiuoti. Magnetohidrodinaminių mašinų teorijoje plačiai taikoma vadinamoji nuosekioji atstojamoji schema, kurią 1962 m. pasiūlė ir pagrindė estų mokslininkas Ch. Janes [1]. Tokioje schemoje išilginis kraštų efektas įvertinamas aktyviaja ir induktyviaja varžomis, o antrinio elemento įtaka ir antrinių srovių išmagnetinamasis poveikis – įneštinėmis varžomis. Dėl palyginti didelio nemagnetinio tarpo ir silpnos elektromagnetinės sąveikos tarp induktoriaus ir antrinių srovių tokiuose energijos keitikliu iš tinklo imama srovė beveik nepriklauso nuo slydimo. Tai tolygu atvejui, kai toks elektromechaninis keitiklis maitinamas iš srovės šaltinio, nes jo begalinė vidaus varža neleidžia kisti antrinėms srovėms. Tokiais atvejais praktiniams poreikiams gaunami pakankamai tikslūs skaičiavimo rezultatai, o matematinių modelių, sudarytų pagal nuosekliąją schemą, taikymas yra pagrįstas.

Vėliau ši schema buvo modernizuota ir pritaikyta tiesiaeigių asinchroninių variklių (TAV) bei pavarų charakteristikoms tirti ir analizuoti [2, 3, 4]. Induktoriaus apvijos aktyvioji ir sklaidos induktyvioji varžos bei variklio pagrindinė induktyvioji varža skaičiuojamos elektros mašinų teorijoje žinomais metodais. Tačiau kraštų efekto ir įneštinių varžų tikslus nustatymas dėl sudėtingos tokių variklių magnetinio lauko struktūros darosi labai komplikotas. Pvz., trifaziam TAV nuosekioji atstojamoji schema sudaroma vienai (apibendrintai) fazei, todėl negali būti įvertinta atskirose fazėse esanti srovių asimetrija. Straipsnyje [5] eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad priklausomai nuo TAV konstrukcinių ypatybių ir darbo režimo, srovių asimetrija atskirose induktoriaus apvijos fazėse gali siekti iki 30%. Fazinių srovių asimetrijos priežastys analizuojamos darbe [6]. Čia parodyta, kad varikliuose, kurių pagrindinė aktyvioji varža yra tos pačios eilės kaip ir sklaidos induktyviosios varžos, induktoriaus fazių srovės priklauso nuo slydimo. Tokiu atveju galima teigti, kad trifazis TAV maitinamas ne iš srovės šaltinio, o iš simetrinio įtampos šaltinio. Beje, visos pramoninės tiesiaeigės pavaros realiomis sąlygomis maitinamos arba iš galingo simetrinio įtampos tinklo, arba iš ventiliinio

keitiklio, kurio vidinė struktūra gali būti simetrinė arba asimetrinė. Be to, kiekvienos fazės induktyviosios ir tarpusavio induktyvumo varžos yra skirtingos ir dėl išilginio kraštų efekto įtakos nevienodai keičiasi, kintant slydimui. Tokio variklio įtampų balanso lygtys turi būti užrašomos atskirai kiekvienai fazei ne pagal įtampų kryčius atitinkamose ekvivalentinėse varžose, o įvertinant kiekvienoje fazinėje apvijoje elektromagnetinio lauko indukuotas elektrovaras, kurios tarpusavyje taip pat yra skirtingos. Tik tokiu būdu sudarant įtampų balanso lygtis kiekvienai fazei galima įvertinti kartu egzistuojančią TAV vidinę elektrinę bei magnetinę asimetriją ir tiksliai apskaičiuoti variklio charakteristikas.

Šio darbo tikslas – sudaryti ir pagrįsti TAV trifazę atstojamąją schemą ir patikslinti parametru skaičiavimą.

### Įneštinių varžų apskaičiavimas

Didelis oro tarpas ir induktoriaus magnetolaidžių bei aktyviosios zonos baigtinis ilgis turi lemiamą įtaką energijos keitimo procesui ir elektromagnetinei sąveikai tarp TAV pirminių ir antrinių srovių. Elektromagnetiniai reiškiniai, susiję su variklio baigtiniu ilgiu ir pločiu TAV teorijoje buvo pavadinti išilginio ir skersinio kraštų efektais [1, 6]. Bendroju atveju įneštinių varžų skaičiavimas pagrįstas energijos keitiklio galių balanso lygtimi [7]. Aktyvioji įneštinė varža  $r_i$  skaičiuojama pagal elektromagnetinės galios aktyviają dedamąją  $P_{elm}$ , o reaktyvioji  $X_i$  – pagal elektromagnetinės galios reaktyviają dedamąją  $Q_{elm}$ :

$$\begin{cases} r_i = \frac{P_{elm}}{mI_1^2}; \\ X_i = \frac{Q_{elm}}{mI_1^2}; \end{cases} \quad (1)$$

čia  $m$  – induktoriaus fazių skaičius;  $I_1$  – fazės srovės efektinė vertė.

Indukcinių magnetohidrodinaminių mašinų teorijoje įneštinių varžos skaičiuojamos pagal induktoriaus pagrindinę induktyviają varžą  $X_{p1}$  [1]:

$$\begin{cases} r_i = K_a X_{p1}; \\ X_i = K_r X_{p1}; \end{cases} \quad (2)$$

čia  $K_a$  ir  $K_r$  – įneštinių varžų koeficientai, kurie priklauso nuo mašinos tipo ir konstrukcinių parametrų.

Tokių mašinų skaičiavimo metodikose yra sudarytos ir pateiktos koeficientų  $K_a$  ir  $K_r$  priklausomybių šeimos nuo mašinos magnetinio Reynoldso skaičiaus  $\varepsilon$  ir jos santykinio pločio  $a/\tau$  (čia  $a$  – mašinos aktyviosios zonos plotis;  $\tau$  – induktoriaus poliaus žingsnis). TAV įneštinių varžų koeficientams tokių priklausomybių nėra. Todėl jiems skaičiuoti pirmiausia turi būti kuo tiksliau nustatoma variklio pilnutinė elektromagnetinė galia ir jos dedamosios. Tam tikslui reikia spręsti Maksvelo lygčių sistemą, užrašytą nagrinėjamam atvejui, ir rasti magnetinio lauko pasiskirstymą variklio oro tarpe.

Trifazę nesimetrinę induktoriaus srovių sistemą simetrijų dedamųjų metodu galima išskaidyti į tiesiogines ir atvirkštines sekas priešingomis kryptimis bėgančiasias srovės linijinio tankio bangas. Tada kiekvienos fazės srovės linijinio tankio kompleksinei amplitudei galima užrašyti tokias priklausomybes:

$$\begin{cases} \underline{J}_u = \underline{J}_{mt} e^{-i\left(\alpha_1 x + \frac{2\pi}{3}\right)} + \underline{J}_{ma} e^{i\left(\alpha_1 x - \frac{4\pi}{3}\right)}; \\ \underline{J}_v = \underline{J}_{mt} e^{-i\left(\alpha_1 x + \frac{4\pi}{3}\right)} + \underline{J}_{ma} e^{i\left(\alpha_1 x - \frac{2\pi}{3}\right)}; \text{ kai } |x| \leq \frac{L}{2}; \\ \underline{J}_w = \underline{J}_{mt} e^{-i\alpha_1 x} + \underline{J}_{ma} e^{i\alpha_1 x}; \end{cases} \quad (3)$$

čia  $\underline{J}_{mt} = J_{mt} e^{-i\omega t}$  ir  $\underline{J}_{ma} = J_{ma} e^{i\omega t}$  – srovės linijinio tankio tiesioginės ir atvirkštinės sekos kompleksinės amplitudės, kai  $x=0$ ;  $L$  – aktyviosios zonos ilgis;  $\omega = 2\pi f$  – srovės kampinis dažnis;  $\alpha_1 = \pi / \tau$  – srovės tankio erdvinis dažnis.

Kiekvienos fazės srovės tankio bangos viena kitos atžvilgiu erdvėje perstumtos per  $2\pi/3$  elektrinių laipsnių, o fazinės apvijos  $w$  vidurys sutampa su Dekarto koordinatinių sistemų  $z$  ašimi.

### Elektromagnetinio lauko elementariosios dedamosios

Elektromagnetinio lauko uždavinys šiuo atveju sprendžiamas spektriniu metodu. Elektromagnetiniai procesai nagrinėjami nejudančioje dešininėje Dekarto koordinatinių sistemoje, o magnetinis laukas variklio oro tarpe yra vienmatis ir pasižymi plokščiai lygiagretaus lauko savybėmis. Neperiodinėms koordinatėms  $x$  funkcijoms (3) taikomas dvipusis Furjė pakeitimas [6, 8, 9], ir gaunamos tokios srovės linijinio tankio ištinio spektro elementariųjų dedamųjų išraiškos:

$$\begin{cases} \underline{j}_{eu} = \frac{J_{mt}}{\pi} A_{+\alpha} e^{i\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right)} d\alpha + \frac{J_{ma}}{\pi} A_{-\alpha} e^{i\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right)} d\alpha \\ \underline{j}_{ev} = \frac{J_{mt}}{\pi} A_{+\alpha} e^{i\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right)} d\alpha + \frac{J_{ma}}{\pi} A_{-\alpha} e^{i\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right)} d\alpha; \\ \underline{j}_{ew} = \frac{J_{mt}}{\pi} A_{+\alpha} e^{i\alpha} d\alpha + \frac{J_{ma}}{\pi} A_{-\alpha} e^{i\alpha} d\alpha \end{cases} \quad (4)$$

kai  $|x| \leq \frac{L}{2}$ ; čia  $\alpha = \pi/\tau_e$  – elementariosios dedamosios

erdvinis dažnis;  $\tau_e$  – elementariosios dedamosios poliaus

$$\text{žingsnis; } A_{+\alpha} = \frac{\sin(\alpha + \alpha_1) \frac{L}{2}}{\alpha + \alpha_1}; \quad A_{-\alpha} = \frac{\sin(\alpha - \alpha_1) \frac{L}{2}}{\alpha - \alpha_1}.$$

Dvipusis Furjė pakeitimas TAV teorijoje turi tokią fizikinę prasmę: realus variklio modelis pakeičiamas be galo dideliu skaičiumi elementariųjų modelių, kurių aktyviosios zonos yra begalinių matmenų [9]. Tokiuose modeliuose magnetinio lauko išilginis kraštų efektas nepasireiškia, todėl Maksvelo lygčių sprendimas šiuo atveju nesudaro jokių sunkumų. Tai tiesinės neįsotintos sistemos, kurioms galioja magnetinių laukų superpozicijos principas. Todėl elementariojo modelio suminio magnetinio lauko stiprio kompleksinė amplitudė  $\underline{H}_e$  susideda iš induktoriaus fazinių srovių sukurto pirminio lauko stiprio  $\underline{H}_{1e}$  ir antrinių srovių sukurto lauko stiprio  $\underline{H}_{2e}$  kompleksinių amplitudžių:

$$\underline{H}_e = \underline{H}_{1e} + \underline{H}_{2e}. \quad (5)$$

Išsprendus Maksvelo lygčių sistemą, užrašytą elektromagnetinio lauko elementariosioms dedamosioms,  $\underline{H}_{1e}$  ir  $\underline{H}_{2e}$  apskaičiuoti gautos tokios diferencialinės lygtys:

$$\frac{d^2 \underline{H}_{1e}}{dx^2} = -\frac{d j_{-1e}}{dx}; \quad (6)$$

$$\frac{d^2 \underline{H}_{2e}}{dx^2} - \lambda^2 \underline{H}_{2e} = -i\lambda_1 \underline{H}_{1e}; \quad (7)$$

čia  $\lambda^2 = \alpha^2 + i\lambda_1$ ;  $\lambda_1 = \mu_0 \gamma_2 (\omega + v\alpha)$ ;  $v$  ir  $\gamma_2$  – antrinio elemento greitis ir jo elektrinis laidis;  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$ .

(6) lygtis sprendžiama kartu su (4) sistemos išraiškomis. Tada pirminio magnetinio lauko elementariąją dedamąją kuria atskirų fazinių srovių tiesioginės ir atvirkštinės sekos elementariosios dedamosios:

$$\underline{H}_{1e} = \underline{H}_{1eu} + \underline{H}_{1ev} + \underline{H}_{1ew}. \quad (8)$$

Antrinio magnetinio lauko elementariosios dedamosios kitimas erdvėje kartojama  $\underline{H}_{1e}$  kitimą pagal  $x$  ašį, o skersine kryptimi, kur  $y = \pm a$ ,  $\underline{H}_{2e} = 0$ . Šios ribinės sąlygos leidžia surasti abi (7) lygties integravimo pastoviasias. Todėl (7) lygties sprendinio bendrasis pavaldas yra toks:

$$\underline{H}_{2e} = -\frac{i\lambda_1}{\lambda} \left( 1 - \frac{ch\lambda y}{ch\lambda a} \right) \underline{H}_{1e}. \quad (9)$$

Skliausteliuose esantis reiškinys su hiperbolinių kosinusų santykiu priklauso nuo variklio skersinių matmenų ir apibūdina antrinio magnetinio lauko skersinį kraštų efektą. Į (9) sprendinį įrašius (8) lygties narius, išreikštus per kiekvienos fazės srovės linijinio tankio elementariąsias dedamąsias, gaunamos tokios antrinio magnetinio lauko kompleksinių dedamųjų išraiškos:

$$\begin{cases} H_{2eu} = \frac{\lambda_1}{\pi\alpha\lambda^2} \left(1 - \frac{ch\lambda y}{ch\lambda a}\right) \left[ J_{-m\alpha} A_{+\alpha} e^{-\frac{2\pi}{3}} + J_{-m\alpha} A_{-\alpha} e^{-\frac{4\pi}{3}} \right] e^{i\alpha x} d\alpha \\ H_{2ev} = \frac{\lambda_1}{\pi\alpha\lambda^2} \left(1 - \frac{ch\lambda y}{ch\lambda a}\right) \left[ J_{-m\alpha} A_{+\alpha} e^{-\frac{4\pi}{3}} + J_{-m\alpha} A_{-\alpha} e^{-\frac{2\pi}{3}} \right] e^{i\alpha x} d\alpha; \\ H_{2ew} = \frac{\lambda_1}{\pi\alpha\lambda^2} \left(1 - \frac{ch\lambda y}{ch\lambda a}\right) \left[ J_{-m\alpha} A_{+\alpha} + J_{-m\alpha} A_{-\alpha} \right] e^{i\alpha x} d\alpha \end{cases} \quad (10)$$

Kiekviena (10) sistemos dedamoji induktoriaus atžvilgiu juda  $x$  ašies kryptimi greičiu  $v_e = 2\tau_e f$ . Todėl kiekvienos fazės nejudančiuose laidininkuose indukuojamos elektrovaros, dėl kurių bendru atveju sukuriamas tokia elektrinio lauko stiprio elementarioji dedamoji:

$$\underline{E}_{12e} = -\mu_0 v_e \underline{H}_{2e} e^{i\alpha x} d\alpha = -\frac{\mu_0 \omega}{\alpha} \underline{H}_{2e} e^{i\alpha x} d\alpha. \quad (11)$$

Iš (10) ir (11) išraiškų išplaukia, kad variklio suminis elektrinio lauko stipris susideda iš atskirose fazėse sukuriamų elektrinio lauko elementariųjų bėgančiųjų bangų. Be to suminių elektrinių laukų visų fazių laidininkuose sukuria antrinio magnetinio lauko ištisinis spektras. Todėl kiekvienos fazės pilna elektrinio lauko stiprio reikšmė yra ne kas kita kaip elementariųjų dedamųjų  $\underline{E}_{12e}$  integralinė suma. Tuo remiantis, fazei  $u$  galime užrašyti:

$$\underline{E}_{12u} = \frac{\mu_0 \omega}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\lambda_1}{\alpha^2 \lambda^2} \left( \frac{ch\lambda y}{ch\lambda a} - 1 \right) \left[ \underline{A}_{-m\alpha}^{+\alpha} + \underline{A}_{-m\alpha}^{-\alpha} \right] e^{i\alpha x} d\alpha; \quad (12)$$

čia  $\underline{A}_{-m\alpha}^{+\alpha}$  ir  $\underline{A}_{-m\alpha}^{-\alpha}$  – srovės linijinio tankio tiesioginės ir atvirkštinės sekos funkcijos.

Įvertinus fazės daugiklius  $a$  atskirų fazių erdvinį poslinkį, analogiškos išraiškos užrašomos fazėms  $v$  ir  $w$ . Visi (12) tipo netiesioginiai integralai gali būti išspręsti greitojo Furjė pakeitimo kompiuterinių programų paketu [10, 11] arba analiziniu būdu, taikant reziduumų teorijos metodus, nes visos pointegralinės funkcijos šiuo atveju tenkina Žordano lemos sąlygas [12]. Pointegralinių funkcijų ypatingieji taškai apskaičiuojami palyginti lengvai: taškuose, kur  $\alpha = \pm\alpha_1$ , egzistuoja pirmos eilės poliai, o taške, kur  $\alpha = 0$  – antros eilės poliai. Be to pointegralinės funkcijos turi be galo daug paprastų polių, kurie yra hiperbolinės lygties  $cha\sqrt{\alpha^2 + i\lambda_1} = 0$  šaknys.

### Elektromagnetinės galios skaičiavimas

Elektromagnetinė galia perduodama iš induktoriaus aktyviosios zonos elementariojo tūrio  $dv = dx dy dz$  antriniam elementui bendruoju atveju skaičiuojama taip:

$$d\underline{S}_E = -\frac{1}{2} \underline{E}_{12} \underline{J}_1(x) dv; \quad (13)$$

čia  $\underline{J}_1(x)$  – induktoriaus srovių tūrinio tankio jungtinis kompleksas.

Visa elektromagnetinė galia apskaičiuojama integruojant (13) išraišką pagal trifazio variklio aktyviosios zonos tūrį:

$$\underline{S}_E = -\frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \int_{(v)} \underline{E}_{12} \underline{J}_1(x) dx dy dz. \quad (14)$$

TAV teorijoje integravimo rezultatas paprastai pateikiamas tokiu pavidalu:

$$\underline{S}_E = S_{E0} \underline{K}_E; \quad (15)$$

$$S_{E0} = \frac{\mu_0 \omega L a \delta \varepsilon_0 s}{\alpha_1^2} I_{1m}^2; \quad (16)$$

$$\underline{K}_E = K_P + iK_Q; \quad (17)$$

čia  $S_{E0}$  – idealiojo variklio, kuriame nepasireiškia išilginis ir skersinis kraštų efektai ir nėra antrinių srovių išmagnetinančio poveikio, pilnutinė galia;  $s$  – slydimas;  $\varepsilon_0$  – magnetinis Reynoldso skaičius, kai  $s=1$ ;  $\underline{K}_E$  – elektromagnetinės galios kompleksinis koeficientas.

Čia pateikta induktoriaus srovių asimetrijos įvertinimo metodika įgalina rasti iš kiekvienos fazės perduodamos antriniam elementui elektromagnetinės galios atitinkamas išraiškas ir apskaičiuoti kiekvienos fazės kompleksinius galios koeficientus. Realios šių koeficientų dalys charakterizuoja kiekvienos fazės aktyviąją elektromagnetinę galią, o menamosios dalys – reaktyviąją galią. Tada kiekvienos fazės aktyviosios įneštinės varžos pagal (1) išraišką gali būti skaičiuojamos taip:

$$\begin{cases} r_{iu} = \frac{S_{E0} K_{Pu}}{mI_u^2} \\ r_{iv} = \frac{S_{E0} K_{Pv}}{mI_v^2}; \\ r_{iw} = \frac{S_{E0} K_{Pw}}{mI_w^2} \end{cases} \quad (18)$$

o reaktyviosios fazių įneštinės varžos - taip:

$$\begin{cases} X_{iu} = \frac{S_{E0} K_{Qu}}{mI_u^2} \\ X_{iv} = \frac{S_{E0} K_{Qv}}{mI_v^2}; \\ X_{iw} = \frac{S_{E0} K_{Qw}}{mI_w^2} \end{cases} \quad (19)$$

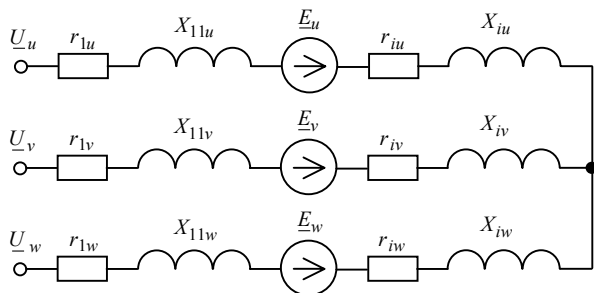
Suminis magnetinis laukas induktoriaus apvijose  $u$ ,  $v$  ir  $w$  indukuoja elektrovaras, kurios šiuo atveju yra ne kas kita kaip fazės saviindukcijos elektrovaros ir atskirų fazių abipusės indukcijos elektrovarų geometrinė suma [12, 13]. Todėl fazių pilnas elektrovaras galima išreikšti žinant elektrinio lauko stiprį ir įvertinus apvijų  $u$  ir  $v$  erdvinį poslinkį atžvilgiu apvijų  $w$ :

$$\begin{cases} \underline{E}_u = K_E \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-a}^a \underline{E}_{12u} \cos\left(\alpha_1 x - \frac{2\pi}{3}\right) dx dy \\ \underline{E}_v = K_E \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-a}^a \underline{E}_{12v} \cos\left(\alpha_1 x + \frac{2\pi}{3}\right) dx dy; \\ \underline{E}_w = K_E \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-a}^a \underline{E}_{12w} \cos(\alpha_1 x) dx dy \end{cases} \quad (20)$$

čia  $K_E = \frac{\pi w_1 k_{ap}}{L}$  - elektrovaros koeficientas;  $w_1$  - fazės vijų skaičius;  $k_{ap}$  - apvijos koeficientas.

### Atstojamoji schema ir įtampų balanso lygtys

Pagal (18), (19), (20) išraiškas galima sudaryti TAV, maitinamo iš simetrinio įtampos šaltinio, ekvivalentinę atstojamąją schemą, kuri pavaizduota paveikslėlyje.



Pav. TAV trifazė atstojamoji schema

Pagal pateiktą atstojamąją schemą kiekvienai variklio fazei galima užrašyti įtampų balanso lygtis:

$$\begin{cases} \underline{U}_u = \underline{E}_u + \underline{I}_u (r_{1u} + r_{iu}) + i \underline{I}_u (X_{l1u} + X_{iu}) \\ \underline{U}_v = \underline{E}_v + \underline{I}_v (r_{1v} + r_{iv}) + i \underline{I}_v (X_{l1v} + X_{iv}) \\ \underline{U}_w = \underline{E}_w + \underline{I}_w (r_{1w} + r_{iw}) + i \underline{I}_w (X_{l1w} + X_{iw}) \end{cases} \quad (21)$$

Gautos lygčių sistemos (20) ir (21) įgalina apskaičiuoti fazių sroves, kai TAV maitinamas iš simetrinio įtampos šaltinio. Reikia pažymėti, kad gautos išraiškos priklauso ne tik nuo induktoriaus bei antrinio elemento parametrų ir geometrinių matmenų, bet ir nuo variklio aktyviosios zonos ilgio  $L$ , kuriame gali būti lyginis:  $L_l = 2p\tau$ , nelyginis:  $L_n = (2p+1)\tau$  arba trupmeninis:  $L_r = (2p-r)\tau$  induktoriaus aktyviųjų (sužadintų) zonų skaičius. Čia  $p$  – polių porų skaičius;  $r$  – trupmeninė dalis, rodanti sutrumpintą apvijos žingsnį, palyginti su pilnutinio žingsnio  $y = \tau$  apviją. Šia prasme gautos išraiškos ir lygčių sistemos yra universalios, įgalinančios analizuoti variklių su skirtingais aktyviųjų zonų skaičiais energijos keitimo procesus bei integralines charakteristikas, atsižvelgiant į išilginį ir skersinį kraštų efektus bei jų tarpusavio sąveiką.

### Išvados

1. Pateikta TAV fazinių srovių asimetrijos įvertinimo metodika įgalina analizuoti variklio elektromagnetinius

procesus bei charakteristikas, esant duotai maitinimo įtampai.

2. Induktoriaus srovių trifazė nesimetrinė sistema išskaidoma simetrinėmis dedamosiomis, o paskui elektromagnetinio lauko teorijos metodais apskaičiuojamos atskirų fazių elektromagnetinės galios, elektrovaros bei įneštinės varžos, kurių pagrindu sudaroma trifazė atstojamoji schema.

3. Elektromagnetinės galios ir atskirų fazių elektrovaroms apskaičiuoti panaudotos elektrinio lauko stiprio analizinės išraiškos, gautos spektriniu metodu, pagrįstu integraliaisiais pakeitimais.

4. Nesimetrinio TAV elektromagnetiniai energijos keitimo procesai priklauso ne tik nuo pagrindinės elektromagnetinio lauko harmonikos, bet ir nuo ištesinių spektrų tiesioginės ir atvirkštinės sekos elementariųjų dedamųjų, judančių priešingomis kryptimis ir skirtingais greičiais.

### Literatūra

1. **Вольдек А. И.** Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. - Ленинград: Энергия, 1970. - 272с.
2. **Poška A., Teišerskas Č.** Automatinės sistemos su tiesiaieigėmis elektros pavaromis. - Vilnius: Technika, 1993. - 174 p.
3. **Gieras J. F.** Linear Induction Drives. - Oxford: Clarendon Press, 1993, - 214 p.
4. **Smilgevičius A., Poška A., Rinkevičienė R., Teišerskas Č.** Specialiosios automatinės sistemos su tiesiaieigėmis elektros pavaromis // Elektronika ir elektrotechnika. - Kaunas: Technologija, 2001. - Nr. 5(34). - P. 76 - 87.
5. **Darulienė O., Karaliūnas B.** Tiesiaiegių ir lankinių asinchroninių variklių vidinė asimetrija // Energetikos ir elektrotechnikos technologijos: Respubl. konferenc. pranešimų medžiaga. - Kaunas: Technologija, 2002. - P. 90 - 91.
6. **Чесонис В. И.** Характеристики ЛАД при заданном напряжении // Электротехника. - Москва, 1980. - Nr. 10. - С. 47 - 52.
7. **Strangas E. G., Qiang H. M.** Equivalent Circuit Derivation for double sided Linear Induction Motor // Proceedings of International Conference on Electrical Machines. - 1994. - Vol. 2. - P. 89 - 97.
8. **Torri S., Mori Y. and Efhara D.** Fundamental Investigation on Analysis of Linear Induction motor using the Wavelet Transform Technique // Proceedings of International Conference on Electrical Machines. - Helsinki. Finland, 2000. - Vol. 1. - P. 99 - 102.
9. **Nonaka S.** Analysis of single - sided Linear Induction Motor by simplified Fourier Transform Method // Proceedings of International Conference on Electrical Machines. - Helsinki. Finland, 2000. - Vol. 1. - P. 247 - 251.
10. **Morizane T., Ohsaki H., Masada E.** Study on the Feasibility of the System applied with Linear Induction Motor for vertical movement // Proceedings of International Conference on Electrical Machines. - 1994. - Vol. 2. - P. 84 - 88.
11. **Ersoy O. K.** Comparative Review of Real and Complex Fourier - Related Transform // Proceedings IEEE. - 1994. - Vol. 82. Nr. 3. - P. 429 - 447.
12. **Yoshida K., Lee J., Kim Y. J.** Lift and Thrust Forces in Contolled - PM LSM for MAGLEV vehicle using 3 - d FEM // Proceedings of International Conference on Electrical Machines. - 1996. - Vol. 2. - P. 373 - 378.

13. Davidson J. E., Gieras J. F. New shaded – pole Linear Induction Motor Computation of Characteristics using Classical and Finite Element Approach // Proceedings of

International Conference on Electrical Machines. – 1996. - Vol. 2. – P. 283 – 288.

Pateikta spaudai 2003 02 27

**O. Darulienė, B. Karaliūnas. Tiesiaeigio asinchroninio variklio trifazė atstojamoji schema // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr. 4(46). - P. 78-82.**

Pateikta tiesiaeigio asinchroninio variklio (TAV) fazinių srovių asimetrijos įvertinimo metodika įgalina analizuoti variklio elektromagnetinius procesus bei charakteristikas, esant duotai maitinimo įtampai. Trifazė nesimetrinė induktoriaus srovių sistema simetrinių dedamųjų metodu išskaidoma į tiesioginės ir atvirkštinės sekos priešingomis kryptimis bėgančiąsias srovės linijinio tankio bangas. Paskui elektromagnetinio lauko uždavinys sprendžiamas spektriniu metodu, neperiodinėms koordinatės  $x$  funkcijoms taikant dvipusį Furjė pakeitimą. Nesimetrinio TAV atstojamosios schemos varžų skaičiavimas pagrįstas elektrinio lauko stiprio, elektromagnetinės galios bei kiekvienoje induktoriaus fazėje suminio magnetinio lauko indukuotų elektrovarų nustatymu. Maksvelo lygčių sistema šiuo atveju užrašoma ir sprendžiama ištininio spektro vienos elementariosios dedamosios atžvilgiu. Pagal gautas varžų ir elektrovarų išraiškas sudaryta TAV trifazė atstojamoji schema, kurioje įvertinta srovių asimetrija, atsirandanti dėl išilginio ir skersinio kraštų efekto ir jų tarpusavio sąveikos. Induktoriaus srovėms apskaičiuoti pateiktos kiekvienos fazės įtampų balanso lygtys. Il. 1, bibl. 13 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

**O. Darulienė, B. Karaliūnas. Three Phase Equivalent Circuit of Linear Induction Motor // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2003. – No. 4(46). – P. 78-82.**

Presented evaluation method of a linear induction motor, hereinafter LIM, phases' current asymmetry enables us to analyze motor's electromagnetic processes and characteristics being an appropriate voltage supply. Three phase asymmetric inductor's current system is divided into direct and indirect sequence current's linear density waves of different directions using a method of symmetric components. Then a task of electromagnetic field is solved using a spectral method, i. e. applying two-sided Fourier change for non-periodic functions of the coordinate  $x$ . LIM asymmetric equivalent scheme's resistance calculation is based on estimation of electrical field intensity, electromagnetic power and the whole magnetic field inducted electromotive force in each inductor's phase. In this case, Maxwell equations' system is recorded and worked out taking into account one elementary component of continuous spectrum. According to resistance and electromotive force estimations LIM three phase equivalent scheme is made. In the scheme current asymmetry, the cause of which are longitudinal and transverse edge effects and their interaction, is evaluated. In order to calculate inductor's current, each phase voltage balance equations are presented. Il. 1, bibl. 13 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English and Russian).

**O. Дарулене, Б. Каралюнас. Трехфазная схема замещения линейного асинхронного двигателя // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2003. - № 4(46). – С.78-82.**

Представлена методика учета асимметрии фазных токов линейного асинхронного двигателя (ЛАД), позволяющая анализировать электромагнитные процессы и характеристики при заданном напряжении питания. Трехфазная несимметричная система токов индуктора с помощью метода симметричных составляющих представлена прямобегущей и обратнобегущей волнами линейной плотности первичного тока. После этого задача электромагнитного поля решается спектральным методом, основанным на двустороннем преобразовании Фурье относительно неперидических по координате  $x$  функций. Расчет параметров схемы замещения несимметричного ЛАД основан на определении напряженности электрического поля, электромагнитной мощности и индуцированных в фазах индуктора электродвижущих сил. Уравнения Максвелла в данном случае решаются относительно элементарной составляющей сплошного спектра напряженности магнитного поля. На основании полученных выражений для сопротивлений и электродвижущих сил составлена трехфазная схема замещения. Для расчета фазных токов составлена система уравнений баланса напряжений для каждой фазы индуктора. Ил. 1, библи. 13 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).

DOI: 10.5755/j02.eie.11246