

## Paviršiaus reiškinyje asinchroninių ryškiapolių elektros variklių rotoruose

V. Katkevičius, S. Gečys, A. Kalvaitis

Elektros sistemų katedra, Kauno technologijos universitetas,  
Studentų g. 48, LT – 51367 Kaunas, Lietuva, tel. +370 37 351318

### Įvadas

Trifazių asinchroninių variklių narvelinių rotorių strypuose paviršiaus reiškinyje yra gana gerai išnagrinėtas [1–6]. Paviršiaus reiškinyje trifazių asinchroninių variklių rotoriaus strypuose yra vertinamas tik paleidimo taške ( $s=1$ ), kai rotoriaus griovelio aukštis viršija 1,4 cm, jei strypai aliumininiai, ir 1,0 cm, jei strypai variniai. Nagrinėjant asinchroninius ryškiapolius variklius, šio reiškinio nepaisoma, nes griovelių aukščiai paprastai būna mažesni už paminėtus.

Vienfaziuose asinchroniniuose ryškiapoliuose varikliuose, be pagrindinės magnetinio lauko harmonikos, yra aukštesniųjų  $\nu$ -osios eilės žemesnio numerio harmonikų, sukurančių tiesioginius ir atvirkštinius sukamuosius magnetinius laukus, kurių vertės gali būti artimos pagrindinio sukamojo magnetinio lauko vertei. Šie aukštesniųjų harmonikų sukamieji magnetiniai laukai indukuoja rotoruje elektrovaras, kurių dažnis, mažėjant rotoriaus slydimui, didėja.

$\nu$ -osios sukamojo magnetinio lauko harmonikos indukuotos rotoriaus elektrovaros dažnis:

$$f_{2\nu}^{\pm} = \frac{n_1 \mp \nu n}{n_1} f_1; \quad (1)$$

čia „+“ – tiesioginio sukamojo magnetinio lauko rotoruje indukuotos elektrovaros dažnis; „-“ – atvirkštinio sukamojo magnetinio lauko rotoruje indukuotos elektrovaros dažnis;  $n_1$  – pagrindinio sukamojo magnetinio lauko sukimosi greitis;  $f_1$  – tinklo dažnis;  $n$  – rotoriaus sukimosi greitis.

Arba

$$f_{2\nu}^{\pm} = s_{\nu}^{\pm} f_1; \quad (2)$$

čia

$$s_{\nu}^{\pm} = \frac{n_1 \mp \nu n}{n_1}. \quad (3)$$

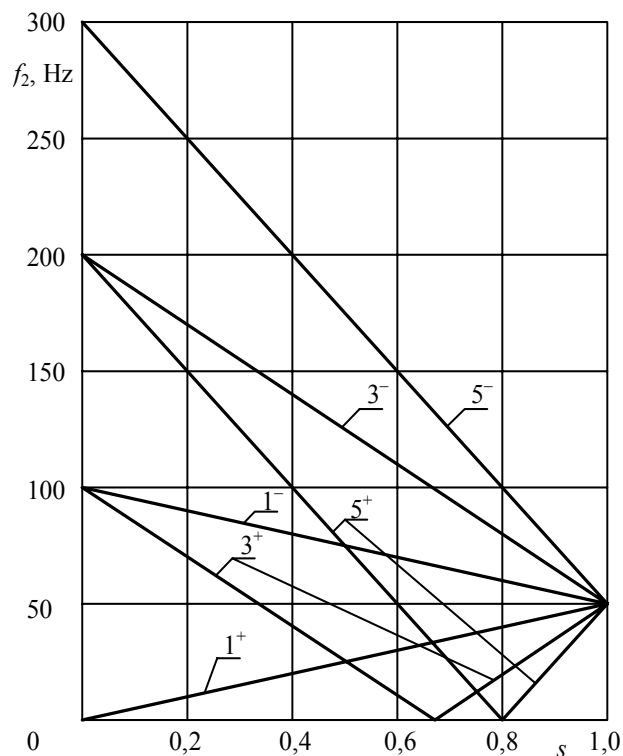
Jeigu statoriaus magnetinis laukas turi  $1^+$ ,  $1^-$ ,  $3^+$ ,  $3^-$ ,  $5^+$  ir  $5^-$  sukamuosius magnetinio lauko harmonikų dedamąsias, tai rotoruje jos sukurs elektrovaras ir sroves, kurios kurs tokio pat numerio ir sukimosi krypties sukamuosius magnetinius laukus rotoruje, kurie, sąveikaudami su statoriaus magnetiniais laukais, kurs asinchroninius sukimo momentus. Slydimo ribose nuo  $s=0$  iki  $s=s_k$  (čia  $s_k$  –

kritinis slydimas, kuriam esant  $M = M_{\max}$ ) visų aukštesnės eilės harmonikų, taip pat ir atvirkštinės pagrindinės (pirmosios) harmonikos kuriami asinchroniniai sukimo momentai yra neigiami:

$$M = M_1^+ - M_1^- - M_3^+ - M_3^- - M_5^+ - \dots \quad (4)$$

### Tyrimo objektas ir metodika

Kaip buvo paminėta, elektrovaros, taip pat srovių dažnis rotoruje priklauso nuo sukamojo magnetinio lauko harmonikos eilės numerio, jos sukimosi krypties ir slydimo. Dažnio priklausomybė nuo slydimo, esant kiekvienai sukamojo magnetinio lauko harmonikai, pavaizduota 1 paveiksle.



1 pav. Rotoruje indukuotų elektrovarų ir srovių dažnio priklausomybė nuo slydimo esant  $1^+$ ,  $1^-$ ,  $3^+$ ,  $3^-$ ,  $5^+$  ir  $5^-$  sukamojo magnetinio lauko harmonikoms

Kaip matome iš 1 paveikslu, indukuotų elektrovarų dažnis didėja mažėjant slydimui. Pavyzdžiui, rotoriumi sukantis slydimu  $s = 0,1$ , pagrindinio magnetinio lauko indukuotas elektrovaros dažnis rotoriume bus 5 Hz, trečiosios harmonikos atvirkštinio lauko – 185 Hz, o penktosios harmonikos atvirkštinio lauko – 275 Hz ir t. t. Todėl galima teigti, kad vienfazinių asinchroninių ryškiapolių variklių paviršiaus reiškinys pasireiškia jiems dirbant mažais slydimais, t. y. tuščiąja veika, nominaliuoju režimu. Didėjant srovės dažniui rotoriume, reikėtų laikyti, kad visuotinai priimti kritiniai rotoriaus strypų (griovelių) aukščiai (1,4 cm – Al; 1,0 cm – Cu) turi mažėti.

Šio darbo tikslas – nustatyti vienfazinių asinchroninių ryškiapolių variklių, dirbančių mažais slydimais, kritinį strypo aukštį, kuriam esant reikėtų vertinti paviršiaus reiškinį, t. y. rotoriaus varžų pasikeitimą.

Paviršiaus reiškinys pasireiškia tik toje rotoriaus apvijos dalyje, kuri yra rotoriaus grioveluose. Todėl aktyviąją  $R_2$  ir induktyviąją  $X_2$  rotoriaus varžas galima išreikšti taip:

$$R_2 = k_R R_{2st} + R_{2gal}; \quad (5)$$

$$X_2 = k_X X_{2st} + X_{2gal}; \quad (6)$$

čia  $R_{2st}$ ,  $X_{2st}$  – rotoriaus grioveluose esančių strypų varžos;  $R_{2gal}$ ,  $X_{2gal}$  – galūnių (narvelinio rotoriaus žiedų) varžos;  $k_R$ ,  $k_X$  – koeficientai, įvertinantys varžų pasikeitimus dėl paviršiaus reiškinio.

Šie koeficientai yra slydimo ir indukuotų elektrovarų rotoriume dažnio funkcijos:

$$k_R = \xi \frac{\text{sh} 2\xi + \sin 2\xi}{\text{ch} 2\xi - \cos 2\xi}; \quad (7)$$

$$k_X = \frac{3}{2\xi} \frac{\text{sh} 2\xi - \sin 2\xi}{\text{ch} 2\xi - \cos 2\xi}; \quad (8)$$

čia  $\xi = \frac{h}{h_k}$ ;  $h$  – rotoriaus strypo aukštis;  $h_k$  – kritinis rotoriaus strypo aukštis:

$$h_k = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \gamma \omega_v^\pm}}; \quad (9)$$

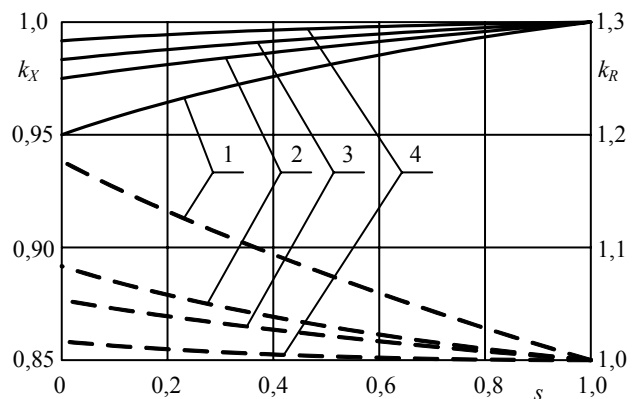
čia  $\omega_v^\pm = 2\pi f_1 s_v^\pm$ ;  $\mu_0$  – magnetinė konstanta;  $\gamma$  – apvijos elektrinis laidis.

### Skaičiavimų rezultatai ir analizė

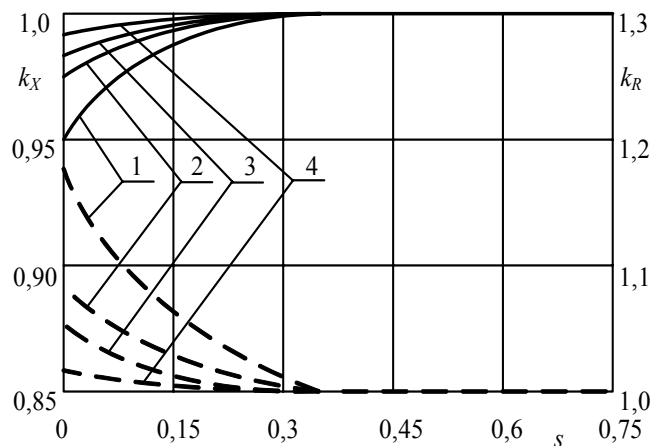
Ovalinių pusiau uždarytų, užlietų aliuminiu rotoriaus griovelų koeficientų  $k_R$  ir  $k_X$  priklausomybės nuo slydimo, esant įvairiems griovelų aukščiams, pavaizduotos 2 – 6 paveiksluose.

Iš 1 paveikslu matome, kad elektrovarų ir srovių dažnis sukeltas atvirkštinių magnetinių laukų, esant mažiems slydimams (nuo tuščiosios veikos iki kritinio slydimo), yra keletą kartų didesnis už srovių dažnį, sukeltą tiesioginių magnetinių laukų. Todėl, analizuojant 2, 3, 4, 5, 6 paveikslus, matyti, kad koeficientų, įvertinančių rotoriaus varžų dydžių pasiskirstymus, atsiradusius dėl paviršiaus reiškinio, vertės sparčiau didėja esant atvirkštinių sukamųjų laukų harmonikoms. Kadangi atvirkštinių magnetinių sukamųjų laukų dažnis didėja tolygiai, tai

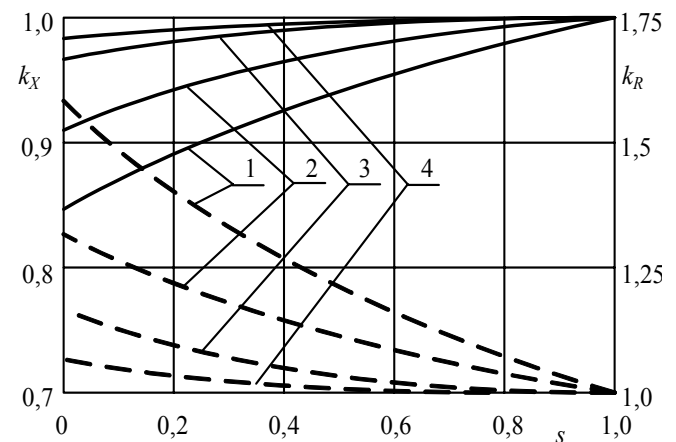
srovės išstūmimo efektas jau gali būti vertinamas nuo paleidimo režimo ( $s = 1$ ) vertės (kai grioveliai yra gilūs).



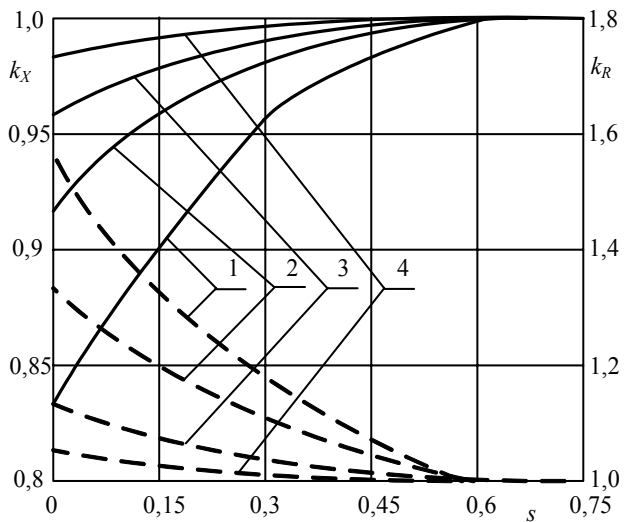
2 pav. Koeficientų  $k_R$  (punktirinė linija) ir  $k_X$  (ištininė linija) priklausomybės nuo slydimo, atsižvelgiant į pirmosios atvirkštinio magnetinio lauko harmonikos įtaką: 1 –  $h=1,2 \cdot 10^{-2}$  m; 2 –  $h=1,0 \cdot 10^{-2}$  m; 3 –  $h=0,8 \cdot 10^{-2}$  m; 4 –  $h=0,6 \cdot 10^{-2}$  m



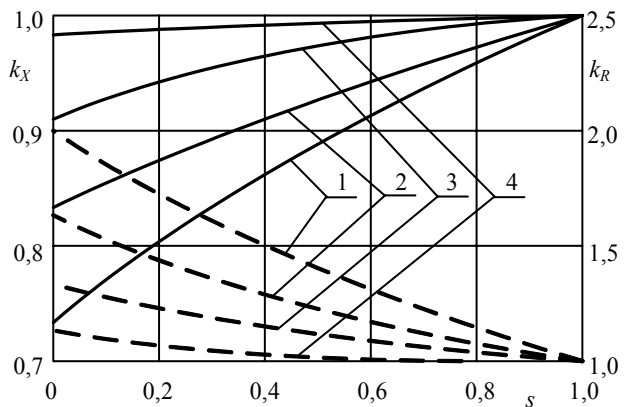
3 pav. Koeficientų  $k_R$  (punktirinė linija) ir  $k_X$  (ištininė linija) priklausomybės nuo slydimo, atsižvelgiant į trečiosios tiesioginio magnetinio lauko harmonikos įtaką: 1 –  $h=1,2 \cdot 10^{-2}$  m; 2 –  $h=1,0 \cdot 10^{-2}$  m; 3 –  $h=0,8 \cdot 10^{-2}$  m; 4 –  $h=0,6 \cdot 10^{-2}$  m



4 pav. Koeficientų  $k_R$  (punktirinė linija) ir  $k_X$  (ištininė linija) priklausomybės nuo slydimo, atsižvelgiant į trečiosios atvirkštinio magnetinio lauko harmonikos įtaką: 1 –  $h=1,2 \cdot 10^{-2}$  m; 2 –  $h=1,0 \cdot 10^{-2}$  m; 3 –  $h=0,8 \cdot 10^{-2}$  m; 4 –  $h=0,6 \cdot 10^{-2}$  m



**5 pav.** Koefficientų  $k_R$  (punktyrinė linija) ir  $k_X$  (ištisinė linija) priklausomybės nuo slydimo, atsižvelgiant į penktosios tiesioginio magnetinio lauko harmonikos įtaką: 1 –  $h=1,2 \cdot 10^{-2}$  m; 2 –  $h=1,0 \cdot 10^{-2}$  m; 3 –  $h=0,8 \cdot 10^{-2}$  m; 4 –  $h=0,6 \cdot 10^{-2}$  m

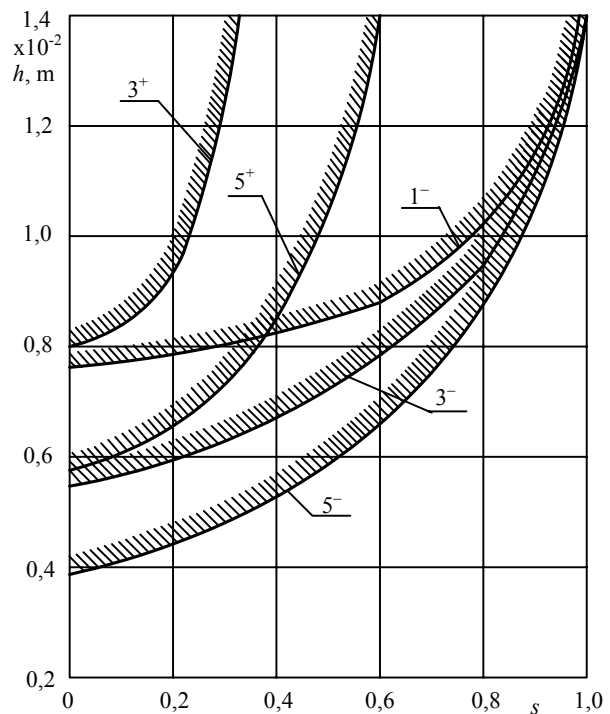


**6 pav.** Koefficientų  $k_R$  (punktyrinė linija) ir  $k_X$  (ištisinė linija) priklausomybės nuo slydimo, atsižvelgiant į penktosios atvirkštinio magnetinio lauko harmonikos įtaką: 1 –  $h=1,2 \cdot 10^{-2}$  m; 2 –  $h=1,0 \cdot 10^{-2}$  m; 3 –  $h=0,8 \cdot 10^{-2}$  m; 4 –  $h=0,6 \cdot 10^{-2}$  m

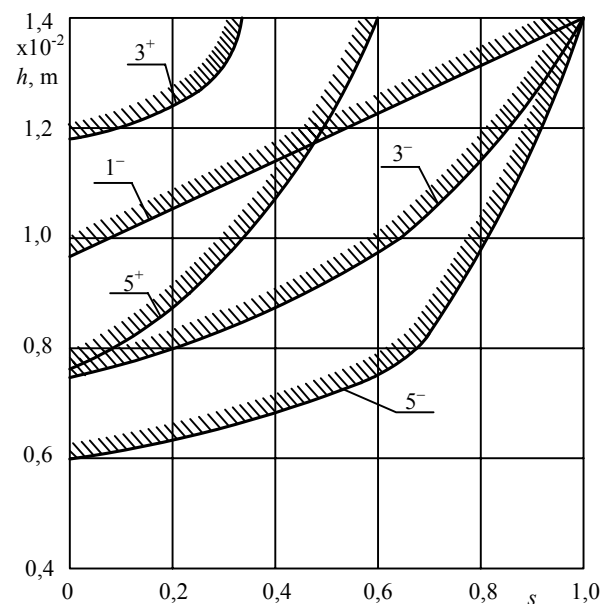
Tiesioginių sukamųjų magnetinių laukų srovių dažnis iki sinchroninio tos harmonikos greičio sumažėja iki nulio, o paskui pradeda didėti. Tiesioginių sukamųjų magnetinių laukų rotoriuje sukurtų srovių paviršiaus reiškinį reikia pradėti vertinti tik nuo atitinkamo slydimo. Kaip matome iš 1 paveikslo,  $3^+$  harmonika pasiekia srovės dažnį 50 Hz rotoriuje, kai  $s=0,33$ ,  $5^+$  harmonika kai  $s=0,6$ . Bet kuriuo atveju skaičiuojant nominaliuosius režimus ( $s=0,05 \dots 0,1$ ) iki maksimaliojo momento ( $s=0,2 \dots 0,3$ ) neįvertinus rotoriaus varžų pasikeitimo dėl paviršiaus reiškinio, galima gauti paklaidas skaičiuojant variklio technines energines charakteristikas.

Kaip matome iš pateiktos medžiagos, kritinis griovelių aukštis mažėja slydimui mažėjant; taip pat jis mažėja ir didėjant magnetinio lauko harmonikos eilės numeriui.

7 ir 8 paveiksluose plokštumoje  $h$  ir  $s$  pavaizduotos linijos  $k_R = 1,03 = const$  ir  $k_X = 0,97 = const$ . Jos rodo, kokiam slydimui esant galima išlaikyti 3 % rotoriaus varžų skaičiavimų tikslumą.



**7 pav.** Rotoriaus strypo aukščio priklausomybė nuo slydimo, kai koeficientas  $k_R=1,03=const$



**8 pav.** Rotoriaus strypo aukščio priklausomybė nuo slydimo, kai koeficientas  $k_X=0,97=const$

Autorių pasiūlyta rotorių varžų skaičiavimo metodika, įvertinant paviršiaus reiškinį esant nominaliajam slydimui, panaudota kuriant vienfazių asinchroninių variklių AD2,5–4; AD4–4; AD6–4; AD10–4; AD16–4 ir AD25–4 seriją.

## Išvados

Jei asinchroniniuose varikliuose magnetinis laukas turi aukštesniųjų harmonikų, tai paviršiaus reiškinys rotoriaus strypuose pasireiškia ir esant mažiems slydimams.

Esant mažiems slydimams, aukštesniųjų harmonikų srovių rotoriuje dažnis didėja ir srovės rotoriaus strypuose paviršiaus reiškinys prasideda esant mažesniems strypų aukščiams už visuotinai priimtus (pavyzdžiui, esant 3<sup>-</sup> harmonikai, jis pasireiškia nuo  $h = 0,55 \cdot 10^{-2}$  m, esant 5<sup>-</sup> harmonikai, nuo  $h = 0,4 \cdot 10^{-2}$  m, kai apvijos strypai aliumininiai).

#### Literatūra

1. **Emde F.** Uber einseitige Stromverdrangung in Ankerleiteern, E und M, 24, 1908. –703 s.
2. **Schuisky V.** Stromverdrangungsmotoren, Arch. Elektrotechn. 27, 1933. – 185 s.

3. **Шуйский В.П.** Расчет электрических машин. – Ленинград: Энергия, 1968. –731с.
4. **Клоков Б.К.** Расчет вытеснения тока в стержнях произвольной конфигурации // Электротехника, 1969. – №9. – С. 25–29.
5. **Клоков Б.К., Фисенко В.Г., Цуканов В.И.** Расчет на ЭВМ вытеснения тока в стержнях сложной конфигурации // Специальные электрические машины для электротехнических систем. Труды. МЭИ. – Москва. – Вып. 410, 1979. – С. 14–17.
6. **Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф.** Проектирование электрических машин / Под ред. И.П. Копылова. Изд. 3–е, испр. и доп. – Москва: Высшая школа, 2002. –756 с.

Pateikta spaudai 2004 05 12

#### **V. Katkevičius, S. Gečys, A. Kalvaitis. Paviršiaus reiškinys asinchroninių ryškiapolių elektros variklių rotoriuose // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2004. – Nr. 6(55). – P. 49 – 52.**

Vienfaziuose asinchroniniuose ryškiapoliuose varikliuose susikuria to paties numerio harmonikos tiesioginiai ir atvirkštiniai sukamieji magnetiniai laukai. Kartais aukštesniosios harmonikos magnetinio lauko vertė gali būti artima pagrindinio lauko vertei. Šie aukštesniųjų harmonikų sukamieji magnetiniai laukai indukuoja rotoriuje elektrovaras, kurių dažnis, mažėjant rotoriaus slydimui, didėja. Pateiktos elektrovarų, indukuotų to paties numerio tiesioginių ir atvirkštinių sukamųjų magnetinių laukų harmonikų rotoriuje, dažnių priklausomybės nuo slydimo. Apskaičiuotos rotoriaus varžų pasikeitimo koeficientų  $k_R$  ir  $k_X$  vertės slydimui kintant nuo 0 iki 1, pirmajai, trečiajai bei penktajai tiesioginių ir atvirkštinių sukamųjų magnetinių laukų harmonikoms, kai strypų aukščiai yra:  $h = 1,2 \cdot 10^{-2}$  m;  $h = 1,0 \cdot 10^{-2}$  m;  $h = 0,8 \cdot 10^{-2}$  m;  $h = 0,6 \cdot 10^{-2}$  m. Taip pat pateikti grafikai, vaizduojantys ekvipotencialines linijas ( $k_R = 1,03 = const$  ir  $k_X = 0,97 = const$ ) slydimo  $s$  ir strypų aukščio  $h$  plokštumose. Vienfaziams asinchroniniams ryškiapoliams varikliams, dirbantiems mažais slydimais, nustatytas kritinis rotoriaus strypo aukštis, kuriam esant reikėtų vertinti paviršiaus reiškinį. Il. 8, bibl. 6 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

#### **V. Katkevičius, S. Gečys, A. Kalvaitis. Skin-Effect in the Rotor of Induction Salient – Pole Electric Motor // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2004. –No 6 (55). – P. 49 – 52.**

The same harmonic components of forward and backward rotating magnetic fields are created in the single – phase induction salient – pole motor. The magnitudes of higher order harmonics of these fields may be of the same order as a fundamental. These rotating fields of higher harmonics induce in the rotor electromotive forces the frequency of which increase while the rotor slip decrease. The frequency dependences upon slip of electromotive forces induced from 1, 3, 5–th forward and backward rotating magnetic fields harmonics in the rotor are presented. The values of the rotor resistance change coefficients from 1, 3, 5 forward and backward rotating field harmonics at slip range from 0 till 1 are calculated when the rotor slot depth values are the following:  $h = 1,2 \cdot 10^{-2}$  m;  $h = 1,0 \cdot 10^{-2}$  m;  $h = 0,8 \cdot 10^{-2}$  m;  $h = 0,6 \cdot 10^{-2}$  m. The graphs representing equipotential lines ( $k_R = 1,03 = const$ ,  $k_X = 0,97 = const$ ) at slip and rotor slot depth plane are given. The critical rotor slot depth is determined when the skin – effect may be evaluated for the induction salient – pole motors operating at low slip. Ill. 8, bibl. 6 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English, Russian).

#### **V. Каткявичюс, С. Гячис, А. Калвайтис. Эффект вытеснения тока в роторе асинхронного явнополюсного электродвигателя // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2004. – № 6 (55). – С. 49–52.**

В асинхронных однофазных явнополюсных двигателях имеют место прямо и обратно вращающиеся магнитные поля, пространственных гармоник данного порядка, величина которых может быть соизмеримой с основной. Данные поля в обмотке ротора наводят электродвижущие силы, частота которых с уменьшением скольжения растёт. Показаны зависимости частоты электродвижущих сил от скольжения для прямо и обратно вращающихся полей 1, 3, 5 гармоник. Рассчитаны изменения коэффициентов вытеснения ротора  $k_R$  и  $k_X$ , при изменении скольжения ротора от 0 до 1 для глубин паза:  $h = 1,2 \cdot 10^{-2}$  м;  $h = 1,0 \cdot 10^{-2}$  м;  $h = 0,8 \cdot 10^{-2}$  м;  $h = 0,6 \cdot 10^{-2}$  м для прямо и обратно вращающихся полей 1, 3, 5 гармоник. Представлены графики эквипотенциальных линий ( $k_R = 1,03 = const$ ,  $k_X = 0,97 = const$ ) в плоскости скольжения  $s$  и глубины паза  $h$ . Определены критические глубины паза ротора, при которых необходимо учитывать эффект вытеснения тока. Ил. 8, библи. 6 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).

DOI: 10.5755/j02.eie.10883