

## Vienfazių asinchroninių elektros variklių paleidimo momento pulsacija

V. Katkevičius, S. Gečys, A. Kalvaitis, G. Rinkevičius

Elektros sistemų katedra, Kauno technologijos universitetas  
Studentų g. 48, LT-3031 Kaunas, Lietuva, tel. +370 37 351318

### Įvadas

Asinchroninio variklio paleidimo momento pulsacija laikysime paleidimo momento dydžio pasikeitimą priklausomai nuo rotoriaus pasisukimo kampo statoriaus atžvilgiu. Trifazių asinchroninių elektros variklių paleidimo momento pulsacija yra gana gerai išnagrinėta ir pateiktos rekomendacijos, kaip parinkti statoriaus ir rotoriaus dantų skaičių, kad pulsacija sumažėtų iki minimumo [1, 2, 3, 4]. Šios rekomendacijos nevisiškai tinka vienfaziams asinchroniniams varikliams, kurių sukamasis magnetinis laukas yra elipsinis, t. y. jame yra tiesioginės ir atvirkštinės sukamųjų apskritiminių laukų dedamosios.

### Trumpai sujungto rotoriaus magnetovara

Trumpai sujungto rotoriaus apvija yra daugiafazė, o jos fazių skaičius  $m_2$  lygus rotoriaus dantų skaičiui  $Z_2$ . Erdvinis kampas tarp gretimų fazių:

$$\beta = \frac{2\pi}{m_2} \chi; \quad (1)$$

čia  $\chi$  – rotoriaus erdvinės harmonikos numeris.

Kiekviena rotoriaus fazė sukuria pulsuojančiąją rotoriaus magnetovara. Pulsuojančiosios rotoriaus magnetovaros, kurias sukūrė tiesioginis statoriaus magnetinis laukas, užrašomos taip:

$$F_1'(\alpha, t) = F_{v\chi m}' \sin \gamma s_v \omega_1 t \cos \chi \alpha; \quad (2)$$

$$F_2'(\alpha, t) = F_{v\chi m}' \sin \gamma \left( s_v \omega_1 t - v \frac{2\pi}{m_2} \right) \cos \chi \left( \alpha - \frac{2\pi}{m_2} \right); \quad (3)$$

$$F_{m_2-1}'(\alpha, t) = F_{v\chi m}' \sin \gamma \left( s_v \omega_1 t - (m_2 - 1)v \frac{2\pi}{m_2} \right) * \cos \chi \left( \alpha - (m_2 - 1) \frac{2\pi}{m_2} \right); \quad (4)$$

čia  $F_{v\chi m}'$  – rotoriaus  $\chi$ -osios harmonikos magnetovaros, sukurtos statoriaus tiesioginio magnetinio lauko, amplitudinė vertė;

$\alpha$  – kampinė koordinatė;

$s_v$  –  $v$ -osios harmonikos slydimas;

$\gamma$  – rotoriaus srovės laiko harmonikos numeris;

$\omega_1$  – pirmosios harmonikos kampinis srovės dažnis.

Statoriaus atvirkštinio magnetinio lauko sukurtos rotoriaus pulsuojančiosios magnetovaros:

$$F_1''(\alpha, t) = F_{v\chi m}'' \sin \gamma (2 - s_v) \omega_1 t \cos \chi \alpha; \quad (5)$$

$$F_2''(\alpha, t) = F_{v\chi m}'' \sin \gamma \left( (2 - s_v) \omega_1 t - v \frac{2\pi}{m_2} \right) * \cos \chi \left( \alpha - \frac{2\pi}{m_2} \right); \quad (6)$$

$$F_{m_2-1}''(\alpha, t) = F_{v\chi m}'' \sin \gamma \left( (2 - s_v) \omega_1 t - (m_2 - 1)v \frac{2\pi}{m_2} \right) * \cos \chi \left( \alpha - (m_2 - 1) \frac{2\pi}{m_2} \right); \quad (7)$$

čia  $F_{v\chi m}''$  – rotoriaus  $\chi$ -osios harmonikos magnetovaros, sukurtos statoriaus atvirkštinio magnetinio lauko, amplitudinė vertė.

Kiekvienos rotoriaus fazės sukurtas pulsuojančiasis magnetovaras galima išskaidyti į tiesiogines ir atvirkštines:

$$F_{m_2-1}'(\alpha, t) = F_{v\chi m}' * \sin \left( \gamma s_v \omega_1 t - \chi \alpha - (m_2 - 1) \frac{2\pi p}{m_2} (\gamma v - \chi) \right) + \quad (8)$$

$$+ \frac{1}{2} F_{v\chi m}' \sin \left( \gamma s_v \omega_1 t + \chi \alpha - (m_2 - 1) \frac{2\pi p}{m_2} (\gamma v + \chi) \right);$$

$$F_{m_2-1}''(\alpha, t) = \frac{1}{2} F_{v\chi m}'' * \sin \left( \gamma (2 - s_v) \omega_1 t - \chi \alpha + (m_2 - 1)v \frac{2\pi p}{m_2} (\gamma v - \chi) \right) + \quad (9)$$

$$+ \frac{1}{2} F_{v\chi m}'' * \sin \left( \gamma (2 - s_v) \omega_1 t + \chi \alpha + (m_2 - 1)v \frac{2\pi p}{m_2} (\gamma v + \chi) \right).$$

(8, 9) lygtys rodo, kad kiekviena statoriaus tiesioginio sukamojo magnetinio lauko dedamoji rotorijoje sukuria tiek tiesioginę, tiek atvirkštinę rotoriaus magnetovara. Tą patį

galima pasakyti ir apie statoriaus sukamojo magnetinio lauko atvirkštinę dedamąją.

### Sinchroninių momentų susikūrimo sąlygos variklio paleidimo metu

Atsižvelgiant į tai, kokia yra statoriaus apvija, vienfazių asinchroninių variklių magnetovaroje be pagrindinės erdvės harmonikos, susikuria aukštesnės eilės (žemesnio numerio - 3, 5, 7, ...) harmonikos, kurios, kaip ir pagrindinė harmonika, rotoriaus apvijoje indukuoja visą spektrą erdviųjų harmonikų, o šios, sąveikaudamos su statoriaus harmonikomis, kuria tiek asinchroninius, tiek sinchroninius momentus.

Kad būtų paprasčiau, darome tokias prielaidas: statoriaus vidinis ir rotoriaus išorinis paviršiai yra cilindriniai; statoriaus ir rotoriaus aktyvieji ilgai lygūs; oro tarpas tolygus; eksperimentams supaprastinti statoriuje suklotos sinusinės apvijos.

Sinchroniniai momentai, kurie susikuria, kai rotoriaus greitis  $n_2 = 0$ , ir yra pagrindinė paleidimo momento pulsacijos priežastis.

Rotoriaus erdvinė harmonika  $\chi$ , sukurta statoriaus erdvinės harmonikos  $\nu_a$ , sąveikaudama su statoriaus erdvine harmonika  $\nu_b$ , kuri nekūrė rotoriaus harmonikos  $\chi$ , kuria sinchroninį momentą.

Taigi sinchroninis momentas visada susikuria, jei tenkinama sąlyga  $\chi = \nu_b$ , kadangi šios harmonikos yra nepriklausomos, nes jos neindukavo viena kitos.

Šie sinchroniniai momentai gali pasireikšti esant įvairiems rotoriaus sukimosi greičiams, variklio stabdymo režimais, taip pat ir paleidimo metu, kai  $n_2 = 0$ .

Sinchroninių momentų susikūrimas variklio ir stabdžio režimais plačiau išnagrinėtas [5, 6].

Panagrinėsime sinchroninių momentų susikūrimo sąlygas variklio paleidimo metu, t.y.  $n_2 = 0$ .

Statoriaus tiesioginio lauko harmonika  $\nu_b^+$ , sąveikaudama su rotoriaus tiesioginio lauko harmonika  $\chi^+$ , kurią sukūrė statoriaus tiesioginio lauko harmonika  $\nu_a^+$ , kuria sinchroninį momentą, rotoriumi sukantis greičiu  $n_2$ :

$$n_2 = \frac{1-\gamma}{\chi^+ - \gamma\nu_a^+} n_1; \quad (10)$$

čia  $n_1$  – statoriaus magnetinio lauko sinchroninis sukimosi greitis.

Statoriaus tiesioginio lauko harmonika  $\nu_b^+$ , sąveikaudama su rotoriaus tiesioginio lauko harmonika  $\chi^+$ , kurią sukūrė statoriaus atvirkštinio lauko harmonika  $\nu_a^-$ , kuria sinchroninį momentą, rotoriumi sukantis greičiu  $n_2$ :

$$n_2 = \frac{1-\gamma}{\chi^+ + \gamma\nu_a^-} n_1. \quad (11)$$

Statoriaus atvirkštinio lauko harmonika  $\nu_b^-$ , sąveikaudama su rotoriaus atvirkštinio lauko harmonika  $\chi^-$ , kurią sukūrė statoriaus tiesioginio lauko harmonika  $\nu_a^+$ , kuria sinchroninį momentą, rotoriumi sukantis greičiu  $n_2$ :

$$n_2 = -\frac{1-\gamma}{\chi^- + \gamma\nu_a^+} n_1. \quad (12)$$

Statoriaus atvirkštinio lauko harmonika  $\nu_b^-$ , sąveikaudama su rotoriaus atvirkštinio lauko harmonika  $\chi^-$ , kurią sukūrė statoriaus atvirkštinis laukas  $\nu_a^-$ , kuria sinchroninį momentą, rotoriumi sukantis greičiu  $n_2$ :

$$n_2 = -\frac{1-\gamma}{\chi^- - \gamma\nu_a^-} n_1. \quad (13)$$

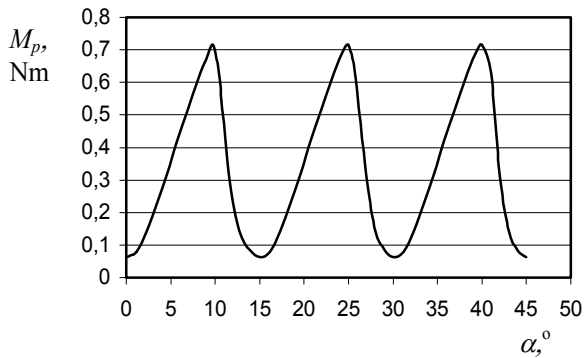
Variklio paleidimo metu ( $n_2 = 0$ ) visų statoriaus harmonikų  $\nu_a$  sukurtų srovių dažnis rotoriuje lygus statoriaus apvijomis tekančios srovės dažniui, t. y. lygus tinklo dažniui  $f_1$ , todėl  $\gamma = 1$ .

Taigi visais pateiktais atvejais (10–13) sinchroniniai momentai bus kuriami rotoriumi sukantis greičiu  $n_2 = 0$ , t.y. asinchroninio variklio paleidimo metu.

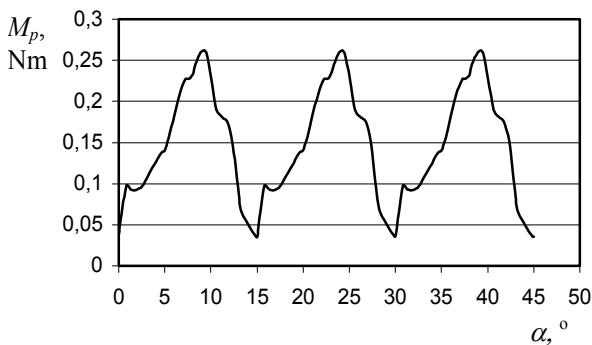
Vadinasi, galime teigti, kad vienvardės pagal sukimosi kryptį statoriaus harmonikos  $\nu_b$  ir rotoriaus harmonikos  $\chi$ , nesvarbu kas jas sukūrė, kuria sinchroninius momentus variklio paleidimo metu.

### Paleidimo momento eksperimentinis tyrimas

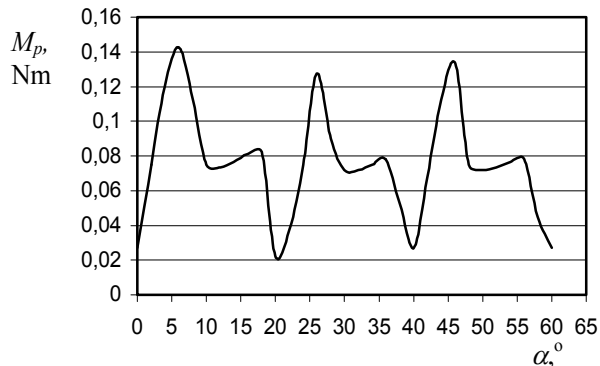
1 paveiksle pavaizduota dvifazio asinchroninio variklio, maitinamo iš simetrinio dvifazio tinklo ( $U_A = U_B, \underline{U}_A \perp \underline{U}_B$ ), paleidimo momento pulsacijos kreivė. Tokį variklį galima vadinti dvifaziu simetriniu varikliu (sukamasis magnetinis laukas – apskritiminis). Norint išvengti žemesnio numerio aukštesniųjų erdviųjų harmonikų (3, 5, 7...21), variklio statoriuje buvo suklotos „sinusinės“ apvijos. Statoriaus ir rotoriaus dantų skaičiai lygūs:  $Z_1 = Z_2 = 24$ . Šiuo atveju statoriaus magnetovaros erdviųjų harmonikų spektras yra  $1^+, 23^-, 25^+, 47^-, 49^+, \dots$ . Čia ženklas „+“ reiškia tiesioginio sukamojo magnetinio lauko, o ženklas „-“ – atvirkštinio sukamojo magnetinio lauko harmonikas. Šios statoriaus magnetinio lauko harmonikos indukuoja rotoriume elektrovaras, dėl kurių rotoriume susikuria savi sukamieji magnetiniai laukai. Statoriaus sukamojo magnetinio lauko harmonika  $1^+$  sukūrė rotoriume rotoriaus sukamojo magnetinio lauko harmonikas  $1^+, 23^-, 25^+, \dots$ . Sąveikaujant statoriaus ir rotoriaus harmonikoms  $\nu_b = 23^- \Leftrightarrow \chi = 23^-$  ir  $\nu_b = 25^+ \Leftrightarrow \chi = 25^+$ , asinchroninio variklio paleidimo metu susikuria sinchroniniai momentai. Šie sinchroniniai momentai yra pagrindinė paleidimo momento pulsacijos priežastis.



1 pav. Dvifazio asinchroninio variklio paleidimo momento pulsacija (sukamasis magnetinis laukas – apskritiminis)



2 pav. Dvifazio asinchroninio variklio paleidimo momento pulsacija (sukamasis magnetinis laukas – elipsinis)



3 pav. Vienfazio asinchroninio variklio su ekranuotais poliais paleidimo momento pulsacija

Kai sukamasis magnetinis laukas yra elipsinis (atsiranda ir atvirkštinis sukamasis magnetinis laukas), tada variklį galima vadinti nesimetriniu dvifaziu varikliu. Tokio variklio paleidimo momento pulsacijų kreivė parodyta 2 paveiksle. Elipsinis sukamasis magnetinis laukas buvo sukurtas tą patį variklį maitinant iš dvifazio tinklo su sumažinta apvijos B įtampa ( $U_B < U_A$ ).

Tokių atvejų statoriaus sukamųjų laukų harmonikų spektras yra  $1^+, 23^-, 25^+ \dots$  ir  $1^-, 23^+, 25^- \dots$ . Be jau aptartų erdviųjų harmonikų, statoriaus harmonika  $1^-$  sukuria rotorijoje papildomas sukamojo lauko harmonikas  $\chi = 1^-, 23^+, 25^-, \dots$ . Taigi sinchroninius momentus paleidimo režimu kurs šios harmonikos:

$$\nu_b = 23^- \Leftrightarrow \chi = 23^-, \nu_b = 25^+ \Leftrightarrow \chi = 25^+$$

(žadinančioji magnetovaros harmonika  $1^+$ ),

$$\nu_b = 23^+ \Leftrightarrow \chi = 23^+, \nu_b = 25^- \Leftrightarrow \chi = 25^-$$

(žadinančioji magnetovaros harmonika  $1^-$ ).

Paleidimo momento kreivė šiuo atveju darosi sudėtingesnė (2 pav.).

Dar sudėtingesnė asinchroninių ryškiapolių variklių paleidimo momento pulsacijos kreivė. Šiuose varikliuose sunku išvengti žemesnio numerio aukštesniųjų statoriaus magnetovaros harmonikų (3, 5, 7, ...). Sukamieji magnetiniai laukai paprastai būna elipsiniai, o tai reiškia, kad, be tiesioginių sukamųjų laukų, egzistuoja ir atvirkštiniai kiekvienos harmonikos sukamieji laukai. Ryškiapolio asinchroninio variklio ( $2p = 2$ ,  $Z_2 = 18$ ) erdviųjų harmonikų spektras pateiktas [5], o paleidimo momento pulsacijos kreivė pavaizduota 3 paveiksle.

Tiriamųjų elektros variklių paleidimo momento pulsacijos kreivės buvo užrašytos KTU sukurtu elektros variklių paleidimo momento matavimo įrenginiu [7]. Šio įrenginio didžiausias trūkumas – trinties ir magnetinių nuostolių eliminavimas, todėl įrenginiu registruojama didesnė variklio paleidimo momento vertė.

## Išvados

1. Vienvardės pagal sukimosi kryptį statoriaus ir rotoriaus erdvinės harmonikos, nesvarbu kas jas sukūrė, bet ir neindukavo viena kitos, sinchroninius momentus kuria variklio paleidimo metu.
2. Vienfazių asinchroninių neryškiapolių variklių paleidimo momento pulsacijai sumažinti ir vidutinei vertei padidinti rekomenduojama statoriaus apviją sukloti sinusines, o rotoriaus dantų skaičių parinkti nelyginį.
3. Vienfazių asinchroninių ryškiapolių variklių paleidimo momento pulsaciją galima sumažinti parenkant statoriaus polių ir oro tarpo geometriją, o rotoriaus dantų skaičių nelyginį.

## Literatūra

1. **Lund H.** Über das Anfahren des Kurzschlussmotors unter dem Einfluss der Rotoroberfelder. - A. f. E. - 1932. - S. 811 - 830.
2. **Dreese E. E.** Synchronous-Motors Effect in Induction Machines. - AIEE. - 1930. - 938 p.
3. **Oberretl K.** Parasitare Synchrone Dreh- und Pendelmomente in Asynchronmotoren, Einfluß von Ausgleichsvorgängen und Eisensättigung. Teil. I : Stationärer Zustand. A.f.E. - 1994. - Nr. 3. - S. 179-190.
4. Teil II : Schneller Hochlauf, feldabhängige Permeabilität. A.f.E. - 1994. - Nr. 4. - S. 277-288.
5. **Katkevičius V.** Asinchroninių elektros variklių sinchroniniai momentai // Elektrotechnika: Mokslo darbai. - Kaunas: Technologija 1993. - Nr. 18(27). - P. 95-102.
6. **Gečys S.** Asinchroninių variklių sinchroniniai momentai // Elektronika ir elektrotechnika. - Kaunas: Technologija, 1995. - Nr. 1. - P. 34-38.
7. A.I. 637736 SSSR. Elektros variklių paleidimo momento matavimo įrenginys / V. Katkevičius, G. Rinkevičius, P. Ukaniš. Publ. 1978, Biul. Nr. 46. - 4 p.

Pateikta spaudai 2003 03 14

**V. Katkevičius, S. Gečys, A. Kalvaitis, G. Rinkevičius. Vienfazių asinchroninių elektros variklių paleidimo momento pulsacija // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2003. –Nr. 5(47). – P. 27–30.**

Asinchroninių elektros variklių paleidimo momento pulsacija yra paleidimo momento dydžio pasikeitimo priklausomybė nuo rotoriaus pasisukimo kampo statoriaus nejudančių koordinačių atžvilgiu. Pagrindinė asinchroninių variklių paleidimo momento pulsacijos priežastis yra sinchroniniai momentai. Darbe pateikta vienfazių asinchroninių elektros variklių sinchroninių momentų susikūrimo sąlygos variklio paleidimo režime. Vienvardės pagal sukimosi kryptį statoriaus harmonikos  $\nu_b$  ir rotoriaus harmonikos  $\chi$ , nesvarbu kas jas sukūrė, bet ir neindukavo viena kitos ( $\chi = \nu_b$ ), kuria sinchroninius momentus variklio paleidimo metu. Tiriamų elektros variklių paleidimo momento pulsacijos kreivės buvo užrašomos sukurtu paleidimo momento matavimo įrenginiu [7]. Vienfazių asinchroninių ryškiapolių elektros variklių paleidimo momento pulsaciją galima sumažinti parenkant statoriaus polių ir oro tarpo geometriją, o rotoriaus dantų skaičių nelyginį. Il.3, bibl. 7 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

**V. Katkevičius, S. Gečys, A. Kalvaitis, G. Rinkevičius. Starting Torque Pulsation of Single-phase Asynchronous Motors // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2003. – No. 5(47). – P. 27–30.**

The starting torque pulsations of asynchronous motors are the change of the magnitude of starting torque depending on the angle of rotor rotation with respect to the standing stators coordinates. The synchronous torques are the main reason of the starting torque pulsation. The occurring conditions of the synchronous torques of the single-phase asynchronous motors at the starting conditions are analyzed. The like stator harmonics  $\nu_b$  and rotor harmonics  $\chi$  according to the direction of rotation however in spite of what creates these ones and did not induced each other ( $\chi = \nu_b$ ) created the synchronous torques at the starting conditions of motor. The curves of starting torque pulsations of the investigated electrical motors were recorded with the created measuring device of pulsating torque [7]. The starting torque pulsations of the salient – pole single – phase asynchronous motors may be decreased by choosing the geometry of the stator poles and the air gap and the odd number of rotor slots. Ill. 3, bibl. 7 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English, Russian).

**В. Каткявичюс, С. Гячис, А. Калвайтис, Г. Ринкевичюс. Пульсация пускового момента однофазных асинхронных электродвигателей // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2003. –№ 5(47). – С. 27 – 30.**

Пульсация пускового момента асинхронных электродвигателей – это зависимость изменения величины пускового момента от угла поворота ротора относительно неподвижных координат статора. Синхронные моменты являются основной причиной пульсаций пускового момента асинхронных электродвигателей. В работе представлены условия возникновения синхронных моментов однофазных асинхронных электродвигателей в пусковом режиме. Одноимённые согласного направления вращения гармоники статора  $\nu_b$  и гармоники ротора  $\chi$ , создают синхронные моменты в пусковом режиме работы электродвигателя независимо от причин их возникновения, но при условии, что они не созданы при помощи взаимной индукции ( $\chi = \nu_b$ ). Кривые пульсации пускового момента исследуемых электродвигателей записывались созданным устройством для регистрации пускового момента и его пульсаций [7]. Пульсацию пускового момента однофазных асинхронных явнополюсных электродвигателей можно уменьшить путём подбора геометрий полюсов статора, воздушного зазора и нечетное число зубцов ротора. Ил. 3, библи. 7 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском языках).