

## Electronics and electrical engineering Elektronika ir elektros inžinerija

### KINTAMOSIOS SROVĖS VARIKLIŲ IDENTIFIKACIJA

Dominykas BEIŠTARAS<sup>1, \*</sup>, Donatas UZNYS<sup>2</sup>, Aurelijus PITRĖNAS<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup>Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

<sup>1, 3</sup>Vilniaus technologijų ir dizaino kolegija, Vilnius, Lietuva

Gauta 2018 m. birželio 20 d.; priimta 2018 m. birželio 27 d.

**Santrauka.** Straipsnyje apžvelgti pagrindiniai kintamosios srovės variklių parametrų identifikavimo principai. Apžvelgti dažniausiai naudojami kintamosios srovės variklių identifikavimo metodai, jų privalumai ir trūkumai. Pateiktas šešiafazio asinchroninio variklio matematinis modelis. Išnagrinėti pagrindiniai tikslo funkcijos sudarymo etapai, naudojant variklio paleidimo pereinamųjų vyksmų duomenis: srovės, greičio ir sukimo momento matavimus, esant skirtingoms maitinimo įtampos dažnio vertėms.

**Reikšminiai žodžiai:** kintamosios srovės varikliai, matematinis modelis, parametrų identifikacija, tikslo funkcija.

#### Įvadas

Pastaruoju metu tampa aktualu nagrinėti daugiafazius kintamosios srovės variklius dėl geresnių savybių, lyginant juos su trifaziais varikliais. Daugiafazių variklių statoriaus nuostoliai yra mažesni, mažesnės rotoriaus srovių harmonikos ir sukimo momento pulsacijos (Kundrotas, 2014). Taip pat svarbi savybė veikti sugebus vienai ar kelioms statoriaus fazinėms apvijoms (Pitrėnas, Uznys ir Beištaras, 2017).

Kuriant daugiafazės elektros pavaras, projektavimo išlaidoms sumažinti reikalingas kompiuterinis modelis (Tuo, 2011). Sudarant kintamosios srovės variklių modelius, dalį parametrų galima gauti iš variklio lentelės – inercijos momentą, polių porų skaičių, vardinį greitį, galią ir vardinę srovę. Kitus parametrus – statoriaus varžą ir įtampą – galima išmatuoti. Tačiau jei matuojami statinės būsenos arba neapkrauto variklio parametrai, matavimo procesas užima daug laiko ir gali duoti klaidingus duomenis. Rotoriaus varža ir induktyvumas, abipusis induktyvumas ir oro tarpas yra sunkiai išmatuojami, todėl šiems variklio parametrams nustatyti taikomi įvairūs identifikavimo metodai (Janickas, 2013).

Trifazių kintamosios srovės variklių parametrų identifikavimo metodai ir jų taikymas plačiai nagrinėti literatūroje (Alonge, Cirrincione, D’Ippolito, Pucci ir Sferlazza, 2014), tačiau daugiafazių variklių parametrų identifikavimas yra nauja ir aktuali tema.

#### 1. Identifikavimo principai ir metodai

Identifikuojant sistemos procesus ar parametrus, tiriamasis objektas gali būti charakterizuojamas išmatuotais įėjimo  $u(t)$  ir išėjimo  $y(t)$  duomenimis (Simutis, 2008), t. y. tiriamas sistemos atsakas į įvairius signalus (Janickas, 2013). Identifikavimas laikomas atliktu, kai nustatomos šios įėjimo ir išėjimo signalų koreliacijos (Simutis, 2008). Naudojant kintamosios srovės variklius tokie signalai gali būti greičio, sukimo momento ar srovės pereinamieji vyksmai.

Parametrai gali būti identifikuojami klasikiniu būdu pagal nusistovėjusių verčių parametrus, taikant įvairius paieškinės optimizacijos metodus. Taip pat galima išskirti identifikavimo pagal sprendinį ir pagal lygtis metodus.

Klasikiniu būdu identifikuojant kintamosios srovės variklių parametrus, atliekami trys bandymai: nuolatinės srovės, tuščiosios veikos ir trumpojo jungimo bandymai (Janickas, 2013).

Nuolatinės srovės bandymas atliekamas norint nustatyti variklio statoriaus apvijų varžą.

Tuščiosios veikos bandymas atliekamas norint išmatuoti besisukančio variklio nuostolius ir apytikslę pagrindinės induktyviosios varžos ir statoriaus nuostolių induktyviąją dedamąją.

Trumpojo jungimo bandymas leidžia apskaičiuoti statoriaus ir rotoriaus apvijų suminį induktyvumą ir rotoriaus reaktyviąją varžą.

\*Autorius susirašinėti. El. paštas [dominykas.beistaras@vgtu.lt](mailto:dominykas.beistaras@vgtu.lt)

Plačiau parametų identifikavimą eksperimentiniu būdu nagrinėjo Vilisas (Willis, Brock ir Edmonds, 1989) ir Janickas (2013).

Kintamosios srovės variklių parametrus identifikuoti taip pat taikomi įvairūs paieškinės optimizacijos metodai: mažiausiųjų kvadratų metodas, Kalmano filtras, genetiniai algoritmai, neuroniniai tinklai ir simpleksinės paieškos metodai (Alonge et al., 2014).

Kai taikomas identifikavimo pagal sprendinį metodas, privaloma turėti identifikuojamos sistemos matematinį modelį, aprašytą diferencialinėmis lygtimis ir šių lygčių sprendinį. Tuomet, taikant įvairius paieškinės optimizacijos metodus, keičiami sistemos parametrai, kol skirtumas tarp sprendinio ir matavimo rezultatų tampa minimalus. Tokio metodo trūkumai: būtinas diferencialinių lygčių sprendinys ir reikalingas labai didelis signalo ir triukšmo santykis.

Šio metodo pagrindiniai trūkumai pašalinti identifikuojant pagal lygtis. Taikant tokį metodą, reikalingas tik identifikuojamo objekto matematinis modelis, kuriuo bandomos aproksimuoti matematinės sąsajos tarp eksperimentinių duomenų (Petrovas, Pitrenas ir Savickienė, 2017).

## 2. Šešifazio asinchroninio variklio matematinis modelis

Šešifazio asinchroninio variklio kompiuterinis modelis sudaromas transformuojant apibendrintą daugiafazės mašinos matematinį modelį į dvimatę nejudamą koordinatinių sistemą, naudojant Klarko transformaciją.

Šešifazio asinchroninio variklio statoriaus įtampų transformacija išreiškiama taip:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha s} \\ u_{\beta s} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \begin{bmatrix} u_{A_s} \\ u_{B_s} \\ u_{C_s} \\ u_{D_s} \\ u_{E_s} \\ u_{F_s} \end{bmatrix} \quad (1)$$

čia  $\alpha$  – kampas tarp gretimų fazių lygus  $\pi/3$ ;  $u_{\alpha s}$  – statoriaus įtampų projekcija į  $\alpha$  ašį;  $u_{\beta s}$  – statoriaus įtampų projekcija į  $\beta$  ašį;  $u_{A-F_s}$  – statoriaus fazinės įtampos.

Statoriaus įtampų balansas stacionarioje  $\alpha\beta$  koordinatinių sistemoje aprašomas lygtimis:

$$\begin{cases} u_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + \frac{d}{dt} \Psi_{\alpha s}; \\ u_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + \frac{d}{dt} \Psi_{\beta s}, \end{cases} \quad (2)$$

čia  $R_s$  – statoriaus aktyvioji varža;  $i_{\alpha s}$  – statoriaus srovė projekcija į  $\alpha$  ašį;  $i_{\beta s}$  – statoriaus srovė projekcija į  $\beta$  ašį;

$\Psi_{\alpha s}$  – statoriaus susietųjų srautų projekcija į  $\alpha$  ašį;  $\Psi_{\beta s}$  – statoriaus susietųjų srautų projekcija į  $\beta$  ašį.

Rotoriaus įtampų balanso lygtis stacionarioje  $\alpha\beta$  koordinatinių sistemoje:

$$\begin{cases} u_{\alpha r} = R_r i_{\alpha r} + \frac{d}{dt} \Psi_{\alpha r} - \omega_r \Psi_{\beta r}; \\ u_{\beta r} = R_r i_{\beta r} + \frac{d}{dt} \Psi_{\beta r} + \omega_r \Psi_{\alpha r}, \end{cases} \quad (3)$$

čia  $u_{\alpha r}$  – rotoriaus įtampų projekcija į  $\alpha$  ašį;  $u_{\beta r}$  – rotoriaus įtampų projekcija į  $\beta$  ašį;  $R_r$  – rotoriaus aktyvioji varža;  $i_{\alpha r}$  – rotoriaus srovės projekcija į  $\alpha$  ašį;  $i_{\beta r}$  – rotoriaus srovės projekcija į  $\beta$  ašį;  $\Psi_{\alpha r}$  – rotoriaus susietųjų srautų projekcija į  $\alpha$  ašį;  $\Psi_{\beta r}$  – rotoriaus susietųjų srautų projekcija į  $\beta$  ašį.

Susietieji srautai išreiškiami taip:

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr}); \\ \Psi_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}); \\ \Psi_{dr} = L_{lr} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}); \\ \Psi_{qr} = L_{lr} i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr}), \end{cases} \quad (4)$$

čia  $L_{ls}$  – statoriaus apvijų savasis induktyvumas;  $L_m$  – abi-pusio statoriaus ir rotoriaus apvijų induktyvumas;  $L_{lr}$  – rotoriaus apvijų sklaidos induktyvumas.

Šešifazio asinchroninio variklio elektromagnetinis momentas:

$$M_{em} = \frac{P}{2} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}), \quad (5)$$

čia  $P$  – statoriaus polių skaičius.

Pavaros judesio lygtis:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_{em} - M_{st}), \quad (6)$$

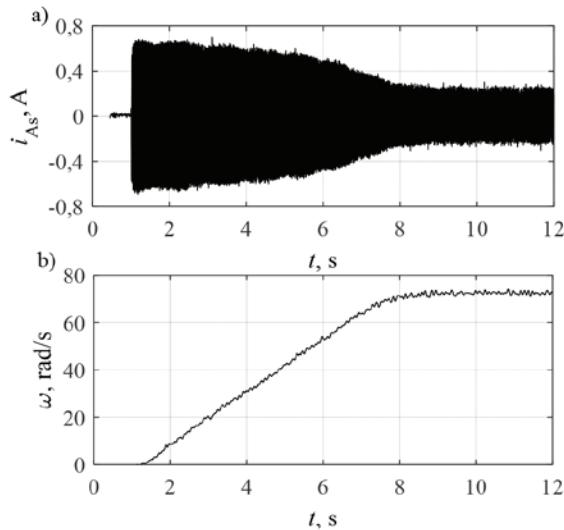
čia  $J$  – rotoriaus inercijos momentas;  $M_{st}$  – statinis apkrovos momentas (Uznys, 2015).

Tiriamo variklio duomenys pateikti 1 lentelėje.

Šešifazio asinchroninio variklio srovės ir greičio perinamieji vyksmai, esant 50 Hz dažniui, pateikti 1 paveiksle ir esant 30 Hz dažniui – 2 paveiksle.

1 lentelė. Šešifazio asinchroninio variklio duomenys  
Table 1. Six-phase induction motor parameters

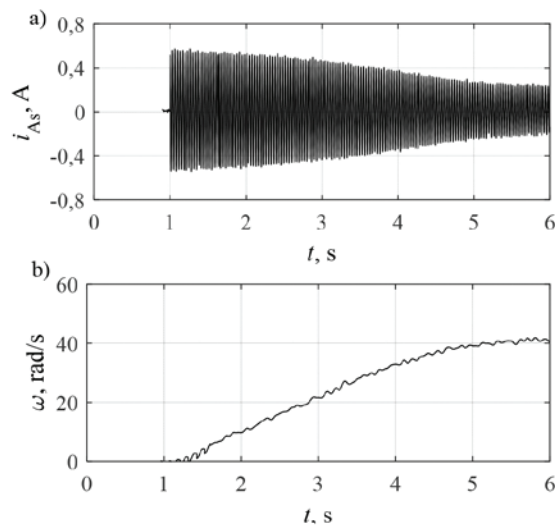
Parametras	Vertė
U	230 V
P	218 W
I	0,2 A
$\omega$	75 rad/s
Polių skaičius	8
$\cos\varphi$	0,81
$R_s$	88 $\Omega$
J	0,0114 kg·m <sup>2</sup>



1 paveikslas. Šešiafazio asinchroninio variklio pereinamieji vyksmai, esant 50 Hz maitinimo įtampos dažniui:

a – statoriaus srovės; b – greičio

Figure 1. Six-phase induction motor transients at 50 Hz frequency: a – current; b – velocity



2 paveikslas. Šešiafazio asinchroninio variklio pereinamieji vyksmai, esant 30 Hz maitinimo įtampos dažniui:

a – statoriaus srovės; b – greičio

Figure 2. Six-phase induction motor transients at 30 Hz frequency: a – current; b – velocity

### 3. Tikslų funkcijos sudarymas

Atliekant identifikavimo procesus, pirmasis žingsnis yra tikslo funkcijos sudarymas.

Paieškinės optimizacijos tikslo funkcija išreiškiama tokiu bendroju pavidalu:

$$Q = Q(p, z), \tag{7}$$

čia  $Q$  – priklausomasis kintamasis;  $p = (p_1, \dots, p_k)$  – nepriklausomųjų kintamųjų vektorius;  $z = (z_1, \dots, z_k)$  – atsitiktinių dydžių vektorius;  $k$  – identifikuojamų parametru skaičius.

Nepriklausomieji kintamieji optimizavimo procese gali būti keičiami taip:

$$p_{i-1} \leq p_i \leq p_{i+1}, \tag{8}$$

čia  $p_{i-1}$  ir  $p_{i+1}$  – ribinės įėjimo kintamųjų reikšmės;  $i = 1, 2, 3, \dots$

Identifikuojant šešiafazį asinchroninį variklį, vektorius  $p$  yra sudarytas iš statoriaus aktyviosios varžos, rotoriaus aktyviosios varžos, statoriaus savojo induktyvumo, rotoriaus savojo induktyvumo, statoriaus ir rotoriaus abipusio induktyvumo ir rotoriaus inercijos momento.

Atsitiktiniai kintamieji – tai įrenginių dilimas, matavimo paklaidos, gamybos sąlygų sezoniniai pasikeitimai ir pan.

Priklausomuoju kintamuoju  $Q$  parenkamas objekto funkcionavimo rodiklis, kurį reikia identifiukuoti arba pagerinti, keičiant valdomus kintamuosius pagal jų (8) ribas (Dambrauskas, 2007).

Turint tikslo funkciją, identifikavimo uždavinys yra formuluojamas taip: reikia rasti vektorių  $p^*$ , kuris suteikia tikslo funkcijai minimumą, atsižvelgiant į apribojimus (8), t. y.:

$$Q(p^*) = \min Q(p). \tag{9}$$

Tikslo funkcijos sudarymas priklauso nuo identifiukuojamo objekto ir identifikavimo metodo. Paprasčiausiu atveju tikslo funkcija yra skirtumas tarp analitiškai gauto sprendinio ir išmatuoto signalo verčių. Sakykime, kad sistemos atsakas apibrėžiamas taip:

$$y(p) = f(p, u), \tag{10}$$

čia  $u$  – sistemos įėjimo signalas. Tokiu atveju tikslo funkcija taikant identifikavimo pagal sprendinį metodą gali būti aprašoma taip:

$$Q(p) = \int_0^t \|y(p) - y_m\|_2 dt, \tag{11}$$

čia  $y_m$  – išmatuotas signalas;  $\| \cdot \|_2$  – Euklidinė metrika (norma).

Dėl minėtų identifikavimo pagal sprendinį metodo trūkumų, (11) formule aprašoma tikslo funkcija koreguojama pagal identifikavimo pagal lygtis metodą. Sakykime, kad identifiukuojamo objekto matematinis modelis aprašomas taip:

$$\dot{x} = f(x, u, p), \tag{12}$$

čia  $x$  – būsenos kintamųjų vektorius.

Suintegravus (12) lygtį ir žinant būsenos kintamųjų signalus, tikslo funkcija užrašoma taip:

$$Q(p) = \int_0^t \left\| x - \int_0^t f(x, u, p) dt - x_0 \right\|_2 dt, \tag{13}$$

čia  $x_0$  – būsenos kintamųjų pradinių verčių vektorius (Petrovas et al., 2017).

Šešiafazio asinchroninio variklio parametru identifikavimo uždavinyje tikslo funkcija, kai maitinimo įtampos dažnis yra 50 Hz, naudojant identifikavimo pagal sprendinį metodą, išreiškiama taip:

$$Q = Q(p) \Big|_{f=50}. \tag{14}$$

Atitinkamai užrašoma tikslo funkcija, esant 30 Hz maitinimo įtampos dažniui. Tuomet galutinė tikslo funkcijos išraiška bus lygi šių tikslo funkcijų sumai:

$$Q = Q(p)|_{f=50} + Q(p)|_{f=30} \cdot \quad (15)$$

Turint tikslo funkciją, vektoriaus  $p$  vertė skaičiuojama taikant paieškinės optimizacijos metodus.

## Išvados

1. Vertinant variklio paleidimo pereinamuosius vyksmus, reikia užtikrinti žemą triukšmų lygį arba taikyti tik kertinių taškų vertes parametrų identifikacijai taikant paieškinius optimizacijos metodus.
2. Variklis identifikuojamas šešiais parametrais, siekiant užtikrinti ne tik nusistovėjusias variklio greičio ir momento vertes bei pereinamojo vyksmo trukmę, bet ir statoriaus srovių dinaminį procesus. Toks tikslumas būtinas šiuolaikinių elektros pavarų valdymo metodams plėtoti.
3. Pasiūlytos tikslo funkcijos daugiafazio variklio identifikacijai remiasi ganėtinai dideliu eksperimentinių duomenų kiekiu, t. y. paleidimo procesu skirtingomis sąlygomis. Taip nustatyti parametrai būtų tinkamesni įvairiems elektros pavaros režimams modeliuoti.

## Literatūra

- Alonge, F., Cirrincione, M., D'Ippolito, F., Pucci, M., & Sferlazza, A. (2014). Parameter identification of linear induction motor model in extended range of operation by means of input-output data. *IEEE Transactions on Industry and Applications*, 50(2), 959-972. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2272051>
- Dambrauskas, A. (2007). *Simpleksinės paieškos statistinė teorija* (monografija) (260 p.). Vilnius: Technika. ISBN 978-9955-28-100-9. <https://doi.org/10.3846/1343-M>
- Janickas, R. (2013). *Mechatroninių pavarų parametrų identifikavimas realiuoju laiku* (daktaro disertacija) (124 p.). Vilnius: Technika. ISBN 978-609-457-577-8.
- Kundrotas, B. (2014). Šešiafazių asinchroninių variklių pereinamųjų vyksmų tyrimas (daktaro disertacija) (120 p.). Vilnius: Technika. ISBN 978-609-457-682-9.
- Petrovas, A., Pitrėnas, A. ir Savickienė, Z. (2017). DC motor parameter identification using equation error method. *Electrical Engineering*. Springer. <https://doi.org/10.1007/s00202-017-0514-6>
- Pitrėnas, A., Uznys, D. ir Beištaras, D. (2017). Production of circular stator current trajectory in multi-phase induction drive under open phase fault condition. *Balkan journal of electrical & computer engineering*, 1(5), 1-4. <https://doi.org/10.17694/bajece.292281>
- Simutis, R. (2008). *Sistemų modeliavimas ir identifikavimas* (178 p.). Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla. ISBN: 978-9955-20-255-4.
- Uznys, D. (2015). Šešiafazio variklio modeliavimas. *Mokslas Lietuvos ateitis = Science – future of Lithuania: elektronika ir elektrotechnika = Electronics and electrical engineering*, 7(3), 361-364. Vilnius: Technika. <https://doi.org/10.3846/mla.2015.800>
- Tuo, C. (2011). Analysis on the mathematical model of the six-phase induction motor of the electric vehicle. *Future Intelligent Information Systems, Lecture Notes in Electrical Engineering*, 1, 303-310.
- Willis, J. R., Brock, G. J., & Edmonds J. S. (1989). Derivation of induction motor models from standstill frequency responses test. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 4, 608-615. <https://doi.org/10.1109/60.41719>

## INDUCTION MOTOR PARAMETER IDENTIFICATION

D. Beištaras, D. Uznys, A. Pitrėnas

Abstract

A review of induction motor parameter identification principles, most common identification methods, their advantages and disadvantages is presented. Six phase induction motor mathematical model is presented. The main steps of writing objective functions using motor transients: current and velocity at different frequencies are analysed.

**Keywords:** induction motors, mathematical model, objective function, parameter identification.