

УДК 621.313

Б.Т. Кононов, Н.М. Рябуха, В.М. Уваров

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МОМЕНТУ ДУГОСТАТОРНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

В статті обґрунтовується отримані аналітичні співвідношення для визначення електромагнітного моменту дугостаторного асинхронного електричного двигуна з короткозамкненим ротором.

Ключові слова: електромагнітний момент, дугостаторний асинхронний електричний двигун з короткозамкненим ротором, рівняння рівноваги напруг, визначальні параметри дугостаторного двигуна.

Вступ

Постановка науково-технічної задачі. При вирішенні питань регулювання частоти асинхронних електричних двигунів, які використовуються в якості електроприводу антен радіолокаційних станцій, необхідно з'ясувати, які чинники впливають на момент руху асинхронного двигуна, тобто визначити залежність, $M_p = f(u_1, u_2, \dots, u_n)$, де u_1, u_2, \dots, u_n – параметри, зміна яких приводить до зміни рухомого моменту. Для отримання вказаної залежності й обґрунтування закономірностей, що визначають особливості процесу регулювання частоти асинхронних електричних двигунів з короткозамкненим ротором, слід розглянути рівняння напруг і моментів, які справедливі для будь-яких режимів роботи двигуна.

Аналіз літератури. В [1] пропонується двоканальна система керування частотно-регульованим електроприводом, заснована на реалізації наступної залежності моменту руху від напруги живлення двигуна U та частоти живлячої напруги f

$$M = CU^2/f, \quad (1)$$

де C – постійна, яка визначається конструктивними особливостями двигуна. Відповідно до (1) перший канал системи регулювання, запропонованої в [1], для зміни частоти обертання змінює величину моменту руху, а другий канал забезпечує зміну рівня напруги, подаваної на статорні обмотки асинхронного електричного двигуна. Система керування частотно-регульованим електроприводом, запропонована в [1] для асинхронного електричного двигуна з короткозамкненим ротором, живлення якого здійснюється від інвертора струму або інвертора напруги, на виході якого отримується змінний струм з регульованою частотою і регульованим рівнем напруги. Комбінація некеруемого випрямляча і регульованого інвертора не дозволяє отримати стійку систему автоматичного регулювання частоти в інфранизькому діапазоні частот від 0,5 об/хв до 6 об/хв., тобто в діапазоні частот, в якому працюють в бойовому, дежурному й технологічному режимах електропри-

води сучасних радіолокаційних комплексів великих і середніх висот та радіолокаційні станції маловисотного поля й мобільні радіолокаційні станції. Потрібні інфранизькі частоти отримують шляхом використання в електроприводах антен радіолокаційних станцій механічних редукторів, що ускладнює систему регулювання частоти й знижує її надійність в зв'язку з появою в системі регулювання частоти послідовно вимкненої ланки, надійність якої менше надійності власне асинхронного електричного двигуна й інвертора струму або інвертора напруги.

Потрібні інфранизькі частоти обертання електроприводу антен радіолокаційних станцій можливо отримати в разі використання в якості приводного двигуна дугостаторного електричного двигуна з короткозамкненим ротором [2], який дозволяє забезпечувати електромагнітну редукцію частоти.

Живлення дугостаторного електричного двигуна з короткозамкненим ротором від інвертора струму або інвертора напруги, на виході якого можливо одержувати як змінну частоту, так і змінну за амплітудою напругу, дає змогу отримати необхідні частоти обертання електроприводу. Але в існуючій літературі не розглядалися питання визначення закономірностей, подібних співвідношенню [1] й дозволяючих встановити залежність моменту руху від частоти й напруги в разі використання в якості приводного двигуна дугостаторного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Мета статті: отримати й обґрунтувати залежності електромагнітного моменту руху дугостаторного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором від амплітуди й частоти живлячої напруги й встановити тим самим закономірності процесу регулювання частоти електроприводу антен радіолокаційних станцій.

Виклад основного матеріалу

Для з'ясування закономірностей процесу регулювання частоти електроприводу антен радіолокаційних станцій розглянемо рівняння рівноваги напруг дугостаторного асинхронного двигуна. В [3]

запропоновано представляти дугостаторний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором як уявну двофазну електричну машину, статорні й роторні обмотки якої співпадають з повздожньою d та поперечною q її осями. В координатних осях d та q , які обертаються з синхронною частотою обертання, рівняння рівноваги напруг дугостаторного асинхронного двигуна мають наступний вигляд

$$\begin{aligned} U_d &= r I_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \bar{\alpha}\omega_1 \psi_q; & U_q &= r I_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \bar{\alpha}\omega_1 \psi_d; \\ 0 &= r_r I_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \bar{\alpha}\omega_1 \psi_{rq}; & 0 &= r_r I_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + \bar{\alpha}\omega_1 \psi_{rd}, \end{aligned} \quad (2)$$

де U_d, U_q – проекції живлячої напруги U у осях d та q ; $\psi_d, \psi_q, \psi_{rd}, \psi_{rq}$ – проекції потокозчеплень статорних й роторних контурів дугостаторного електричного двигуна з короткозамкненим ротором; r, r_r – активний опір статорної та роторної обмотки дугостаторного електричного двигуна; I_d, I_q, I_{rd}, I_{rq} – проекції струмів статорних та роторних контурів в осях d та q ; $\bar{\alpha} = \frac{\alpha}{2\pi}$ – відносний центральний кут статора дугостаторного двигуна, центральний кут якого дорівнює α ; s – ковзання дугостаторного асинхронного двигуна, яке дорівнює різниці синхронної кутової частоти $\bar{\alpha}\omega_1$, та кутової частоти обертання ротора, віднесеної до синхронної кутової частоти обертання $\bar{\alpha}\omega$. В відносних одиницях ω_1 дорівнює одиниці. В рівняннях рівноваги напруг зв'язок між потокозчепленнями та струмами має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \psi_d &= I_d x_d + I_{rd} x_{ad}; & \psi_q &= I_q x_q + I_{rd} x_{aq}; \\ \psi_{rd} &= I_d x_{ad} + I_{rd} x_{rd}; & \psi_{rq} &= I_q x_{aq} + I_{rq} x_{rq}, \end{aligned} \quad (3)$$

де x_d, x_q, x_{rd}, x_{rq} – повні реактивні опори статорних і роторних контурів дугостаторного асинхронного двигуна відповідно по осям d та q ; x_{ad}, x_{aq} – реактивні взаємноіндуктивні опори двигуна по осям d та q .

В математичній моделі дугостаторного асинхронного електричного двигуна рівняння рівноваги напруг його статорних і роторних контурів враховують крім трансформаторних електрорушійних сил, обумовлених зміною потокозчеплень у часі, електрорушійні сили обертання, обумовлені зміною електрорушійних сил у просторі. Диференціальні рівняння рівноваги напруг слід доповнити рівнянням рівноваги моментів, яке представлено таким чином

$$H \bar{\alpha} (1 - S) \frac{d\omega_1}{dt} = M_p - M_o, \quad (4)$$

де H – момент інерції рухомих мас дугостаторного асинхронного двигуна; $M_p = \psi_d I_q - \psi_q I_d$ – електромагнітний момент руху; M_o – момент опору.

Для забезпечення постійної частоти обертання валу ротора необхідно підтримувати в встановлених режимах рівність $M_p = M_o$, тобто змінювати електромагнітний момент руху при зміні моменту опору. Отже, треба встановити залежність M_p від величини живлячої напруги, частоти й параметрів дугостаторного асинхронного двигуна.

Виходячи з припущення про те, що асинхронний дугостаторний двигун з короткозамкненим ротором є симетричною електричною машиною, в якій реактивні опори по осях d та q однакові й однакові потокозчеплення й напруги по осях d та q , рівняння (2) спрощуються й приймають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} U &= r_1 I_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + \bar{\alpha}\omega_1 \psi_1; \\ 0 &= r_2 I_2 + \frac{d\psi_2}{dt} + \bar{\alpha}\omega_1 \psi_2, \end{aligned} \quad (5)$$

де r_1, r_2 – активні опори статорного й роторного контурів двигуна; I_1, I_2 – струми статорного й роторного контурів; ψ_1, ψ_2 – потокозчеплення статорного й роторного контурів, які відповідно дорівнюють $\psi_1 = m_1 w_1 \Phi$, $\psi_2 = m_2 w_2 \Phi$; Φ – магнітний потік у двигуні; w_1, w_2 – кількість вітків статорної та роторної обмотки двигуна, при цьому звичайно вважають [4], що $w_2 = \frac{1}{2}$, або $w_2 = \frac{y_2}{2}$; m_1, m_2 – кількість фаз статорної та роторної обмотки двигуна, при цьому звичайно вважають [4], що $m_1 = Z_2$ або $m_2 = \frac{Z_2}{y_2}$; Z_2 – кількість стрижнів короткозамкненого ротора; $y_2 = \frac{Z_2}{p}$ – відношення кількості стрижнів до кількості пар полюсів. Якщо це відношення не дорівнює цілому числу, то $m_2 = Z_2$, а якщо воно дорівнює цілому числу, то найбільше ціле число дорівнює y_2 .

У встановленому режимі роботи двигуна, нехтуючи величиною активного опору статорної обмотки двигуна, отримуємо з першого рівняння системи (5), що

$$\psi_1 = \frac{U}{\bar{\alpha}\omega_1} \quad (6)$$

й відповідно

$$\Phi = \frac{U}{\bar{\alpha}\omega_1 m_1 w_1}. \quad (7)$$

Електрорушійна сила E_2 , яка виникає в роторі, визначається наступним співвідношенням

$$E_2 = 4,44 m_2 w_2 \bar{\alpha}\omega_1 \Phi = 4,44 \frac{m_2 w_2 s U}{m_1 w_1}. \quad (8)$$

Використовуючи друге рівняння системи (5), знаходимо роторний струм I_2 .

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2 s^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{x_2^2 + x_{2s}^2}}, \quad (9)$$

де $x_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi \bar{\alpha} \omega_1 s L_2 = x_2 s$.

Відомо [4], що електромагнітний момент руху визначається із наступного співвідношення

$$M_p = \frac{\Delta P_2}{\omega_2}, \quad (10)$$

де $\Delta P_2 = m_2 I_2^2 r_2$ – втрати в роторі;

$$\omega_2 = \bar{\alpha} \omega_1 s = \frac{\bar{\alpha} 2\pi f_1}{p} s.$$

Використовуючи (10) та враховуючи, що

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + r_{2s}^2}}, \text{ отримуємо:}$$

$$M_p = \frac{\pi \left(\frac{w_2 m_2}{w_1 m_1} \right)^2 U^2 \cos \varphi_2 s}{\bar{\alpha} f_1 \sqrt{r_2^2 + r_{2s}^2}}. \quad (11)$$

Співвідношення (11) за своїм змістом співпадає з відомими в [4] та в іншій літературі виразами для визначення рухомого моменту й враховує конструктивні особливості дугостаторного асинхронного двигуна, а саме кількість витків його статорної обмотки, кількість стрижнів ротора, величину відносного центрального кута $\bar{\alpha}$, величини активного й реактивного опорів ротора.

При визначенні електромагнітного моменту руху дугостаторного електричного двигуна слід мати на увазі, що на відміну від двигуна з круглим ротором, визначальними параметрами якого є $2\pi r$ та ℓ , де r – кількість пар полюсів; $\tau = \frac{\pi D}{2p}$ – полюсне ділення; D –

діаметр статора, а ℓ – активна довжина осердя статора, дуговий статор має ще один визначальний параметр – центральний кут α .

В зв'язку з цим в процесі розрахунку дугостаторних електричних машин, виходячи із [2], доцільно використовувати питомі величини, тобто величини, віднесені до одиниці довжини, поверхні або об'єму. Перш за все, основною розрахунковою величиною є питома потужність електричної машини, яка дорівнює відношенню її потужності до активної поверхні машини. Активна поверхня електричної машини F визначається співвідношенням

$$F = \alpha \ell = 2\pi r \ell, \quad (12)$$

де r – радіус статора; $\alpha \ell$ – довжина активної дуги статора.

Питома електромагнітна потужність \bar{p} дорівнює:

$$\bar{p} = EA \cos \varphi_2, \quad (13)$$

де $E = 2K_{об} \tau f B$ – питома електрорушійна сила, тобто електрорушійна сила віднесена до одиниці акти-

вної довжини провідника статора; $K_{об}$ – обмоточний коефіцієнт, $K_{об} \approx 1$; f – частота; B – ефективне (середньо квадратичне) значення магнітної індукції магнітного поля в проміжку між активними поверхнями статора й ротора; $A = \frac{I}{y}$ – лінійне наванта-

ження електричної машини; I – струм статорної обмотки; y – полюсний крок.

Добуток активної довжини ℓ на полюсний крок y являє собою площу пазового кроку, а величина лінійного навантаження A визначає напруженість магнітного поля на активній поверхні.

Питомий активний опір – опір, віднесений до одиниці площі активної поверхні статора або ротора, визначається співвідношенням

$$R = \frac{\rho k_R k_F}{h}, \quad (14)$$

де ρ – питомий електричний опір матеріалу обмотки; k_R – відносна довжина витка (відношення довжини витка до довжини активної її частини); k_F – коефіцієнт Фільда, враховуючий поверхневий ефект; $h = \frac{F_\ell}{y} = \frac{A}{J}$ – площа активної поверхні статора (ротора); F_ℓ – поперечний переріз всіх провідників паза; J – щільність струму.

Відносна довжина витка обмотки k_R дорівнює

$$k_R = 1 + \frac{L_\ell}{\ell}, \quad (15)$$

де L_ℓ – довжина лобових (неактивних) частин обмотки.

Коефіцієнт Фільда визначається з виразу

$$k_F = \frac{k_{Fa} + k_{Fl}(k_R - 1)}{k_R}, \quad (16)$$

де k_{Fa}, k_{Fl} – коефіцієнти Фільда, враховуючи поверхневий ефект окремо в активній та неактивній частині витка.

При розрахунках питомих величин ротора, зазвичай, їх приводять до відповідних величин статорного кола. Коефіцієнт приведення питомого опору кола ротора до опору в колі фази обмотки статора k дорівнює

$$k = m_1 \bar{\ell} N_\phi^2 k_w^2, \quad (17)$$

де m_1 – кількість фаз статора; $\bar{\ell} = \frac{\ell}{2\pi r}$ – відношен-

ня активної довжини статора до довжини його активної дуги; N_ϕ – кількість провідників фази статора;

$k = \frac{w_1}{m_2 w_2}$ – коефіцієнт трансформації; m_2 – кіль-

кість фаз ротора, яка визначається кількістю його стрижнів; w_1, w_2 – кількість витків фазної обмотки статора й обмотки ротора.

Для приведення параметрів роторного кола до статорного слід використовувати наступні вирази

$$E_2' = E_2 k_w; \quad A_2' = A_2 \frac{1}{k_w}; \quad R_2' = R_2 k_w. \quad (18)$$

При визначенні питомого індуктивного опору дугостаторної електричної машини будемо вважати, що обмотка являє собою неферомагнітну оболонку товщиною h й покриває феромагнітне осердя, а її індуктивність залежить від напруженості поперечного магнітного поля, віднесеної до одиниці площі.

Якщо вважати, що щільність струму J однакова по всій товщині обмотки, то для не феромагнітної оболонки, зосередженій в пазах, полюсний крок яких дорівнює y , а ширина b_n , питома індуктивність розсіювання

$$L_S = \frac{1}{3} \mu_0 \frac{hy}{b_n} = \mu_0 \lambda y, \quad (19)$$

де μ_0 – магнітна провідність матеріалу обмотки;

$\lambda = \frac{n}{3b_n}$ – коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання.

Враховуючи (19), визначимо питомі індуктивності розсіювання і питомі індуктивні опори статорного й роторного кола

$$\begin{aligned} L_{S1} &= \mu_0 \lambda_1 y_1; \\ L_{S2}' &= \mu_0 \lambda_2 y_2 K_w^2; \\ X_1 &= \omega L_{S1}; \quad X_2' = \omega L_{S2}'. \end{aligned} \quad (20)$$

Величини питомих активних і питомих реактивних опорів дугостаторних електричних машин практично вдвічі менші величин відповідних опорів електричних машин зі звичайним круглим статором, що дозволяє суттєво підвищити питому електромагнітну потужність дугостаторного асинхронного двигуна у порівнянні з асинхронним двигуном звичайного виконання.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА ДУГОСТАТОРНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Б.Т. Кононов, Н.Н. Рябуха, В.Н. Уваров

В статье обосновываются полученные аналитические соотношения для определения электромагнитного момента дугостаторного асинхронного электрического двигателя с короткозамкнутым ротором.

Ключевые слова: электромагнитный момент, дугостаторный асинхронный электрический двигатель с короткозамкнутым ротором, уравнение равновесия напряжений, определяющие параметры дугостаторного двигателя.

THE ELECTROMAGNETIC DETERMINING OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR A ROTOR

B. T. Kononov, N.M. Ryabukha, V.M. Uvarov

In the article the got analytical correlations are grounded for determination of electromagnetic moment of arc-type stator asynchronous electric engine with a short-circuited rotor.

Keywords: electromagnetic moment, arc-type stator asynchronous electric engine with a short-circuited rotor, equalization of equilibrium of tensions, determining the parameters of arc-type stator engine.

Висновки

1. Запропоновані аналітичні співвідношення для визначення електромагнітного моменту руху дугостаторного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором дозволяють встановити зв'язок між величиною цього моменту, напругою й частотою живлячої мережі та параметрами дугостаторного асинхронного двигуна.

2. Отримані аналітичні залежності дозволяють обґрунтувати закономірності процесу регулювання й стабілізації частоти при використанні в якості електроприводу антен радіолокаційних станцій дугостаторних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.

3. Визначені особливості розрахунку конструктивних параметрів дугостаторних асинхронних електричних двигунів з короткозамкненим ротором та встановлено, що крім таких визначальних параметрів звичайних асинхронних двигунів з круглим ротором, як активна довжина осердя статора, кількість пар полюсів та полюсне ділення, слід враховувати ще один визначальний параметр – центральний кут дуги статора.

4. Встановлено, що за основними питомими характеристиками, такими як питома потужність й лінійне навантаження, дугостаторний асинхронний електричний двигун з короткозамкненим ротором має суттєві переваги у порівнянні зі асинхронними електричними двигунами звичайного вимикання.

Список літератури

1. Кононов Б.Т. Система керування частотно регульованим електроприводом на базі асинхронного електричного двигуна / Б.Т. Кононов, А.О. Нечаус, Н.М. Рябуха // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2014. – Вип. 3 (40). – С. 136-140.
2. Фридкин П.А. Безредукторный дугостаторный электропривод / П.А. Фридкин. – Л.: Энергия, 1961. – 136 с.
3. Кононов Б.Т. Математична модель дугостаторного електричного двигуна з короткозамкненим ротором / Б.Т. Кононов, Н.М. Рябуха // Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – №1 (41). – С. 112-115.
4. Електричні машини / Б.Т. Кононов, Г.І. Лагутін, О.Б. Кононов, А.О. Нечаус. – Х.: ХУПС, 2015. – 496 с.

Надійшла до редколегії 23.04.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Більчук, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.