

УДК 621.314

Б.Т. Кононов, Н.М. Рябуха

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

РОЗРАХУНКОВІ СПІВВІДНОШЕННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КИДКІВ СТРУМІВ ТА ПРОВАЛІВ НАПРУГИ ПРИ ПУСКУ ДУГОСТАТОРНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

В статті приводяться зручні для інженерних розрахунків співвідношення для визначення кидків струмів та провалів напруги в процесі пуску дугостаторного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Ключові слова: дугостаторний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, кидки струмів та провали напруги, під час пуску двигуна, джерело обмеженої потужності.

Вступ

Для забезпечення безаварійної роботи електропривода антен радіолокаційних станцій використовують систему захисту [1], яка спрацьовує при коротких замиканнях в колі живлення електричного двигуна. Струми в колах статорних обмоток електричних двигунів в процесі їх пуску майже не відрізняються від струмів при коротких замиканнях й для забезпечення функціонування систем захисту електропривода використовують різні способи обмеження пускових струмів [2]. Для налаштування уставок релейного захисту електропривода необхідно мати можливість розрахувати значення його пускових струмів. Відомо, що при пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, живлення якого здійснюється від автономного джерела живлення, потужність якого незначно перевищує потужність запускаемого електричного двигуна, можливі провали напруги, які порушують нормальну роботу системи електропостачання. З'ясування значень пускових струмів й можливих провалів напруги в процесі пуску електропривода необхідно для забезпечення функціонування його системи захисту.

Аналіз літератури. В відомій літературі [3] багато уваги приділено питанням визначення пускових струмів асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Але використання асинхронних двигунів з круглим статором потребує використання механічного редуктора для отримання потрібних значень кутових частот обертання антени.

В [4] доведено, що вимагаємі частоти обертання привода й потрібні значення моменту обертання можливо отримати, якщо використовувати для привода асинхронний двигун з дуговим статором. Питання визначення значень пускових струмів й можливих провалів напруги в процесі пуску дугостаторного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в відомій літературі практично майже не розглядалися, а особливості процесу пуску такого двигуна при живленні від

джерела обмеженої потужності в відомій авторам літературі не вивчалися.

Мета статті полягає в обґрунтуванні аналітичних співвідношень для проведення інженерних розрахунків пускових струмів й провалів напруги, які мають місце в процесі пуску дугостаторного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, який живиться від автономного генератора обмеженої потужності.

Основний матеріал

Для отримання зазначених в меті статті аналітичних співвідношень складемо рівняння рівноваги напруг в статорних і роторних контурах електричних машин, які утворюють систему електропостачання, а саме в контурах синхронного генератора й дугостаторного електричного двигуна з короткозамкненим ротором.

$$\|U\| = \|r\| \cdot \|I\| + \left\| \frac{d\Psi}{dt} \right\| + \|\omega\| \cdot \|\Psi\|, \quad (1)$$

де

$$\|U\|^T = \begin{bmatrix} -U_d & -U_q & U_f & 0 & 0 & U_d & U_q & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

– матриця напруг;

T – символ транспонування;

U_d, U_q – напруги статорних контурів генератора й двигуна в вісях d та q відповідно;

U_f – напруга на виході контуру збудження генератора;

$$\|I\|^T = \begin{bmatrix} I_d & I_q & I_f & I_{rd} & I_{rq} & I_{dg} & I_{qg} & I_{rdg} & I_{rqg} \end{bmatrix}$$

– матриця струмів;

I_d, I_q – струми статорних контурів генератора;

I_f, I_{rd}, I_{rq} – струми в контурі збудження й в за-спокійливих контурах генератора;

I_{rdg}, I_{rqg} – струми роторних контурів двигуна.

$$\|\Psi\| = \begin{bmatrix} \Psi_d & \Psi_q & \Psi_f & \Psi_{rd} & \Psi_{rq} & \Psi_{dg} & \Psi_{qg} & \Psi_{rdg} & \Psi_{rqg} \end{bmatrix}$$

– матриця потокочеплень;

$\Psi_d, \Psi_q, \Psi_f, \Psi_{rd}, \Psi_{rq}$ – потокочеплення статорних та роторних контурів генератора;

$$\|r\| = \begin{pmatrix} r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{rg} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{rg} \end{pmatrix}$$

– матриця активних опорів;

$$\|\omega\| = \begin{pmatrix} 0 & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

матриця кутових швидкостей.

В системі диференціальних рівнянь (1) та при складанні матриці кутових швидкостей $\|\omega\|$ враховані наступні міркування. Обрана система координат d-q обертається з синхронною кутовою швидкістю ω , тобто вона обертається разом з ротором синхронного генератора розглядаємої системи електропостачання. В зв'язку з цим в рівняннях рівноваги напруг статорних обмоток генератора крім трансформаторних електрорушійних сил, пов'язаних зі зміною потокозчеплення у просторі враховані електрорушійні сили обертання, які виникають при обертанні його ротора з синхронною кутовою швидкістю ω . В рівняннях рівноваги напруг статорних обмоток дугостаторного електричного двигуна також враховані трансформаторні електрорушійні сили й електрорушійні сили обертання, але зміна потокозчеплення в просторі в цих обмотках відбувається з кутовою швидкістю, яка дорівнює $\bar{\alpha}\omega$. В роторних обмотках генератора електрорушійні сили обертання не виникають, а в роторних обмотках дуго статорного електричного двигуна зміна потокозчеплення в просторі відбувається з кутовою швидкістю обертання його ротора, яка дорівнює $(1-S)\bar{\alpha}\omega$.

Наведена форма запису системи диференціальних рівнянь (1) враховує в загальному вигляді опис всіх можливих режимів роботи розглядаємої системи електропостачання й в окремих варіантах режимів роботи системи може бути істотно спрощена. Це стосується, в першу чергу, варіанта пуску дуго статорного двигуна при його живленні від генератора, що не живить інше навантаження.

r – опір статорних обмоток генератора;
 r_f – опір обмотки, збудження генератора;
 r_r – опір заспокійливих обмоток генератора;
 r_g, r_{rg} – опір статорних та роторних обмоток двигуна;

ω – кутова швидкість ротора генератора;

S – ковзання ротора двигуна;

$\Psi_{dg}, \Psi_{qg}, \Psi_{rdg}, \Psi_{rqg}$ – потокозчеплення статорних та роторних контурів електричного двигуна;

$\bar{\alpha} = \alpha/(2\pi)$ – відносний центральний кут статора дугостаторного двигуна.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\bar{\alpha}\omega & 0 & 0 & 0 \\ \bar{\alpha}\omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -(1-S)\bar{\alpha}\omega \\ 0 & 0 & (1-S)\bar{\alpha}\omega & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

У випадку дослідження найбільш небезпечного варіанта пуску, коли генератор працює в режимі неробочого ходу, тобто коли на процес пуску не впливає згладжуючий ефект навантаження, між статорними струмами генератора й електричного двигуна існує такий зв'язок.

$$I_d = I_{dg}; \quad (2)$$

$$I_q = I_{qg}$$

Враховуючи (2), перетворимо систему рівнянь (1) та отримаємо

$$(r+r_g)I_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega\Psi_q + \frac{d\Psi_{dg}}{dt} - \bar{\alpha}\omega\Psi_{qg} = 0;$$

$$(r+r_g)I_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega\Psi_d + \frac{d\Psi_{qg}}{dt} + \bar{\alpha}\omega\Psi_{dg} = 0; \quad (3)$$

$$r_f I_f + \frac{d\Psi_f}{dt} - U_f = 0; \quad r_r I_{rd} + \frac{d\Psi_{rd}}{dt} = 0;$$

$$r_r I_{rq} + \frac{d\Psi_{rq}}{dt} = 0;$$

$$r_r I_{rdg} + \frac{d\Psi_{rdg}}{dt} - (1-S)\bar{\alpha}\omega\Psi_{rqg} = 0;$$

$$r_r I_{rqg} + \frac{d\Psi_{rqg}}{dt} - (1-S)\bar{\alpha}\omega\Psi_{rdg} = 0.$$

Враховуючи те, що в системі відносних одиниць $\omega = 1$, а в початковий момент пуску ротор двигуна нерухомий, тобто $S=1$, й нехтуючи величинами активного опору статорних та роторних контурів генератора та двигуна, які незначні в порівнянні з

реактивними опорами цих контурів, перетворимо системи рівнянь (3) до наступного вигляду

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q + \frac{d\psi_{dg}}{dt} - \bar{\alpha}\psi_{qg} &= 0; \\ \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d + \frac{d\psi_{qg}}{dt} + \bar{\alpha}\psi_{dg} &= 0; \\ \frac{d\psi_f}{dt} - U_f &= 0; \\ \frac{d\psi_{rd}}{dt} = 0; \frac{d\psi_{rq}}{dt} = 0; \frac{d\psi_{rdg}}{dt} = 0; \frac{d\psi_{rqg}}{dt} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Опис електромагнітного перехідного процесу за допомогою рівнянь (4) відповідає представленню розглядаємої системи як консервативної системи, де не відбувається згасання енергії на активних опорах статорних та роторних контурів. Фактично електромагнітний перехідний процес відбувається в реальній дисипативній системі, в зв'язку з чим отримані в результаті рішення системи (4) значення кидків струмів та провалів напруг будуть трохи більшими ніж відповідні значення, які мають місце в реальній системі. Разом з тим, уставки на спрацювання релейного захисту завжди вибирають з деяким запасом, що дозволяє вважати доцільним використовувати запропоновані співвідношення для розрахунку пускових струмів налаштування релейного захисту електроприводу антен радіолокаційних станцій.

В рівняннях системи (4) потокозчеплення визначаються в такий спосіб

$$\begin{aligned} \psi_d &= x_d I_d + x_{ad} I_f + x_{ad} I_{rd}; \\ \psi_q &= x_q I_q + x_{aq} I_{rq}; \\ \psi_f &= x_{ad} I_d + x_f I_f + x_{ad} I_{rd}; \\ \psi_{dg} &= x_{dg} I_d + x_{adg} I_{rdg}; \quad \psi_{qg} = x_{qg} I_q + x_{aqg} I_{rqg}; \\ \psi_{rd} &= x_{ad} I_d + x_{ad} I_f + x_{rd} I_{rd}; \\ \psi_{rq} &= x_{aq} I_q + x_{rq} I_{rq}; \\ \psi_{rdg} &= x_{adg} I_d + x_{rdg} I_{rdg}; \\ \psi_{rqg} &= x_{aqg} I_q + x_{rqg} I_{rqg}. \end{aligned} \quad (5)$$

З аналізу 4, 5, 6 та 7 рівнянь системи (4) слідує, що в консервативній системі потокозчеплення $\psi_{rd}, \psi_{rq}, \psi_{rdg}$ та ψ_{rqg} лишаються незмінними, тобто дорівнюють своїм початковим значенням $\psi_{rdo}, \psi_{rdo}, \psi_{rdgo}$ та ψ_{rqgo} , які для розглядаємого режиму дорівнюють нулю. Зроблений висновок дозволяє визначити струми роторних контурів генератора та двигуна й отримати з (5) такі співвідношення:

$$I_{rd} = -\frac{x_{ad}}{x_{rd}} I_d - \frac{x_{ad}}{x_{rd}} I_f;$$

$$I_{rq} = -\frac{x_{aq} I_q}{x_{rq}}; \quad (6)$$

$$I_{rdg} = -\frac{x_{adg}}{x_{rdg}} I_{dg}; \quad I_{rqg} = -\frac{x_{aqg}}{x_{rqg}} I_{qg}.$$

Здійснюючи в перших трьох рівняннях (4) перехід від потокозчеплень до струмів й враховуючи (2) та (6), отримуємо таку систему диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} \frac{dI_d}{dt} \left(x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{rd}} + x_{dg} - \frac{x_{adg}^2}{x_{rdg}} \right) + \frac{dI_f}{dt} \left(x_{ad} - \frac{x_{ad}^2}{x_{rd}} \right) - \\ - I_q \left[x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_{rq}} + \bar{\alpha} \left(x_{qg} - \frac{x_{aqg}^2}{x_{rqg}} \right) \right] = 0; \\ \frac{dI_q}{dt} \left(x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_{rq}} + x_{qg} - \frac{x_{aqg}^2}{x_{rqg}} \right) + I_d \left[\left(x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{rd}} \right) + \right. \\ \left. + \bar{\alpha} \left(x_{dg} - \frac{x_{adg}^2}{x_{rdg}} \right) \right] + I_f \left(x_{ad} - \frac{x_{ad}^2}{x_{rd}} \right) = 0; \\ \frac{dI_d}{dt} \left(x_{ad} - \frac{x_{ad}^2}{x_d} \right) + \frac{dI_f}{dt} \left(x_f - \frac{x_{ad}^2}{x_{rd}} \right) - x_f = 0. \end{aligned}$$

Зауваження. З третього рівняння системи (7) отримуємо, що

$$\frac{dI_f}{dt} = -\frac{dI_d}{dt} \frac{\left(x_{ad} - \frac{x_{ad}^2}{x_{rd}} \right)}{x_f - \frac{x_{ad}^2}{x_{rd}} + \frac{U_f}{x_f - x_{ad}^2/x_{rd}}};$$

а інтегрування третього рівняння системи (7), враховуючи, що в режимі неробочого ходу генератора $I_{do} = 0$, дає такий результат

$$I_f = I_{fo} - I_d \frac{x_{ad} - \frac{x_{ad}^2}{x_{rd}}}{x_f - \frac{x_{ad}^2}{x_{rd}}} + \frac{U_{ft}}{x_f - \frac{x_{ad}^2}{x_{rd}}}.$$

Враховуючи зазначене зауваження, отримуємо після перетворень першого та другого рівнянь (7) наступні вирази

$$\begin{aligned} \frac{dI_d}{dt} - I_q \frac{(x'_q - \bar{\alpha}x'_{qg})}{x''_d + x'_{dg}} = -\frac{(K_f + U_f)}{x'_d + x'_{dg}}; \\ \frac{dI_q}{dt} - I_d \frac{(x''_q - \bar{\alpha}x'_{qg})}{x''_q + x'_{qg}} = -\frac{K_f(\psi'_{fo} + U_{ft})}{x'_q + x'_{qg}}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$x''_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{rd}} - \frac{\left(x_{ad} - \frac{x_{ad}^2}{x_{rd}} \right)^2}{\left(x_f - \frac{x_{ad}^2}{x_{rd}} \right)^2};$$

– понадперехідний опір генератора по осі d;

$$x'_{ag} = x_{dg} - \frac{x_{adg}^2}{x_{rdg}} - \text{перехідний опір двигуна по осі d};$$

$$x'_{q'} = x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_{rq}} - \text{перехідний опір генератора по осі q};$$

$$x'_{qg} = x_{qg} - \frac{x_{aqg}^2}{x_{rqg}} - \text{перехідний опір двигуна по осі q};$$

$$x'_f = x_f - \frac{x_{ad}^2}{x_{rd}} - \text{перехідний опір обмотки збудження генератора};$$

генератора;

$$K_f = \frac{x_{ad} - x_{ad}^2/x_{rd}}{x'_f} - \text{коефіцієнт підсилення};$$

$\Psi'_{fo} = I_{fo} (x_f - x_{ad}^2/x_{rd})$ – початкове перехідне поточкозчеплення обмотки збудження генератора.

Для спрощення форми запису представимо систему рівнянь (8) у вигляді

$$\frac{dI_d}{dt} - aI_q = AU_f; \quad \frac{dI_q}{dt} + bI_d = B(\Psi'_{fo} + U_{ft}),$$

$$\text{де} \quad a = \frac{x'_{q'} + \bar{\alpha}x'_{qg}}{x'_d + x'_{dg}}; \quad b = \frac{x''_d + \bar{\alpha}x'_{dg}}{x'_{q'} + x'_{qg}};$$

$$A = -\frac{K_f}{x''_d + x'_{dg}}; \quad b = -\frac{K_f}{x'_{q'} + x'_{qg}}.$$

Часткове рішення системи диференціальних рівнянь (9) будемо шукати в вигляді

$$I_d = C_1 \cos \gamma t + C_2 \sin \gamma t; \quad (10)$$

$$I_q = -C_1 \beta \sin \gamma t + C_2 \beta \cos \gamma t;$$

$$\text{де} \quad \gamma = \sqrt{\frac{(x''_d + \bar{\alpha}x'_{dg})(x'_{q'} + \bar{\alpha}x'_{qg})}{(x'_d + x'_{dg})(x'_{q'} + x'_{qg})}} = \sqrt{ab};$$

$$\beta = \sqrt{\frac{(x''_d + \bar{\alpha}x'_{dg})(x'_{q'} + \bar{\alpha}x'_{qg})}{(x'_d + x'_{dg})(x'_{q'} + x'_{qg})}} = \sqrt{\frac{b}{a}}.$$

Загальне рішення системи диференціальних рівнянь (9) будемо шукати методом варіації довільних сталих. В відповідності до цього метода система диференціальних рівнянь для визначення C_1 та C_2 представляється таким чином

$$\begin{aligned} C'_1 \cos \gamma t + C'_2 \sin \gamma t &= AU_f; \\ -C'_1 \beta \sin \gamma t + C'_2 \beta \cos \gamma t &= B(\Psi'_{fo} + U_{ft}). \end{aligned} \quad (11)$$

З (11) маємо, що

$$C'_1 = AU_f \cos \gamma t - \frac{B(\Psi'_{fo} + U_{ft})}{\beta} \sin \gamma t; \quad (12)$$

$$C'_2 = AU_f \sin \gamma t - \frac{B(\Psi'_{fo} + U_{ft})}{\beta} \cos \gamma t.$$

Рішення рівняння (12) має вигляд

$$\begin{aligned} C_1 &= C_{10} + \frac{AU_f \sin \gamma t}{\gamma} + \frac{B\Psi'_{fo}}{\gamma\beta} \cos \gamma t + \\ &+ \frac{BU_f}{\beta} \left(\frac{t \cos \gamma t}{\gamma} - \frac{1}{\gamma^2} \sin \gamma t \right); \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} C_2 &= C_{20} - \frac{AU_f}{\gamma} \cos \gamma t + \frac{B\Psi'_{fo}}{\gamma\beta} \sin \gamma t + \\ &+ \frac{BU_f}{\beta} \left(\frac{t \sin \gamma t}{\gamma} - \frac{1}{\gamma^2} \cos \gamma t \right). \end{aligned}$$

Враховуючи (13) та (10), загальне рішення системи диференціальних рівнянь (10) отримаємо в вигляді

$$I_d = C_{10} \cos \gamma t + C_{20} \sin \gamma t + \frac{B\Psi'_{fo}}{\gamma\beta} + \frac{BU_f t}{\gamma\beta}; \quad (14)$$

$$I_q = -C_{10} \sin \gamma t + C_{20} \cos \gamma t - \frac{AU_f \beta}{\gamma} + \frac{BU_f}{\beta\gamma^2}.$$

Оскільки при $t=0$ $I_d(t=0)=0$, $I_q(t=0)=0$ значення C_{10} та C_{20} в (14) дорівнюють

$$C_{10} = -\frac{B\Psi'_{fo}}{\gamma\beta}; \quad (15)$$

$$C_{20} = \frac{AU_f}{\gamma} - \frac{BU_f}{\beta^2\gamma^2}.$$

Таким чином отримуємо

$$I_d = \frac{B\Psi'_{fo}}{\gamma\beta} (1 - \cos \gamma t) - \frac{AU_f}{\gamma} \sin \gamma t - \frac{BU_f}{\beta^2\gamma^2} \sin \gamma t + \frac{BU_{ft}}{\beta\gamma}; \quad (16)$$

$$I_q = \frac{B\Psi'_{fo}}{\gamma} \sin \gamma t - \frac{AU_f \beta}{\gamma} (1 - \cos \gamma t) + \frac{BU_f}{\beta\gamma^2} (1 - \cos \gamma t).$$

Співвідношення (16) дозволяють визначити значення величин I_d та I_q для любого моменту часу, але оскільки нас цікавить максимальний кидок струму та максимальний провал напруги під час пуску двигуна, то з (16) зрозуміло, що найбільш небезпечні збурення мають місце на інтервалі часи від $t=0$ до $t=\pi/(2\gamma)$. Враховуючи те, що регулятор збудження генератора якщо й встигає зафіксувати початковий провал напруги, але не спроможний відреагувати на це збурення, тобто $U_f = 0$, що спрощує вирази для визначення струмів й дає змогу спростити співвідношення (16)

$$I_d = \frac{B\Psi'_{fo}}{\gamma\beta} (1 - \cos \gamma t); \quad I_q = \frac{B\Psi'_{fo}}{\gamma} \sin \gamma t. \quad (17)$$

Враховуючи позначення, прийняті при виводі співвідношень (8), (9) та (10), отримаємо

$$I_d = -\frac{E_o (1 - \cos \gamma t)}{x''_d + \bar{\alpha}x'_{dg}}; \quad (18)$$

$$I_q = -\frac{E_o \sin \gamma t}{(x'_{q'} + x'_{qg})\gamma},$$

де $E_o = I_{fo} \left(x_{ad} - \frac{x_{ad}^2}{x_{rd}} \right)$ – електрорушійна сила ге-

нератора в режимі неробочого ходу в системі відно-
сних одиниць $E_o=1$.

Співвідношення (18) дозволяють знайти проек-
ції напруги на вісі d та q .

Виходячи з (1) та враховуючи всі припущення,
які були зроблені в процесі виводу співвідношень
(13), отримуємо

$$U_d = E_o \sin \gamma t \left[\frac{\gamma x_d''}{x_d'' + \bar{\alpha} x_{dg}'} + \frac{x_q'}{x_q' + x_{qg}'} \right]; \quad (19)$$

$$U_q = -\frac{E_o \cos \gamma t}{x_q' + x_{qg}'} x_q' - \frac{E_o x_d''}{x_d'' + \bar{\alpha} x_{dg}'} (1 - \cos \gamma t).$$

Отримані аналітичні вирази (18) та (19) добре
відтворюють зміст процесів, що відбуваються під
час пуску асинхронного двигуна, коли він отримує
живлення від синхронного генератора, що працює в
режимі неробочого ходу.

Так струми I_d та I_q визначаються електрорушій-
ної силою неробочого ходу й відповідними надпе-
рехідними й перехідними опорами генератора і дви-
гуна, напруги U_d та U_q , в свою чергу, урівноважу-
ють падіння напруги на вказаних реактивних опорах
генератора та двигуна.

При виконанні розрахунків кидків струмів та
провалів напруг з використанням співвідношень
(18) та (19) перехідний опір двигуна x_{*g}' визначають
величиною, яка обернена пропорційна кратності
пускового струму I_* .

При цьому при визначенні значень x_{dg}' та x_{qg}'
величину x_{*g}' необхідно привести до базисних ве-
личин, за які зручно вибирати потужності та номі-
нальні значення напруги генератора

$$x_{dg}' = x_{qg}' = x_{*g}' \frac{P_\Gamma}{P_g} \left(\frac{U_g}{U_\Gamma} \right)^2, \quad (20)$$

де P_g, P_Γ – потужності двигуна та генератора;

U_g, U_Γ – напруга двигуна та генератора.

Висновки

1. Отримані аналітичні співвідношення для ви-
значення пускових струмів й провалів напруги до-
зволяють з достатньою для інженерної практики
точністю провести розрахунки пускових режимів
роботи дугостаторного синхронного двигуна з коро-
ткозамкненим ротором який отримує живлення від
генератора обмеженої потужності.

2. Результати розрахунків пускових струмів та
провалів напруги дозволяють обґрунтувати установ-
ки релейного захисту електропривода антен радіо-
локаційних станцій.

Список літератури

1. Кононов Б.Т. *Захист частотно регульованого електропривода, на базі електричного двигуна з короткозамкненим ротором* / Б.Т. Кононов, А.О. Нечаус, Н.М. Рябуха // *Системи обробки інформації*. – Х.: ХУ ПС, 2014. – Вип. 6(122). – С. 39-42.
2. Кононов Б.Т. *Системы управления электроснабжением и электроприводом: учебник* / Б.Т. Кононов, Б.Ф. Самойленко. – Х.: МО СССР, 1990. – 425 с.
3. *Электричні машини: підручник* / Б.Т. Кононов, Г.І. Лагутін, О.Б. Котов, А.О. Нечаус; за ред. Б.Т. Кононова. – Х.: МОН Україн., ХУ ПС, 2015. – 496 с.
4. Фридкин П.А. *Безредукторний дугостаторний електропривод* / П.А. Фридкин. – Л., 1961. – 136 с.
5. Веников В.А. *Переходные электромеханические процессы в электрических системах* / В.А. Веников. – М. - Л.: Энергия, 1964. – 380 с.
6. 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.

Надійшла до редколегії 29.04.2015

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

РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БРОСКОВ ТОКОВ И ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПУСКА ДУГОСТАТОРНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Б.Т. Кононов, Н.М. Рябуха

В статье приводятся аналитические соотношения для определения бросков токов и провалов напряжения при пуска дугостаторного асинхронного двигателя с коротко замкнутым ротором.

Ключевые слова: дугостаторный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, броски токов и провалы напряжения, во время пуска двигателя, источник ограниченной мощности.

THE CALCULATED RATIO DETERMINE THE INRUSH CURRENTS AND VOLTAGE DIPS WHEN STARTING INDUCTION MOTOR SQUIRREL CAGE

В.Т. Kononov, N.M. Ryabukha

The article provides a determine the inrush currents and voltage dips when starting induction motor squirrel cage.

Keywords: dycostatorний асинхронний starting induction motor squirrel cage, throws of currents and failures of ten- sion, during starting of engine, source of the limited power.