

УДК 004.942: 621.313 (045)

Красношапка Н.Д., к.т.н.,
Тихонов В.В., к.т.н.,
Захарченко В.П., к.т.н.,
Мазур Т.А., к.т.н.,
Тачиніна О.М., к.т.н.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ З ПІДВИЩЕНИМ ПУСКОВИМ МОМЕНТОМ

Національний авіаційний університет

Розглянуті питання побудови математичної моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором з підвищеним пусковим моментом. Особливістю запропонованої моделі є врахування змінних параметрів роторного контуру, які обумовлені явищем «витискання струму» та застосуванням масивних феромагнітних екранів частин роторної обмотки поза робочим повітряним зазором.

Вступ

В сучасних умовах постійного зростання цін на енергоносії актуальними є питання підвищення енергетичної ефективності обладнання. Майже половина виробленої електричної енергії перетворюється в механічну за допомогою електричних двигунів, найбільш поширеними серед яких є асинхронні (АД) з короткозамкненим ротором. Вони мають найменші масо-габаритні показники і вартість та є найбільш надійними та простими в процесі експлуатації, порівняно з іншими типами електричних машин. Проте для даного типу електромеханічних перетворювачів характерні відносно низькі динамічні та енергетичні показники в пускових режимах. Даний факт обумовлений перш за все порівняно малою величиною пускового моменту (у загальнопромислових двигунів звичайного виконання він не перевищує двократного номінального значення) та значними пусковими струмами, які в 6–8 раз перевищують номінальні.

Для покращення енергетичних характеристик АД, які працюють з частими пусками, пропонуються різні технічні рішення, які дозволяють збільшувати величину опору роторного контуру під час пуску. Одним з них може бути застосування масивних феромагнітних екранів короткозамкненої обмотки ротора поза межами робочого повітряного зазору [1]. При відповідному виборі параметрів екранів такий модифікований двигун дозволяє збільшити величину пускового моменту при обмеженні величини пускових струмів, що призводить до покращення динамічних та енергетичних показників в пускових режимах. На рис. 1 для порівняння наведені механічні

та струмові характеристики асинхронного двигуна типу 4А160S2У3 звичайного виконання (пунктирні лінії) та модифікованого (суцільні лінії).

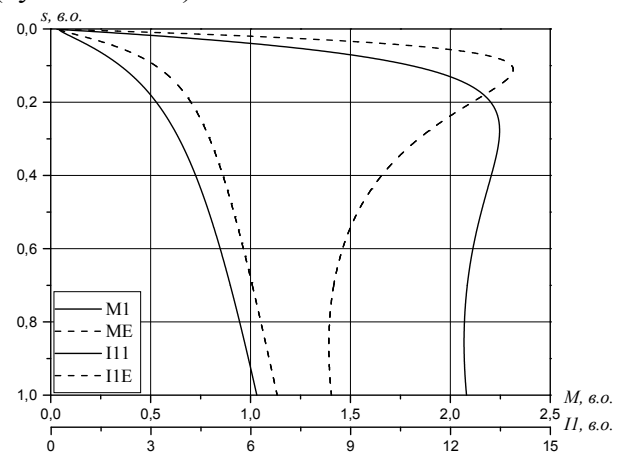


Рис. 1. Механічні та струмові характеристики АД.

Особливості протікання електромагнітних процесів в таких електричних машинах потребують внесення відповідних змін їх в математичні моделі, які дозволяють аналізувати електромеханічні та енергетичні процеси.

Аналіз досліджень і публікацій

З врахуванням відомих припущень для узагальненої електричної машини [2] АД може бути представлений ідеалізованою двофазною машиною, що дозволить зменшити кількість диференціальних рівнянь в математичній моделі, які необхідно розв'язувати одночасно. Із застосуванням нерухомої системи координат α, β , жорстко зв'язаною із статором, рівняння АД з короткозамкненим ротором матимуть вигляд (1):

$$\left. \begin{aligned}
 u_{1\alpha} &= r_1 i_{1\alpha} + L_1 \frac{di_{1\alpha}}{dt} + L_0 \frac{di'_{2\alpha}}{dt}; \\
 u_{1\beta} &= r_1 i_{1\beta} + L_1 \frac{di_{1\beta}}{dt} + L_0 \frac{di'_{2\beta}}{dt}; \\
 0 &= r'_2 i'_{2\alpha} + \frac{d}{dt}(L'_2 i'_{2\alpha}) + p\omega L'_2 i'_{2\beta} + L_0 \frac{di_{1\alpha}}{dt} + p\omega L_0 i_{1\beta}; \\
 0 &= r'_2 i'_{2\beta} + \frac{d}{dt}(L'_2 i'_{2\beta}) - p\omega L'_2 i'_{2\alpha} + L_0 \frac{di_{1\beta}}{dt} - p\omega L_0 i_{1\alpha}; \\
 M &= pL_0 (i_{1\beta} i'_{2\alpha} - i_{1\alpha} i'_{2\beta}); \\
 M - M_c &= J_\Sigma \frac{d\omega}{dt},
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де: $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$, $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ – напруги та струми фаз α і β статора; r_1 , L_1 – активний опір та власна індуктивність обмотки статора; r'_2 , L'_2 – приведені активний опір та власна індуктивність роторного контуру; L_0 – взаємна індуктивність обмоток статора та ротора; p – число пар полюсів машини; ω – швидкість обертання ротора АД; M – електромагнітний момент.

Переважаюча кількість асинхронних машин, що застосовуються в промисловості мають короткозамкнений ротор типу «біляча клітка». Ротор такої конструкції для збільшення величини моменту в процесі пуску має поглиблені пази, а стрижні ротора виконуються прямокутної форми, тому коли на початку процесу пуску частота струмів ротора дорівнює частоті струмів в статорній обмотці, в стрижнях проявляється ефект «витискання струму» [3]. Внаслідок проявлення поверхневого ефекту струм в стрижні витискається в напрямку повітряного зазору, і активний опір стрижня збільшується. Одночасно з цим зменшується величина індуктивного опору розсіяння стрижня внаслідок послаблення магнітного потоку в нижній частині. При розгоні АД частота струмів в роторі зменшується і відповідно змінюються параметри роторного контуру r'_2 , і L'_2 . Зміна цих параметрів може бути врахована при відомій геометрії пазів та стрижнів ротора [4], проте не завжди така інформація є доступною для конкретного двигуна.

Іншою проблемою є врахування в математичній моделі параметрів модифікованого ротора. Частота струмів обмотки ротора прямо пропорційна величині ковзання s ($s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$, ω_0 – швидкість обертання магнітного поля). Тому по мірі розгону двигуна із зменшенням частоти струмів в роторній обмотці відповідно буде зменшуватись глиби-

на проникнення електромагнітної хвилі в феромагнітний масив екрану. Це призведе до зменшення величини додаткового опору, що вноситься в роторну обмотку. Така конструкція ротору АД дозволяє підвищити величину пускового моменту машини за рахунок збільшення опору ротора, а після завершення процесу пуску, цей опір стає незначним, що не призводить до значного зростання величини втрат енергії в усталеному режимі роботи.

Постановка завдання

Метою даної статті є розробка математичної моделі АД, яка дозволила би проводити розрахунки перехідних процесів з корекцією параметрів роторного контуру без конкретних даних щодо геометричних розмірів стрижнів та пазів. Окрім того необхідним є доопрацювати математичну модель для проведення розрахунків перехідних процесів в модифікованій машині з масивними феромагнітними екранами короткозамкненої обмотки, коли параметри моделі також є змінним в залежності від швидкості обертання і, відповідно, частоти струмів ротора.

Математична модель АД з торцевими феромагнітними екранами короткозамкненої обмотки при змінних параметрах роторного контуру

Для врахування зміни параметрів роторного контуру внаслідок явища «витискання струму» в стрижнях при змінній частоті струмів ротора була проведена серія розрахунків струмів та моментів машини за Т-виглядовою схемою заміщення [3], та емпірично визначена залежність приведених активного та реактивного опору від величини ковзання, виходячи із умови, що розрахункові значення струму і моменту в номінальному, критичному та пу-

сковому режимі дорівнюють паспортним даним АД, які були взяті із довідникової літератури [5]:

$$r'_2 = r'_{2н} (1 + 0,25s^2);$$

$$x'_2 = x'_{2н} (1 - 0,75\sqrt{s}),$$

де $r'_{2н}$ і $x'_{2н}$ – паспортні значення приведених активного та реактивного опорів.

На рис. 2 наведені механічні характеристики АД 4А160S2У3 при розрахунках за схемою заміщення без врахування зміни опорів роторного контуру в залежності від величини ковзання (лінія 2) та із врахуванням цієї зміни за наведеним законом (лінія 1). Механічна характеристика 1 відповідає паспортним значенням машини.

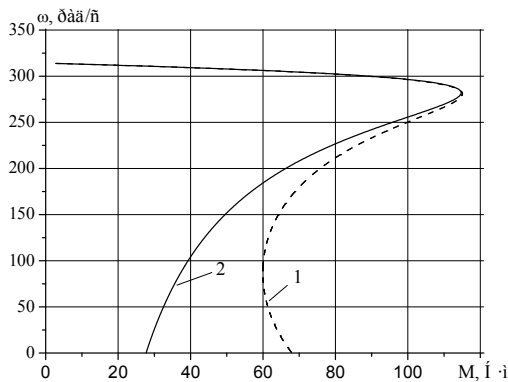


Рис. 2. Механічні характеристики АД 4А160S2У3 при врахуванні зміни величини опорів кола ротора

Особливості електромагнітних процесів, що протікають в роторному контурі з екрануванням частин короткозамкненої обмотки, обумовлені появою в роторному контурі додаткової електрорушійної сили (ЕРС), створеною спільною дією магніто-рушійних сил (МРС) струмів роторної обмотки і вихрових струмів феромагнітних екранів. Дана ЕРС виявляється пропорційною струму роторного контуру і за законом електромагнітної індукції направлена проти причини, що її викликала. Ця еквівалентна внесена ЕРС збільшується із зростанням ковзання ротора щодо поля і істотно обмежує струм ротора при великих ковзаннях, що приводить до обмеження величини струму, споживаного АД з мережі.

Еквіваленту внесеної ЕРС E_e можна представити у вигляді двох складових, що є падіннями напруги на активному r_e і індуктивному x_e еквівалентних опорах феромагнітних екра-

нів:

$$-E_e = r_e I_2 + jx_e I_2.$$

«Т»-виглядова схема заміщення АД із врахуванням еквівалентних опорів екранів наведена на рис. 3.

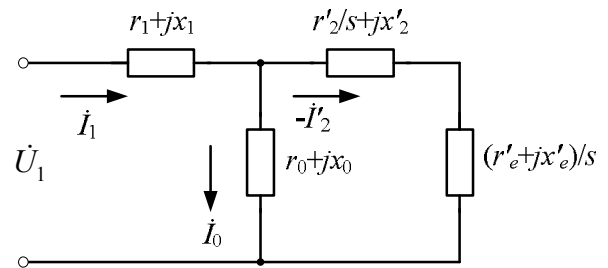


Рис. 3. «Т»-виглядова схема заміщення АД із врахуванням еквівалентних опорів феромагнітних екранів

Таким чином, в контур ротора вводиться активно-індуктивний опір, обумовлений поглинанням енергії феромагнітними екранами, падіння напруги на якому від струму роторного контуру еквівалентно наведеної в ньому ЕРС E_e . Величини активного (r'_e) і індуктивного (x'_e) еквівалентних опорів істотно нелінійні і залежать від ковзання ротора щодо магнітного поля статора.

Алгоритм визначення еквівалентних внесених опорів масивних феромагнітних екранів частин роторної обмотки наведений в статті [6]. Розрахунок базується на визначенні величин активної і реактивної складових електромагнітної потужності, що поглинаються масивними феромагнітними елементами роторного контуру.

Масивний феромагнітний масив поділяється тонкі шари товщиною Δ , на кожному з яких визначаються активні і реактивні складові вектора Умова-Пойнтінга, який визначає потужність та напрям потоку електромагнітної енергії, що проходить через одиницю поверхні, перпендикулярної напрямку руху потоку енергії. Результуючі значення потужностей, що поглинаються масивними екранами, визначаються як сума елементарних складових цих потужностей вздовж радіального розміру екранів.

Величини опорів можуть бути визначені за співвідношеннями:

$$\left. \begin{aligned} r'_e &= 8\alpha_p \sigma \sqrt{\frac{\mu_0 \omega_0}{2\gamma}} \frac{m_1 (k_{об1} w_1)^2 \Delta}{\pi} \sum_{i=1}^n \left(K_1 \sqrt{\frac{\mu_{si} s}{D_i^2}} \right); \\ x'_e &= 8\alpha_q \sigma \sqrt{\frac{\mu_0 \omega_0}{2\gamma}} \frac{m_1 (k_{об1} w_1)^2 \Delta}{\pi} \sum_{i=1}^n \left(K_2 \sqrt{\frac{\mu_{si} s}{D_i^2}} \right); \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де $\alpha_p = 1,4$, $\alpha_q = 0,8$ – поправочні коефіцієнти, які враховують змінність магнітної проникності в товщині екранів; $\sigma \approx 1,2$ – коефіцієнт внеску опору від екранування короткозамикаючих кілець; μ_0 – магнітна постійна; γ – електрична провідність сталі; m_1 – кількість фаз статора; $k_{об1}$ – обмотковий коефіцієнт статора; w_1 – кількість витків фази статора; μ_{si} – відносна магнітна проникність на межі i -го тонкого шару; D_i – діаметр струмового шару. Коефіцієнти K_1 , K_2 залежать від геометричних розмірів екранів та еквівалентної глибини проникнення електромагнітної хвилі в феромагнітний масив і дорівнюють:

$$K_1 = \frac{\operatorname{th} \xi + \operatorname{tg}^2 \xi \operatorname{th} \xi + \operatorname{th}^2 \xi \operatorname{tg} \xi - \operatorname{tg} \xi}{1 + \operatorname{th}^2 \xi \operatorname{tg}^2 \xi},$$

$$K_2 = \frac{\operatorname{th} \xi + \operatorname{tg}^2 \xi \operatorname{th} \xi - \operatorname{th}^2 \xi \operatorname{tg} \xi + \operatorname{tg} \xi}{1 + \operatorname{th}^2 \xi \operatorname{tg}^2 \xi},$$

де $\xi = \frac{l}{2\delta_e} = \frac{l}{2} \sqrt{\frac{\omega \mu_i \gamma}{2}}$ – відношення половини

осьової товщини феромагнітного екрана l до еквівалентної глибини проникнення в масив електромагнітної хвилі δ_e .

Магнітна проникність феромагнітного масиву екрана є функцією струму ротора, який залежить від величини ковзання, тому при розрахунках еквівалентних параметрів феромагнітних екранів в процесі пуску АД необхідно застосовувати ітераційну процедуру, при якій на першому кроці при даному ковзанні задаються значення струму ротора при нульових величинах еквівалентних опорів з подальшим уточненням струму і визначенням значень опорів.

Таким чином, в математичній моделі АД (1) параметри r'_2 , і L'_2 є змінними і залежать як від швидкості обертання ротора ω , так і від струму роторного контуру I'_2 . Тому при розрахунках часових та енергетичних показників АД з торцевими феромагнітними екранами фрагментів роторної обмотки за системою диференціальних рівнянь (1), необхідно на кожному кроці інтегрування диференціальних рівнянь рівноваги напруг статорних та роторних

контурів визначати величину еквівалентних опорів екранів. Визначення величини еквівалентних опорів і уточнення миттєвих значень струмів статорного і роторного контурів передбачає організацію ітераційних процедур на кожному кроці інтегрування, що істотно ускладнює алгоритм розрахунку і призводить до значних витрат машинного часу.

Одним з шляхів скорочення часу розрахунку перехідного процесу пуску АД з торцевими феромагнітними екранами фрагментів роторної обмотки є попереднє формування масивів значень еквівалентних активного і реактивного опорів екранів у функції модуля роторного струму по співвідношеннях (2) відповідно до методики їх розрахунку для усталеного режиму роботи [6].

У початковий момент пуску АД кратності струмів статорного і роторного контурів (по відношенню до номінальних значень струмів) істотно перевищують кратності пускових струмів двигуна, які визначаються розрахунком схеми заміщення (рис. 3) при ковзанні $s = 1,0$ при номінальній напрузі. З цієї причини, з метою формування масивів еквівалентних параметрів, розрахунок струмів по схемі заміщення (рис. 3) проводився для підвищеного рівня фазної напруги (400 В при номінальному значення 220 В) з кроком по ковзанню $5 \cdot 10^{-4}$ відносних одиниць, що забезпечило 2000 розрахункових значень струмів і відповідних ним значень активного і реактивного опорів, внесених до роторного контуру АД феромагнітними екранами.

При такому підході алгоритм інтегрування диференціальних рівнянь рівноваги напруги контурів статорів і роторних АД системи рівнянь (1) припускає рівність нулю значень еквівалентних опорів екранів на першому кроці інтегрування. Після розрахунку значення модуля струму ротора $I'_2 = \sqrt{(I'_{2\alpha})^2 + (I'_{2\beta})^2}$ на першому кроці в масивах параметрів відшукуються значення активного і реактивного еквівалентних опорів екранів, максимально відповідних цьому значенню струму. Дані значення еквівалентних опорів змінюють величини роторних опорів математичній моделі

АД (1) на другий крок інтегрування, тобто, організовується корекція параметрів ротора АД за значенням струму ротора на попередньому кроці. При достатньо малому часовому кроці інтегрування ($2 \cdot 10^{-6}$ с) даний алгоритм забезпечує високу точність результатів розрахунку параметрів перехідного режиму пуску АД з феромагнітним екрануванням фрагментів роторної обмотки. Одночасно з високою точністю розрахунку, цей алгоритм істотно знижує час обчислень в порівнянні з алгоритмами, що передбачають ітераційну процедуру уточнення параметрів перехідного режиму пуску на кожному кроці інтегрування.

Висновки

Проведені дослідження показали, що у випадках, коли не відомі геометричні розміри пазів та обмотки ротора АД, можна врахувати зміну величин активного і реактивного опорів роторного контуру за допомогою аналітичних залежностей, параметри яких визначаються шляхом проведення розрахунків механічної та струмової характеристик за схемою заміщення, забезпечуючи виконання умов рівності розрахункових і паспортних значень струму і моменту в номінальній і критичній точках, а також в пусковому режимі.

Застосування масивних феромагнітних екранів фрагментів роторної обмотки дозволяє покращити динамічні та енергетичні показники АД в пускових режимах за рахунок збільшення величини пускового моменту. Встановлено, що застосування феромагнітних екранів також призводить до появи змінних параметрів математичної моделі АД. Визначення величини еквівалентних внесених опорів масивних феромагнітних екранів потребує застосування ітераційної процедури розрахунків на кожному кроці інтегрування. Для спрощення математичної моделі і зниження витрат часу запропоновано попередньо розраховувати масив значень еквівалентних опорів роторної обмотки в функції струму, а при дослідженні динамічних процесів на підставі системи рівнянь (2) після визначення величини струму ротора вибираються значення опорів, що відповідають струму, найближчому до розрахованого.

В сучасних системах електроприводів для

обмеження величини пускових струмів найчастіше застосовують так звані пристрої плавного пуску, принцип дії яких базується на зниженні величини прикладеної напруги під час пуску. Проте такі системи призводять до значного зменшення пускового моменту, величина якого пропорційна квадрату прикладеної напруги. Застосування АД із підвищеним пусковим моментом дозволяє розширити діапазон застосування таких пристроїв особливо при живленні від автономних джерел живлення.

Запропонована в статті математична модель АД з підвищеним пусковим моментом дозволяє проводити дослідження динамічних режимів та енергетичних характеристик при розробці нових систем електроприводів, здатних реалізовувати пуск АД від автономних і бортових джерел живлення та джерел обмеженої потужності.

Список літератури

1. Борисенко В.Е. Алгоритм расчета рабочих и пусковых характеристик асинхронного двигателя с частотно-зависимыми параметрами ротора / В.Е. Борисенко, Н.Д. Красношапка // Тр. Научного центра Военно-воздушных сил. – 1997. – Вып. 1. – С. 183–186.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: [Учеб. для вузов] / И.П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
4. Попович О.М. Математична модель для дослідження режимів асинхронних машин електромеханотронних систем / О.М. Попович // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Зб. наук. праць. – 2010. – Вип. 25. – С. 89–97.
5. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
6. Красношапка Н.Д. Особенности определения параметров динамической модели асинхронного двигателя с ферромагнитными экранами частей короткозамкнутой роторной обмотки / Н.Д. Красношапка // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Електротехніка. – 1999. – С. 98–104.