

УДК 621.313

МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Росінська Г. П.

Київський національний університет технологій та дизайну

В статті зроблений аналіз існуючих моделей асинхронного двигуна, що використовується в електромеханічній системі регульованого електроприводу.

Ключові слова: модель асинхронного двигуна, електромеханічна система, регульований електропривод

Концепція енергоефективності відомої електротехнічної фірми *Schneider Electric*: «Енергоефективність не відрізняється від інших наук, і при її вивченні необхідно використовувати раціональний підхід із загальновідомим порядком дій визначення, вимірювання, аналіз, поліпшення та управління. Неможливо поліпшити те, що не можна виміряти».

Таким чином, сьогодні одним із шляхів вимірювання, з метою подальшого поліпшення властивостей як для об'єктів, що експлуатуються так і для об'єктів, які проектується є математичне і комп'ютерне моделювання пристроїв, систем і процесів. Моделювання дозволяє скоротити витрати на макетування та випробування, прискорити процес накопичення необхідної інформації і є в даний час основним інструментом дослідження, яке дозволяє прорахувати різні режими роботи електротехнічного пристрою і передбачити його поведінку в аварійних режимах роботи. Воно поєднує в собі малі витрати на проведення наукових досліджень та високу ефективність.

Але від точності математичної моделі та її комп'ютерної реалізації багато в чому залежать якісні та кількісні показники об'єктів, що проектується, а від достовірності, адекватності моделі існуючого об'єкта - його характеристики в різних режимах роботи, то слід визнати, що сьогодні є актуальним питання розробки різних методологій складання і використання моделей, зручних для використання на сучасному рівні розвитку комп'ютерної техніки.

В даний час для моделювання електричного приводу, електротехнічних, електромеханічних та електронних пристроїв використовують програмні пакети систем автоматичного проектування (САПР), *MatLab Simulink*, *Electronics Workbench*,

Micro-Cap, *OrCAD* та інші. Сьогодні ці САПР відкривають широкі можливості для інженера-дослідника і вченого завдяки наявності широкої бібліотечної бази елементів та візуальному принципу програмування. Більшість з цих пакетів моделювання електричних схем засноване на різних модифікаціях програми моделювання аналогових пристроїв *SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)*.

Одним з важливих, багатогранних і складних елементів енергетичних систем, наприклад, електрифікованого залізничного транспорту є електричний привід (ЕП). Як відомо, поняття ЕП включає в себе певну кількість складових частин [1]. Кожна із складових частин ЕП може бути представлена чималою різноманітністю варіантів. З практикою моделювання ЕП можна ознайомитися сьогодні у багатьох роботах.

Підвищення якості розробки та експлуатації електропривода, за рахунок створення фонду імітаційних моделей пристроїв та систем, що входять в його склад, а також покращення програм, методик розрахунку, дослідження з їх допомогою працездатності і якості функціонування схем електропривода в різних режимах роботи є сьогодні актуальним.

Постановка завдання

Враховуючи актуальність напрямку, завданням досліджень стало проведення аналізу існуючих підходів до розробки моделей асинхронних двигунів.

Результати досліджень

Будемо виходити з того, що різні математичні моделі (ММ) асинхронного двигуна (АД), являють собою різні види формального опису одних і тих самих явищ. Більш того, різні форми запису одних і тих же диференціальних рівнянь дають ті чи інші зручності та переваги при використанні в різних сферах техніки (наприклад, аналіз процесів) або при складанні комп'ютерних моделей в різних програмних середовищах.

Асинхронний двигун наприклад, може бути представлений у вигляді ММ з прийнятими допущеннями [5]. Авторами для аналізу перехідних режимів використана модель, електричні змінні якої представлені в нерухомій трифазній системі координат статора. Ця модель складається з трьох рівнянь напруги статора, трьох рівнянь напруги ротора, трьох рівнянь потокозчеплення статора, трьох рівнянь потокозчеплення ротора, рівняння електромагнітного моменту і рівняння руху.

$$\begin{cases} \frac{di_{ra}}{dt} = \frac{1}{(L_r + L_M)} \cdot \left[-R_r \cdot i_{ra} - \frac{\omega_{ep} \cdot P}{\sqrt{3}} \cdot (i_{rb} \cdot (L_r + L_M) + i_{sb} \cdot L_M - i_{rc} \cdot (L_r + L_M) - i_{sc} \cdot L_M) \right] - \frac{L_M}{(L_r + L_M)} \cdot \frac{di_{sa}}{dt} \\ \frac{di_{rb}}{dt} = \frac{1}{(L_r + L_M)} \cdot \left[-R_r \cdot i_{rb} - \frac{\omega_{ep} \cdot P}{\sqrt{3}} \cdot (i_{rc} \cdot (L_r + L_M) + i_{sc} \cdot L_M - i_{ra} \cdot (L_r + L_M) - i_{sa} \cdot L_M) \right] - \frac{L_M}{(L_r + L_M)} \cdot \frac{di_{sb}}{dt} \\ \frac{di_{rc}}{dt} = \frac{1}{(L_r + L_M)} \cdot \left[-R_r \cdot i_{rc} - \frac{\omega_{ep} \cdot P}{\sqrt{3}} \cdot (i_{ra} \cdot (L_r + L_M) + i_{sa} \cdot L_M - i_{rb} \cdot (L_r + L_M) - i_{sb} \cdot L_M) \right] - \frac{L_M}{(L_r + L_M)} \cdot \frac{di_{sc}}{dt} \end{cases}$$

$$M_{\Delta} = \frac{P}{\sqrt{3}} \cdot L_M \cdot [(i_{sa} \cdot i_{rc} + i_{sb} \cdot i_{ra} + i_{sc} \cdot i_{rb}) - (i_{sa} \cdot i_{rb} + i_{sb} \cdot i_{rc} + i_{sc} \cdot i_{ra})]$$

$$\frac{d\omega_{ep}}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_{\Delta} - M_C)$$

Сьогодні існує програмне забезпечення для проведення розрахунків, такі як MATHCAD, MATLAB, MAPLE, які спрощують процес математичної обробки інформації.

Ефективність найбільш поширених частотно-керованих асинхронних електроприводів (АЕП) визначається рівнем втрат в асинхронних двигунах (АД). Значну частину часу регульовані АЕП можуть працювати у нестационарних режимах. Дуже часто для аналізу електромагнітних, механічних, енергетичних показників як електроприводів взагалі, так і для АД використовуються ММ, які базуються на рівняннях Парка-Горєва [3, 4]. Такі ММ мають недолік, це нехтування втратами в сталі магнітопроводу, які можуть складати від 20-40 % від загальних втрат в двигуні. І як результат це приводить до похибок у розрахунках енергетичних та теплових показників АД.

З точки зору підвищення точності відображення реальних процесів цікаві моделі АД, які дозволяють враховувати втрати в сталі, а також вплив насичення магнітного кола. Про це ж свідчить велика кількість публікацій [5-9]. Крім того в технічній літературі вважається, що Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна (АД) дає в більш точні результати розрахунку, ніж Г-подібна [10] особливо для малопотужних АД. Вважається, що при Т-подібній схемі заміщення паралельне з'єднання в контурі намагнічування r_m і L_m дає більш точну з точки зору фізики картину процесів в електричній машині, ніж послідовне з'єднання r_m і L_m .

В 2001 році була розроблена модель АД в середовищі OrCAD. Вона була побудована на основі структурних схем, отже всі сигнали в ній представлялися потенціалами, а поширення сигналів було односпрямованим. Ці обставини ускладнювали використання моделі АД в електричних схемах ЕП, так як, наприклад, модель АІН побудована в середовищі OrCAD на основі елементів (активних опорів,

індуктивностей, ємностей, ключів, діодів), має передбачати існування двонаправлених сигналів струмів та напруг.

Тим не менш, за допомогою використання залежних джерел струму і напруги (ітун, інут) використання моделі АД успішно здійснювалося, але було б зручніше просто приєднувати клеми АД до клем АІН без додаткових операцій. Іншим недоліком комп'ютерної моделі АД 2001 була відсутність можливості з'єднати обмотки статора інакше, ніж за схемою «зірка». Крім цього модель 2001 описувала тільки АД з короткозамкненим ротором і не могла застосовуватися для АД з фазним ротором.

В 2006-2007 рр. були розроблені кілька варіантів схемотехнічної комп'ютерної моделі трифазного АД в САПР OrCAD, які володіють всіма можливостями моделей 2001 року (можуть враховувати несиметрію параметрів фаз АД), усунуті зазначені недоліки, крім того, передбачена можливість розрахунку кута повороту ротора АД, що може бути корисно, якщо навантаження на валу залежить від кутового положення (поршневий компресор).

Моделі АД 2006 мають шість виводів обмотки статора і шість виводів обмотки ротора для двонаправленого обміну сигналами струму і напруги зі схемою ЕП. При створенні комп'ютерної моделі АД в OrCAD – САПР, призначеної в основному для розробки та імітаційного схемотехнічного моделювання електронних і електротехнічних пристроїв, було поставлено завдання:

- забезпечити двонаправлене протікання електричного струму в схемах, що з'єднуються, у тому числі наскрізного струму між ними;
- формування такої структури комп'ютерної моделі, щоб її можна було використовувати як універсальний шаблон, в який можна підставляти різні значення змінних (параметрів АД), задаючи їх в одному місці для всіх рівнянь. При цьому отримати комп'ютерну модель придатну для опису АД як з короткозамкненим, так і з фазним ротором в будь-якому з чотирьох квадрантів. Обмотки фаз можуть з'єднуватися за схемами трикутник, зірка, незалежно кожна приєднується до своєї напруги, мати будь-яку іншу схему з'єднань між собою або з джерелом живлення.

Завдання вирішені [10] шляхом поєднання при побудові моделі АД двох підходів: схемотехнічного для електричної частини і методу структурних схем для магнітної та механічної частин. В цілому комп'ютерна модель АД згорнута в ієрархічний блок [10], для якого заданий список змінних (параметрів АД). В одному

проекті OrCAD копіюванням можна отримати необхідну кількість ієрархічних блоків, для кожного з яких можливо задати унікальні значення параметрів. Як датчики і для введення сигналів у складі моделі АД використані елементи типу ИНУН, ИНУТ, ИТУН. У цих скороченнях: I – джерело; У – керований; Н – напруга; Т – струм. Наприклад, ИНУТ – джерело напруги, керований струмом.

На рис. 1 представлено графічне зображення комп'ютерної моделі фази А обмоток статора і ротора АД.

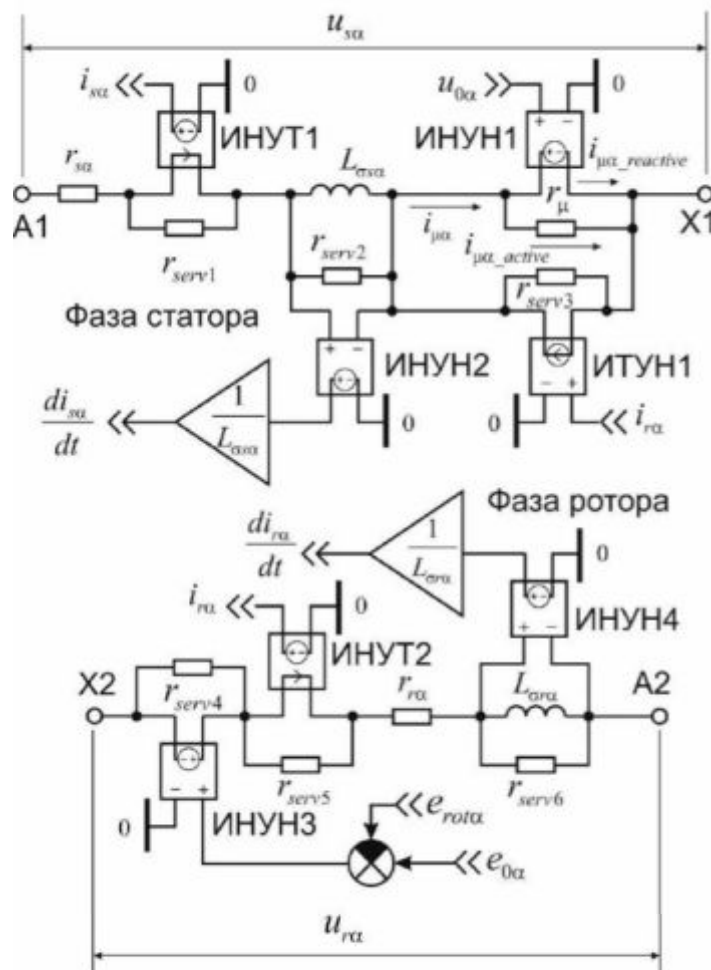


Рис. 1. Графічне зображення комп'ютерної моделі фази А обмоток статора і ротора АД

Де $L_{\sigma sa}$ – індуктивність розсіювання фази обмотки статора; $L_{\sigma ra}$ – індуктивність розсіювання фази обмотки ротора. Параметри ротора приведені до обмотки статора. *ИНУТ1* виконує функцію датчика струму фази статора i_{sa} , аналогічно *ИНУТ2* – функцію датчика струму фази ротора i_{ra} . *ИТУН1* служить для введення в схему струму i_{ra} - наведеного струму фази ротора. *ИНУН1* вводить в ланцюг намагнічування фази напруга u_{0a} . Аналогічну функцію виконує *ИНУН3* – вводить у ланцюг обмотки ротора різницю

ЕРС гілки намагнічування і ЕРС обертання, тобто величину падіння напруги. *ИНУН2* є датчиком різниці потенціалів на індуктивності $L_{\sigma\alpha}$. Подальша обробка цього сигналу напруги шляхом ділення на значення $L_{\sigma\alpha}$ дає похідну струму статора фази А. За допомогою *ИНУН4* виконується аналогічна операція з метою виділення сигналу напруги шляхом ділення на значення $L_{\sigma\alpha}$ дає похідну струму ротора.

В комп'ютерній моделі на рис.2. використані сигнали ЕРС гілки намагнічування (1) та ЕРС обертання фаз ротора.

$$e_{0\alpha} = -u_{0\alpha}; e_{0\beta} = -u_{0\beta}; e_{0\gamma} = -u_{0\gamma}. \quad (1)$$

$$e_{rota} = \frac{(\Psi_{r\beta} - \Psi_{r\gamma})p\omega_r}{\sqrt{3}}; e_{rot\beta} = \frac{(\Psi_{r\gamma} - \Psi_{r\alpha})p\omega_r}{\sqrt{3}}; e_{rot\gamma} = \frac{(\Psi_{r\alpha} - \Psi_{r\beta})p\omega_r}{\sqrt{3}}. \quad (2)$$

Активні опори r_{serv} мають великий номінал, наприклад 10 МОм. Вони введені в службових цілях: практично не впливаючи на чисельні результати розрахунку, стабілізують хід рішення (моделювання) за рахунок збереження ланцюга струму (фізичний сенс - шлях протікання струмів витоку), що особливо важливо при дискретній зміні опору ланцюгів живлення АД, наприклад, при живленні від напівпровідникового перетворювача частоти або при обриві фази.

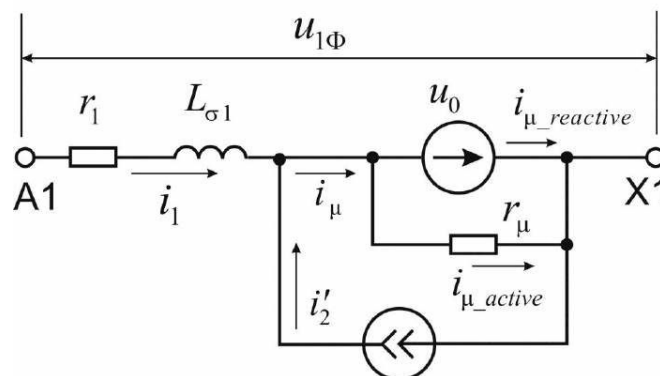


Рис. 2. Графічне пояснення фізичного сенсу комп'ютерної моделі фази статора АД

Комп'ютерна модель фази статора АД, що зображена на рис. 1 пояснюється рис. 2 з використанням традиційних позначень, що використовуються в теорії електричних машин [3, 4].

Багаторазові обчислювальні експерименти виявили, що характер перехідного процесу пуску АД в моделі істотно залежить від величини намагнічування активного опору r_{μ} , який відповідає за величину втрат у сталі АД. Ця величина є одним з критеріїв

адекватності комп'ютерної моделі реальному АД. Крім того, величина r_{μ} відчутно впливає на характеристики встановленого процесу АД.

Висновки

Аналізуючи результати роботи, можемо зробити такі висновки:

- розглянута можливість розширення можливостей пакету OrCAD, як більш точної САПР (бо моделювання в програмі здійснюється на базі моделей реальних фізичних об'єктів);
- аналіз робіт по моделюванню АД показує, що модель асинхронного двигуна може мати математичні рівняння, що складаються з 2-х частин електричної та механічної. Електрична частина реалізується просто в пакеті OrCAD за допомогою стандартних елементів. Тому постає питання розробки нових підходів до еквівалентування механічної частини ММ електричними колами;
- створити бібліотеку моделей АД в пакеті OrCAD, які дозволили б усунути недоліки вже існуючих моделей.

ЛІТЕРАТУРА

1. Росінська Г. П. Моделювання електромеханічних систем з асинхронними двигунами / Г. П. Росінська // Вісник КНУТД. – 2012. – № 6 (68). – С. 43-49.
2. Стаценко А. В. Модель асинхронного двигателя для анализа динамики электропривода с частотно-токовым управлением на основе следящих импульсных регуляторов тока / А. В. Стаценко, Н. С. Комаров, Л. И. Мазуренко // Праці інституту електродинаміки НАН України. Зб.наук.праць. – 2005. – № 1 (10). – С. 69-79.
3. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / Копылов И. П. – М. : Высш. шк., 1987. – 248 с.
4. Копылов И. П. Электромеханические преобразователи энергии / Копылов И. П. – М. : Энергия, 1973. – 400 с.
5. Петрушин В. С. Математична модель асинхронного двигуна у нестационарних режимах роботи / В. С. Петрушин, А. М. Якімець, О. Б. Бабійчук // Вісник одеського національного політехнічного університету. – 2006. – С. 223-225.
6. Виноградов А. Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотнорегулируемом асинхронном электроприводе / Виноградов А. Б. – Электротехника, 2005, № 5.

7. Баранов П. Р. Математическая модель асинхронного двигателя со встроенным электромагнитным приводом тормозного устройства / П. Р. Баранов, Ю. Н. Дементьев, И. Г. Однокопылов // Изв. Томского политех. ун-та. – 2006. – т. 309, № 1.
8. Чиков Ю. В. Динамическая модель асинхронной машины с учетом внешних повреждений / Ю. В. Чиков, Э. Р. Байбурин, В. Ю. Алексеев // Уфимский государственный нефтяной технический университет. – 2010.
9. Синявский И. В. Компьютерное моделирование динамики тепловых процессов в асинхронном двигателе при несимметрии питающих напряжений / И. В. Синявский, М. Ю. Пустоветов // Новочеркасск: Вестник ВЭЛНИИ. – 2011. – № 2 (62).
10. Пустоветов М. Ю. Развитие научной базы по проектированию и анализу вспомогательных асинхронных электроприводов электровозов: дис. доктора тех. наук : 05.09.03 / Пустоветов М. Ю. – Ростов-на-Дону, 2015. – 310 с.

Модель асинхронного двигателя

Росинская Г. П.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

В статье сделан анализ существующих моделей асинхронного двигателя, который используется в электромеханической системе регулируемого электропривода.

Ключевые слова: модель асинхронного двигателя, электромеханическая система, регулируемый электропривод

Model of asynchronous motor

Rosinska G.

Kiev National University of Technologies & Design

In this article have been analyzed existing models of asynchronous motor that is used in electric drives of electromechanical system.

Keywords: model of asynchronous motor, electromechanical system, electric drive