

УДК 621.313

Г.П. РОСІНСЬКА

Київський національний університет технологій та дизайну

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

У статті розглянуто умови, які необхідно враховувати при проектуванні електромеханічних систем регульованих електроприводів з асинхронними двигунами. Проведено аналіз підходів та програмного забезпечення для моделювання процесів в них.

**Ключові слова:** електромеханічна система, регульований електропривод.

Сучасний електропривод – це сукупність безлічі електромашин, апаратів і систем управління ними. Він є основним споживачем електричної енергії і головним джерелом механічної енергії в промисловості. Тому питання підвищення коефіцієнта корисної дії електроприводу шляхом зменшення втрат при перетворенні енергії, тобто підвищення його ефективності є одним з головних питань енергозбереження в електроенергетиці і є безумовно актуальним.

Розвиток науки, техніки і технології підійшов до того рубежу, коли стало можливим створення регульованого електроприводу змінного струму і в першу чергу на основі асинхронних двигунів (асинхронні електроприводи). Сучасні транзисторні перетворювачі частоти, тиристорні пристрої плавного пуску на базі мікропроцесорних пристроїв забезпечують надійне і якісне управління асинхронними двигунами.

### **Об'єкт та методи дослідження**

Об'єктом досліджень обрана електромеханічна система регульованого електроприводу змінного струму побудованого на основі асинхронного двигуна.

### **Постановка завдання**

Враховуючи актуальність наряду, завданням досліджень стало визначення вимог до моделювання електромеханічних систем та проведення аналізу існуючих підходів до розробки моделей електромеханічних систем.

### **Результати та їх обговорення**

Складність моделювання електроприводів (рис.1) полягає в тому, що процеси у складових частинах приводу взаємопов'язані. Зміна навантаження викликає зміну режиму як двигуна, так і перетворювача частоти, що приводить до суттєвих відхилень показників приводу. Тому, для достовірного визначення показників необхідна узагальнена модель приводу, яка враховує процеси в його складових.

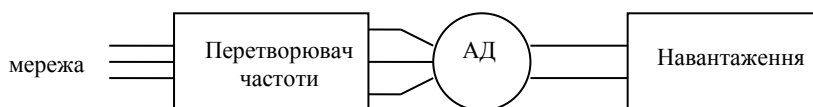


Рис.1.

Однак, практика розробки узагальнених моделей ускладнена тим, що для опису процесів в складових приводу, як правило використовуються різні формати їх опису та, відповідно, різне програмне забезпечення.

Наприклад: загальний алгоритм управління приводом може бути описаний алгоритмом, представленим у вигляді послідовності виконання математичних виразів, наведений на рис.2 [1].

Для моделювання цих процесів існують стандартні середовища універсальних мов програмування BASIC, PASCAL, C++ та ін., які дають інструмент для власного опису проєктованих пристроїв.

Асинхронний двигун може бути представлений у вигляді математичної моделі з прийнятими допущеннями [2].

Авторами для аналізу перехідних режимів використано 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.

$$\begin{cases} \frac{di_{ra}}{dt} = \frac{1}{\sigma_r + L_M} \left[ -R_r \cdot i_{ra} - \frac{\omega_{gp} \cdot P}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_b \cdot \sigma_r + L_M \right] i_{sb} \cdot L_M - i_{rc} \cdot \sigma_r + L_M \right] i_{sc} \cdot L_M \left] - \frac{L_M}{\sigma_r + L_M} \cdot \frac{di_{sa}}{dt} \right. \\ \frac{di_{rb}}{dt} = \frac{1}{\sigma_r + L_M} \left[ -R_r \cdot i_{rb} - \frac{\omega_{gp} \cdot P}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_c \cdot \sigma_r + L_M \right] i_{sc} \cdot L_M - i_{ra} \cdot \sigma_r + L_M \right] i_{sa} \cdot L_M \left] - \frac{L_M}{\sigma_r + L_M} \cdot \frac{di_{sb}}{dt} \right. \\ \frac{di_{rc}}{dt} = \frac{1}{\sigma_r + L_M} \left[ -R_r \cdot i_{rc} - \frac{\omega_{gp} \cdot P}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_a \cdot \sigma_r + L_M \right] i_{sa} \cdot L_M - i_{rb} \cdot \sigma_r + L_M \right] i_{sb} \cdot L_M \left] - \frac{L_M}{\sigma_r + L_M} \cdot \frac{di_{sc}}{dt} \right. \end{cases}$$

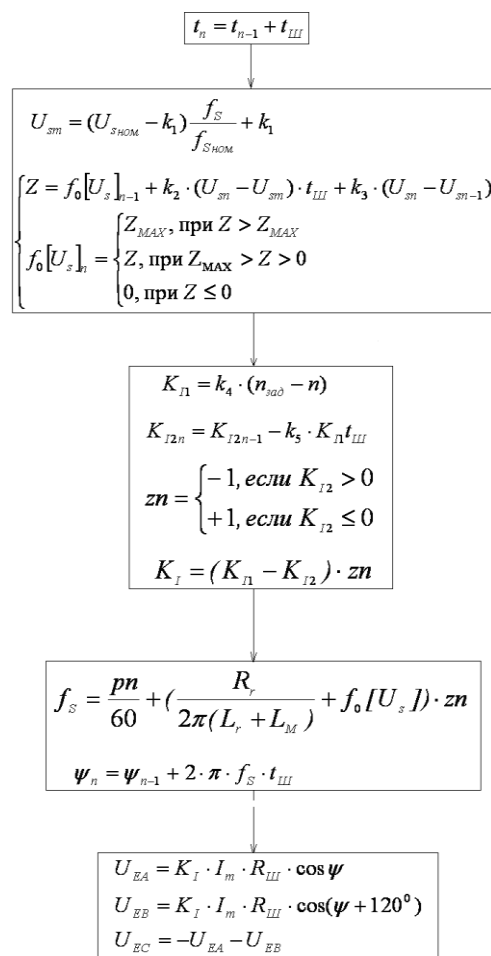


Рис. 2.

$$M_{\Theta} = \frac{P}{\sqrt{3}} \cdot L_M \cdot \left[ i_{sa} \cdot i_{rc} + i_{sb} \cdot i_{ra} + i_{sc} \cdot i_{rb} \right] - \left[ i_{sa} \cdot i_{rb} + i_{sb} \cdot i_{rc} + i_{sc} \cdot i_{ra} \right]$$

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

Існує програмне забезпечення для проведення розрахунків, таких як MATHCAD, MATLAB, MAPLE, які спрощують процес математичної обробки інформації.

В сучасних регульованих приводах знаходять найбільш широке вживання перетворювачі з явно вираженою ланкою постійного струму. У перетворювачах цього класу використовується подвійне перетворення електричної енергії: вхідна синусоїдальна напруга з постійною амплітудою і частотою випрямляється у випрямлячі, фільтрується фільтром, згладжується, а потім знов перетворюється інвертором в змінну напругу змінної частоти і амплітуди. Подвійне перетворення енергії приводить до зниження ККД і до деякого погіршення маса – габаритних показників по відношенню до перетворювачів з безпосереднім зв'язком.

Для відображення процесів протікаючи у структурних схемах (блоках), частіше використовують програмне забезпечення яке містить в собі програму PSPICE.

Як правило, момент навантаження є випадковою величиною. Точне його визначення можливо лише при статичній обробці результатів вимірів на реальному об'єкті. Проте, усю різноманітність навантажень систематизують за характером зміни моменту від швидкості або від кута повороту робочого механізму і представляють у вигляді типових залежностей [3].

При аналізі та проектуванні електроприводу необхідно враховувати:

1. Необхідно враховувати потужність на силових елементах перетворювача, які не є ідеальними ключами в статичному режимі;
2. При перемиканні в напівпровідникових перетворювачах необхідно враховувати динамічні втрати (які залежать від частоти перемикання і від параметрів самих приладів);
3. Включення напівпровідникового перетворювача між джерелом живлення і двигуном призводить до спотворення форми струму (тобто появи гармонік в струмі). Ці гармоніки істотно впливають на мережу живлення. Тому необхідно при аналізі проводити дослідження гармонійного складу струму.

В теорії електроприводу розрізняють три основні види характеристик :

- статичні;
- енергетичні;
- динамічні.

У режимі, що встановився, якість електроприводу характеризується наступними параметрами: жорсткістю механічної характеристики; коефіцієнтом передачі (підсилення) регульовальної характеристики; діапазоном регулювання за швидкістю на виході електроприводу.

Енергетичні характеристики визначають ккд і коефіцієнт потужності електроприводу.

У динамічному режимі якість електроприводу характеризується наступними параметрами: часом першого узгодження; перерегулюванням; часом перехідного процесу.

Визначивши основні вимоги до моделювання електромеханічних систем, проведемо аналіз існуючих підходів до розробки моделей електромеханічних систем та розглянемо програмні забезпечення які для цього використали.

В статті [4] моделюють електромеханічну систему, що складається з трьох електроприводів на основі асинхронних двигунів з векторним управлінням. Авторами розроблена Simulink-модель для дослідження динамічних процесів в електромеханічній системі, яка складається з електроприводів на базі частотно-керованих асинхронних двигунів та навантаження. Комп'ютерне моделювання виконано в пакеті Matlab/Simulink/SimPowerSystem.

Слід зазначити, що у більшості наукових робіт і навчальних посібниках, присвячених питанням комп'ютерного моделювання електромеханічних систем, момент навантаження електродвигуна приймається постійним і подається у будь-яких моделях або у момент початку процесу моделювання або через деякий час, коли закінчується перехідний процес після запуску двигуна. Тому отримані результати моделювання при такому підході не відбивають повною мірою поведінку реальних електромеханічних систем, оскільки від характеру і виду навантажень залежать динамічні властивості електроприводу, його режими роботи, а також енергетичні показники.

У роботі [5] зроблена спроба змоделювати поведінку електромеханічних систем залежно від виду навантажень. Авторами розроблена універсальна модель завдання навантажувального моменту та формування динамічного моменту електроприводу, яка може бути використана для будь якого типу двигунів. Дослідження режимів роботи електромеханічної системи в залежності від навантаження проводиться на базі відомої класичної структури електроприводу в пакеті Matlab - Simulink.

В статті [6] запропоновано варіант макромоделі об'єкту регулювання та математичний опис його структури. Об'єктом регулювання є безконтактний моментний електродвигун, з'єднаний з датчиком кутового положення та навантаженням. Математична модель враховує наступні види тертя : *сухе тертя* (тертя ковзання), що виникає в підшипниках конструкції; *в'язке тертя*, пов'язане з виникненням протито-ЕРС при обертанні ротора з постійними магнітами відносно статора з керуючими обмотками; *тертя спокою*, яке визначається параметрами самого електродвигуна. Апробація моделі, в першому наближенні показала задовільні результати.

Запропонована модель об'єкту регулювання дозволяє з високою точністю здійснити попередній розрахунок режимів роботи пристрою і якісний аналіз системи в цілому. Проте для отримання адекватних результатів необхідно максимально точно вказати в моделі усі критичні параметри.

Ефективність найбільш поширених частотно-керованих асинхронних електроприводів визначається рівнем втрат в АД, які здійснюють електромеханічне перетворення енергії. Велику кількість часу регульовані асинхронні електроприводи працюють в нестационарних режимах. Для аналізу електромагнітних, механічних, енергетичних показників як електроприводів взагалі так і АД використовуються математичні моделі, які ґрунтуються на рівняннях Парка-Горева [7–9]. Недоліком таких математичних моделей, так вважають автори [10] є нехтування втратами в сталі магнітопроводу, ці втрати можуть складати від 20-40% загальних втрат в двигуні. В результаті це може привести до помилок в розрахунку енергетичних і теплових показників АД.

Автори [10] пропонують математичну модель АД, ґрунтовану на рівняннях Парка-Горева з урахуванням втрат в магнітопроводі статора. Перехідні процеси побудовані в середовищі MathCAD.

Врахування втрат в сталі істотно уточнює результати розрахунків енергетичних показників АД в перехідних режимах. До недоліків запропонованої моделі автори відносять нехтування втратами в сталі ротора. Це може привести до помилок при аналізі енергетичних показників асинхронних машин, які працюють з великим ковзанням.

Автори роботи [11] розробили модель асинхронного електродвигуна, яка дозволяє аналізувати процеси вибігання АД при КЗ в електричній мережі, а також процеси пуску і самозапуску АД після відключення пошкодженої ділянки мережі і відновлення напруги живлення. Модель асинхронного електродвигуна в змінних «входи-виходи» створена в середовищі моделювання Simulink v.4 математичні пакети Matlab v.7. Графіків аналізу автори не приводять. Ефективність моделі не показують.

Кожна з розглянутих статей відображує окремий науковий напрям. Не всі розглядають електромеханічні системи разом з перетворювачами (системами керування), а тому залишаються не врахованими багато важливих параметрів які істотно впливають на характеристики та параметри регульованого приводу. Для моделювання ЕМС регульованих електроприводів автори статей використовують пакети Matlab з його додатком Simulink та пакет MathCAD.

Огляд сучасних прикладних пакетів, які можуть бути використані для проектування електроприводу, показав, що в першу чергу слід виділити пакет Matlab з широко розвиненими доповненнями, з яких Simulink найбільш пристосований для аналізу і синтезу різних систем. Для дослідження і проектування електронних блоків добре зарекомендували себе прикладні пакети, в основі яких використовується пакет Pspice (Orcad, DesighnLab, Workbench, Circuit Marker). Для вивчення і аналізу нескладних схем можна застосовувати пакет Workbench, який є віртуальною лабораторією з досить широкими можливостями.

Зазначимо, що пакет Orcad об'єднав в собі можливості аналізу, синтезу, розрахунку і конструювання електронних схем і має дуже велику бібліотеку (більше 200 тис.) електронних компонентів. Це пакет так званого наскрізного проектування, який дозволяє проводити найглибший аналіз електронних блоків, здійснювати проектування друкованих плат для розробленої і дослідженої електронної схеми. Доповнений спеціальними пакетами (PLSyn, Max plusII, XACTStep), пакет Orcad дозволяє синтезувати програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛИС) типу Altera, Xilinx та інші. Тому, доцільно розглянути можливість використання цього пакету, як базового для створення узагальнених моделей приводу.

Але існують проблеми, з якими зустрічається дослідник електроприводу:

1. Різні процеси в системі мають різний масштаб часу. Наприклад, перехідні процеси в електромеханічній частині системи протікають впродовж одиниць - десятків секунд, а електромагнітні перехідні процеси при перемиканні силових транзисторів тривають мікросекунди. Як бачимо, різниця в тривалості процесів тут складає дев'ять порядків. Нині немає прикладних пакетів, які дозволили б досліджувати систему з одночасним обліком тих та інших процесів. Проте і ті і інші роблять істотний вплив на характеристики системи і мають бути враховані. Вирішення цієї проблеми сьогодні базується на розділенні (декомпозиції) системи в просторі і в часі, з обґрунтованим вибором на кожному кроці певної моделі, а інколи і окремого програмного забезпечення.

2. Поява нових електронних компонентів призводить до того, що модулі і вузли, побудовані на цих компонентах, вимагають проведення ретельного комп'ютерного аналізу усіх режимів роботи, щоб

забезпечити надійність - головний критерій роботи виробу. Експериментальний підбір більшості параметрів є дуже складним і трудомістким процесом. У свою чергу точність комп'ютерного моделювання визначається якістю математичних моделей компонентів, що входять до складу системи. Т.ч. вимоги високої точності накладають істотні обмеження на використання універсальних моделей. Сучасні пакети математичного моделювання і автоматизованого проектування включають бібліотеки моделей компонентів електронної техніки, проте в них використані усереднені параметри приладів і, як правило, не вказаний допустимий розкид, що знижує ефективність моделювання.

У зв'язку з цим виникає необхідність створення узагальненої моделі приводу на базі асинхронного двигуна, яка б дозволила коректувати максимальну кількість параметрів. Для цього необхідно моделі складових частин електроприводу виконати в одному форматі, що дозволить їх об'єднати у єдину модель електропривода, яка враховує взаємозалежність процесів у його складових частинах. Розробка такої моделі дозволить проектувальнику об'єктивно оцінювати показники електроприводу та вирішувати задачі оптимізації параметрів його складових частин.

### **Висновки**

Аналізуючи результати роботи, можемо зробити такі висновки:

– на процеси в перетворювачах частоти і електромеханічній системі асинхронного двигуна робить вплив електромеханічне навантаження, тому при проектуванні електроприводу необхідно враховувати величину і характер зміни механічного навантаження на валу електродвигуна, які визначаються параметрами виконавчого органу;

– до завдань моделювання електромеханічних систем можемо віднести визначення статичних характеристик, динамічних характеристик (розгін, гальмування, зміна швидкості при скачках моменту опору), енергетичних характеристик та показників якості електроенергії на вході.

– програма наскрізного моделювання OrCAD не використовується для моделювання електромеханічних систем, хоча моделі елементів в цій програмі мають більшу точність у порівнянні з моделями програми Matlab.

– розглянути можливість розширення можливостей пакету OrCAD для рішення задач пов'язаних з моделюванням електромеханічних систем;

– розробити нові підходи до еквівалентування механічних систем електричними колами;

– створити спеціальні бібліотеки для моделювання структурних схем в пакеті OrCAD.

### Список використаної літератури

1. Н.С.Комаров, А.В.Стаценко. Разгон асинхронного двигателя электропривода с частотно-токовым управлением //Техн. электродинамика. – 2007. – № 4. – 50–56с.

2. А.В.Стаценко, Н.С.Комаров, Л.И.Мазуренко. Модель асинхронного двигателя для анализа динамики электропривода с частотно-токовым управлением на основе следящих импульсных регуляторов тока //Праці інституту електродинаміки НАН України. Зб.наук.праць. – 2005. – № 1(10). – 69–79 с.

3. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.

4. В.М. Золотарев, А.А. Щерба, А.Д. Подольцев. Моделирование динамических процессов в электромеханической системе для регулирования движения сверхвысоковольтного кабеля в наклонной экструзионной линии //Техн. электродинамика. – 2010. – № 3. – 44–51с.

5. В.М. Чермалых, А.В. Чермалых, А.В. Данилин, И.Я. Майданский. Национальный технический университет Украины «КПИ» Інформаційні системи і моделювання. // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. Випуск 2009, № 4(57). Частина 1, – 107–111с.

6. Сергей Капралов, Владимир Матвеев, Виктор Майоров, Денис Павлов, Максим Таранец. Математическая модель объекта регулирования на базе моментного электропривода. Проектирование и моделирование. // Современная электроника. № 5.– 2009. – 42–47с.

7. А.В. Иванов – Смоленский Электрические машины. – М.: Энергия, – 1980. –733 с.

8. И.П. Копылов. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш.шк.,–1987. – 248 с.

9. И.П. Копылов. Электромеханические преобразователи энергии. – М.: Энергия, –1973. – 400 с.

10. В.С. Петрушин, А.М. Якімець, О.Б. Бабійчук Математична модель асинхронного двигуна у нестационарних режимах роботи // Вісник одеського національного політехнічного університету. –2006. – 223–225с.

11. Ю.В. Чиков, Э.Р. Байбурин, В.Ю. Алексеев Динамическая модель асинхронной машины с учетом внешних повреждений. // Уфимский государственный нефтяной технический университет – 2010.

#### **Моделирование электромеханических систем с асинхронными двигателями**

Росинская Г.П.

*Киевский национальный университет технологий и дизайна*

В статье рассмотрены условия, которые необходимо учитывать при проектировании электромеханических систем регулируемых электроприводов с асинхронными двигателями. Проведен анализ подходов и программного обеспечения для моделирования процессов в них.

**Ключевые слова:** электромеханическая система, регулируемый электропривод.

#### **Modelling of electromechanical systems with asynchronous motors**

Rosinska G.

*Kiev National University of Technologies and Design*

The article describes the conditions that must be considered in the design of electromechanical systems, adjustable electric drives for asynchronous motors. The analysis approaches and software for modeling processes in them.

**Keywords:** electromechanical system, electric drive.