

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
ПЕРЕДМОВА	7
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1	
РОЗВИТОК ТЕОРІЇ СИНТЕЗУ СПОСТЕРІГАЧІВ У СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ.	14
1.1 Огляд досліджень спостерігачів потокозчеплення.	14
1.2 Сучасні дослідження спостерігачів координат електроприводу.	19
1.3 Огляд публікацій із синтезу спостерігачів внутрішніх параметрів та зовнішніх збурень в електроприводі.	29
1.4 Сучасний стан досліджень із застосування фільтру Калмана в системах керування електроприводами.	37
РОЗДІЛ 2	
МЕТОДИ СИНТЕЗУ ТА МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ.	45
2.1 Стійкість руху динамічних систем.	45
2.2 Самоналагоджувальні системи з моделлю.	47
2.3 Безпошукові самоналагоджувальні системи керування.	51
2.4 Спостереження детермінованих об'єктів.	57
2.5 Розширений фільтр Калмана.	63
2.6 Рівняння асинхронної машини в ортогональних осях координат.	70
РОЗДІЛ 3	
СПОСТЕРІГАЧІ ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯ.	79
3.1 Чутливість спостерігача потокозчеплення ротора до зміни параметрів асинхронної машини.	79
3.2 Синтез спостерігача потокозчеплення ротора з використанням методики модального керування.	91
3.3 Синтез спостерігача потокозчеплення ротора на основі другого методу Ляпунова.	101
3.4 Ідентифікатор потокозчеплення статора в системі векторного керування машиною подвійного живлення.	118

3.5 Синтез замкненого спостерігача потокозчеплення статора машини подвійного живлення.	131
--	-----

РОЗДІЛ 4

СПОСТЕРІГАЧІ ШВИДКОСТІ ПРИ КЕРУВАННІ ЗА СТАТОРОМ.	144
---	-----

4.1 Синтез спостерігача швидкості асинхронної машини на основі вектора потокозчеплення ротора.	144
4.2 Синтез спостерігача швидкості ротора асинхронної машини з використанням вектора ЕРС.	161
4.3 Спостерігач швидкості з порівнянням струмів.	171
4.4 Визначення параметрів функції адаптації спостерігача швидкості обертання ротора асинхронного електропривода.	181

РОЗДІЛ 5

СПОСТЕРІГАЧІ В МАШИНІ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ.	195
--	-----

5.1 Синтез спостерігача швидкості з використанням вектора потокозчеплення статора.	195
5.2 Спостерігач швидкості машини подвійного живлення з порівнянням струмів.	217
5.3 Ідентифікація кута повороту ротора.	228

РОЗДІЛ 6

СПОСТЕРІГАЧІ ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ.	244
---	-----

6.1 Спостерігач моменту навантаження асинхронного електроприводу з векторним керуванням.	244
6.2 Спостерігач моменту навантаження в складі векторної системи керування машиною подвійного живлення.	256
6.3 Спостерігач потокозчеплення ротора з контуром параметричного зворотного зв'язку.	264
6.4 Спостерігач потокозчеплення ротора з ідентифікацією активних опорів асинхронної машини.	273
6.5 Спостерігач потокозчеплення статора для машини подвійного живлення з ідентифікацією активних опорів.	286

РОЗДІЛ 7

ФІЛЬТР КАЛМАНА В АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ.	299
---	-----

7.1 Статистичні характеристики струму асинхронної машини при релейному керуванні.	299
---	-----

7.2	Фільтр Калмана як спостерігач стану у векторній системі керування асинхронною машиною.	310
7.3	Фільтр Калмана у векторній системі екстремального керування асинхронною машиною.	317
7.4	Бездатчикова система керування машиною подвійного живлення на основі фільтра Калмана.	331
7.5	Спостерігач Калмана у векторній системі екстремального керування машиною подвійного живлення.	345
	ВИСНОВКИ.	359
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.	365

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АМ	асинхронна машина
АД	асинхронний двигун
АВК	асинхронний вентильний каскад
АДФР	асинхронний двигун з фазним ротором
БР	блок регуляторів
ВА	векторний аналізатор
ВП	вирішальний пристрій
ДШ	датчик швидкості
ЕП	електропривод
ЕРС	електрорушійна сила
ЕОМ	електронна обчислювальна машина
ІКП	ідентифікатор потокозчеплення
ККД	коефіцієнт корисної дії
КС	коло самонастроювання
МПЖ	машина подвійного живлення
ОК	об'єкт керування
ПІ-регулятор	пропорційно-інтегральний регулятор
ПІД-регулятор	пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор
ПК	пристрій керування, перетворювач координат
ПФ	перетворювач фаз
ПЧ	перетворювач частоти
РН	регулятор напруги
РШ	регулятор швидкості
РП	регулятор потокозчеплення
РАС	регулятор активного струму
РРС	регулятор реактивного струму
СНС	самоналагоджувальна система
СГК	середньогометричний корінь
СП	спостерігач потокозчеплення
ТП	транзисторний перетворювач частоти
ФК	фільтр Калмана
ФП	функціональний перетворювач

ПЕРЕДМОВА

Розвиток сучасної теорії автоматичного керування нерозривно пов'язаний з ускладненням структури керованих об'єктів, а також із безперервним підвищенням вимог до динамічних характеристик, надійності та інваріантності систем. Необхідною умовою побудови високоефективних алгоритмів є повнота інформації про поточний стан об'єкта керування. Проте на практиці класичний підхід, який передбачає пряме вимірювання всіх координат стану керованого об'єкта, стикається із жорсткими фізичними та економічними обмеженнями. Встановлення спеціалізованих датчиків часто є неможливим через конструктивні особливості об'єкта, агресивне робоче середовище, габарити або суттєве подорожчання апаратної частини. Більш того, фізичні датчики вносять у контур керування додаткові шуми та знижують загальну надійність системи внаслідок появи нових місць можливих відмов.

У цих умовах одним із ключових елементів сучасної теорії та практики керування стають спостережувальні пристрої. Вони являють собою програмно-апаратні алгоритми, що функціонують паралельно з об'єктом і відновлюють вектор його внутрішніх, недоступних для прямого вимірювання координат на основі аналізу математичної моделі та сигналів, які піддаються вимірюванню. Теорія спостерігачів сьогодні з допоміжного інструменту для оцінювання станів стає підґрунтям для створення інтелектуальних, енергоефективних та високонадійних систем автоматичного керування будь-якими складними технічними та технологічними об'єктами.

Найбільш масовим прикладом таких систем у сучасній промисловості є регульований асинхронний електропривод. Будучи основним споживачем електричної енергії та головним виконавчим органом у більшості технологічних процесів, асинхронний двигун потребує застосування складних законів векторного або частотно-адаптивного керування. Однак пряма реєстрація ключових змінних його стану – таких як потокозчеплення ротора і статора, електромагнітний момент або механічна швидкість і кут повороту ротора у специфічних умовах експлуатації – пов'язана

з технічними труднощами. Тому розвиток теорії спостерігачів знайшов глибоке та всебічне відображення в задачах бездатчикового керування асинхронними електромеханічними системами.

У першому розділі представлено аналітичний огляд сучасних вітчизняних та закордонних досліджень, присвячених розробці спостерігачів для електроприводів, що дозволило обґрунтувати вибір методології їхнього синтезу, яка застосовується у роботі. У другому розділі викладено теоретичні основи та математичний апарат запропонованої методики синтезу. Розглянуто питання стійкості динамічних систем, теорію самонастроюваних структур, а також алгоритми детермінованого та стохастичного оцінювання. Представлено математичні моделі асинхронної машини, які можна застосувати для адаптації обраної методології до особливостей електромеханічних об'єктів.

У розділах 3–7 наведено основні результати роботи, що охоплюють розв'язання задач оцінювання невимірних координат і параметрів асинхронних двигунів та машин подвійного живлення. Розділи 3–5 присвячені розробці детермінованих спостерігачів координат із використанням методів Ляпунова та модального керування. У шостому розділі розглянуто спостерігачі моменту навантаження та алгоритми ідентифікації активних опорів обмоток у структурі спостерігачів потокозчеплення. У сьомому розділі на основі алгоритму фільтрації Калмана розроблено спостерігачі стану для векторних та екстремальних систем керування асинхронними машинами, які ефективно працюють за наявності шумів вимірювання.

Ідея створення монографії та її структура належать О. В. Ключеву. Матеріал між авторами розподілено так: О. В. Ключев – розд. 1, § 1.3, 1.4, розд. 2, § 2.2, 2.3, 2.5, 2.6, розд. 3, розд. 4, крім § 4.2, розділи 5–7, висновки; О. В. Садовой – вступ, розд. 1, § 1.1, розд. 2, § 2.1, 2.4, 2.6; Ю. В. Сохіна – розд. 1, § 1.2, розд. 4, § 4.2 (параграфи, вказані у двох авторів, написані спільно).

Монографія призначена для наукових працівників та інженерів, зайнятих розробкою сучасних систем керування електроприводами, аспірантів та викладачів вищих навчальних закладів, які спеціалізуються в галузі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки.

ВСТУП

Сучасний електропривод (ЕП) має характеризуватися високою надійністю, помірною вартістю та простотою інтеграції у виробниче обладнання. Найбільшою мірою цим вимогам відповідають бездатчикові системи ЕП на базі асинхронних машин (АМ), у яких для функціонування систем керування вимірюються лише струми та напруги обмоток.

Для побудови векторних полеорієнтованих систем керування асинхронними ЕП необхідно знати точні значення потокозчеплень статора або ротора в реальному часі, а виміряти їх датчиками всередині працюючого асинхронного двигуна (АД) практично неможливо. Вернер Леонард першим показав, що можна побудувати математичну модель (спостерігач), яка в реальному часі обчислює змінні, що не піддаються вимірюванню (потокозчеплення), спираючись на ті змінні, які виміряти легко (струми та напруги). У роботі [1] до рівнянь АМ, записаних у формі простору станів, застосовано методику синтезу спостерігачів стану.

У середині 80-х років з'явилися достатньо потужні цифрові сигнальні процесори (DSP), на яких можна було реалізувати запропоновані в теорії алгоритми спостерігачів потокозчеплення в системах векторного керування з датчиком швидкості. На початку 1990-х років обчислювальної потужності сигнальних процесорів стало достатньо для того, щоб у спостерігач потокозчеплення додати ще контур адаптації швидкості, що і стало називатися бездатчиковим (sensorless) керуванням.

Задача бездатчикового керування ставилася як вимога щодо розробки спостерігаючих пристроїв у вигляді систем диференціальних рівнянь, які розв'язуються в реальному часі, а відомими величинами для них у загальному випадку є вимірювані значення фазних струмів і напруг статорних та роторних обмоток АМ. При цьому, залежно від типу ЕП, вимог до нього та цілей керування, ідентифікованими величинами приймаються значення векторів потокозчеплень, кутова швидкість ротора або його кут повороту

відносно статора, момент статичного навантаження на валу АМ. У статті [2] наводиться одна з перших класифікацій спостерігачів, що застосовуються в асинхронному ЕП. Зазначається, що у векторних системах керування асинхронними ЕП ефективно застосовувати наступні типи спостерігачів.

Адаптивні системи з еталонною моделлю (Model Reference Adaptive System, MRAS), у яких використовуються еталонна модель напруги, що обчислює ЕРС, та адаптивна модель струму, до якої входить значення швидкості, для оцінювання тієї самої змінної – найчастіше вектора потокозчеплення ротора для АМ або вектора потокозчеплення статора для машини подвійного живлення (МПЖ). Похибка між моделями, що виражається у відмінності від нуля векторного добутку двох оцінок одного вектора потокозчеплення, використовується ПІ-регулятором для підстроювання (адаптації) оцінюваної швидкості.

Далі розглядаються адаптивні нелінійні спостерігачі повного порядку (Adaptive State Full Order Observers, ASFO), розмірність математичних моделей яких збігається з розмірністю моделі електричної машини. При цьому оцінюються і невимірювані потокозчеплення, і струми, які обчислюються та вимірюються одночасно. Оскільки швидкість ротора є невідомою координатою, що змінюється, то спостерігач адаптується до її зміни шляхом зведення похибок між виміряними та оцінюваними струмами до нуля. Механізм адаптації, що отримується, як правило, на основі теорії стійкості Ляпунова, доводить із збереженням стійкості системи оцінку швидкості до її реального значення способом спрямування помилок оцінювання струмів до нуля. Головна перевага ASFO перед спрощеними моделями (типу MRAS) полягає у кращій стійкості та точності на низьких швидкостях, а також у здатності фільтрувати шуми вимірювань за рахунок зворотних зв'язків за струмами.

Спостерігачі у режимі ковзання (Sliding Mode Observers, SMO) представляють системи зі змінною структурою (Variable Structure Systems), що використовують принципи розривного керування для оцінювання таких змінних стану АМ, як потокозчеплення та кутова швидкість ротора. На відміну

від спостерігачів, які коригують похибку плавно через коефіцієнти підсилення, у SMO використовується знакова функція перемикавання. Внаслідок високочастотних перемикань неузгодженості струмів прямують до нульового значення і утримуються на ньому при роботі релейних елементів у ковзному режимі. Оскільки сигнал на виході реле містить високочастотні пульсації, його пропускають через фільтр нижніх частот і корисна складова є оцінкою швидкості ротора. Головною перевагою SMO є його робастність до змін параметрів двигуна, коли у режимі ковзання модель спостерігача слідує за реальним двигуном всупереч неспівпадинням деяких параметрів, насамперед активних опорів статора та ротора.

Методи оцінювання змінних стану асинхронних ЕП на основі фільтрації представлені насамперед розширеним фільтром Калмана (Extended Kalman Filter, EKF), який вважається одним із найточніших, але математично складних методів. На відміну від вищезазначених спостерігачів, які є детермінованими, фільтр Калмана (ФК) представляє стохастичний алгоритм, що виходить з того, що вимірювання струмів і напруг містять шуми, а в моделі АМ присутні не точно визначені параметри. Для використання фільтра Калмана в бездатчиковому асинхронному ЕП математична модель АМ розширюється за рахунок того, що кутова швидкість ротора перестає бути параметром (як у спостерігачах потокозчеплення), а стає змінною стану як струми та потокозчеплення. Залежно від особливостей системи керування розмірність ФК може бути ще збільшена шляхом розгляду активних опорів статора і ротора не як параметрів, а як змінних стану, а також введенням до складу ФК рівнянь таких змінних, як кут повороту ротора та момент статичного навантаження на валу АМ у випадку, якщо ФК використовується в системах керування МПЖ або при синтезі контурів екстремального регулювання у складі векторних систем керування асинхронними ЕП. Недоліком може слугувати необхідність перерахунку на кожному інтервалі дискретизації за часом якобіана системи диференціальних рівнянь спостерігача Калмана, що потребує потужного сигнального процесора.

У [3], крім зазначених типів спостерігачів, той самий автор додає методи, засновані на магнітній анізотропії ротора, коли для визначення його положення при нульовій кутовій швидкості у статор подається додатковий сигнал високої частоти. У цій статті робиться висновок, що для створення бездатчикового ЕП необхідно комбінувати методи: фундаментальні моделі (спостерігачі) для середніх та високих швидкостей і методи на основі подачі високочастотних сигналів для роботи на наднизьких швидкостях та утримання ротора з моментом навантаження на валу при нульовій швидкості.

Стаття [4] також є однією з перших праць, присвячених розробці та експериментальній перевірці методу керування асинхронним двигуном без датчика швидкості. Пропонується використовувати спостерігач повного порядку (ASFO) для обчислення швидкості обертання ротора і вектора потокозчеплення ротора, спираючись лише на виміряні струми та напруги статора. Структура функції адаптації отримана в результаті застосування другої теореми О. М. Ляпунова про стійкість руху і забезпечує оціночне значення швидкості ротора, при якому похибка між виміряними та обчисленими струмами статора прямує до нуля. У роботі [5] представлено загальнотеоретичне розв'язання задачі бездатчикового векторного керування АД в умовах дії невідомого постійного моменту навантаження на валу. Розроблено метод створення алгоритмів керування, заснований на принципі прямого полеорієнтування у поєднанні з адаптивним спостерігачем швидкості зниженого порядку. Це розв'язання має строге математичне доведення локальної експоненціальної стійкості з опорою на теорію стійкості композитних систем, що розділяє динаміку електромагнітних і механічних процесів. Алгоритм будується виключно на вимірюванні струмів статора і забезпечує асимптотичне відпрацювання заданої траєкторії кутової швидкості з ідентифікацією опорного вектора потокозчеплення ротора без використання механічних датчиків.

На відміну від традиційних методів, які використовують спостерігач для обчислення швидкості ротора з подальшим її використанням у контурах керування, у статті [6] пропонується метод