

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

КОЗАКЕВИЧ ІГОР АРКАДІЙОВИЧ

УДК 62-83:621.313.3

**БЕЗДАТЧИКОВЕ ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ
ДВИГУНАМИ ПРИ РОБОТІ НА НИЗЬКИХ КУТОВИХ ШВИДКОСТЯХ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у ДВНЗ «Криворізький національний університет» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Осадчук Юрій Григорович,
ДВНЗ «Криворізький національний університет»,
декан електротехнічного факультету.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Садовой Олександр Валентинович,
Дніпродзержинський державний технічний університет,
проректор з наукової роботи;

кандидат технічних наук, доцент
Данілін Олександр Валерійович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
доцент кафедри автоматизації управління
електротехнічними комплексами.

Захист відбудеться «18» березня 2016 р. о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий «15» лютого 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. В. Кулик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Асинхронний двигун є найбільш поширеним типом двигунів, що використовуються у промисловості. Забезпечити високу якість регулювання ним можна за допомогою векторного керування. При цьому найбільш привабливими для реалізації у сучасних частотно-керованих приводах є системи, що базуються на бездатчиковому векторному керуванні. Але у електромеханічних системах, що передбачають такий спосіб керування, діапазон зміни швидкості, як правило, обмежується 1:50.

Таке обмеження діапазону керування пояснюється проблемами, які властиві цій системі при роботі на низьких кутових швидкостях, а саме: теоретичні обмеження для математичної моделі ідеалізованої електричної машини з синусоїдальним розподіленням поля в повітряному зазорі, значне зменшення співвідношення сигнал/шум в вимірювальних каналах, збільшення чутливості до похибок в визначенні параметрів схеми заміщення, наявність нелінійних властивостей інвертора напруги («мертвого» часу, падіння напруги на відкритих силових ключах інвертора і т.д.).

При роботі в зоні низьких кутових швидкостей перетворювач частоти на базі автономного інвертора напруги з широтно-імпульсною модуляцією живить двигун напругою, що є значно нижчою за номінальну. При цьому нелінійні властивості інвертора проявляються більшою мірою, ніж при роботі на середніх та високих напругах, вони здатні суттєво змінювати напругу, що прикладається до статора асинхронного двигуна, спотворюючи форму струму. Оскільки оцінка кутової швидкості базується на вимірюванні електричних величин, а вихідна напруга перетворювача розраховується на базі напруги ланки постійного струму та стану інвертора, то відхилення реальної напруги від її заданого значення призводить до наявності похибок у ідентифікації кутової швидкості та потокозчеплення машини. Крім того, поява вищих гармонік, що викликана наявністю некомпенсованих нелінійних властивостей інвертора, створює додаткові пульсації кутової швидкості та електромагнітного моменту, погіршуючи показники якості керування приводу.

Системи ідентифікації кутової швидкості та потокозчеплення, як правило, базуються на використанні ідеалізованої математичної моделі двигуна. При цьому, працюючи з низькою кутовою частотою, вони мають здатність втрати стійкості. Отже, з точки зору подальшого розвитку таких систем та розширення діапазону їх можливого застосування доцільно дослідити умови стійкості при роботі в нижній частині діапазону керування та розробити заходи покращення їх властивостей.

Саме тому розробка та впровадження систем бездатчикового визначення потокозчеплення та кутової швидкості асинхронного двигуна при роботі на низьких кутових швидкостях, є актуальною **науковою задачею**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконані відповідно до наукового напрямку кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті ДВНЗ «Криворізький національний університет» та пріоритетного напрямку

розвитку науки і техніки «Енергетика та енергоефективність» (закон України від 11.07.2001 №2623-III).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає в розробці теоретичних аспектів та практичних рішень покращення якості керування асинхронних електроприводів з векторним керуванням та бездатчиковим визначенням кутової швидкості та потокозчеплення.

Для досягнення поставленої мети розв'язані такі **основні задачі**:

- на основі аналітичного аналізу ідеалізованої математичної моделі асинхронного двигуна визначити обмеження можливостей застосування даного математичного апарату для бездатчикової ідентифікації кутової швидкості та потокозчеплення машини при роботі на низьких частотах обертів;

- створення заходів компенсації нелінійних властивостей інвертора, що мають підвищену стійкість при роботі в умовах наявності шумів у каналах вимірювання електричних величин;

- аналіз існуючих структур адаптивних систем з задаючою моделлю для бездатчикового векторного керування з точки зору стійкості при роботі на низьких кутових частотах;

- визначення структури та параметрів системи бездатчикового векторного керування, що базується на використанні анізотропних властивостей асинхронного двигуна з введенням додаткових тестових сигналів у напругу, що живить двигун, та з використанням гармонік ШІМ;

- визначення методів розділення сигналів, що модулюються різними видами анізотропій асинхронного двигуна (насичення магнітної системи двигуна, ексцентриситет, роторні стержні).

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є динамічні процеси у асинхронному електроприводі з векторним керуванням при роботі на низькій кутовій швидкості та процеси у автономному інверторі з широтно-імпульсною модуляцією, що живить його.

Предметом дослідження є способи непрямого бездатчикового визначення частоти обертання ротора та потокозчеплення асинхронного двигуна.

Методи дослідження. Для аналізу та розв'язання поставлених задач використано наступні методи: операторний метод (для складання передаточних функцій математичної моделі асинхронного двигуна та системи керування ним); метод диференціального числення, методи чисельного інтегрування, методи планування експерименту та пошуку екстремуму – для ідентифікації швидкості та потокозчеплення на базі анізотропних властивостей двигуна при введенні тестових сигналів; метод кінцевих елементів – при складанні дискретно-польової моделі асинхронного двигуна.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що:

- запропоновано новий метод компенсації нелінійних властивостей інвертора напруги, що базується на струмі, який оцінюється адаптивною моделлю, та не вимагає завчасного знання параметрів інвертора та системи керування на відміну від методів, які передбачають використання вимірних струмів та завчасного визначення параметрів інвертора;

–вперше формалізовано структуру спостерігача стану асинхронного двигуна, що базується на використанні його анізотропних властивостей та дозволяє виконувати виділення сигналів корисних анізотропій, не використовує параметри схеми заміщення, на відміну від методів, які передбачають використання моделі ідеалізованого асинхронного двигуна;

–на основі аналізу існуючих структур адаптивних систем з задаючою моделлю показано доцільність застосування системи зі змінною структурою, що дозволить суттєво підвищити стійкість приводу в зоні низьких кутових швидкостей.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає в тому, що на підставі виконаних досліджень вирішено актуальну задачу покращення показників якості керування частотно-керованих електроприводів з векторним керуванням, що використовують бездатчикове оцінювання величин кутової швидкості та потокозчеплення. Зокрема:

– розроблено засоби компенсації нелінійностей інвертора, що можуть бути використані у сучасних перетворювачах частоти при отриманні якісного синусоїдального вихідного струму при роботі в зоні низьких вихідних напруг;

– розроблені алгоритми бездатчикового визначення кутової швидкості та потокозчеплення асинхронного двигуна при вимірюванні лише напруги в ланці постійного струму перетворювача та його вихідних струмів, які можуть бути використані в сучасних перетворювачах частоти, що призначені для технологічних установок, які вимагають глибокого керування швидкістю двигуна;

– розроблено засоби розділення модуляційних ефектів, викликаних різними анізотропними властивостями двигуна з метою їх подальшого використання для бездатчикового визначення кутової швидкості.

Роботоздатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів підтверджено фізичними експериментами на реальних електромеханічних системах. Розроблена апаратна частина та програмне забезпечення експериментальної плати системи керування перетворювачем частоти «Вектор-АС» (виробник – ТзОВ «Семіол»), що дозволяє всебічно дослідити системи бездатчикового векторного керування при роботі в широкому діапазоні зміни кутової частоти (довідка про впровадження від 15.10.2013 р.). Їх впровадження дозволить підвищити показники якості керування при роботі на низьких кутових швидкостях, створюючи умови для суттєвого розширення діапазону керування таких систем.

Результати дисертаційної роботи використано в навчальному процесі ДВНЗ «Криворізький національний університет» під час проведення лекційних та лабораторних занять (довідка про впровадження від 15.01.2015 р.).

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні мети та основних задач дослідження, розробка математичних моделей досліджень, обробці та аналізі результатів, що отримані шляхом математичного моделювання та експериментальних досліджень. Наукові положення, які містяться у дисертації одержані автором самостійно. У публікаціях, що видані у співавторстві, автору належить: у [2] – метод бездатчикового визначення кутової швидкості двигуна

при наявності декількох анізотропних властивостей; у [3] –аналітичне дослідження та математичне моделювання системи бездатчикового векторного керування асинхронним двигуном при використанні спостерігача Люенбергера для бездатчикового оцінювання невимірюваних змінних стану; у [4] – розробка математичної моделі інвертора та дослідження кривих струмів та напруг при роботі на низьких вихідних частотах; у [5] – вдосконалення методу бездатчикового визначення кутової швидкості та потокозчеплення ротора з використанням струму нульової послідовності для двигунів зі з'єднанням обмоток в трикутник; у [6] – розробка методу компенсації нелінійних властивостей інвертора напруги з використанням адаптивного спостерігача струму; у [7] – аналіз особливостей систем частотного керування з векторним керуванням з точки зору формування електромагнітного моменту двигуна; у [8] – дослідження існуючих структур адаптивних систем з задаючою моделлю з точки зору роботи на низькій кутовій частоті, аналіз їх стійкості; у [9] – вдосконалення методу компенсації нелінійних властивостей інвертора для багаторівневих схем; у [10] – розробка алгоритму векторного керування для систем з декількома двигунами, що живляться від одного інвертора; у [11] – розробка математичного апарату для експериментального визначення кривої намагнічення асинхронного двигуна; у [17] – розробка математичної моделі багаторівневого інвертора напруги, що є частиною комбінованого перетворювача великої потужності; у [20] – аналіз способів побудови систем прямого керування моментом при живленні двигуна від інвертора напруги; у [22] – алгоритм вирівнювання напруг на конденсаторному подільнику багаторівневого інвертора напруги; у [23] – розробка структури системи бездатчикового векторного керування з використанням адаптивної системи з задаючою моделлю та спостерігача з ковзним режимом.

Результати досліджень, що викладені у [1–23], були отримані у ДВНЗ «Криворізький національний університет».

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких міжнародних науково-технічних конференціях: «Силова електроніка та енергоефективність» (Малий Маяк, ХПІ, 2010), «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (2011, Одеса, ОНПУ; 2012, смт Миколаївка; 2013, Малий Маяк; 2014, Одеса; 2015, Харків), «Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості» (Кривий Ріг, ДВНЗ «КНУ», 2009, 2010, 2011, 2012), «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації» (Кременчук, 2012, 2014, 2015), «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (Кременчук, 2014, 2015), семінарі кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 23 наукових працях, з яких: 11 – у наукових фахових виданнях (4 – у виданнях, що внесено до міжнародних наукометричних баз даних), 2 – у наукових виданнях, що не належать до переліку фахових за напрямком роботи, а також 10 тез доповіді у збірниках матеріалів міжнародних конференцій.

Структура й обсяг роботи Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (172 найменувань) і двох додатків. Основний зміст викладений на 150 сторінках друкованого тексту, містить 105 рисунків, 4 таблиці. Загальний обсяг дисертації – 226 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета та задачі дослідження. Вказана наукова новизна та практична цінність отриманих результатів. Наведені відомості щодо апробації роботи, особистий внесок здобувача і публікації. Зазначено зв'язок роботи з науковими програмами та темами.

Перший розділ присвячений обґрунтуванню необхідності розробки систем бездатчикової ідентифікації кутової швидкості та потокозчеплення ротора при роботі двигуна на низькій або нульовій кутовій швидкості. Ця проблема набула актуальності у зв'язку з високим проникненням частотно-регульованого електроприводу у промислові підприємства України. При цьому перевага віддається застосуванню систем, що не вимагають встановлення жодних механічних датчиків на валу асинхронного двигуна, оскільки їх встановлення пов'язано з додатковими фінансовими витратами, знижує надійність, а також ускладнює можливість використання даного приводу у агресивних та вибухонебезпечних середовищах. В Україні теорія та практичні підходи щодо ідентифікації у системах векторного керування розвинуті Пересадою С.М., Садовим О.В., Клепіковим В.Б. та іншими провідними вченими.

Доведено, що використання ідентифікаторів, що базуються на моделі ідеалізованої асинхронної машини, призводить до значних похибок у визначенні змінних стану при роботі на низьких кутових швидкостях. При цьому найбільші ускладнення викликає ідентифікація при роботі з напругою, що має частоту, близьку до нульової. Більшість існуючих методів стають нестійкими у такому режимі роботи.

Окрім того, методи, що базуються на ідеалізованій моделі двигуна, вимагають точних відомостей щодо параметрів схеми заміщення, які змінюються під час роботи приводу (наприклад, збільшення активних опорів при нагріві електричної машини). Це вимагає застосування додаткових адаптивних механізмів для відслідковування значень цих параметрів у режимі реального часу. Стійкість таких схем також може частково втрачатися при роботі в області низьких кутових швидкостей.

Другий розділ присвячений розробці методу компенсації нелінійностей інвертора.

Графік форми вихідного струму (рис.1), зафіксований на перетворювачі частоти в умовах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» при роботі на низькій кутовій швидкості підтверджує, що струм є значно несинусоїдальним, що свідчить про суттєве відхилення реальної напруги від заданої. Це пояснюється

наявністю нелінійних властивостей інвертора, таких як «мертвий» час, падіння напруги на відкритих силових ключах, затримки включення/виключення ключів, вплив паразитних ємностей та ін. Доведено, що найбільший вплив на спотворення форми струму створюється наявністю «мертвого» часу.

Вихідна напруга автономного інвертора напруги, як правило, формується за допомогою просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції. При цьому у дворівневому інверторі навантаження підключається до однієї з двох напруг ланки постійного струму. Для запобігання виникнення коротких замикань через кінцевий час відкривання та закривання транзисторів у сигнали керування ними вводиться «мертвий» час, протягом якого обидва ключі одного плеча інвертора закриті. Струм навантаження при цьому проходить через зворотні діоди транзисторів.



Рисунок 1 – Графік реального струму при роботі вентилятора печі в умовах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» з низькою кутовою швидкістю

Існуючий метод компенсації передбачає використання коригуючого вектору напруги, що формується зі знакових функцій вихідних струмів машини:

$$\text{---} \quad \text{---} \quad (1)$$

Використання у формулі (1) вимірюваних струмів вносить неточності у роботу системи компенсації через вплив електромагнітних перешкод та наявність дрейфу нуля у вимірювальних ланцюгах перетворювача.

Тому у роботі запропоновано новий метод компенсації нелінійних властивостей інвертора напруги, що базується на спостерігачі струму та адаптивному підлаштуванні величини коригуючого вектору з використанням пульсацій реактивного струму машини. Спостерігач струму описується наступними рівняннями:

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad (2)$$

де R_s, R_r, L_s, L_r, L_m – активні опори та індуктивності схеми заміщення асинхронного двигуна, $\mathbf{i}_s, \mathbf{u}_s$ – вектор струму та напруги статора, $\boldsymbol{\psi}_r$ – вектор потокозчеплення ротора, ω_r – кутова швидкість обертання ротора.

Структура системи, що базується на запропонованому методі компенсації «мертвого» часу, представлена на рис. 2. Застосування адаптивного спостерігача струму дозволило надати запропонованій системі більшої стійкості при наявності шумів та похибок у каналі вимірювання струму. Як відомо, параметри інвертора можуть змінюватися під час його роботи, що може призводити до погіршення якості компенсації. Отже, існує необхідність постійного спостереження за якістю форми вихідного струму інвертора з подальшою зміною величини коригуючого вектору напруги. Застосування інтегральних показників якості не є зручним з позиції обчислювальної складності, а також оновлення значень лише один раз на період.

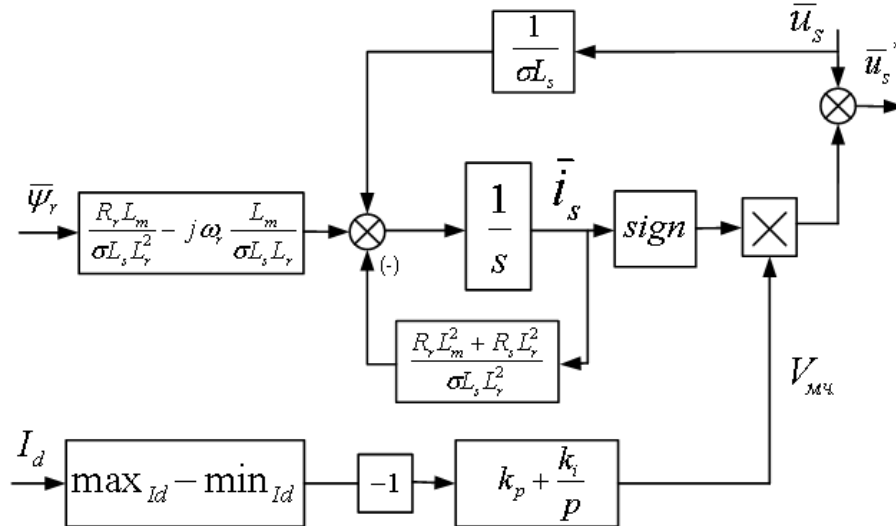


Рисунок 2 – Структура системи, що базується на запропонованому методі компенсації «мертвого» часу

У роботі запропоновано використання величини пульсацій реактивного струму двигуна як показника якості кривої струму. За умови синусоїдальної форми струму й напруги без жодних викривлень реактивний струм двигуна у статичному режимі є постійним за величиною. З появою викривлень форма реактивного струму стає пульсуючою, що дає змогу використовувати розмах пульсацій реактивного струму як неінтегрального показника якості кривої струму. З цією ж метою можливо застосовувати активну складову струму, але з урахуванням того, що в будь-яких режимах роботи асинхронний двигун є споживачем реактивної енергії, знак реактивної складової, на відміну від активної, є незмінним при зміні величини навантаження. Для знаходження величини реактивного струму використовується наступне рівняння:

$$I_{react} = -i_{s\alpha} \sin \theta_U + i_{s\beta} \cos \theta_U, \quad (3)$$

де θ_U – кут між вектором напруги статора (або відповідного сигналу завдання) і додатнім напрямком осі α .

Результати моделювання доводять, що запропонований метод дозволяє досягнути більш якісної форми вихідного струму, ніж при використанні методів, що базуються на вимірюванні струму. Форма реактивного струму стає гладкою, що відповідає мінімальному рівню пульсацій вихідних струмів інвертора. В результаті проведених досліджень було встановлено, що реалізація запропонованого методу дозволяє знизити рівень найбільш значущих гармонік (5-ї та 7-ї) приблизно в 8-10 разів.

Таким чином, отримано новий метод компенсації нелінійностей інвертора, що забезпечує високу синусоїдальність вихідного струму інвертора при роботі з низькими напругами і при цьому не вимагає попереднього знаходження (експериментального чи за документацією) параметрів силових ключів інвертора, здатний задовольнити вимоги до бездатчикових систем векторного керування з широким діапазоном зміни кутової швидкості.

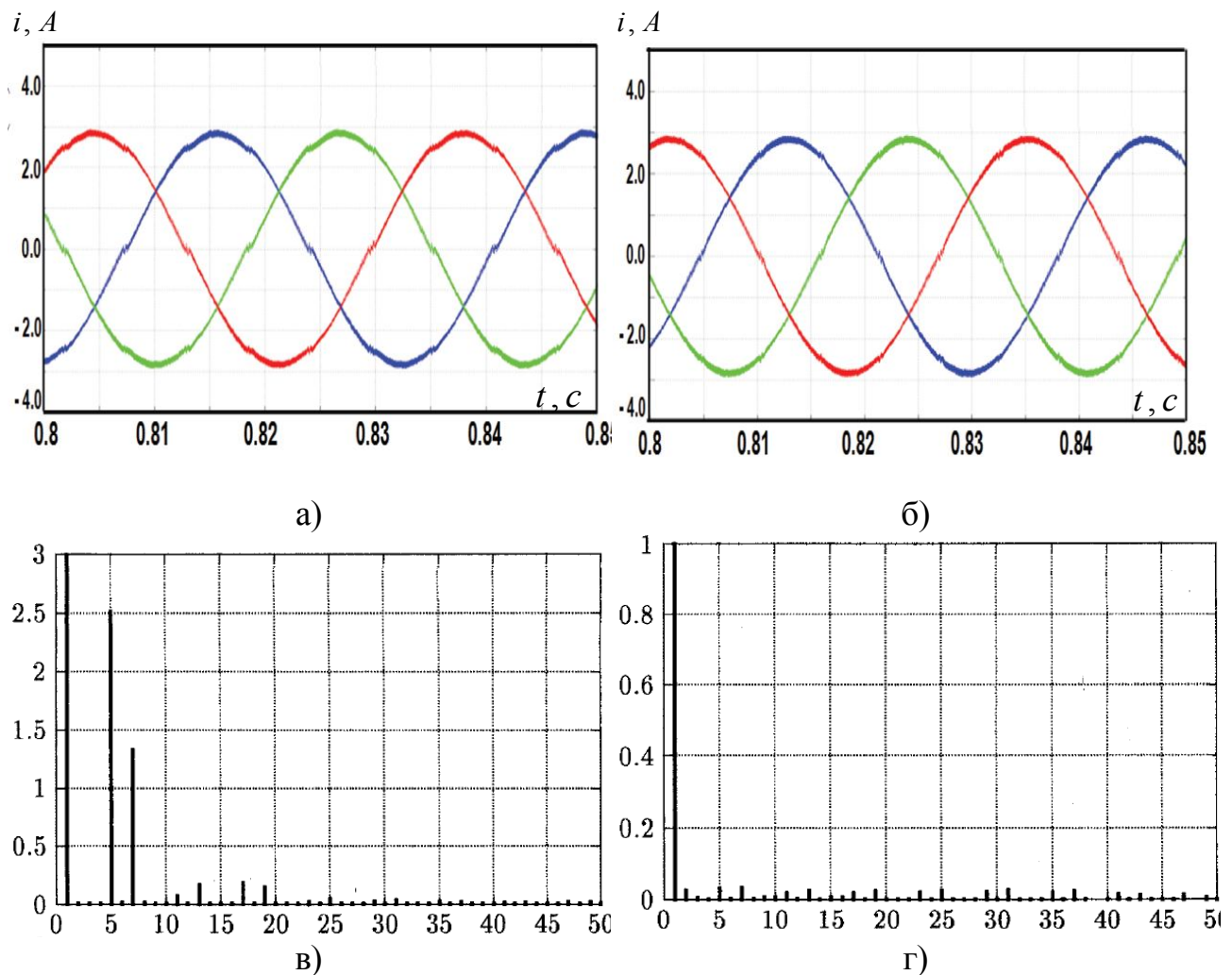


Рисунок 3 – Форми (а, б) та спектри (в, г) кривих вихідного струму, що отримані без використання компенсації нелінійних властивостей (а, в) та з використанням запропонованого методу (б, г)

В **третьому розділі** проведено аналіз стійкості існуючих методів бездатчикової ідентифікації швидкості та потокозчеплення, що базуються на

ідеалізованій моделі асинхронного двигуна, та запропоновані заходи щодо підвищення їх стійкості при роботі на низьких кутових швидкостях.

Найпростішим методом ідентифікації невимірюваних змінних стану є використання розімкнених ідентифікаторів. У роботі доведено, що їх застосування суттєво обмежене через наявність операцій чистого інтегрування, яке на практиці доводиться замінювати фільтрами низьких частот, частота зрізу яких і обмежує можливість роботи на низькій кутовій швидкості.

Серед ідентифікаторів замкненого типу особливий інтерес викликає адаптивна система з задаючою моделлю (рис. 4), яка дозволяє визначати кутову швидкість двигуна навіть в умовах зміни параметрів його схеми заміщення. Проаналізовано стійкість при роботі на низькій кутовій швидкості адаптивних систем з задаючою моделлю з використанням складових вектору потокозчеплення, проти-ЕРС, миттєвої реактивної потужності та статорного струму машини в якості вихідних сигналів задаючої та адаптивної моделей.

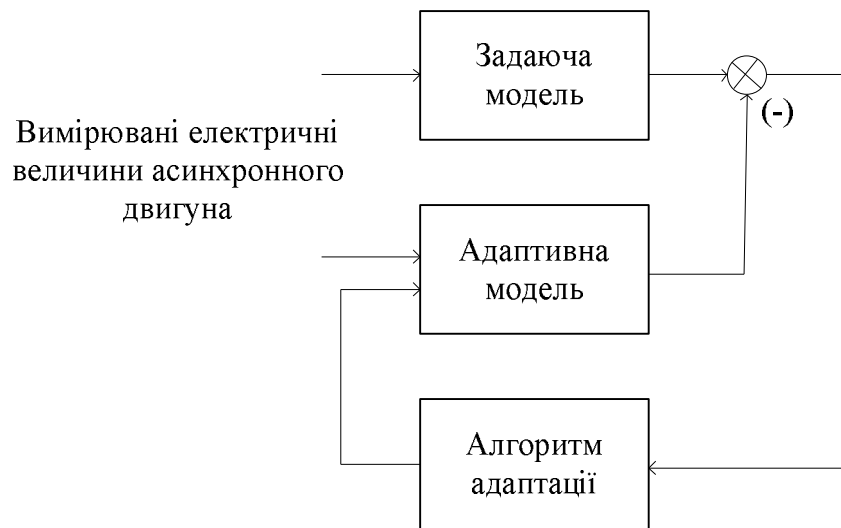


Рисунок 4 – Загальна структура адаптивної системи з задаючою моделлю

Доведено, що система з використанням складових вектору статорного струму має задовільну стійкість при роботі на низьких кутових швидкостях. З метою покращення властивостей існуючої системи запропоновано нову структуру, що поєднує в собі принципи побудови адаптивних систем з задаючою моделлю та містить спостерігач струму з використанням ковзного режиму.

Спостерігач з ковзним режимом другого порядку у найпростішій формі може бути записаний так:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{x}_1}{dt} &= f(\hat{x}_2) + k_1 \sqrt{|x_1 - \hat{x}_1|} \cdot \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) + z_1; \\ \frac{d\hat{x}_2}{dt} &= k_2 \cdot \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) + z_2, \end{aligned} \quad (4)$$

де x_1, x_2 -- змінні стану системи; k_1, k_2 -- коефіцієнти підсилення перемикаючих функцій; z_1, z_2 -- складові сигналу збурення.

Виконавши перетворення рівнянь математичної моделі асинхронного двигуна, спостерігач другого порядку може бути записаний так:

$$\frac{d\hat{i}_{s\alpha}}{dt} = -\frac{R_s}{\sigma L_s} \hat{i}_{s\alpha} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\alpha} + k_1 \sqrt{|i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha}|} \cdot \text{sign}(i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha}); \quad (5)$$

$$\frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} = k_2 \cdot \text{sign}(i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha}); \quad (6)$$

$$\frac{d\hat{i}_{s\beta}}{dt} = -\frac{R_s}{\sigma L_s} \hat{i}_{s\beta} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \frac{d\hat{\psi}_{r\beta}}{dt} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\beta} + k_3 \sqrt{|i_{s\beta} - \hat{i}_{s\beta}|} \cdot \text{sign}(i_{s\beta} - \hat{i}_{s\beta}); \quad (7)$$

$$\frac{d\hat{\psi}_{r\beta}}{dt} = k_4 \cdot \text{sign}(i_{s\beta} - \hat{i}_{s\beta}), \quad (8)$$

де k_1, k_3 --коєфіцієнти підсилення головного спостерігача з ковзним режимом; k_2, k_4 -- коєфіцієнти підсилення допоміжного спостерігача з ковзним режимом.

Оскільки рівняння (5) – (6) та (7) – (8) є незалежними, то дослідження впливу збурень на роботу спостерігача з ковзним режимом можна дослідити окремо для кожної вісі нерухокої відносно статора системи відліку. У такому випадку за умови зміни параметрів об'єкту керування систему рівнянь спостерігача можна записати так:

$$\frac{d\hat{i}_{s\alpha}}{dt} = -\frac{R_s}{\sigma L_s} \hat{i}_{s\alpha} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\alpha} + k_1 \sqrt{|i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha}|} \cdot \text{sign}(i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha}) + z_1; \quad (9)$$

$$\frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} = k_2 \cdot \text{sign}(i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha}) + z_2.$$

В даному випадку збурення, що викликане зміною параметрів статорного кола, відображається величиною z_1 , а зміна параметрів роторного кола -- z_2 . Згідно з теорією спостерігачів з ковзним режимом, для будь-якого значення $\varepsilon > 0$ існують коєфіцієнти підсилення k_1 та k_2 при яких оцінювання, що здійснюється спостерігачем, буде стійким за умови обмеження сигналів збурення $|z_2| < \varepsilon$. При цьому слід зазначити, що спостерігач є чутливим до величини z_1 , що формується за рахунок зміни статорного опору обмоток двигуна. Визначення величини активного опору статора є дуже важливим при роботі на низькій кутовій швидкості, оскільки наявність розбіжності між реальним значенням опору та тим, що використовується у системі керування, може призвести не тільки до виникнення помилки в оцінюванні кутової швидкості, а й до втрати стійкості. Таким чином, використання спостерігача другого порядку дозволяє досягнути нечутливості до зміни роторного опору обмоток машини, але залишається чутливим до зміни статорного опору.

Оцінювання кутової швидкості на основі адаптивної системи з задаючою моделлю передбачає використання двох моделей машини з різними структурами для визначення аналогічних змінних стану системи. В якості вихідних сигналів моделей використовуються складові вектору роторного

потокочеплення, протиЕРС, реактивна потужність і т.д. При виборі складових вектору потокочеплення ротора сигнал помилки системи розраховується наступним чином:

$$\varepsilon = \psi_{ra2}\psi_{r\beta1} - \psi_{r\beta2}\psi_{ra1}. \quad (10)$$

Таким чином, сигнал помилки формується на основі кутової різниці двох оцінок векторів потокочеплення, що отримані в різних моделях. Оскільки значення похідних складових вектору роторного потокочеплення були отримані за допомогою спостерігача з ковзним режимом, то необхідно синтезувати механізм адаптації кутової швидкості на основі цих величин.

У матричній формі рівняння складових роторних потокочеплень асинхронного двигуна, що називаються струмовою моделлю, можуть бути записані так:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\psi_{ra}}{dt} \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \frac{L_m R_r}{L_r} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{L_r} & -\omega_r \\ \omega_r & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_{ra} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Для величин, що є оцінками відповідних змінних, дана система рівнянь має наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{\psi}_{ra}}{dt} \\ \frac{d\hat{\psi}_{r\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \frac{L_m R_r}{L_r} \begin{bmatrix} \hat{i}_{sa} \\ \hat{i}_{s\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{L_r} & -\omega_r \\ \omega_r & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{ra} \\ \hat{\psi}_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Виконуючи віднімання (12) від (11):

$$\begin{bmatrix} \frac{d(\psi_{ra} - \hat{\psi}_{ra})}{dt} \\ \frac{d(\psi_{r\beta} - \hat{\psi}_{r\beta})}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{L_r} & -\omega_r \\ \omega_r & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_{ra} - \hat{\psi}_{ra} \\ \psi_{r\beta} - \hat{\psi}_{r\beta} \end{bmatrix} - \Delta\omega \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{ra} \\ \hat{\psi}_{r\beta} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Для бездатчикового оцінювання кутової швидкості можна вважати, що вихід задаючої моделі адаптивної системи відповідає реальним значенням складових вектору потокочеплення ротора. Тоді:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r &= \left(K_{\Pi} + \frac{K_i}{p} \right) \begin{bmatrix} \frac{d(\psi_{ra} - \hat{\psi}_{ra})}{dt} \\ \frac{d(\psi_{r\beta} - \hat{\psi}_{r\beta})}{dt} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{d\hat{\psi}_{ra}}{dt} \\ \frac{d\hat{\psi}_{r\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \\ &= \left(K_{\Pi} + \frac{K_i}{p} \right) \left(\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} \frac{d\hat{\psi}_{ra}}{dt} - \frac{d\psi_{ra}}{dt} \frac{d\hat{\psi}_{r\beta}}{dt} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Отже, використання ковзного режиму у спостерігачах стану для системи векторного керування дозволило реалізувати оцінювання складових вектору потокочеплення ротора без використання параметрів роторного кола. Це дозволило розробити структуру адаптивної системи з задаючою моделлю, у якій спостерігач струму є спостерігачем з ковзним режимом другого порядку, а в подальшому складові струму використовуються для оцінки вектору

потокочеплення ротора. Кутова швидкість визначається у адаптивній моделі при паралельному оновленні значення активного опору статорного ланцюга, що дозволяє суттєво покращити показники якості керування електроприводу при роботі в зоні низьких кутових швидкостей.

У **четвертому розділі** виконано розробку методу ідентифікації швидкості та потокочеплення ротора з використанням анізотропних властивостей асинхронного двигуна. В даній групі методів бездатчикової оцінки положення додатковий високочастотний сигнал певної частоти інжектуються в основну напругу живлення машини. При високочастотному живленні використання ідеалізованої моделі асинхронного двигуна неможливе, оскільки частота високочастотного сигналу (250 Гц – 4 кГц), як правило, значно вище частоти основної напруги, що живить двигун. При аналізі анізотропії машини використовується тільки той струмовий відгук, що викликаний інжектованим високочастотним сигналом. Таким чином, наявністю протиЕРС можна знехтувати.

Ці методи використовують внутрішні анізотропії машини, які можуть бути викликані її геометрією, наявністю ексцентриситету, насиченням сталі машини або наявністю пазів. Такі анізотропії можуть бути виявлені з використанням тестових впливів на машину. За допомогою їх виявлення можна реалізувати знаходження положення ротора або положення вектору потокочеплення ротора без використання параметрів схеми заміщення машини та при роботі на дуже низьких швидкостях. Оцінювання базується на реакції машини на високочастотну напругу, яка вводиться у основну напругу, що живить двигун, за допомогою інвертора.

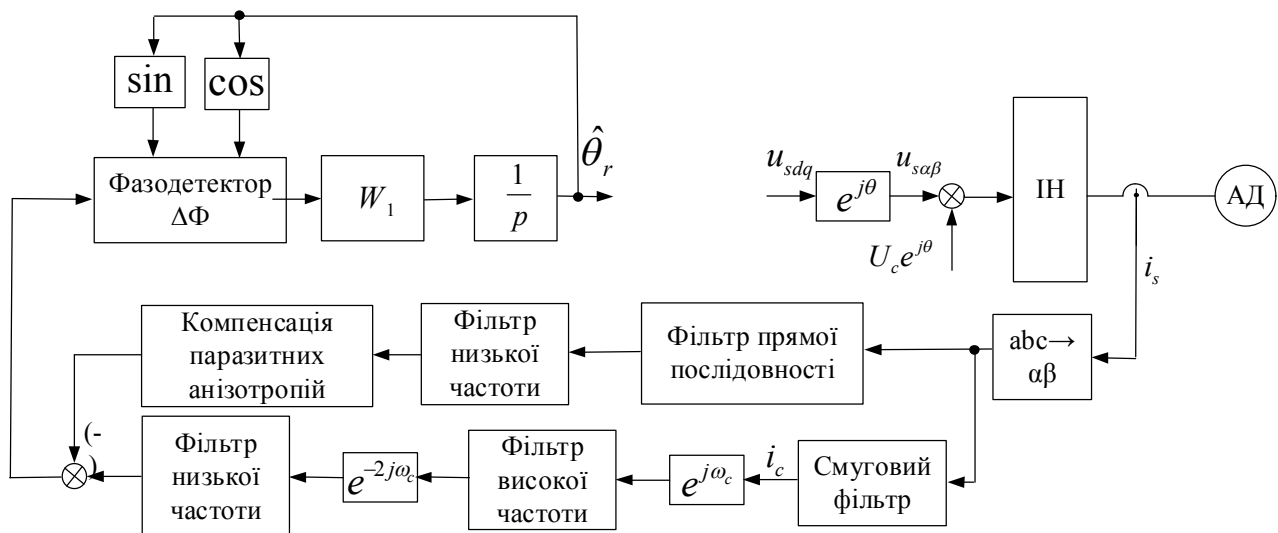


Рисунок 5 – Структура запропонованої системи визначення положення ротора з використанням анізотропних властивостей машини

Аналізуючи струмовий відгук, доведено, що він складається з складової прямої та зворотної послідовності. При цьому складова прямої послідовності, не містить інформації щодо просторого розміщення вісі анізотропії, а складова

зворотної послідовності містить просторову інформацію у своїй фазі та є пропорційною до індуктивності, що модулюється анізотропією.

Отже, перед визначенням просторової інформації щодо вісі анізотропії слід відфільтрувати складову прямої послідовності у струмовому відгуці системи. Оскільки вектори складових прямої та зворотної послідовностей обертаються в протилежних напрямках, то одним з варіантів усунення прямої складової є застосування фільтру високої частоти у системі координат, що обертається синхронно зі складовою прямої послідовності несучого тестового сигналу.

На рис. 5 представлена структурна схема системи бездатчикового визначення положення ротора асинхронного двигуна. Визначення положення анізотропії після усіх вищеописаних процедур фільтрації виконується за допомогою фазодетектора $\Delta\Phi$, контурного фільтру $W_1(p)$ та керованого генератора, що у даному випадку представлений інтегратором. На виході фазодетектора скалярної системи фазового автопідстроювання частоти присутні низькочастотна та високочастотна складові. При цьому лише перша складова містить фазову різницю між вхідним сигналом та оцінкою фази, що дозволяє налаштувати контур. Високочастотна складова відфільтровується фільтром низької частоти, що міститься у $W_1(p)$. Цей фільтр низької частоти створює проблеми при реверсуванні швидкості та при роботі на дуже низькій кутовій частоті, оскільки високочастотна складова зміщується в низькочастотну зону та не може бути усунена. Це призводить до порушень у роботі системи фазового автопідстроювання частоти через неможливість визначення фазової різниці.

Застосування системи фазового автопідстроювання у векторній формі дозволяє усунути дану проблему через те, що використовуються два ортогональних сигнали, що містять фазову інформацію. Припустимо, що на вхід системи діють ідеально відфільтровані сигнали зворотної послідовності:

$$i_{c1d} = I \sin(\theta_r); \quad (15)$$

$$i_{c1q} = I \cos(\theta_r), \quad (16)$$

де θ_r – кут анізотропії.

Коефіцієнт n показує співвідношення між кутом повороту ротора в геометричних градусах та кутом повороту анізотропії, що розглядається, тобто:

$$\theta_r = n\theta_{dq'}. \quad (17)$$

Фазодетектор виконує векторне множення вхідного вектору та вектору одиничної величини, аргументом якого є отримана оцінка положення з виходу спостерігача:

$$\Delta\hat{\theta} = i_{c1d} \cdot \cos \hat{\theta}_r - i_{c1q} \cdot \sin \hat{\theta}_r = I \sin(\theta_r - \hat{\theta}_r). \quad (18)$$

За умови $\theta_r - \hat{\theta}_r \rightarrow 0$:

$$\Delta\hat{\theta} \approx I(\theta_r - \hat{\theta}_r). \quad (19)$$

Для дослідження системи керування була розроблена дискретно-польова модель асинхронного двигуна, що дозволила застосувати метод кінцевих елементів для розрахунку процесів у асинхронному двигуні з урахування його геометрії, тобто з наявністю анізотропних властивостей. Результати

моделювання при роботі з кутовою швидкістю 2 рад/с при номінальному навантаженні на валу двигуна представлені на рис. 6-7.

У п'ятому розділі виконана експериментальна перевірка запропонованих у роботі рішень. Експериментальна установка для дослідження бездатчикового векторного керування базується на перетворювачі частоти, що складається з некерованого випрямляча та автономного інвертора напруги. Система керування перетворювачем реалізована на базі цифрового сигнального контролера фірми Texas Instruments TMS320F28335, що поєднує в собі потужне ядро сигнального DSP процесора та широкі периферійні можливості. У роботі представлені результати роботи запропонованого методу компенсації нелінійних властивостей інвертора, запропонованої системи оцінювання швидкості на базі адаптивної системи з задаючою моделлю, запропонованої системи бездатчикового векторного керування з використанням анізотропних властивостей машини. Експериментальні дані продемонстрували високу збіжність з результатами математичного моделювання та підтвердили достовірність основних висновків, що були зроблені в ході дослідження.

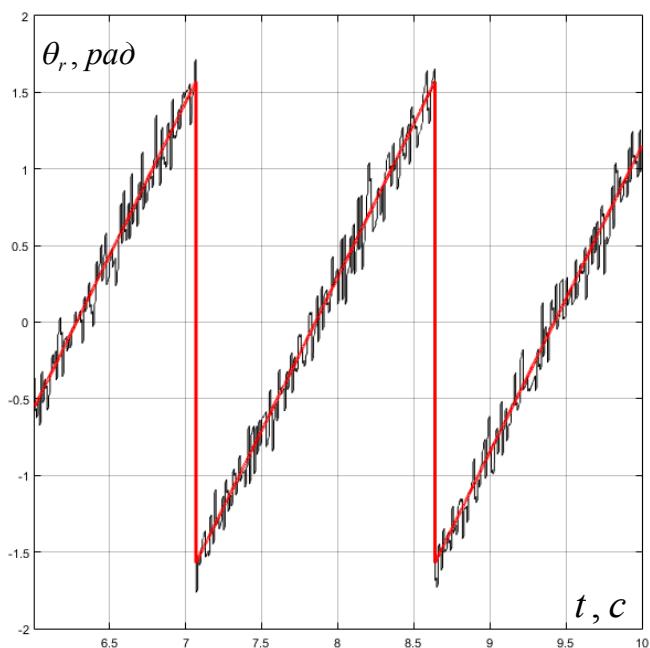


Рисунок 6 – Результати моделювання роботи системи бездатчикового оцінювання положення при кутовій частоті 2 рад/с при номінальному навантаженні

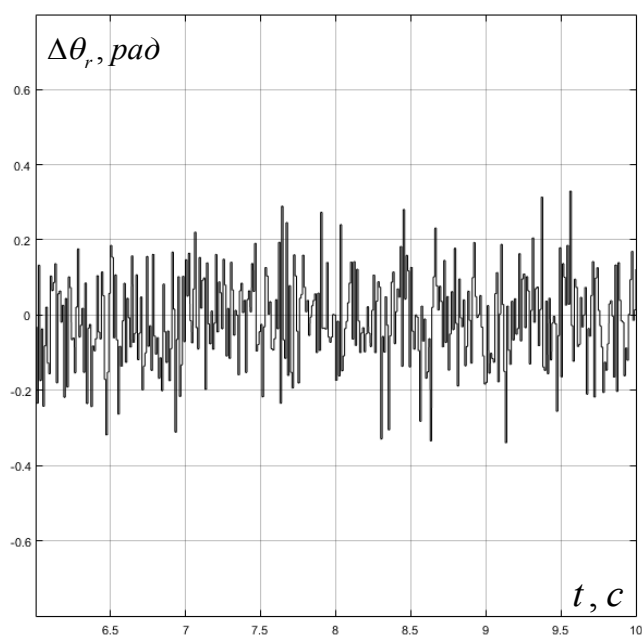


Рисунок 7 – Графік похибки визначення положення системи бездатчикового оцінювання положення при кутовій частоті 2 рад/с при номінальному навантаженні

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення наукової задачі покращення характеристик частотно-керованого асинхронного приводу при роботі на низьких кутових швидкостях.

Проведені у роботі дослідження дають змогу зробити наступні узагальнюючі висновки:

1. Необхідність розширення діапазону керування існуючих бездатчикових електроприводів з векторним керуванням призводить до потреб у детальному вивченні можливості оцінювання кутової швидкості з використанням ідеалізованої математичної моделі асинхронного двигуна при роботі в необхідному діапазоні, оскільки при зниженні величини кутової швидкості рівень її впливу на процеси, що відбуваються у статорному колі машини, зменшується, що призводить до неможливості її непрямой ідентифікації.

2. З аналізу математичної моделі асинхронного двигуна для випадку низької частоти живлення доведено, що у такому режимі роботи кутова швидкість обертання ротора майже не впливає на процеси у колі статора, що призводить до суттєвого погіршення оцінювання кутової швидкості методами, що базуються на ідеалізованій математичній моделі асинхронного двигуна

3. Живлення асинхронного двигуна від автономного інвертора напруги з широтно-імпульсною модуляцією, що є найбільш поширеним методом реалізації частотного керування в даний час, призводить до обмежень при роботі в зоні низьких кутових швидкостей через вплив нелінійних властивостей інвертора на форму вихідного струму.

4. Запропонований метод компенсації нелінійних властивостей інвертора, що відрізняється від існуючого тим, що напрям вихідних струмів визначається не шляхом прямого вимірювання, а за допомогою спостерігача струму, дозволяє досягнути більш якісної форми вихідного струму. Форма реактивного струму стає гладкою, що відповідає мінімальному рівню пульсацій вихідних струмів інвертора. В результаті проведених досліджень було встановлено, що реалізація запропонованого методу дозволяє знизити рівень найбільш значущих гармонік (5-ї та 7-ї) приблизно в 8-10 разів.

5. Розроблена адаптивна система з задаючою моделлю, що використовує у якості моделі спостерігач струму з ковзним режимом другого порядку, дозволяє підвищити стійкість при роботі на низьких кутових швидкостях у порівнянні з існуючими системами, де в якості вихідних сигналів обох моделей використовуються складові вектору потокозчеплення ротора, протиЕРС або миттєва реактивна потужність. При цьому, спостерігач струму та механізм адаптації, що виконує ідентифікацію кутової швидкості, демонструють здатність коректно оцінювати вектор стану системи навіть при відхиленні параметрів схеми заміщення, що використовуються у системі керування, від їх реальних значень.

6. Синтезована система бездатчикового визначення кутової швидкості асинхронного двигуна з використанням анізотропних властивостей машини, що відрізняється від існуючих здатністю виконувати розділення впливу різних анізотропій, дає змогу оцінки кутової швидкості без використання значень параметрів схеми заміщення двигуна, створюючи можливості для розробки систем з розширеним діапазоном та високими вимогами щодо статичних та динамічних показників якості керування.

7. Розроблено апаратну та програмну частину експериментального стенду для практичної реалізації і проведення досліджень розробленої системи.

8. Обґрунтованість і достовірність наукових досліджень, висновків і рекомендацій підтверджена узгодженням результатів теоретичних досліджень та експериментальних даних.

9. Результати дослідження системи бездатчикового векторного керування, що були проведені на експериментальній установці в умовах підприємства-виробника частотних перетворювачів, відповідають результатам, що були отримані шляхом математичного моделювання системи, що доводить доцільність застосування розроблених рішень при синтезі систем керування електроприводами змінного струму для покращення якості керування при роботі на низьких кутових швидкостях.

Таким чином, дослідження, що проведені у дисертаційній роботі, є подальшим розвитком теорії бездатчикового керування електроприводів з асинхронними двигунами і дає змогу покращити статичні та динамічні характеристики при роботі у широкому діапазоні зміни кутової швидкості та підвищити техніко-економічні показники функціонування таких систем.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Козакевич І.А. Адаптивний спосіб компенсації нелінійних властивостей інвертора напруги для бездатчикового векторного керування на низьких частотах обертів / І.А. Козакевич // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2014. – Вип. 1. – С. 19-25. (Index Copernicus International, Ulrich's Periodicals Directory, CiteFactor, Polish Scholarly bibliography, ВІНІТІ РАН)

2. Козакевич И.А. Бездатчиковое векторное управление на основе анизотропных свойств машины / О.Н. Синчук, Ю.Г. Осадчук, И.А. Козакевич // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – № 15. – С. 45-47. (Index Copernicus International, Ulrich's Periodicals Directory, Electronic Journals Library, ВІНІТІ РАН, РИНЦ, Google Scholar).

3. Козакевич І.А. Дослідження спостерігача Люенбергера для бездатчикового векторного керування при роботі на низькій швидкості / А.П. Сінолиций, Ю.Г. Осадчук, І.А. Козакевич // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. – № 3. – С. 38-39. (Index Copernicus International, Ulrich's Periodicals Directory, Electronic Journals Library, ВІНІТІ, РИНЦ, Google Scholar).

4. Козакевич И.А. Исследование многоуровневого инвертора напряжения, построения по модульному принципу, при работе на низких частотах / Осадчук Ю.Г., Козакевич И.А., Удовенко О.А. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – 2013. – №36 (1009). – С. 322-325. (Index Copernicus International).

5. Козакевич І.А. Аналіз струму нульової послідовності асинхронних двигунів для бездатчикового керування / О.М. Сінчук, Ю.Г. Осадчук, І.А. Козакевич // Гірничий вісник. – 2014. – Вип. 98. – С. 23-27.

6. Козакевич І.А. Підвищення якості компенсації «мертвого часу» автономного інвертора напруги для бездатчикового векторного керування на

низькій кутовій швидкості / А.П. Сінолиций, Ю.Г. Осадчук, І.А. Козакевич // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-виробничного журналу. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3, 2012(19). – С. 142-144.

7. Козакевич І.А. Порівняльний аналіз класичного векторного та J-M керування / А.П. Сінолиций, І.А. Козакевич // Вісник Криворізького національного університету. – 2012. – Вип. 30. – С. 128-131.

8. Козакевич І.А. Дослідження адаптивних систем з задаючою моделлю для бездатчикового векторного керування асинхронним двигуном при роботі на низькій швидкості / І.А. Козакевич, Д.О. Шкурко // Вісник Криворізького технічного університету. – 2011. – Вип. 29. – С. 150-154.

9. Козакевич І.А. Алгоритм компенсації ефекту «мертвого часу» в трьохрівневих інверторах напруги / Ю.Г. Осадчук, І.А. Козакевич, І.О. Сінчук // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2010. – Вип. 1. – С. 38-41.

10. Козакевич І.А. Синтез алгоритму векторного керування двома асинхронними двигунами, що живляться від одного інвертора / Ю.Г. Осадчук, І.А. Козакевич // Вісник Криворізького технічного університету. – 2011. – Вип. 28. – С. 150-154.

11. Козакевич І.А. Экспериментальное определение кривой намагничивания асинхронного двигателя средствами частотного привода / Ю.Г. Осадчук, И.А. Козакевич // Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського. – 2009. – Вип. 4(57). – С. 95-97.

12. Козакевич І.А. Бездатчиковое векторное управление с использованием анизотропных свойств машины / И.А. Козакевич // Наука и образование в XXI веке. Часть 15 : Международная научно-практическая конференция : материалы конференции. – Тамбов: Юком, 2014. – С. 70-71.

13. Козакевич І.А. До питання використання анізотропних властивостей асинхронних двигунів для бездатчикового керування / І.А. Козакевич // Актуальні питання сучасної науки : Науково-практична конференція : матеріали конференції. – Херсон: Видавничий дім «Гельветика», 2014. – С. 60-66.

14. Козакевич І.А. Спосіб бездатчикового керування асинхронними двигунами з використанням струму нульової послідовності / І.А. Козакевич // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих : Науково-технічна конференція аспірантів та студентів : матеріали конференції. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. – С. 231-234.

15. Козакевич І.А. Дослідження системи бездатчикового керування асинхронними двигунами з використанням їх анізотропних властивостей / І.А. Козакевич // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації : XII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів : матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, 2014. – С. 83-84.

16. Козакевич И.А. Анализ работы автономного инвертора напряжения при низком выходном напряжении и способ улучшения его формы / И.А. Козакевич // Наука XXI века: теория, практика, перспективы: Международная

научно-практическая конференция : материалы конференции – Уфа: РИО МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2014. – С. 19-21.

17. Козакевич И.А. Модернизация инвертора, ведомого нагрузкой, для синхронных электроприводов большой мощности / О.Н. Синчук, И.А. Козакевич, В.П. Музыка // Роль науки в развитии общества: Международная научно-практическая конференция : материалы конференции – Уфа: РИО МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2015. – С. 25-27.

18. Козакевич И.А. Исследование адаптивного наблюдателя полного порядка для низких угловых скоростей двигателя // Перспективи розвитку сучасної науки : Міжнародна науково-практична конференція : матеріали конференції. – Херсон : Видавничий дім «Гельветика», 2014. – С. 65-67

19. Козакевич І.А. Система бездатчикового векторного керування з використанням релейних регуляторів / І.А. Козакевич // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика : XVI Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 1/2015 (3). – С. 80-82.

20. Козакевич І.А. Система прямого керування моментом асинхронного двигуна, що живиться від багаторівневого інвертора напруги / І.А. Козакевич, Я.С. Гембарський // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації : Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених і спеціалістів : матеріали конференції. – КрНУ, 2012. – С. 124-125.

21. Козакевич І.А. Дослідження адаптивних систем для бездатчикового керування асинхронними двигунами при роботі на низьких частотах обертів / І.А. Козакевич // Проблеми енергоресурсозбереження в електромеханічних системах. Наука, освіта і практика : XV Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, 2014. – С. 29-31.

22. Козакевич І.А. Дослідження топологій багаторівневих інверторів з використанням «плаваючих» конденсаторів / Ю.Г. Осадчук, І.А. Козакевич, Р.В. Сіяно // Качество минерального сырья. Сборник научных трудов. – Кривой Рог, 2014. – С. 420-428.

23. Козакевич І.А. Аналіз способів покращення динамічних властивостей асинхронних електроприводів зі скалярним керуванням / О.М. Сінчук, І.А. Козакевич, Д.О. Швидкий // Качество минерального сырья. Сборник научных трудов. – Кривой Рог, 2014. – С. 428-432.

АНОТАЦІЯ

Козакевич І.А. Бездатчикове векторне керування асинхронними двигунами при роботі на низьких кутових швидкостях. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2016.

Дисертація присвячена питанням розробки та дослідження систем бездатчикового векторного керування асинхронними двигунами, що мають

підвищені показники якості керування при роботі на низьких кутових швидкостях.

Проаналізовано основні нелінійні властивості автономного інвертора напруги та доведено, що їх вплив при роботі системи з низькою кутовою частотою може призводити до значних похибок у роботі підсистеми непрямого визначення невимірюваних змінних стану, оскільки при цьому спостерігається суттєве спотворення форм вихідних струмів та відхилення реальної вихідної напруги перетворювача від заданої. Представлено новий метод компенсації нелінійних властивостей інвертора, що відрізняється від існуючого наявністю адаптивного спостерігача струму, що дозволяє суттєво покращити властивості системи при наявності впливу електромагнітних перешкод на вимірювальні струмові канали, а величина коригуючого вектору підлаштовується з використанням показника пульсацій реактивного струму машини. Отримав подальший розвиток теорія бездатчикового визначення кутової швидкості з використанням адаптивної системи з задаючою моделлю. Проаналізовано стійкість існуючих систем, що базуються на використанні в якості вихідних сигналів моделей величин складових вектору потокозчеплення, проти ЕРС, миттєвої реактивної потужності, складових вектору струму статора. Для суттєвого покращення стійкості запропоновано нову структуру адаптивної системи, що містить внутрішній спостерігач струму з використанням ковзних режимів. Розроблено метод визначення положення ротора, що базується на використанні анізотропних властивостей машини, та відрізняється від існуючих можливістю працювати при наявності декількох виражених анізотропій. Результати математичного моделювання та експериментальних досліджень довели ефективність запропонованих рішень.

Ключові слова: асинхронний векторно-керований електропривод, нелінійні властивості інвертора, ідентифікація параметрів, спостерігач швидкості, адаптивна система, анізотропна властивість.

ABSTRACT

Kozakevich I.A. Sensorless vector control of induction motors at low angular speed. – A manuscript.

Dissertation for scientific degree of Candidate of Science (Engineering) on Specialty 05.09.03 – electrical engineering complexes and systems. – Vinnytsia National Technical University. – Vinnytsia, 2016.

Thesis deals with development and research of sensorless vector control systems for induction motors with increased values of quality control when operating at low angular speed.

The main non-linear properties of the voltage-fed inverter were analyzed and fact of their influence can lead to significant errors in the subsystem of indirect identification of unmeasured state variables at low angular frequency were proved. There are significant distortions of the output current and the deviation of the actual output voltage from the command. A new method for compensation of nonlinear properties of the inverter, which is characterized by the presence of existing adaptive current observer that can significantly improve the properties of the system in the

presence of electromagnetic interferences on the current measurement channels, and the magnitude of the correction vector is adjusting using reactive current pulsation. The theory of sensorless identification of the angular speed using the reference adaptive systems has continued to develop. Analyzed the stability of the existing systems, which are based on the use as on output value of the model components of flux vector, back-EMF, instantaneous reactive power, stator current vector components. For a noticeable improvement in the stability offered the new structure of the adaptive system, comprising an inner sliding mode observer. It developed a method for determining rotor position, which is based on the use of the anisotropic properties of the machine, and differs from existing ability to work when there are several pronounced anisotropy. The results of mathematical modeling and experimental studies confirmed the effectiveness of the proposed solutions.

Keywords: asynchronous vector-controlled electric drive, inverter nonlinearities, parameter identification, speed observer, adaptive system, anisotropic property.

АННОТАЦИЯ

Козакевич И.А. Бездатчиковое векторное управление асинхронными двигателями при работе на низких угловых скоростях. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Винницкий национальный технический университет. – Винница, 2016.

Диссертация посвящена вопросам разработки и исследования систем бездатчикового векторного управления асинхронными двигателями с повышенными показателями качества управления при работе на низких угловых скоростях.

Целью работы является разработка теоретических аспектов и практических решений улучшения качества управления асинхронных электроприводов с векторным управлением и бездатчиковым определением угловой скорости и потокосцепления.

Объектом исследования являются динамические процессы в асинхронном электроприводе с векторным управлением при работе на низкой угловой скорости и процессы в автономном инверторе с широтно-импульсной модуляцией, питающем его.

Предметом исследования являются способы косвенного бездатчикового определения частоты вращения ротора и потокосцепления асинхронного двигателя.

В диссертационной работе для решения поставленных задач использовались такие методы: операторный метод (для составления передаточных функций математической модели асинхронного двигателя и системы управления ним); метод дифференциального исчисления, методы численного интегрирования, методы планирования эксперимента и поиска экстремума – для идентификации скорости и потокосцепления на базе анизотропных свойств двигателя при введении тестовых сигналов; метод

конечных элементов – при составлении дискретно-полевой модели асинхронного двигателя.

Предложен новый метод компенсации нелинейных свойств инвертора напряжения, базирующийся на токе, оцениваемом адаптивной моделью, не требует заблаговременного определения параметров инвертора и системы управления в отличие от методов, предусматривающих использование измеренных токов и параметров инвертора.

Впервые формализована структура наблюдателя состояния асинхронного двигателя, базирующегося на использовании его анизотропных свойств и позволяющего выполнять разделение сигналов полезных анизотропий, не использует параметры схемы замещения, в отличие от методов, предусматривающих использование модели идеализированного асинхронного двигателя.

На основе анализа существующих структур адаптивных систем с задающей моделью показана целесообразность использования системы с переменной структурой, что позволит существенно повысить устойчивость привода в зоне низких угловых скоростей.

Проанализированы основные нелинейные свойства автономного инвертора напряжения и доказано, что их влияние при работе системы с низкой угловой частотой может приводить к значительным погрешностям в работе подсистемы косвенного определения неизмеряемых переменных состояния, поскольку при этом наблюдается значительное искажение форм выходных токов и отклонение реального выходного напряжения преобразователя от заданной. Использование предложенного метода компенсации нелинейных свойств инвертора позволяет снизить уровень наиболее значимых гармоник (5-й и 7-й) приблизительно в 8-10 раз.

Получила дальнейшее развитие теория бездатчикового определения угловой скорости с использованием адаптивной системы с задающей моделью. Проанализирована устойчивость существующих систем, базирующихся на использовании в качестве выходных сигналов моделей величин составляющих вектора потокосцепления, противоЭДС, мгновенной реактивной мощности, составляющих вектора тока статора. Для заметного улучшения устойчивости предложена новая структура адаптивной системы, содержащая внутренний наблюдатель тока с использованием скользящих режимов. При этом наблюдатель тока и механизм адаптации, выполняющий идентификацию угловой скорости, демонстрируют способность корректно оценивать вектор состояния системы даже при отклонении параметров схемы замещения, используемых в системе управления, от их реальных значений.

Работоспособность и эффективность предложенных в работе методов и алгоритмов подтверждены физическими экспериментами на реальных электромеханических системах, а также путем математического моделирования.

Ключевые слова: асинхронный векторно-управляемый электропривод, нелинейные свойства инвертора, идентификация параметров, наблюдатель скорости, адаптивная система, анизотропное свойство.

Підписано до друку 08.02.2016
Формат 60×84¹/32 Папір офсетний
Ум. друк. арк. 09 Обл. вид. арк.1.04
Наклад 100 прим. Зам. № 11.02.2016

Віддруковано в Видавничому центрі
ДВНЗ «Криворізький національний університет»
м. Кривий Ріг, вул. XXII Партз'їзду, 11. Тел.: 409-17-23
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №4328 від 24.05.2012 р.