

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ДЯЧЕНКО Григорій Григорійович



УДК 621.3.07:681.5

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННОЮ МАШИНОЮ У
ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ НА БАЗІ МЕТОДІВ З ПРОГНОЗУЮЧИМИ
МОДЕЛЯМИ**

Спеціальність: 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси і системи»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електропривода Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент

Азюковський Олександр Олександрович, ректор Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Чорний Олексій Петрович, директор Інституту електромеханіки, енергозбереження і систем управління Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України.

кандидат технічних наук, доцент

Назарова Олена Сергіївна, доцент кафедри електропривода і автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Захист дисертації відбудеться «28» вересня 2021 р. о 13-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19, тел. (056) 746-22-00.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19, корпус 1.

Автореферат розісланий «27» серпня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 08.080.07, к.т.н., доцент



І.М. Удовик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку науки і техніки електромеханічні системи посідають домінуюче місце серед приводних пристроїв і забезпечують безперебійну й надійну роботу технологічних механізмів у багатьох галузях промисловості та спеціальної техніки. Разом з тим все гостріше стає питання глобального енергозбереження не тільки через збільшення споживання електроенергії в промисловості і побуті, та пов'язаної з цим необхідності в будівництві та введенні в експлуатацію нових енергетичних потужностей, а й через обмеженість світових запасів природних ресурсів.

Асинхронний електропривод залишається основним типом приводу в багатьох механізмах практично усіх галузей побуту, промисловості та транспорту. Типовими механізмами, в яких застосовуються електроприводи на базі асинхронної машини з короткозамкненим ротором є: відцентрові насоси, промислові приводи (наприклад, для стрічкових конвеєрів), великі повітродувки і вентилятори, токарні верстати тощо. В умовах неповного навантаження коефіцієнт корисної дії асинхронної машини значно зменшується при роботі на номінальних значеннях магнітного потоку. Добре відомо, що енергоефективність асинхронних машин в усталеному режимі може бути збільшена. Цьому присвячено багато наукових публікацій науковців, а саме: О.П. Чорний, О.С. Назарова, О.С. Бешта, О.В. Балахонцев, О.В. Садовой, О.Р. Колганов, О.С. Ушков, О.І. Толочко, А.М. Bazzi, P.T. Krein, F. Abrahamsen, O. Wasynczuk, S.N. Vukosavic, M. Ranta, G. Schullerus, M. Schubert, M. Cacciato та ін. Головний принцип керування в цих роботах зводиться до вибору відповідного оптимального значення потокозчеплення, що залежить від моменту навантаження в усталеному режимі. Асинхронний електропривод є найбільш досконалим, однак, якщо машина працює в режимі зі змінним у часі (нестационарним) навантаженням та/або швидкістю, існуючі методи не дають максимальної енергоефективності. Тому, є необхідність використання енергоефективних і рентабельних систем електроприводу для подібних приладів та обладнання.

Рішення задачі енергоефективного керування в цьому випадку ускладнюється з двох причин. По-перше, на відміну від завдання оптимального керування при усталеному режимі, не може бути отримано рішення в закритій формі. По-друге, у результаті має бути вирішена задача енергоефективного керування у режимі реального часу в інверторах з високою швидкодією.

Таким чином, розробка законів енергоефективного керування координатами асинхронного електропривода, що працює в умовах змінного навантаження і завдання на швидкість є **актуальною науковою задачею**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи відповідає Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», зокрема, стаття 3 «Пріоритетні напрями розвитку науки і техніки на період до 2021 року» пункт 3 «Енергетика та енергоефективність».

Дисертаційна робота виконувалась в рамках науково-дослідних робіт, що проводилися в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» (до 2018 р. – Державному ВНЗ «Національний гірничий університет»), в яких автор брав участь як виконавець: бюджетна тематика «Енергозберігаюче управління електромеханічними технологічними комплексами і системами гірничометалургійної промисловості» (тема ГП-475, № ДР 0115U002296, 01.2015 – 12.2017), госпдоговірна тема «Оцінка поточного стану корпусної ізоляції обмоток електричних машин» (тема 072216, 01.2021 – 12.2021), а також робота за спільним міжнародним проектом «LAB – Лабораторії без границь. Цифрові засоби і інструменти для віддаленої лабораторії з Індустрії 4.0» (LAB – Laboratories Across Borders. Digital applications and tools for engineering laboratory training 4.0) – грант DAAD в рамках програми «Підтримка інтернаціоналізації українських університетів» (партнери – НТУ «Дніпровська політехніка» та Ройтлінгенський університет, ФРН, 10.2020 – 09.2022).

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є підвищення енергетичних показників асинхронної машини у складі електропривода шляхом розробки законів керування електромеханічною системою у перехідних режимах, що забезпечують найбільш раціональний перехід електромеханічної системи із робочої точки з одними координатами (швидкість, крутний момент) до бажаної точки за траєкторією мінімуму енергії втрат.

Для досягнення зазначеної мети в дисертації поставлено і вирішено такі **задачі:**

– визначено шляхи модифікації градієнтного методу керування на основі прогнозуючих моделей (gradient-based model predictive control, GRAMPC) для забезпечення мінімізації енергоспоживання асинхронного електропривода у динамічних режимах;

– визначено закономірності впливу алгоритмічних параметрів (кількість ітерацій, кількість точок розбиття горизонту прогнозування, величина горизонту прогнозування) на точність розрахунку координат точки на траєкторії переходу електромеханічної системи з поточного стану до нового і сформульовано умови досягнення бажаної точності та швидкодії алгоритму;

– досліджено закономірності впливу значення сталої часу низькочастотного фільтру першого порядку на формування уставки потокозчеплення і сформульовано умови, що забезпечують мінімізацію енергоспоживання у динамічному режимі;

– експериментально досліджено ефективність розроблених законів керування системою електропривода щодо мінімізації енергоспоживання у динамічних режимах.

Об'єкт дослідження – динамічні процеси в системі керування і електромеханічному перетворювачі, що зумовлюють енергоспоживання асинхронного електропривода.

Предмет дослідження – закони керування електромеханічною системою під час зміни керуючого сигналу та/або навантаження для визначення бажаної траєкторії переходу електромеханічної системи з поточного стану до нового.

Методи досліджень. Результати дисертаційної роботи отримані з використанням таких методів досліджень: поліноміальна апроксимація – для отримання кривої намагнічування магнітопроводу; методи теорії автоматичного керування – для синтезу системи векторного керування електроприводом на базі асинхронної машини з короткозамкненим ротором; метод функцій Ляпунова – для аналізу стійкості локальних мінімумів цільового функціоналу; метод GRAMPC – для реалізації прогнозування стану математичної моделі асинхронної машини; метод Гамільтона – для знаходження рішення цільового функціоналу за критерієм мінімуму втрат; принцип максимуму Понтрягіна – для формування умов оптимальності; чисельні методи вирішення алгебраїчних та диференціальних рівнянь, градієнтний метод пошуку екстремумів функції у проєкціях, методи чисельного інтегрування та мова програмування «С» для розрахунку та математичного моделювання GRAMPC методу прогнозування; методи комп'ютерного моделювання із застосуванням сучасного інженерного пакету прикладних програм MATLAB для дослідження розроблених законів керування у складі векторного керування; таксонометричний метод – для визначення діапазону значень алгоритмічних параметрів з урахуванням заданих критеріїв; експериментальна перевірка адекватності результатів, які були одержані аналітичними методами.

Наукові положення, що захищаються в дисертації.

1. Зменшення втрат у динамічному режимі електромеханічної системи з асинхронним електродвигуном забезпечується законом керування потягозчепленням, точність прогнозування якого залежить від кроків розбиття горизонту прогнозування відповідно до гіперболічного закону.

2. Зниження миттєвої потужності втрат у динамічному режимі роботи забезпечується модифікацією конвенціонального векторного керування системою електропривода, що враховує низькочастотну фільтрацію першого порядку ступінчатої траєкторії завдання на потягозчеплення з сталою часу від 0,5 до 1,0 сталої часу ротора.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше застосовано GRAMPC метод прогнозування для керування електромеханічною системою на базі асинхронної машини з метою енергоефективного керування в режимі реального часу.

2. Вдосконалено GRAMPC метод прогнозування можливістю урахування зміни бажаного майбутнього стану електропривода як в результаті впливу сигналу керування, так і в результаті впливу навантаження (у тому числі одночасно), що забезпечує формування закону керування для переводу електромеханічної системи з робочої до бажаної точки координат за траєкторією мінімуму енергії втрат у режимі реального часу.

3. Вперше встановлено діапазон навантаження асинхронної машини, в межах якого найбільш доцільним є застосування закону керування координатами електромеханічної системи, що забезпечує мінімізацію її енергоспоживання в перехідних режимах.

4. Вперше встановлено діапазон раціональних значень сталої часу фільтру і доведено, що мінімізація енергоспоживання у динамічному режимі роботи

забезпечується модифікацією конвенціонального векторного керування системою електропривода шляхом застосування низькочастотної фільтрації ступінчатого завдання на потокозчеплення при правильному виборі сталої часу фільтру.

5. Удосконалено принцип визначення кількості кроків ітерацій на кожному кроці розбиття горизонту прогнозування та кількості цих кроків при використанні GRAMPC методу прогнозування з урахуванням бажаної точності та швидкості розрахунку координат точок траєкторії переходу електромеханічної системи з поточного стану до нового.

6. Удосконалено підходи визначення траєкторії переходу системи з поточного до нового стану, залежно від кроків розбиття горизонту прогнозування відповідно до гіперболічного закону та екстремуму залежності від кількості ітерацій на кожному кроці розбиття горизонту.

Обґрунтованість та достовірність отриманих в роботі результатів підтверджується коректністю припущень, що були прийняті у ході досліджень, адекватністю математичної моделі асинхронної машини у складі електроприводу, високою достовірністю результатів комп'ютерного моделювання у програмному пакеті MATLAB/Simulink, та збіжністю основних результатів аналітичного розрахунку та моделювання з результатами експериментальних стендових досліджень ефективності запропонованих законів керування.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблена методика вибору значень кількості кроків ітерацій на кожному кроці розбиття горизонту прогнозування та кількості цих кроків при використанні модифікованого GRAMPC методу прогнозування. Визначено, що шляхом поєднання даних параметрів досягається бажана точність та швидкість розрахунку координат точок траєкторії переходу електромеханічної системи з поточного стану до нового у режимі реального часу.

2. Підтверджена працездатність та можливість технічної реалізації запропонованого GRAMPC методу прогнозування у системі швидкого прототипування dSPACE ControlDeck з інтервалом дискретизації $1,0 \cdot 10^{-3}$ с.

3. Запропонована модифікація конвенціонального векторного керування системою електропривода, що враховує низькочастотну фільтрацію ступінчатої траєкторії завдання на потокозчеплення, обумовлена принципом роботи регулятора потокозчеплення. Така модифікація забезпечує суттєве зменшення миттєвої потужності втрат у динамічному режимі роботи і, як наслідок, мінімізацію споживаної енергії. Обидва запропоновані підходи можуть бути швидко інтегровані в існуючі інвертори.

Реалізація результатів роботи. Результати роботи використовуються у навчальному процесі для підготовки студентів зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» в дисципліні «Системи керування електроприводами».

Результати впроваджені на ТОВ «Сінерджі ЕР ЕНД ДІ» Synergy R&D LLC. Практичне впровадження результатів роботи підтверджується відповідними документами, що наведені у додатках до дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати та положення одержані в дисертаційній роботі, доповідались, обговорювалися і були схвалені на науково-технічних конференціях: 18й міжнародний симпозиум «Power Electronics EE2015» (м. Нові Сад, Сербія, Новосадський університет, 28–30 жовтня 2015), Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження та енергоефективність – 2018» (м. Дніпро, Україна, НТУ «ДП», 15–16 листопада 2018), Міжнародна конференція «Modern electrical and energy systems». (м. Кременчук, Україна, КрНУ імені Михайла Остроградського, 23–25 вересня 2019), Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (м. Дніпро, Україна, НМетАУ, 17–19 березня 2020), Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження та енергоефективність – 2020. Молодь: наука та інновації» (м. Дніпро, Україна, НТУ «ДП», 24 грудня 2020).

Публікації. Основні положення дисертації і результати досліджень опубліковано в 13 друкованих працях, з них 6 статей у фахових виданнях МОН України (3 статті у виданні, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus), 2 статті у періодичних закордонних виданнях (1 стаття у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Web of Science), 5 – тези і матеріали доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Автором запропоновано застосовувати GRAMPC метод прогнозування для керування електромеханічною системою на базі асинхронної машини з короткозамкненим ротором з метою підвищення енергоефективності у перехідних режимах зі змінним з часом (нестационарним) навантаженням; модифіковано GRAMPC метод прогнозування, для забезпечення працездатності у реальному режимі часу; обґрунтовано вплив алгоритмічних параметрів на точність та швидкість розрахунку траєкторії потокозчеплення, що мінімізує потужність втрат; отримані залежності потужності втрат від постійної часу фільтра першого порядку інтегрованого до каналу керування потокозчепленням; визначено методи досліджень, сплановано та проведено експериментальні дослідження для підтвердження теоретичних результатів роботи; узагальнено та проаналізовано отримані результати.

Структура і обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, літературних джерел та додатку. Загальний обсяг дисертації – 185 сторінок машинописного тексту, ілюстрованого 61 рисунками. Робота містить 12 таблиць, список використаної літератури із 142 найменувань на 14 сторінках і 2 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі дослідження, зв'язок теми роботи з науковими програмами, планами, темами, викладено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У першому розділі виконано комплексний аналіз вітчизняних і закордонних джерел, присвячених підвищенню енергетичних показників асинхронного двигуна у складі регульованого електропривода.

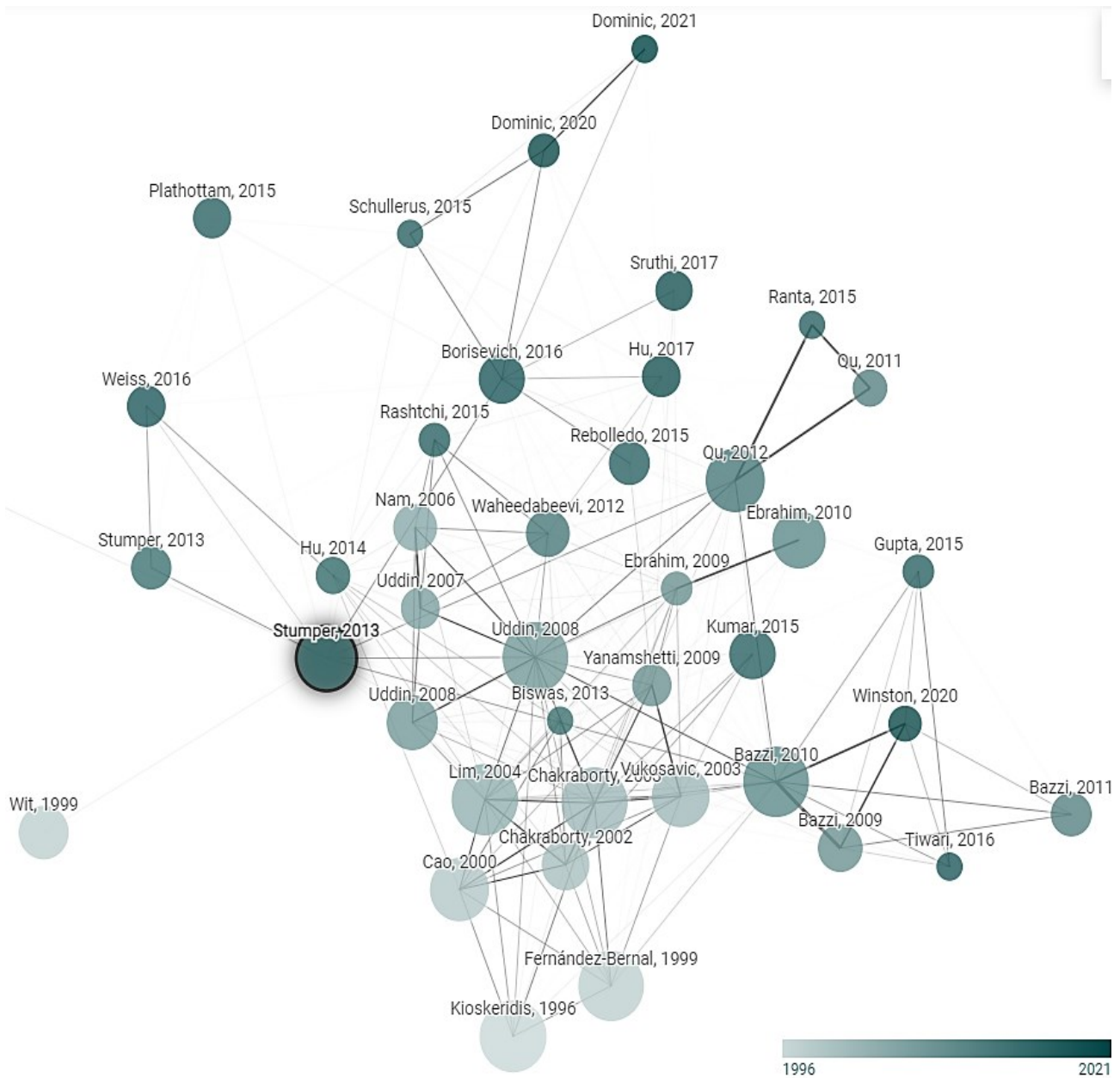


Рисунок 1 – Графік наукових праць пов'язаних з напрямом дисертаційного дослідження

На підставі проведеного аналізу (рис. 1) було виділено три основні категорії стратегій енергоефективного керування, навколо яких можна простежити сталий розвиток:

- методи на базі керування станом двигуна (simple state control);
- методи, що використовують модель потужності втрат (loss model control)
- методи прямої пошукової оптимізації (search control).

Визначено, що найперспективнішим для застосування та подальшого удосконалення є електропривод на базі асинхронної машини з короткозамкненим ротором та класичним векторним керуванням, з використанням методів на базі моделі потужності втрат, завдяки швидкодії.

Сучасні електронні пристрої дозволяють реалізовувати складні за розрахунками алгоритми. У зв'язку з цим набувають розвитку методи прогнозування (на базі моделі потужності втрат), щоб зробити асинхронну машину більш привабливою порівняно з коштовними синхронними машинами для сервоприводних приладів та механізмів. Виявлено недоліки існуючих рішень при застосуванні їх у складі частотно-регульованого електропривода з асинхронною машиною. Підсумовуючи, можна виділити такі пункти:

- поліноміальне або табличне наближення оптимальних траєкторій керування в офлайн режимі, що призводить до тісної прив'язки до конкретного об'єкта та умов роботи;
- великий час обчислень для досягнення найкращих результатів;
- інтеграція нелінійних фільтрів;
- ступінчата зміна завдання на струм намагнічування, що призводить до зміни електромагнітного моменту двигуна, небажаних пульсацій швидкості обертання та додаткових втрат потужності під час перехідних процесів;
- погіршення стійкості векторного керування до зміни крутного моменту навантаження зі зменшенням потоку намагнічування нижче мінімуму;
- попередній розрахунок стану системи тільки для наступної ітерації;
- обмежена динаміка, яку можна досягти за допомогою каскадної структури у високодинамічних застосунках.

Наприкінці розділу сформульовані основні завдання, що розв'язуються в дисертаційній роботі.

Другий розділ присвячений аналізу втрат в системі електроприводу з перетворювачем, критеріям ефективності та математичному моделюванню векторно-керованого асинхронного електропривода.

Під час аналізу залежності вхідної потужності системи електропривода і струму статора для різних значень моменту навантаження як функції від магнітного потоку в повітряному проміжку встановлено, що при малих рівнях навантаження криві вхідної потужності майже паралельні вісі потоку. У зв'язку з цим у разі необхідності визначення мінімуму, наприклад, за допомогою пошукових алгоритмів, потрібне високоточне вимірювання потужності і шукане значення, очевидно, буде дуже чутливим до шумів у вимірюваному сигналі. З іншого боку, криві струму статора мають мінімуми достатньо близькі з вхідною потужністю (повною потужністю втрат), тобто точками оптимального ККД. При цьому, мінімуми струму чіткіше визначені, ніж мінімуми вхідної потужності завдяки більшій ввігнутості кривих i , майже, не залежать від швидкості. Отже, краще використовувати струм статора, ніж вхідну потужність як вхідний параметр в задачах пошуку мінімуму втрат потужності.

Відомо, що робота електродвигуна за критерієм мінімуму потужності втрат досягається за певного постійного коефіцієнта потужності $\cos\phi$. Те ж саме відомо і про швидкість ковзання ω_{slip} . Аналіз залежностей цих критеріїв як функції від магнітного потоку у повітряному проміжку за різними рівнями навантажень показав, що зміна магнітного потоку мало впливає на коефіцієнт

потужності і тому будувати модель, в якій як сигнал завдання для енергоефективного керування використовується $\cos\phi$ як функція швидкості та навантаження, є недоцільним. Причиною цього служить незначне поліпшення енергетичних показників системи і значне ускладнення системи керування порівняно з регулюванням інших параметрів.

Щодо енергоефективного керування реалізованого шляхом встановлення постійного значення частоти ковзання ω_{slip} – це не дає задовільних показників з точки зору енергоефективності. У випадку використання такого параметру як частота ковзання, сигнал керування повинен залежати як від швидкості, так і від навантаження. Таким чином, аналіз представлених даних показує, що швидкість ковзання ω_{slip} не може бути надійним показником для мінімізації потужності втрат в асинхронній машині з урахуванням насичення магнітопроводу, оскільки значення ω_{slip} , в яких досягається мінімум потужності втрат відрізняється майже у два рази за різних моментів навантаження.

Зібраний і проаналізований фактичний матеріал щодо критеріїв ефективності дозволяє зробити важливе порівняння відносно мінімумів потужності втрат в асинхронній машині та в перетворювачі малопотужного електропривода – обидва екстремуми лежать в плоскій частині кривих і практично рівнозначні з енергетичної точки зору. Отже, як залежність потужності втрат в двигуні, так і потужності втрат в перетворювачі може бути використана як індикатор для підвищення енергоефективності. Таким чином, врахування втрат всієї системи не дає істотно кращого результату підвищення енергетичних показників порівняно з потужністю втрат в асинхронній машині і втратами перетворювача можна знехтувати при моделюванні.

Динаміка двигуна у просторі станів згідно з оберненою Г-подібною схемою заміщення з орієнтацією по полю ротора описується наступними диференціальними рівняннями:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1d} &= \frac{R_2}{L_m L_\sigma} \psi_2 - \frac{1}{L_\sigma} (R_1 + R_2) I_{1d} + I_{1q} \omega_1 + \frac{U_{1d}}{L_\sigma}, \\ \dot{I}_{1q} &= -\frac{\omega_2}{L_\sigma} \psi_2 - \frac{1}{L_\sigma} (R_1 + R_2) I_{1q} - I_{1d} \omega_1 + \frac{U_{1q}}{L_\sigma}, \\ \dot{\psi}_2 &= -\frac{R_2}{L_m} \psi_2 + I_{1d} R_2, \\ \dot{\omega}_2 &= Z_p \frac{T_e - T_{load}}{J}, \end{aligned} \quad (1)$$

де ψ_2 – потокозчеплення ротора, Z_p – кількість пар полюсів, ω_1 – швидкість обертання поля статора, ω_2 – швидкість обертання ротора, I_{1d} – компонент струму статора, що генерує магнітне поле, I_{1q} – компонент струму статора, що генерує крутний момент, T_e та T_{load} – крутний момент електричної машини та навантаження, R_1 та R_2 опір статора та ротора, J – момент інерції, U_{1d} та U_{1q} – компоненти напруги статора, L_m та L_σ – індуктивності намагнічування та розсіювання.

За кривими порівняння живлення асинхронної машини безпосередньо від мережі та векторно-керованого перетворювача з завданням на струм намагнічування, що забезпечує мінімум потужності втрат, отримані наступні орієнтовні данні (на практиці сильно залежать від умов експлуатації) середньої ефективності від застосування енергоефективного керування – 28% для двигуна потужністю 370 Вт, 15% для 4 кВт та 7% для 11 кВт. Таким чином, із зростанням номінальної потужності асинхронної машини з короткозамкненим ротором та збільшенням крутного моменту навантаження, середня ефективність від впровадження законів енергоефективного керування в систему векторно-керованого електропривода зменшується.

Третій розділ присвячений підвищенню енергетичних показників асинхронної машини у складі електропривода шляхом розробки законів керування електромеханічною системою у перехідних режимах.

Початковою точкою міркувань роботи є наступна гіпотеза: асинхронна машина працює з деякою швидкістю обертання ω_2 , заданим моментом навантаження T_{load} та керується схемою векторного керування з орієнтацією потоку ротора вздовж осі d обертової системи координат. У деякий момент часу $t = t_k$ роботи електричної машини в усталеному режимі відбувається зміна крутного моменту з рівня T_e на $T_e + \Delta T_{load}$ у зв'язку з новим завданням на швидкість або зміною навантаження. Завданням є регулювання параметрами процесу таким чином, щоб звести до мінімуму втрати енергії у процесі переходу з робочої точки з одними координатами (швидкість, крутний момент) до точки з новими координатами.

У разі відповідного налаштування коефіцієнтів регуляторів струму можливе достатньо точне регулювання компонентів струму статора і досягнення умови $I_{1d} \approx I_{1d}^{ref}$, $I_{1q} \approx I_{1q}^{ref}$. З урахуванням того, що швидкодія регуляторів струму значно вища, ніж динаміка потокозчеплення і швидкості, динамікою регуляторів струму можна знехтувати. У такому випадку, скорочена модель двигуна записується у вигляді

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_2 &= -\frac{R_2}{L_m(I_{1d})} \psi_2 + I_{1d} R_2, \\ I_{1q} &= \frac{2 T_e + \Delta T_{load}}{3 Z_p \psi_2}, \end{aligned} \quad (2)$$

де $L_m(I_{1d})$ – характеристика насичення індуктивності намагнічування.

Рівняння потужності втрат P_{loss} , що враховує втрати як у статичному, так і динамічному режимах роботи, для постійного моменту T_e залежить тільки від змінної стану ψ_2 та складової струму I_{1d} , що генерує поле. Таким чином, задача енергоефективного керування полягає в мінімізації функціоналу (3).

$$\begin{aligned} J = \int_{t_k}^{t_k + T_P} & \left(\frac{3}{2} (R_1 + R_2) I_{1d}^2 + \frac{2}{3} (R_1 + R_2) \frac{(T_e + \Delta T_{load})^2}{Z_p^2 \psi_2^2} + \frac{3}{2} \frac{R_2}{L_m^2(I_{1d})} \psi_2^2 \right. \\ & \left. - 3 \frac{R_2}{L_m(I_{1d})} \psi_2 I_{1d} \right) dt. \end{aligned} \quad (3)$$

У випадку (3) слід враховувати динаміку потокозчеплення ротора за допомогою рівняння (2), насичення індуктивності магнітопроводу $L_m(I_{1d})$ та граничні умови:

$$\begin{aligned}\psi_2(t = t_k) &= L_m(I_{1d}^*(T_e)) \cdot I_{1d}^*(T_e), \\ \psi_2(t = t_k + T_p) &= L_m(I_{1d}^*(T_e + \Delta T_{load})) \cdot I_{1d}^*(T_e + \Delta T_{load}).\end{aligned}\quad (4)$$

Для знаходження рішення функціоналу (3) за критерієм мінімуму енергії втрат був застосований метод Гамільтона:

$$\begin{aligned}H(I_{1d}, \psi_2, \lambda) &= \frac{3}{2}(R_1 + R_2)I_{1d}^2 + \frac{2}{3}(R_1 + R_2)\frac{(T_e + \Delta T_{load})^2}{Z_p^2\psi_2^2} + \\ &+ \frac{3}{2}\frac{R_2}{L_m^2(I_{1d})}\psi_2^2 - 3\frac{R_2}{L_m(I_{1d})}\psi_2 I_{1d} + \lambda\left(-\frac{R_2}{L_m(I_{1d})}\psi_2 + R_2 I_{1d}\right).\end{aligned}\quad (5)$$

де $\lambda \in R$ – це множник Лагранжа (спряжений стан) для ψ_2 . Перевага використання такого непрямого підходу, полягає в тому, що отримане рішення є екстремальною траєкторією.

Згідно з умовами оптимальності, що сформовані за принципом максимуму Понтрягіна, бажана траєкторія струму намагнічування I_{1d}^* (закон керування) є рішенням крайової задачі (6) – (8):

$$\dot{\psi}_2 = -\frac{R_2}{L_m(I_{1d})}\psi_2 + I_{1d}R_2, \quad (6)$$

$$\begin{aligned}\dot{\lambda} &= \frac{4}{3}(R_1 + R_2)\frac{(T_e + \Delta T_{load})^2}{Z_p^2\psi_2^3} - 3\frac{R_2}{L_m^2(I_{1d})}\psi_2 + 3\frac{R_2}{L_m(I_{1d})}I_{1d} \\ &+ \lambda\frac{R_2}{L_m(I_{1d})},\end{aligned}\quad (7)$$

$$\begin{aligned}3(R_1 + R_2)I_{1d} - \frac{3R_2}{L_m^3(I_{1d})}\psi_2^2\frac{\partial L_m}{\partial I_{1d}} - \frac{3R_2}{L_m(I_{1d})}\psi_2 + \frac{3R_2}{L_m^2(I_{1d})}\psi_2 I_{1d}\frac{\partial L_m}{\partial I_{1d}} \\ + R_2\lambda\left(1 + \frac{\psi_2}{L_m^2(I_{1d})}\frac{\partial L_m}{\partial I_{1d}}\right) = 0,\end{aligned}\quad (8)$$

Для знаходження рішення функціоналу (3) застосовується градієнтний метод керування на основі прогнозуючих моделей GRAMPC.

Результатом є дискретна за часом траєкторія для струму I_{1d}^* . У системі керування результуюча траєкторія використовується як керуюча змінна. Алгоритм пошуку рішення виглядає так, (рис. 2):

- ініціалізація вхідної траєкторії $I_{1d}(t)$ для $t \in [t_k, t_k + T_p]$, а також розрахунок результуючого значення $\psi_2(t)$ по (2);
- ітеративний підхід до вирішення крайової задачі (6)-(8):
 - спряжений стан λ розраховується за зворотною інтеграцією (5) (backward time integration);
 - беручи до уваги результат попереднього кроку та вираз (8), визначається напрям пошуку для ітераційного вдосконалення рішення. Покращена траєкторія $I_{1d}(t)$ визначається за розрахованим розміром кроку аналогічним чином. Тоді обмеження керуючої змінної $u(\tau) \in [u_{min}, u_{max}]$, $\forall \tau \in [t_k, t_k + T_p]$, можна врахувати за допомогою функції проєкції градієнтного методу;

- з покращеною траєкторією $I_{1d}(t)$ робиться нове прогнозування $\psi_2(t)$;
- після того, як буде досягнуто кількість дозволених ітерацій $N_{maxIter}$, обчислюється нова траєкторія управління. $I_{1d}(t_k)$ використовується як регульована змінна в цьому алгоритмі. Потім метод починається знову для $t_k + 1$. У іншому випадку наступна ітерація починається з другого кроку.

Для отримання бажаних результатів у режимі реального часу базовий алгоритм модифіковано шляхом врахування можливості зміни координат бажаного стану електроприводу як в наслідок впливу сигналу керування, так і навантаження у процесі переходу системи з поточного стану до нового. Разом з тим, особливий акцент ставиться на дослідженні закономірностей впливу наступних алгоритмічних параметрів GRAMPC методу прогнозування:

- максимальне число ітерацій градієнтного пошукового методу $N_{maxIter}$ за крок GRAMPC для регулювання швидкості сходження та покращення розв'язання задачі оптимізації;
- кількість точок розбиття горизонту прогнозування N_{hor} для чисельного інтегрування, які задаються на першому кроці алгоритму, для прогнозування оптимальної траєкторії керування та інтегрування назад.

Ці параметри мають критичний вплив на тривалість всієї процедури розрахунку, точність отриманого результату та енергетичний ефект від впровадження цього результату.

Для аналізу параметрів $N_{maxIter}$ та N_{hor} , по-перше, вибираються якомога менші значення. Після цього ці значення збільшуються, поки не спостерігається покращення. Здійснюється порівняння енергії втрат $\Delta W_{M12} = W_{M1} - W_{M2}$ при застосуванні ступінчатої траєкторії на завдання оптимального значення в усталеному режимі для потокозчеплення ψ_2 та при застосуванні модифікованого GRAMPC. Порівняння $\Delta W_{M12} = W_{M1} - W_{M2}$ для випадку коли $N_{maxIter}$ та N_{hor} змінюються наведено на рис. 3 та рис. 4. Це дослідження базується на спрощеній моделі асинхронного двигуна (2), номінальною потужністю 370 Вт. Стрибок крутного моменту з 25% до 100% від номінального крутного моменту двигуна використовується як збурення навантаження. Графік на рис. 3, а показує траєкторії для випадку, коли кількість точок дискретизації N_{hor} змінюється, а кількість максимальних ітерацій $N_{maxIter}$ дорівнює 2. Графік на рис. 3, б показує

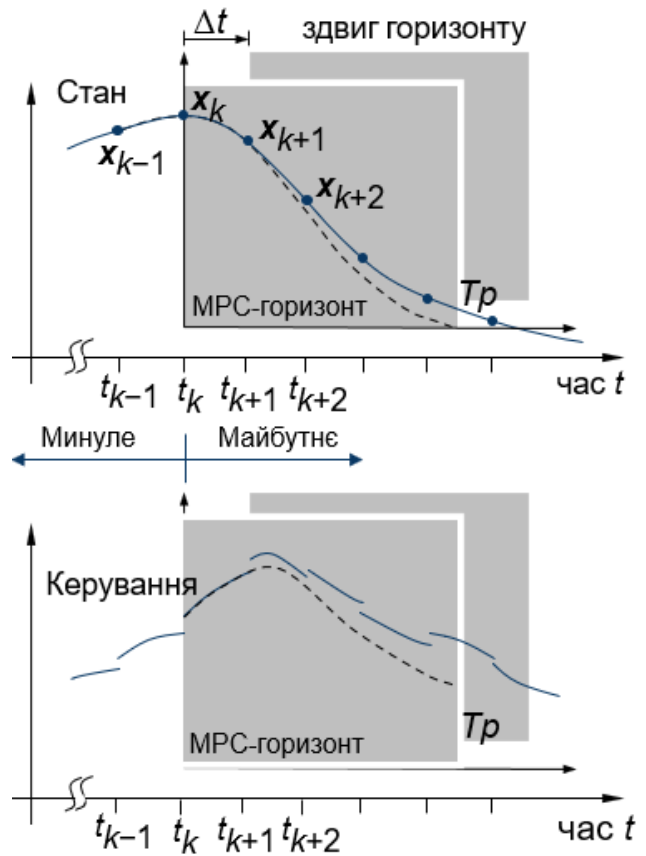


Рисунок 2 – Приклад рухомого горизонту прогнозування $T_p > 0$

траєкторії для випадку, коли змінюється кількість максимальних ітерацій $N_{maxIter}$ градієнтного пошукового методу та кожному інтервалі дискретизації та кількість точок дискретизації дорівнює 9. За аналогією, такий самий тест проводиться у випадку зміни моменту навантаження від 100% до 25% (рис. 4).

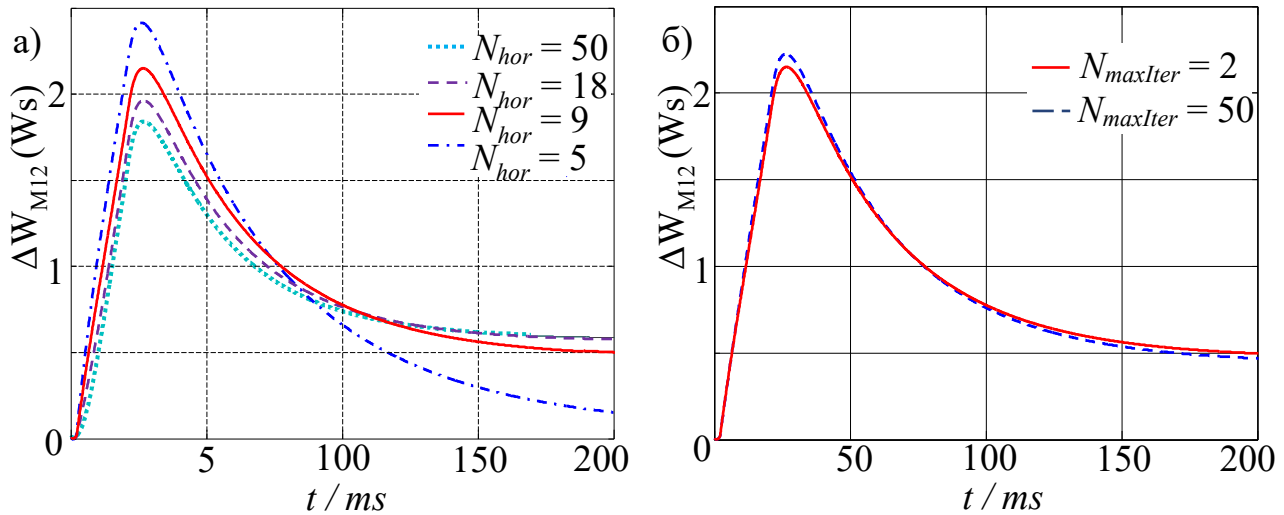


Рисунок 3 – Зміна N_{hor} (а) та $N_{maxIter}$ (б) при ступінчатій зміні навантаження від 25% до 100% для двигуна потужністю 370 Вт

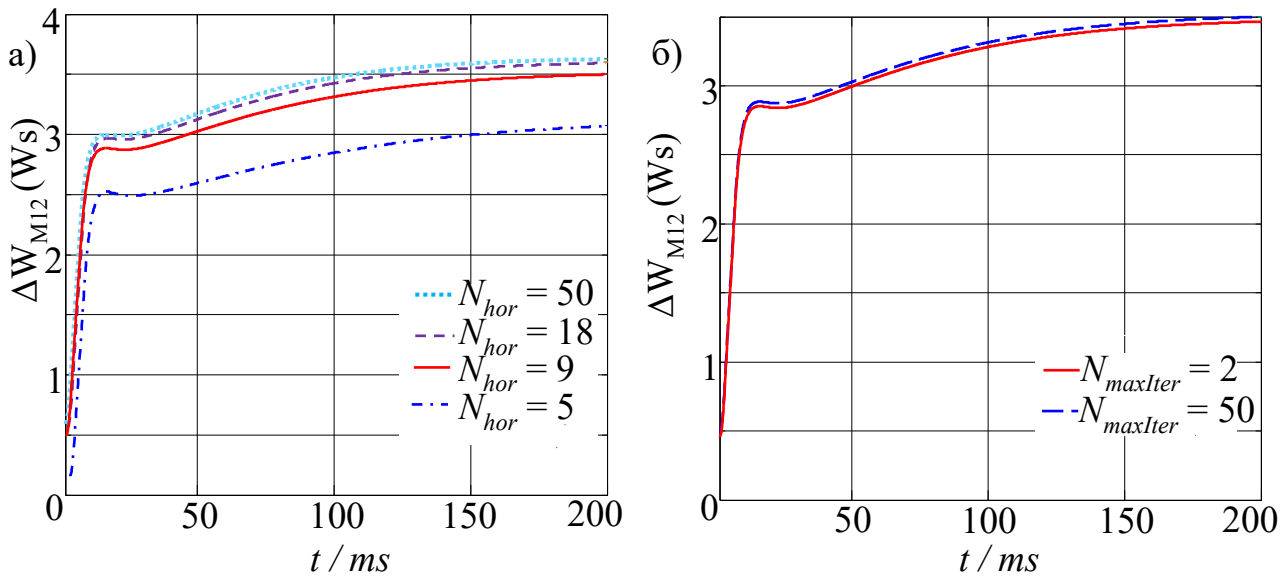


Рисунок 4 – Зміна N_{hor} (а) та $N_{maxIter}$ (б) при ступінчатій зміні навантаження від 100% до 25% для двигуна потужністю 370 Вт

Додатково до порівняння енергії втрат ΔW_{M12} виконано аналіз двох показників:

- похибку розрахунку закону керування (траєкторії), що забезпечує мінімум потужності втрат (у табл.1 приведені значення отримані за методом найменших модулів – м.н.м.);
- час розрахунку такої траєкторії.

Відтак маємо 3 критерії замість одного для більш обґрунтованого вибору значень алгоритмічних параметрів $N_{maxIter}$ та N_{hor} .

З метою уточнення найкращого співвідношення N_{hor} та $N_{maxIter}$ застосовується таксонометричний метод полікритеріального рейтингування, що дозволяє провести ранжування різних характеристик, що відображають різні

фізичні величини, завдяки їх зведенню до єдиної стандартизованої системи вимірювання. Результати рейтингування зведені у табл 1.

Таблиця 1

Зведені результати кращих комбінацій N_{hor} та $N_{maxIter}$

Зміна навантаження, %	N_{hor}	$N_{maxIter}$	Похибка за м.н.м.	Час розрахунку, мкс	ΔW_{M12} , Вт·с
100 → 25	50	2	29.8	62.3	3.428
	20	3	120	41.7	3.504
	15	3	176	28.0	3.501
25 → 100	50	2	61.90	56.6	0.557
	20	3	257.14	41.2	0.52
	15	3	370.61	36.9	0.49

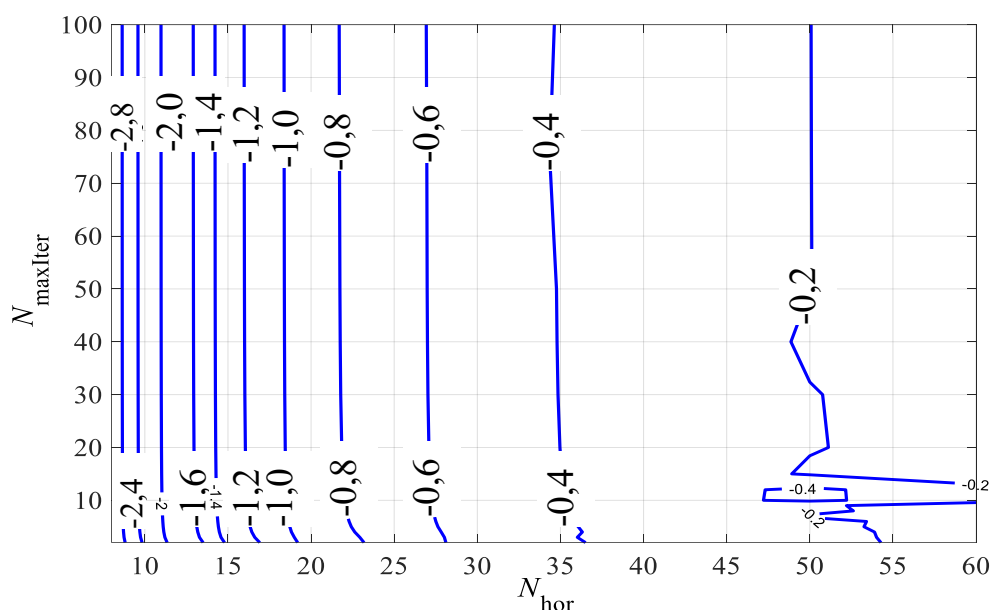


Рисунок 5 – Залежність похибки розрахунку закону керування

Як свідчать дані (рис. 5), у разі вибору комбінацій N_{hor} та $N_{maxIter}$ з табл. 1 забезпечується похибка розрахунку закону керування у діапазоні від 0,2% до 1,4% відносно бажаної траєкторії.

Було встановлено, що великі значення миттєвої потужності втрат при застосуванні ступінчатого завдання на вхід регулятора потужності, спричинені принципом дії самого регулятора. Таким чином, основна ідея другого підходу, що пропонується у дисертаційній роботі, полягає у застосуванні низькочастотного фільтра на вході регулятора потужності. Результати дослідження підтверджують, що зменшення потужності втрат у динамічному режимі роботи забезпечується модифікацією конвенціонального векторного керування, що враховує низькочастотну фільтрацію першого порядку ступінчатої траєкторії завдання на потужності. При чому доцільний вибір сталої часу такого фільтра лежить в межах від 0,5 до 1,0 сталої часу ротора.

У межах отриманих результатів щодо визначення ефективності застосування запропонованих законів керування в залежності від значення навантаження, встановлено, що найбільший приріст енергоефективності досягається при навантаженнях від 5 до 60% від номінального моменту асинхронної машини у складі векторно-керованого електропривода.

Четвертий розділ присвячений експериментальній перевірці та практичній реалізації розроблених підходів. Під час експериментальних досліджень роботи замкнутого контуру швидкості системи векторного керування з орієнтацією у полі ротора асинхронною машиною потужністю 370 Вт у динамічному режимі роботи при зміні умов навантаження враховувалась нелінійність індуктивності намагнічування. Дослідження запропонованих методів проводились як для усталеного, так і динамічного режимів. Розроблені закони керування були реалізовані апаратним шляхом за допомогою технології генерації коду безпосередньо з середовища MATLAB/Simulink для виконання в контролері dSPACE в режимі реального часу. Наступна обробка даних здійснюється в програмному забезпеченні ControlDesk також у режимі реального часу.

Для проведення експериментальних досліджень створено спеціальний вимірювальний стенд, таким чином, що апаратна частина передбачає аналогове вимірювання кожного струму, швидкості та інших показників, які потім зчитуються у системі швидкого прототипування dSPACE, з можливістю збереження та опрацювання експериментальних даних в електронному вигляді.

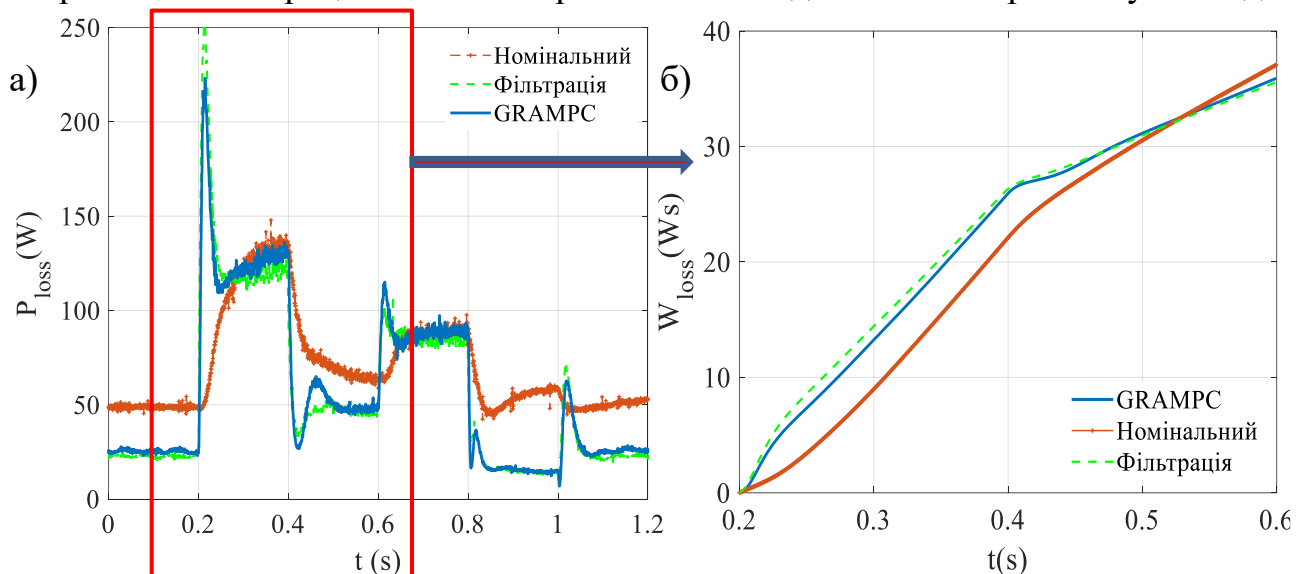


Рисунок 6 – Приклад вимірюної потужності втрат (а) та енергія втрат (б) для двигуна потужністю 370 Вт

Отримані під час експериментальних досліджень результати (рис. 6) підтвердили відповідність та високу точність результатів розрахунку й моделювання результатам виміру, з похибкою за енергією втрат, що не перевищує 6,5%, а також адекватність запропонованої математичної моделі асинхронної машини та систем керування.

ВИСНОВКИ

У дисертації, яка є завершеною науково-дослідницькою роботою, вирішена актуальна наукова задача розробки законів керування координатами асинхронного електропривода, що працює в умовах змінного навантаження і завдання на швидкість, які дозволяють здійснити раціональний перехід електромеханічної системи з робочої точки з вихідними координатами (крутний

момент, швидкість) до нової точки за траєкторією, що забезпечує мінімізацію енергоспоживання у динамічному режимі роботи.

В результаті теоретичних та експериментальних досліджень отримано наступне:

1. Встановлено, що модифікацією градієнтного GRAMPC методу керування на основі прогнозуючих моделей є врахування зміни сигналу керування та рівня навантаження (що можуть відбуватись одночасно) для розрахунку оптимальної траєкторії потокозчеплення асинхронного двигуна у процесі переходу системи від вихідної точки до оновленого значення усталеного режиму. Такий підхід дозволяє розраховувати оптимальну траєкторію в режимі реального часу (онлайн).

2. Встановлено, що точність розрахунку координат точки на траєкторії переходу електромеханічної системи з поточного стану до нового залежить від кроків розбиття горизонту прогнозування відповідно до гіперболічного закону. Це дозволяє визначити оптимальні параметри методу GRAMPC у системі керування електроприводом, виходячи із бажаного співвідношення між енергоефективністю системи та її швидкодією.

3. За результатами здійсненого полікритеріального рейтингування встановлено, що кількість ітерацій для траєкторії переходу електромеханічної системи з поточного стану до нового, яка визначається GRAMPC методом прогнозування належить діапазону від 2 до 3 за умови кількості кроків розбиття на горизонті прогнозування від 9 до 50, що забезпечує значення похибки від 2,7% до 0,2% стосовно бажаної траєкторії переходу електропривода у реальному режимі часу зі збереженням його працездатності з інтервалом дискретизації $1,0 \cdot 10^{-3}$ с.

4. Встановлено, що застосування низькочастотного фільтру першого ступеня вхідного сигналу регулятора потокозчеплення із сталою часу в діапазоні 0,5...1,0 сталої часу ротора забезпечує зниження потужності втрат у перехідному процесі при відпрацюванні ступінчастого завдання. У модифікованій таким чином системі векторного керування електроприводом знижуються результуючі витрати енергії при роботі із нестационарними навантаженням та швидкістю.

5. Встановлено, що метод керування на основі прогнозуючих моделей демонструє найбільший приріст енергоефективності, якщо в циклі роботи електропривода навантаження періодично зменшується нижче ніж 60% від номінального рівня. Це дозволяє обрати ті механізми, для яких застосування запропонованих підходів є найбільш доцільним.

6. Для проведення експериментальних досліджень створено спеціальний вимірювальний стенд. Розроблені закони керування були реалізовані апаратно з використанням технології генерації програмного коду безпосередньо MATLAB/Simulink для виконання в контролері dSPACE. Результати, що отримані під час експериментальних досліджень, підтверджують достовірність та достатню точність результатів аналітичного розрахунку і моделювання, а також адекватність запропонованої математичної моделі асинхронної машини та систем керування.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Diachenko G. G. Investigation of the process parameters influence on the energy efficiency of an induction motor under model predictive control GRAMPC / G. G. Diachenko, O. O. Aziukovskyi. // *Mechanics, Materials Science & Engineering*. – 2017. №12. – P. 1–8.
2. Diachenko G. Rotor flux controller for induction machines considering main inductance saturation / G. Diachenko. // *Problemele energeticii regionale*. – 2020. – №3(47). – P. 10–19. **(Наукометрична база Web of Science)**.
3. Diachenko G. G. Selection of an appropriate numerical integration method for solving the optimal control problem of an induction motor / G. G. Diachenko, O. O. Aziukovskyi, V. S. Zarichnyi. // *Гірничая електромеханіка та автоматика*. – Дніпро: НТУ «ДП», 2017. – №98. – С. 23–30.
4. Diachenko G. G. Control laws of electric drives as a result of an in-depth kinematic analysis of the delta robot / G. G. Diachenko, O. O. Aziukovskyi. // *Науковий вісник Національного гірничого Університету* – 2018. – №1. – С. 106–112. **(Наукометрична база Scopus)**.
5. Diachenko G. G. Power losses minimization and energy accounts in induction motors with nonstationary loads / G. G. Diachenko, O. O. Aziukovskyi, S. Yakimets. // *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського, Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*. – Кременчук: КрНУ, 2019. – Вип. 5/2019 (118). – С. 142–147.
6. Diachenko G. G. Review of methods for energy-efficiency improvement in induction machines / G. G. Diachenko, O. O. Aziukovskyi. // *Науковий вісник Національного гірничого Університету* – 2020. – №1. – С. 80–88. **(Наукометрична база Scopus)**.
7. Diachenko G. G. A continuous energy-efficiency optimization controller for field-orientation induction motor drives / G. G. Diachenko, O. O. Aziukovskyi. // *Системні технології*. – Дніпро: НМетАУ, 2020. – №5(130). – С. 3–14.
8. Diachenko G. G. Energy-efficient predictive control for field-orientation induction machine drives / G. G. Diachenko, G. Schullerus, A. Dominic, O. O. Aziukovskyi. // *Науковий вісник Національного гірничого Університету* – 2020. – №6. – С. 61–67. **(Наукометрична база Scopus)**.
9. Diachenko G. Simple dynamic energy efficient field oriented control in induction motors / G. Diachenko, G. Schullerus. // in *Proceedings of the 18th International Symposium on Power Electronics EE2015 (University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia, 28–30 October 2015)*. – 2015. – P. 1–5.
10. Diachenko G. G. Control law of motion control of a delta robot adapted to digital systems with not high performance / G. G. Diachenko, O. O. Aziukovskyi. // *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження та енергоефективність» (НТУ «ДП», м. Дніпро, 15–16 листопада 2018)*. – 2018. – С. 30–31.
11. Diachenko G. Optimal field-oriented control of an induction motor for loss minimization in dynamic operation / G. Diachenko, O. Aziukovskyi, M. Rogoza, S. Yakimets. // in *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Modern*

Electrical and Energy Systems (Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, 23–25 September 2019). – 2019. – P. 94–97.

12. Diachenko H. Simple dynamic loss-minimizing flux level control of field-orientation induction motor drives / H. Diachenko, O. Aziukovskyi. // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (НМетАУ, м. Дніпро, 17-19 березня 2020). – 2020. – С. 303–305.

13. Diachenko G. G. Predictive rotor flux control for efficient dynamic operation of induction machines / G. G. Diachenko, O. O. Aziukovskyi, A. V. Vizniuk. // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження та енергоефективність – 2020. Молодь: наука та інновації» (НТУ «ДП», м. Дніпро, 24 грудня 2020). – 2020. – С. 45–46.

Особистий внесок автора в праці, опубліковані у співавторстві, полягає: у роботах [1, 3, 13] – проведені дослідження впливу алгоритмічних параметрів (кількість ітерацій, кількість точок розбиття горизонту прогнозування, методу інтегрування) на точність та швидкість розрахунку координат точки на траєкторії переходу електромеханічної системи з поточного стану до нового; [4, 10] – розроблено математичну модель, що описує рух робочого органа дельта-робота з урахуванням взаємного позиціонування елементів кінематичної системи, яка у якості складової частини увійшла до механічної компоненти створеної моделі як мехатронного агрегата; [7, 9, 12] – розроблений спосіб зменшення втрат у динамічному режимі роботи, що враховує низькочастотну фільтрацію сигналу завдання на потягозчеплення, а також встановлений діапазон найприйнятніших значень сталої часу фільтру; [5] – виконано аналіз одночасного протікання електромагнітних та електромеханічних перехідних процесів в електромеханічній системі із електричним двигуном на базі асинхронної машини та розроблено структурну схему для визначення енергетичного ефекту від запровадження нового закону керування; [6] – виконано критичний огляд методів керування та оптимізації для вирішення задачі підвищення енергоефективності асинхронних двигунів; [8, 11] – постановка задачі, методика врахування нелінійної характеристики магнітопроводу в математичній моделі, результати комп'ютерного моделювання, результати стендових досліджень, висновки.

АНОТАЦІЯ

Дяченко Г.Г. Енергоефективне керування асинхронною машиною у перехідних режимах на базі методів з прогнозуючими моделями – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи – Національний

технічний університет «Дніпровська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової задачі з розробки законів енергоефективного керування координатами асинхронного електропривода, що працює в умовах змінного навантаження і завдання на швидкість.

Запропоновано дві модифікації конвенціонального векторного керування електроприводом. Перша базується на вдосконаленому GRAMPC методі прогнозування для керування електромеханічною системою на базі асинхронної машини з короткозамкненим ротором з метою підвищення енергоефективності у перехідних режимах. Показано, що шляхом поєднання кількості кроків ітерацій на кожному кроці розбиття горизонту прогнозування та кількості цих кроків досягається бажана точність та швидкість розрахунку траєкторії потокозчеплення, що мінімізує потужність втрат у режимі реального часу. Другий метод базується на адаптивній фільтрації сигналу завдання на вході регулятора потокозчеплення. Доведено, що при відповідних значеннях сталої часу фільтру, потужність втрат може бути зменшена. Впровадження запропонованих законів керування призводить до зменшення енергії втрат у динамічному режимі роботи двигуна, ніж утримання струму намагнічування на номінальному рівні.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили відповідність результатів розрахунків та моделювання результатам стендових вимірювань.

Ключові слова: асинхронний двигун, векторне керування, потужність втрат, енергоефективне керування, динамічний режим, адаптивна фільтрація, прогнозування, режим реального часу, полікритеріальне рейтингування.

АННОТАЦИЯ

Дяченко Г.Г. Энергоэффективное управления асинхронной машиной в переходных режимах на основе методов с прогнозирующими моделями. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы – Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Министерство образования и науки Украины, Днепр, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной научной проблемы разработки законов энергоэффективного управления координатами асинхронного электропривода, который работает в условиях переменной нагрузки и скорости.

Предложены две модификации конвенционального векторного управления электроприводом. Первый подход основан усовершенствованном GRAMPC методе прогнозирования для управления асинхронной машиной с короткозамкнутым ротором в составе электромеханической системы с целью

повышения энергоэффективности в переходных режимах. Показано, что путем комбинирования количества шагов итераций на каждом шагу разбиения горизонта прогнозирования и количества этих шагов достигается желаемая точность и скорость расчета траектории потокосцепления, что минимизирует мощность потерь в режиме реального времени. Второй метод основан на адаптивной фильтрации управляющего воздействия на входе регулятора потокосцепления. Доказано, что при соответствующих значениях постоянной времени фильтра, мощность потерь может быть уменьшена. Внедрение предложенных законов управления приводит к уменьшению энергии потерь в динамическом режиме работы двигателя, в сравнении с удержанием тока намагничивания на номинальном уровне.

Проведены экспериментальные исследования, которые подтвердили соответствие результатов расчетов и моделирования результатам стендовых измерений.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, векторное управление, мощность потерь, энергоэффективное управление, динамический режим, адаптивная фильтрация, прогнозирование, режим реального времени, многокритериальное рейтингование.

ABSTRACT

Diachenko G.G. Model predictive control for energy-efficient operation of an induction machine in transient behavior.

Qualifying scientific work on the rights of the manuscript. The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2021.

The dissertation deals with the actual scientific problem of the development of energy-efficient control laws of coordinates of asynchronous electric drive operating in modes with changing loads and speed setpoint.

The author proposes two modifications of conventional vector-controlled induction motor drive. For the first time, it is proposed to use a modified nonlinear gradient-based model predictive control toolbox GRAMPC instead of a flux controller in a field-oriented control scheme. This modification ensures a control law for transferring the electromechanical system from one operating point (torque, speed) to the desired point following the minimum energy loss criteria in real-time, taking into account possible changes in the desired future state of the electric drive as a result of the influence of the input reference signal and as a result of the influence of change in load (including simultaneously). The optimal control problem is defined as the minimization of the time integral of the energy losses with constraints. To this end, the expression according to Hamilton's method is defined and first-order optimality conditions are determined based on Pontryagin's Maximum Principle. The effect of the model algorithmic parameters: prediction horizon, the maximum number of iterations,

numerical integration method, and the number of data points is considered and default values in terms of real-time demands are determined. Utilizing the multiple-criteria decision-making approach, it is shown that by combining the number of gradient iterations with the number of discrete horizon intervals, the desired accuracy and speed of precalculating the loss-minimizing trajectory of field-producing current is achieved.

The second proposed modification is a simple technique for sub-optimal online loss minimization achieved through the use of the law of the rotor flux generation augmented with adaptive low-pass filtering of the flux reference at each sampling step. It is shown that by appropriately choosing the filter time constant as a fraction of the rotor time constant the instantaneous power losses after a load torque step can be significantly reduced compared to the standard case. The analysis for the appropriate choice of the filter time constant is based on a numerical study and modeling for three different induction motors with different rated powers.

A laboratory testbench was created for experimental research of the closed-cycle operation of a 370-W field-orientation induction machine in dynamic behavior when load conditions are changing, considering the nonlinearities of the main inductance. Both the steady-state and dynamic performance of the proposed methods is investigated. The developed control laws were implemented in hardware using the code generation technology directly from MATLAB/Simulink environment for execution in the dSPACE real-time controller. Handling real-time applications are made in ControlDesk experiment software for seamless ECU development. The results obtained during experimental studies confirm the reliability and high accuracy of the results of analytical calculation and modeling, as well as the adequacy of the proposed mathematical model of asynchronous machine and control systems. Additionally, the comparison of measurement results with conventional methods is provided, which validates the advantages and performance of the control schemes.

Keywords: induction motor, field-oriented control, power losses, energy-efficient control, dynamic mode, adaptive filtering, model predictive control, real-time implementation, multiple-criteria decision-making

ДЯЧЕНКО Григорій Григорійович

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННОЮ МАШИНОЮ У
ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ НА БАЗІ МЕТОДІВ З ПРОГНОЗУЮЧИМИ
МОДЕЛЯМИ

(Автореферат)

Здано на складання 26.08.2021р. Підписано до друку 26.08.2021р.

Формат 210x48. Папір офсетний. Друк цифровий.

Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 1,16.

Тираж 100 прим. Зам. № 2608

Видавництво ПП Вахмістров О.Є. Адреса видавництва та
друкарні: 49000, Дніпро, вул. Пісаржевського, буд. 18.

тел. +380633598309

ел. адреса: 8102@ukr.net