

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу **Савченка Олега Валерійовича**
«Синтез електроприводів з притаманними нелінійностями»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

В електроприводах проявляються притаманні нелінійності електричної машини, силового перетворювача, механічної частині привода та елементів системи керування. До найбільш поширених типів нелінійностей належать східчастий початок характеристики, зона нечутливості, обмеження керуючих впливів в результаті тертя та люфтів в елементах механізмів та в навантаженні, насичення магнітних кіл, релейних характеристик комутаційних та перемикаючих елементів. Проблема полягає в незадовільній якості керування на всьому діапазоні регулювання електроприводу при застосуванні відомих методів синтезу систем авторегулювання, що базуються на лінеаризованих математичних моделях. Тому актуальною задачею є розробка специфічних методів синтезу електроприводів із урахуванням притаманних їм нелінійностей, що дозволяють підвищити якість перехідних процесів, забезпечити необхідний запас стійкості та покращити точність регулювання. Доцільно застосовувати нелінійні зворотні зв'язки, змінні параметри демпфування та коефіцієнта підсилення, а також методи динамічної корекції, які передбачають зміну структури або параметрів системи в процесі її функціонування.

2. Оцінка змісту дисертації

Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, використаних джерел інформації та 5 додатків з описом публікацій і участі у конференціях. Загальний обсяг дисертації складає 206 сторінок, основна частина її складає 172 сторінки.

У вступі обґрунтовано актуальність обраної тематики, сформульовано мету роботи та задачі дослідження, подано коротку характеристику результатів дослідження, ступінь їх апробації та публікації.

У першому розділі дисертації викладено огляд літератури, розглянуто притаманні нелінійності електроприводів та проблематику нелінійної динамічної корекції, проведено аналіз схем з лінеаризацією. Сформульовано цілі і задачі дослідження. На мою думку, можна було також доповнити розділ оглядом типових нелінійностей, притаманних електроприводам, в загальному вигляді.

У другому розділі проведено порівняльний аналіз схем електроприводів з лінійним і нелінійним керуванням. Розглянуто системи з нелінійними елементами в каналі зворотного зв'язку і в каналі прямої передачі керуючих впливів, враховано зону нечутливості, розглянуто системи зі змінним коефіцієнтом передачі та корекцію динамічних параметрів ланок зі змінною інерційністю, розглянуто математичну модель електроприводу з перемикаючими елементами. На мою думку, значна частина другого розділу могла б бути узагальнена, скорочена в обсязі з формулюванням результатів порівняння, і перенесена в перший розділ.

У третьому розділі викладено способи корекції динамічних параметрів виконавчих двигунів нелінійними засобами, а саме: застосування гальмівної муфти для компенсації наслідків інерційності електродвигунів; компенсація нелінійності двигунів прослизуючими муфтами; корекція інерційності елементом перемикавання в каналі помилки системи.

У четвертому розділі представлено синтез електроприводу із сухим тертям. Розглянуто сухе тертя в системах автоматики взагалі. Далі розглянуто вплив сухого тертя на характеристики електроприводів. Розглянуто також вплив параметрів елементів на стійкість системи. Проаналізовано стійкість електроприводу із сухим тертям. Представлено синтез нелінійної системи

авторегулювання із сухим тертям. На мою думку з третього і четвертого розділів можна було вибрати головні результати досліджень та поєднати цей матеріал в третій розділ.

П'ятий розділ містить результати експериментальних досліджень електроприводу з нелінійними характеристиками. Також розділ містить опис компенсації змінної складової помилки за наявності зовнішніх впливів, дослідження системи при наявності сухого тертя і люфту, опис схеми експериментального електроприводу, таблиці з результатами випробувань. На мою думку підрозділ 5.1 можна було перенести до розділу 4, а в цьому розділі навести блок-схеми видів досліджуваних електроприводів.

Усі отримані результати проілюстровані інформативними таблицями та графіками із переліком використаних значень параметрів структурних та принципових схем. Варто додати, що результати експериментів демонструють шляхи розвитку та розширення подальших експериментальних досліджень керованих електроприводів.

3. Новизна отриманих результатів

1. Запропоновано структуру системи автоматичного керування електроприводом, яка відрізняється тим, що містить у колі зворотного зв'язку нелінійний коригуючий елемент, характеристика якого визначається математичними моделями гальмівних та ковзних муфт, що дозволило покращити динамічні характеристики електропривода, зокрема, зменшити перерегулювання і підвищити швидкодію.

2. Для запропонованої нелінійної системи керування визначено області стійкості та залежності між загасанням та частотою коливань перехідної характеристики від співвідношення коефіцієнтів системи, що дає змогу налаштовувати параметри нелінійного регулятора для забезпечення стійкої роботи електропривода.

4. Відповідність теми дисертації змісту досліджень та обґрунтованість наукових результатів

Тема дисертації в цілому відповідає змісту проведених досліджень та поставленим завданням. У роботі здійснено синтез електроприводів з урахуванням нелінійностей, досліджено вплив нелінійних факторів на динамічні характеристики, розроблено методи компенсації нелінійностей та запропоновано підходи до підвищення якості керування електроприводами.

Рівень обґрунтованості результатів досліджень базується на використанні положень теорії автоматичного керування, теорії електропривода, методів аналізу нелінійних систем, математичного моделювання та гармонійної лінеаризації. Під час виконання досліджень використано сучасні програмні засоби, зокрема пакет *MATLAB/Simulink*, що забезпечило достовірність отриманих результатів.

Слід також відзначити, що основні теоретичні положення дисертаційної роботи підтверджено результатами експериментальних досліджень, виконаних на розробленому лабораторному стенді електропривода. Отримані експериментальні дані в достатній мірі узгоджуються з результатами математичного моделювання, що свідчить про адекватність розроблених моделей і підтверджує достовірність основних наукових результатів.

5. Виконання здобувачем поставленого наукового завдання

Наукове завдання дисертаційної роботи Савченка Олега Валерійовича складається з наступних завдань:

1. *Створити математичну модель для синтезу нелінійних електроприводів.*

Автором розроблено математичні моделі нелінійних електроприводів. Водночас окремі етапи їх побудови могли б бути описані більш детально.

2. *Проаналізувати вплив розташування нелінійного елемента у схемі електропривода на результати синтезу.*

Результати аналізу достатньо повно відображають вплив розташування нелінійного елемента на характеристики системи.

3. Здійснити синтез електропривода з корегувальним пристроєм типу перемикання сигналів.

Синтез електропривода виконано в повному обсязі. При цьому окремі результати могли б бути більш детально прокоментовані.

4. Дослідити зміни загасання коливань та їх частоти у перехідному процесі $\xi I \omega$ в залежності від розташування в структурі системи і параметрів нелінійного елемента.

Автором досліджено зміну параметрів перехідного процесу залежно від характеристик нелінійного елемента. Для кращого сприйняття матеріалу окремі результати доцільно було б коротко узагальнити у висновках до підрозділу.

5. Проаналізувати параметри корекції інерційності двигуна муфтами.

Проведено аналіз математичних моделей корекції інерційності двигуна. Але пояснення щодо практичного застосування моделей доцільно розширити.

6. Довести ефективність використання корекції перемикаючими сигналами.

Ефективність використання перемикаючих сигналів підтверджено результатами досліджень.

7. Провести синтез електропривода із сухим тертям шляхом розробки та дослідження методів його компенсації.

Проведено синтез електропривода і встановлено, що запропоновані методи компенсації сухого тертя покращують характеристики електропривода.

8. Побудувати лабораторний стенд для дослідження електропривода з пристроями на основі перемикаючих сигналів.

Розроблено лабораторний стенд, який використано в експериментальній частині роботи.

9. Визначити, як впливають нелінійності на запас стійкості системи.

Вплив нелінійностей на запас стійкості досліджено достатньо повно. Разом із тим окремі результати могли б бути представлені більш наочно.

10. *Підвищити стійкість системи електропривода при коефіцієнтах посилення, що перевищують критичні, шляхом застосування нелінійних динамічних коригуючих пристроїв.*

Показано можливість підвищення стійкості системи за рахунок застосування нелінійних коригувальних пристроїв.

11. *Визначити, який вплив має використання нелінійного динамічного коригуючого пристрою на виникнення автоколивань.*

Досліджено вплив нелінійного динамічного коригуючого пристрою на виникнення автоколивань в електроприводі.

Таким чином, можна вважати, що поставлені завдання у дисертаційній роботі Савченка Олега Валерійовича в цілому вирішені.

Рівень оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності

Савченко Олег Валерійович показав наявність базових знань та вмінь, які потрібні для проведення наукових досліджень, здатність планувати і отримувати підтверджені наукові результати.

В першому розділі роботи проаналізовано нелінійності електропривода. Виявлено проблеми і проведено аналіз схем електроприводів з лінеаризацією. Сформовано мету та постановку задачі дослідження.

В другому розділі проведено порівняльний аналіз лінійних і нелінійних систем керування, визначено вплив нелінійностей електроприводів, досліджено стійкість системи керування. Розглянуто нелінійні системи керування машиною постійного струму незалежного збудження третього і четвертого порядків, в яких за рахунок вводу нелінійних елементів у зворотному зв'язку підвищується швидкодія при великих відхиленнях та усувається перерегулювання. Враховано зону нечутливості схеми формування нелінійного зворотного зв'язку, а також системи зі змінним демпфуванням у прямому каналі.

Розглянуто деякі особливості розрахунку автоматичних систем, у яких використано ланки зі змінним коефіцієнтом передачі та зі змінною інерційністю, а також наведено необхідні розрахункові формули. Представлена

математична модель електропривода з нелінійними перемикаючими сигналами та доведено ефективність такого підходу.

В третьому розділі проведено дослідження компенсації нелінійностей електропривода в каналі помилки системи. Порівняно результат компенсації з використанням гальмівної і прослизуючої муфти. Запропоновано математичну модель корекції інерційності двигуна муфтами.

В четвертому розділі представлено синтез електропривода із сухим тертям, розроблено методи компенсації тертя, що забезпечують підвищення плавності руху, точності позиціонування та стійкості системи керування.

В п'ятому розділі проведено експериментальне дослідження електроприводу. Представлено синтез системи автоматичного керування електроприводом з нелінійними коригуючими пристроями на основі перемикаючих сигналів з покращенням якості регулювання та зменшенням впливу нелінійностей об'єкта керування на функціонування системи.

6. Повнота викладення положень дисертації в опублікованих працях

Основні результати дослідження повною мірою викладені у 120 друкованих працях, серед них 5 статей у фахових виданнях згідно з переліком, який затверджено ВАК України, 10 статей у закордонних виданнях, 16 публікацій у збірниках праць міжнародних і національних конференцій, 12 патентів на корисну модель, а також 33 статті у закордонних виданнях і 40 публікацій у збірниках праць міжнародних і національних конференцій, що додатково відображає наукові результати дисертації.

Пункти наукової новизни дисертаційної роботи повністю висвітлені в опублікованих статтях, а кількість публікацій відповідає пункту 8 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

7. Відсутність порушення академічної доброчесності

За результатами вивчення рукопису дисертаційної роботи Савченка Олега Валерійовича, а також аналізу наданого їм звіту щодо перевірки тексту рукопису електронним сервісом *StrikePlagiarism* від 17.06.2026 р., порушень академічної доброчесності не було встановлено. Використані здобувачем окремі наукові положення і результати інших науковців мають посилання на відповідні джерела.

8. Зауваження щодо змісту дисертаційної роботи

Слід також відзначити наступні недоліки, питання та недостатньо обґрунтовані аспекти дисертаційної роботи.

1. В роботі значна увага приділяється нелінійності типу сухого тертя і люфту, але електроприводам притаманні і інші нелінійності, наприклад, обмеження максимальних регулюючих величин.

2. Для підвищення наочності роботи окремі результати моделювання можна було б представити у вигляді сімейств перехідних графіків та таблиць узагальнених результатів.

3. У 2, 3, 4 розділах трапляється досить детальний опис проміжних математичних викладок, який можна було б дещо скоротити без втрати змістовності.

4. Окремі графічні матеріали могли б супроводжуватися більш розгорнутими коментарями щодо фізичної інтерпретації отриманих результатів.

5. Деякі проміжні результати могли б бути винесені до додатків, що зробило б основний текст більш компактним.

6. Список позначень на с.166 можна було перенести в загальний список позначень.

7. В результатах експериментів п.5.2-5.3 доцільно було навести структурні блок-схеми досліджуваних електроприводів.

9. Оформлення дисертації

Текст дисертації викладено аргументовано, логічно та послідовно. Стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, нових наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття та використання. Структура дисертації, оформлення, мова та стиль викладення відповідають вимогам, які ставить до дисертацій Міністерство освіти і науки України.

10. Зауваження щодо оформлення дисертаційної роботи

1. На с.11 всього декілька строк тексту і майже порожня сторінка. Бажано заповнювати останню сторінку розділу не менше половини.
2. Висновки до розділів не нумеруються як окремі підрозділи.
3. Список позначень та скорочень слід було розташувати в алфавітному порядку.
4. По тексту роботи зустрічаються пропуски слів та слова в неправильній формі, наприклад, другий знизу пункт списку на с.19, нижній пункт на с.20, другий знизу пункт на с.21, с.24 починаючи із заголовка, с.25 перша строчка і так далі.
5. В деяких формулах знак множення використовується, а в деяких не використовується, там, де це потрібно, що потребує додаткових зусиль для сприйняття.
6. В формулах аргументи стандартних функцій не завжди беруться в дужки.
7. Деякі рисунки структурних схем, наприклад рис. 2.17 та інші, наведено в дрібному масштабі з текстом, значно дрібнішим за основний текст роботи.
8. На деяких графіках, наприклад, рис.2.18, немає одиниць вимірів на вісях координат.
9. Графіки роботи системи на рис.2.23 на підписані окремо по кожному графіку.
10. Для скорочення рисунків можна було графіки рис.4.1-4.4 розмістити в одній системі координат одного рисунка.

11. На рис.5.3 верхня горизонтальна вісь не позначена.

12. Взагалі об'єм пояснювальної записки можна було значно скоротити без скорочення викладення основних результатів роботи.

Але вказані вище зауваження та побажання не зменшують науково-практичного значення роботи та не заперечують основних результатів досліджень здобувача.

11. Загальна оцінка дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Савченка Олега Валерійовича на тему: «Синтез електроприводів з притаманними нелінійностями» є цілісною, завершеною науково-дослідною роботою, яка виконана за актуальною темою, містить теоретичні та експериментальні дослідження, які спрямовані на вирішення науково-прикладного завдання – синтезу електроприводу з урахуванням притаманних йому нелінійностей, що виникають внаслідок особливостей електромеханічного перетворення енергії, характеристик силових перетворювачів, обмежень виконавчих пристроїв, а також нелінійних властивостей механічної частини приводу. Робота відповідає вимогам до оформлення дисертації, затвердженим Наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 року № 40 (із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки № 759 від 31.05.2019).

Використання сучасних програмних засобів для моделювання складних фізичних процесів, доповнених розробленим автором лабораторним стендом складають основу експериментальної частини роботи.

Аналіз змісту дисертаційної роботи і опублікованих праць за темою дослідження дозволяє зробити висновок, що всі пункти наукової новизни, які мають місце, належним чином відображено у роботі.

Дисертаційна робота за науковим рівнем, практичною та науковою цінністю, обґрунтованістю основних результатів, кількістю публікацій та дотриманням принципів академічної доброчесності відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення

разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44, а її автор Савченко Олег Валерійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Рецензент:

доктор технічних наук, доцент

завідувач кафедри суднових електроенергетичних систем

Національного університету кораблебудування

імені адмірала Макарова



Андрій ОБРУБОВ

Підпис засвідчую:

Вчений секретар

Світлана УТКІНА