

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Демків Любомира Ігоровича**
на тему «АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ НЕЧІТКИХ РЕГУЛЯТОРІВ
ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ»,

подану на здобуття наукового ступеня **доктора технічних наук**
за спеціальністю **05.13.03 – системи та процеси керування**

1. Актуальність обраної теми та мета дисертаційної роботи

Дисертаційне дослідження присвячене актуальній науковій проблемі теорії автоматичного керування – розвитку теорії та методів синтезу нелінійних систем автоматичного керування (САК) з нечіткими регуляторами.

Інтелектуальні технології керування, зокрема із застосуванням теорії нечітких множин, грають важливу роль в задачах автоматизації нелінійних об'єктів. Вони дають змогу синтезувати САК з необхідними показниками якості керування, надати САК адаптивні властивості, забезпечити якісне керування в умовах структурної або параметричної невизначеності.

Проте на практиці більшість САК розробляється на основі ПД-регуляторів. Це обумовлено тим, що інтелектуальні САК вимагають суттєвих обчислювальних ресурсів при синтезі та/або експлуатації, методи синтезу передбачають застосування експертних оцінок або проведення експериментів над об'єктом керування. Складність та відсутність єдиного підходу до налаштування нечітких регуляторів обмежує їх широке застосування.

Зазвичай задачу синтезу САК нелінійними об'єктами зводять до лінеаризації математичної моделі об'єкта керування. При цьому якість керування при виході САК за межі квазілінійного простору станів суттєво погіршується. Наявність збурюючих впливів також погіршує якість керування. Це вимагає розвитку теорії керування нелінійними системами, зокрема із застосуванням інтелектуальних регуляторів на базі нечіткої логіки. Тому мету дисертаційного дослідження поставлено як розвиток методів синтезу та аналіз стійкості нелінійних САК на базі нечітких регуляторів.

У зв'язку з цим, актуальність обраної теми не викликає сумнівів, мету роботи сформульовано відповідно до теми дисертації та наукової проблеми, означеної в дисертації.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Основні наукові положення дисертації були отримані автором на основі методів класичної теорії автоматичного керування, теорії нечітких множин, матричного числення, імітаційного моделювання, планування та обробки даних комп'ютерних експериментів.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується:
- використанням достовірних імітаційних моделей об'єктів керування;

- коректно проведеними комп'ютерними експериментами, результати яких мають задовільну збіжність з результатами, отриманими в аналітичному виді;

- працездатністю та ефективністю синтезованих нечітких регуляторів, що було підтверджено результатами експериментальних досліджень САК електромеханічними системами.

Це дає змогу стверджувати, що наукові положення, висновки і рекомендації, які сформульовані у дисертації, обґрунтовані в повній мірі.

3. Наукова новизна отриманих результатів

В дисертації представлені наступні вперше отримані наукові результати:

- вперше синтезовано нечіткий регулятор з нестійкою підсистемою, який дає змогу на основі аналізу кількості коренів характеристичного поліному та траєкторій їх руху задавати динамічні характеристики системи автоматичного керування;

- вперше розроблено метод синтезу нечіткого регулятора на основі застосування каскадної структури, який враховує нелінійності типу «обмеження» керуючих впливів та фазових координат об'єкта керування і дає змогу отримувати регулятори з простішою структурою у порівнянні з типовими нечіткими регуляторами;

- отримав подальший розвиток метод синтезу нечітких регуляторів типу Такагі-Сугено шляхом застосування стандартних форм розподілу коренів характеристичного поліному, що дало змогу визначати параметри регулятора та задавати бажані динамічні характеристики системи автоматичного керування без необхідності розв'язку матричних нерівностей;

- отримала подальший розвиток теорія аналізу стійкості систем автоматичного керування з нечіткими регуляторами шляхом формування критерію стійкості для регулятора з нестійкою підсистемою, що утворює основу для дослідження стійкості таких систем автоматичного керування;

- вперше розроблено метод багатокритеріального оптимального керування на основі застосування змінних в часі вагових коефіцієнтів критеріїв оптимальності в залежності від поточних фазових координат об'єкта, що дає змогу реалізувати переходи між оптимальними траєкторіями підсистем і тим самим покращити якісні характеристики системи автоматичного керування при керуванні об'єктами зі змінними в часі параметрами.

У цілому, наукові результати дисертаційного дослідження представляють собою успішний розв'язок актуальної наукової проблеми синтезу та аналізу САК з нечіткими регуляторами, які забезпечують формування бажаних динамічних характеристик САК нелінійними об'єктами, забезпечують оптимальне керування нелінійними об'єктами зі змінними параметрами.

4. Практичне значення отриманих результатів

Основними теоретичними результатами дисертаційного дослідження, які мають практичне значення, є розробка підходу до синтезу нечітких регуляторів нелінійними об'єктами, який дає змогу синтезувати САК з бажаними

динамічними характеристиками, та розробка методу багатокритеріального оптимального керування нелінійними об'єктами зі змінними в часі параметрами.

Застосування результатів дисертаційного дослідження можливе при синтезі нечітких регуляторів нелінійних об'єктів у випадках, коли необхідно забезпечити бажані динамічні характеристики САК та оптимізувати її роботу за декількома критеріями.

Перспективним вбачається застосування отриманих результатів в задачах автоматизації керування рухомими об'єктами в умовах дії збурюючих впливів, зокрема повітряними, наземними та морськими: надводними та підводними.

Практичну цінність дисертаційного дослідження підтверджено застосуванням отриманих результатів:

- в науково-дослідних роботах: ДБ «Еплік», номер державної реєстрації 0107U001103; ДБ «Інтелектуал», номер державної реєстрації 0109U001149; ДБ «FuzzyOpt», номер державної реєстрації 0111U001230;

- в комерційних організаціях Корпорація «Софтсерв», ТОВ «Завод Електропобутприлад»;

- в начальному процесі Національного університету «Львівська політехніка», Львівського національного університету імені Івана Франка, Українського католицького університету, Університету Алабами в Бірмінгемі.

Застосування отриманих результатів підтверджено відповідними документами про впровадження.

5. Структура та зміст дисертації

Структура дисертації за формою відповідає «Вимогам до оформлення дисертації», затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. №40. Основна частина дисертації складається зі вступу, 4 розділів та висновків.

У вступі подано загальну характеристику роботи – обґрунтування актуальності теми дослідження, мета, завдання та методи дослідження, а також формулювання наукової новизни та особистого внеску здобувача.

У першому розділі дисертації автор аналізує літературні джерела, в яких синтезовано та досліджено регулятори динамічних лінійних та нелінійних систем, та проводить порівняльний аналіз відомих підходів до синтезу САК нелінійними об'єктами. Огляд включає системи з адаптивними регуляторами, в тому числі на базі ПД-регуляторів та нейронних мереж, робастними регуляторами, в тому числі зі змінною структурою та з прогнозуючим керуванням, з регуляторами на основі нечіткої логіки, в тому числі з використанням нечітких поліномів. Розглядаються існуючі САК нелінійними об'єктами, які обрано в якості об'єктів керування в дисертаційній роботі: дуговою сталеплавильною піччю та електроприводом автомобіля.

Наводяться позитивні властивості та обґрунтовуються недоліки розглянутих методів керування нелінійними об'єктами.

На основі проведеного аналізу автор коректно формулює наукову проблему розвитку теорії та методів синтезу нелінійних САК з нечіткими регуляторами та завдання, які необхідно розв'язати в роботі.

У другому розділі детально розглянуто питання аналізу стійкості систем з нечітким регулятором. Досліджено випадки, коли одна з підсистем є нестійкою, та запропоновано підхід до визначення областей стійкості системи в залежності від значень функцій належності нечіткого регулятора та порядку досліджуваної системи. Досліджено вплив параметричних та непараметричних ступенів свободи нечіткого регулятора, траєкторії руху коренів з правої в ліву півплощину на динамічні характеристики досліджуваної системи.

В розділі запропоновано підхід до аналізу стійкості нечіткого регулятора з нестійкою підсистемою, а також отримані кількісні та якісні оцінки доцільності застосування регулятора з нестійкою підсистемою в динамічних САК. В результаті дослідження розроблено метод синтезу нечіткого регулятора з перемиканням між підсистемами, одна з яких може бути нестійкою, що дає змогу задавати динамічні характеристики САК. Адекватність отриманих результатів підтверджена аналітично. Сформульовано та доведено теорему, що визначає умови стійкості САК. Це свідчить про цілком достатнє теоретичне обґрунтування отриманого наукового результату.

Варто відзначити, що задачу синтезу нечіткого регулятора, а саме знаходження вигляду та параметрів функцій належності, автор запропонував вирішувати аналітично як задачу забезпечення відповідної траєкторії руху коренів характеристичного поліному шляхом розв'язування системи алгебраїчних рівнянь.

Наукові результати розділу представляють собою теоретичну основу синтезу САК нелійними об'єктами та дають змогу забезпечувати їх бажані динамічні властивості.

В третьому розділі показано, що застосування нечіткого регулятора дає змогу формувати задачу багатокритеріального керування зі змінними в часі коефіцієнтами ваги окремих критеріїв. Це забезпечує формування траєкторії вихідної координати як набору оптимальних траєкторій, перехід між якими відбувається на основі методів теорії нечітких множин і тим самим покращує якість керування.

Головним науковим результатом третього розділу є метод синтезу нечіткого регулятора на основі застосування каскадної структури, який враховує нелінійності типу «обмеження» керуючих впливів та фазових координат об'єкта керування. Це дає змогу спростити структуру нечіткого регулятора та уникнути необхідності розв'язування оптимізаційної задачі з накладеними обмеженнями на змінні стану. Крім того, забезпечується покращення динамічних характеристик САК у порівнянні з використанням інтегрального критерію якості та функції покарання.

Корисним результатом є можливість синтезу САК нелійними об'єктами зі змінними в часі параметрами.

Заслуговують на увагу результати, що дають змогу сформулювати підхід до синтезу закону керування нелійними об'єктами з обмеженнями проміжних

фазових координат без суттєвого впливу на вихідний сигнал об'єкта в порівнянні з системою керування об'єктом без цих обмежень.

Аналітична складова розділу подана стисло, але змістовно, з відповідними посиланнями на теоретичні роботи попередніх дослідників.

Четвертий розділ присвячено застосуванню результатів попередніх розділів для синтезу САК переміщенням електроду дугової сталеплавильної печі та синтезу САК електродвигуном колеса автомобіля.

Варто відзначити, що САК дуговою сталеплавильною піччю, синтезована на основі розроблених у дисертації методів, забезпечує відпрацювання збурень різної величини з необхідною швидкодією і без перерегулювання. Це свідчить про те, що САК забезпечує необхідну якість керування. При цьому проміжні координати системи перебувають у допустимих межах. Це свідчить про те, що синтезована САК фізично може бути реалізована.

Синтезований нечіткий регулятор швидкості обертання колеса електромобіля було розроблено для запобігання проковзування колеса. Нечіткий регулятор включає додаткові умови для врахування різних видів дорожнього покриття. Це дає змогу згладжувати ступінчастий вхідний сигнал з урахуванням поверхні руху, зменшувати проковзування колеса та зберігати маневреність електромобіля.

Отримані в розділі результати можуть бути корисними для синтезу САК електромеханічними системами. Матеріали розділу викладено чітко і структурно правильно. Він може бути основою для подальших інженерно-конструкторських інновацій та патентування.

Висновки дисертації достатньо повно характеризують всі основні теоретичні та прикладні результати дисертаційної роботи і містять відомості про успішний розв'язок актуальної наукової проблеми розвитку теорії та методів синтезу нелінійних САК з нечіткими регуляторами та нестійкими підсистемами.

Список використаних джерел містить необхідні відомості про сучасний стан проблеми, що розглядається, та свідчить про глибоке і всебічне вивчення автором результатів досліджень вітчизняних та зарубіжних науковців.

Додатки включають інформацію про впровадження результатів дисертаційної роботи, а також перелік публікацій автора за темою дисертації.

Структурно дисертація побудована правильно, стиль подання матеріалу забезпечує його однозначне сприйняття, оформлення дисертації якісне.

6. Повнота викладення положень дисертації в опублікованих працях

Наукові положення дисертації повністю висвітлені в 24 статтях (23 праці опубліковані в друкованих виданнях, 1 праця – в електронному виданні):

- 2 статті в зарубіжних наукових виданнях, які включено до міжнародних наукометричних баз (Scopus);

- 21 стаття (8 одноосібно) у фахових наукових виданнях України, з них 2 статті у виданнях, які включено до міжнародних наукометричних баз (Scopus);

- 1 стаття в зарубіжному електронному виданні, яке включено до міжнародних наукометричних баз (Scopus).

Апробація дисертаційного дослідження підтверджується публікаціями в матеріалах 12 Міжнародних науково-технічних конференцій, з яких 3 публікації індексуються в наукометричній базі Scopus.

Зміст автореферату в повній мірі розкриває наукові результати дисертації.

7. Зауваження до змісту дисертації

Ознайомлення з дисертацією показало, що до її змісту можна сформулювати наступні зауваження.

1. У вступі на стор. 16 автор зазначає, що нелінійна модель об'єкта керування є практично непридатною для синтезу САК за допомогою класичних підходів, проте нелінійна модель об'єкта керування є основою для синтезу САК методами, наприклад, оберненої задачі динаміки, керування з прогнозуючими моделями.

2. В першому розділі наводиться розширений аналіз літературних даних щодо автоматизації керування нелінійними об'єктами, та висвітлюються недоліки конкретних публікацій, проте варто було б зосередитись на систематизації недоліків методів синтезу нелінійних систем автоматичного керування та формулюванні наукової проблеми.

3. В другому розділі (стор. 59) автор зазначає, що нелінійну систему n -го порядку можна звести до системи диференціальних рівнянь першого порядку, проте це не завжди можливо. Особливо це стосується морських рухомих об'єктів, в математичних моделях яких певні залежності задаються графічно або таблично.

4. У третьому розділі дисертаційної роботи доцільно було б розглянути випадок обмеження більш ніж однієї проміжної координати.

5. В роботі проведено дослідження синтезу нечіткого регулятора типу Такагі-Сугено. Однак відкритим залишається питання порівняння регуляторів такого типу з регуляторами Мамдані, Цукамото тощо, адже тип нечіткого регулятора суттєво впливає на значення вихідного сигналу системи.

6. Додаткової наукової цінності робота набула б, якщо було б досліджено питання поєднання функцій належності різних типів (лінійні, нелінійні) а також використання кількох нестійких підсистем з різним типом розміщення коренів в правій півплощині та часом активацій цих підсистем.

7. Дослідження динаміки перехідних процесів САК в основному виконувалось в режимі стабілізації або ступінчастої зміни керованого параметру. Варто було б навести динаміку перехідних процесів при русі за змінними траєкторіями в програмному та слідкувальному режимах, оскільки такі режими важливі при керуванні рухомими об'єктами.

8. Доцільно було б навести інформацію про комп'ютерні ресурси, які необхідні для синтезу, аналізу та побудови САК з нечіткими регуляторами.

9. В текст дисертації бажано було б додати більш детальну інформацію про експериментальні результати, які наводяться в документах про впровадження.

10. В дисертації в якості прикладів розглянуті досить складні нелінійні об'єкти (дугова сталеплавильна піч, електромобіль). Проте детальної

інформації про технічні характеристики цих об'єктів керування автор не надає. Варто було б навести цю інформацію в додатках.

11. Мають місце технічні неточності в основній частині дисертації, наприклад, в поясненні до формули (2.1) на стор. 60 варто було б окремо розшифрувати змінну N , підписи під осями на рис. 2.37 та 2.38 (стор. 124) варто було б зробити крупнішими, рисунок 4.23 (стор. 259) варто було б назвати «Структура САК колісним модулем».

Означені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації.

8. Відповідність дисертації вимогам Міністерства освіти і науки України

Ознайомлення з дисертаційною роботою Демків Любомира Ігоровича дає змогу стверджувати, що вона відповідає вимогам, зокрема п. 9, 10, 12, «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 р. № 656, які висуваються до кваліфікаційних наукових робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Дисертація за змістом та отриманими в ній результатами відповідає науковій спеціальності 05.13.03 – системи та процеси керування.

9. Рекомендації щодо використання результатів дисертаційної роботи

Отримані автором наукові і практичні результати представляють інтерес для наукових і проектних організацій, професійна діяльність яких охоплює питання створення САК нелінійними об'єктами, в тому числі зі змінними в часі параметрами: ТОВ «Завод Електропобутприлад», Корпорація «Софтсерв», ТОВ «ГлобалЛоджик Україна», Cypress Semiconductor Corp., ДП «Дослідно-проектний центр кораблебудування» та ін.

Результати дисертації можуть використовуватись при підготовці інженерних і наукових кадрів у Національному університеті «Львівська політехніка», Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, Чорноморському національному університеті імені Петра Могили, Українському католицькому університеті, Львівському університеті імені Івана Франка, Університеті Алабами в Бірмінгемі (США).

10. Висновки

Дисертаційна робота Демків Л.І. на тему «Аналіз та синтез нечітких регуляторів динамічних систем» є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що розв'язують актуальну наукову проблему синтезу систем автоматичного керування з нечіткими регуляторами нелінійними об'єктами. За рівнем отриманих теоретичних та прикладних наукових результатів, а також за рівнем важливості для практичних

задач дисертаційна робота відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України, які висуваються до докторських дисертацій.

Автореферат повністю розкриває зміст та отримані наукові і практичні результати дисертації.

Наведені зауваження не знижують наукової цінності дисертаційної роботи.

З урахуванням вищезазначеного, вважаю, що дисертація Демків Любомира Ігоровича відповідає паспорту спеціальності 05.13.03 – системи та процеси керування та вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 р. № 656, які висуваються до кваліфікаційних наукових робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.03 – системи та процеси керування.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри комп'ютерних технологій
та інформаційної безпеки Національного
університету кораблебудування
імені адмірала Макарова,
доктор технічних наук, доцент
«01» лютого 2019 р.



О.В. Блінцов

Підпис д.т.н., доцента Блінцова О.В. засвідчую

Вчений секретар Національного
університету кораблебудування
імені адмірала Макарова
«01» 02 2019 р.



С.А. Уткіна