

## **ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

доктора технічних наук, професора Чорного Олексія Петровича  
на дисертаційну роботу Боровця Тараса Васильовича  
«Синтез та аналіз інтелектуальних спостерігачів координат вектору стану  
системи керування рухом колеса електромобіля»,  
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» з  
галузі знань 14 «Електрична інженерія»

### **Актуальність теми.**

Інтелектуальні технології знаходять широке використання в сучасних системах керування електромобілями, зокрема, застосування теорії нечітких множин дозволяють використання класичних систем керування для нелінійних систем, покращують адаптацію системи керування до різних умов навколишнього середовища. Також, інтелектуальні алгоритми знайшли своє застосування для синтезу спостерігачів вектора стану динамічної системи руху електромобіля. Як відомо, динамічні характеристики спостерігача впливають на якість керування об'єктом. Традиційно, прийнято при використанні синтезу спостерігача Люенбергера швидкодію спостерігача робити на порядок вищою ніж системи керування. Такий підхід дає хороші результати у випадку відсутності нулів передавальної функції системи, а при їх наявності, перехідний процес відрізняється від бажаного. Тоді зменшують швидкодію спостерігача для зменшення коливання. Інтелектуальні спостерігачі дозволяють уникнути втрати швидкодії спостереження і зменшити вплив спостерігача на вплив усієї системи. В той же час, алгоритми інтелектуального керування вимагають значних обчислювальних затрат при їх використанні в режимі реального часу.

Враховуючи відсутність методик синтезу інтелектуальних систем, а також, значне поширення бездавачевих систем електроприводу, задача створення інтелектуальних спостерігачів є актуальною.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації та достовірність отриманих результатів**

Отримані наукові положення та результати обґрунтовано коректним застосуванням відомих положень теорії автоматичного керування, теорії електроприводу, методів числового розв'язування систем диференціальних рівнянь, комп'ютерного моделювання, планування та обробки натурального експерименту. Достовірність, отриманих результатів та адекватність створених моделей підтверджена проведеними експериментальними дослідженнями в умовах дослідницьких лабораторій Національного дослідного центру шин, Алтон, США



## **Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в наступному:**

- отримала подальший розвиток класична теорія синтезу спостерігачів шляхом застосування теорій нечітких множин, що забезпечило можливість їх застосування в нелінійних системах без істотного підвищення обчислювальної складності системи;
- вперше для підвищення швидкодії спостерігача на основі фільтра частинок застосований нечіткий алгоритм зміни кількості частинок та параметрів функції їх розподілу, що дало змогу зменшити обчислювальну складність і реалізувати систему в реальному режимі часу;
- отримала подальший розвиток теорія швидкої динаміки шин (agile tire dynamics) при застосуванні різних типів спостерігачів в системі «електропривод-колесо».

**Практична цінність роботи** полягає у синтезі інтелектуальних спостерігачів стану динамічної системи електроприводу, що дає змогу формувати закон керування за повним вектором стану системи і уникати втрати мобільності транспортного засобу. Практична цінність підтверджена впровадженням отриманих результатів ТОВ СофтСерв Технології. для проектування систем керування електроприводом мобільних роботів та впровадженням у навчальний процес кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем Національного університету «Львівська політехніка» в курс дисципліни «Системи керування рухом повних і гібридних електромобілів та міського електротранспорту» в освітній програмі «Системи енергетики сталого розвитку» для студентів першого рівня вищої освіти за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

## **Повнота викладу наукових положень в опублікованих працях.**

Наукові положення і прикладні питання дисертації повністю опубліковано у 7 наукових публікаціях, з них 1 стаття у науковому фаховому виданні України та 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав; 1 стаття у виданні України, яке входить до міжнародної наукометричної бази та 3 матеріали міжнародних науково-практичних конференцій.

Основні результати досліджень доповідались та отримали позитивну оцінку на 2 семінарах учасників проекту за грантом NATO SPS G5176 "Agile Tyre Mobility for Severe Terrain Environments" та на 4 міжнародних науково-практичних конференціях.

## **Аналіз змісту дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота містить анотацію, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел із 129 найменувань та додатки. Повний обсяг роботи становить 145 сторінок. Дисертація містить 75 рисунків і 6 таблиць.

У вступі зазначені актуальність дисертаційного дослідження, її зв'язок з науковими програмами, сформульовані мета та задачі дослідження. Сформульовано наукову новизну результатів, що виносять на захист. Показано



рівень апробації результатів роботи, кількість публікацій по темі й особистий внесок автора.

У *першому розділі* наведено аналіз літературних джерел за тематикою дослідження, формулювання задач і вимог до спостерігачів координат вектора стану динамічної системи рухом колеса електромобіля.

У *другому розділі* розроблено математичну модель транспортного засобу, яка враховує динаміку системи підресорювання та взаємодію шини із різними поверхнями руху. Показано застосування підходу зворотної динаміки для синтезу системи керування із врахуванням індексу мобільності колеса електромобіля. Проведено ґрунтовний порівняльний аналіз класичних методів спостереження із використанням методів моделювання.

У *третьому розділі* показано покращення класичних методів спостереження із використанням підходів нечіткої логіки. Запропоновано синтезувати нечіткий спостерігач Люенбергера для нелінійних систем із різною швидкодією коефіцієнтів підсилення матриці спостерігача. Показано, що застосування нечіткої логіки для фільтра частинок дозволяє зменшувати обчислювальну складність і формувати довільний розподіл частинок.

У *четвертому розділі* наведені експериментальні результати тестування нечіткого фільтра частинок на експериментальній установці MTS Flat-Trac в Національному дослідному центрі шин, Алтон, США.

У додатках наведено довідки про використання і впровадження результатів дисертаційної роботи.

За обсягом, структурою, мовою та стилем викладання дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44).

### **Зауваження та пропозиції до дисертаційної роботи**

1. У висновках до дисертаційної роботи доцільно було б навести більше числової інформації ніж якісних характеристик.
2. У розділі 2 наведено математичну модель досліджуваного об'єкта із щітковим двигуном постійного струму, натомість, в експериментальному дослідженні в розділі 4 описується безщітковий двигун постійного струму із постійними магнітами.
3. Недостатньо описана процедура налаштування спостерігачів, зокрема, вибір функції розподілу частинок для фільтра частинок, вибір бажаної перехідної функції похибки спостереження для спостерігача Люенбергера, налаштування матриці коваріацій шуму системи та сенсорів у фільтрі Калмана.



4. Не проаналізовано вплив на точність спостереження параметричних та непараметричних ступенів свобод нечіткого фільтра частинок та нечіткого спостерігача Люенбергера.
5. Яким чином враховується стан шини колеса, чи впливає фізичне старіння шини на показники керування і чи проводились відповідні дослідження?
6. В роботі відсутні дані про тип електроприводу мотор-колеса, і лише при проведенні експериментальних досліджень вказується що "кутове обертання колеса забезпечується безредукторним електроприводом, який включає безколекторний двигун постійного струму"

Вказані зауваження, в цілому не знижують наукову значущість і практичну цінність роботи та можуть розглядатись як рекомендації до подальших наукових досліджень.

### Висновки щодо дисертації в цілому

Представлена дисертаційна робота Боровця Тараса Васильовича «Синтез та аналіз інтелектуальних спостерігачів координат вектору стану системи керування рухом колеса електромобіля» є завершеною науковою працею, у якій розв'язано науково-прикладну задачу синтезу інтелектуального спостерігача координат вектору стану системи керування рухом колеса важковагового транспортного засобу.

Одержані наукові результати є значущими для галузі знань 14 Електрична інженерія. Тема і зміст дисертації відповідає спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Враховуючи актуальність теми, виконаних досліджень та значення отриманих результатів, відсутність порушення академічної доброчесності, дисертаційна робота відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а її автор Боровець Тарас Васильович заслуговує на присвоєння наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Офіційний опонент - д.т.н., проф.  
професор кафедри "Системи автоматичного управління та електропривод",  
директор навчально-наукового інституту  
електричної інженерії та інформаційних технологій  
Кременчуцького національного університету  
імені Михайла Остроградського

О.П. Чорний

