

## **ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

доктора технічних наук, професорки Толочко Ольги Іванівни  
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 обраної теми**

Стратегії сталого розвитку європейських країн передбачають широке використання електромобілів, зокрема і важковагових. Для розробки систем автоматичного керування рухом електромобіля в умовах бездоріжжя необхідна інформація як про параметри і координати транспортного засобу, так і про стан дорожнього покриття, ситуацію на дорозі тощо. Більшість цієї інформації не може бути отримана шляхом безпосередніх вимірювань за допомогою датчиків. В такій ситуації в систему керування треба закладати алгоритми оцінювання необхідних параметрів та сигналів. Використання сучасних методів параметричної та сигнальної ідентифікації є важливою складовою підвищення ефективності транспортних засобів та безпеки на дорогах. Наявність достовірної інформації про координати об'єкту регулювання, отриманої за допомогою сучасних алгоритмів спостереження, дає можливість розробити систему керування з високими показниками якості перехідних процесів.

Враховуючи сказане, синтез спостерігачів стану, які можуть використовуватися в бездавачевих системах керування електромобілем, та їх удосконалення є актуальною науковою-прикладною задачею.

Актуальність теми підтверджується тим, що дисертаційна робота виконувалась у рамках гранту NATO SPS MYP G5176 «Agile Tire Mobility for Severe Terrain Environments» (рухлива мобільність шин для суворих умов).

### **Аналіз змісту дисертаційної роботи**

Дисертація є завершеною роботою, яка складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 129 найменувань та додатків. Повний обсяг роботи, яка містить 75 рисунків і 6 таблиць, становить 145 сторінок.

*У вступі* обґрунтована актуальність теми дисертації, визначено її зв'язок з науковими програмами, сформульовані мета роботи та задачі досліджень. Сформульовано наукову новизну результатів, що виносять на захист. Показано практичну цінність роботи, рівень апробації результатів, кількість публікацій по темі й особистий внесок автора.

*У першому розділі* виконано аналітичний огляд основних алгоритмів спостереження, що використовуються для сигнальної ідентифікації динамічної

системи автомобіля. Обґрунтовано необхідність використання математичних алгоритмів реального часу для оцінювання невимірних координат та невідомих або змінюваних параметрів, сформульовано вимоги до спостерігачів стану системи керування електромобіля.

*У другому розділі* представлені математичні моделі, які описують динаміку руху транспортного засобу по деформованих поверхнях руху, з урахуванням їх особливостей: зміни радіусу колеса та його моменту інерції під дією зовнішніх збурень, наявності складової тертя Штрібека, що відображує різницю між тертям спокою та тертям руху, пружності та в'язкості кінематичних передач, пружність ресор. Обґрунтовано необхідність обчислення індексу мобільності транспортного засобу на основі алгоритмів спостереження. Проведено ретельний порівняльний аналіз класичних методів спостереження шляхом комп'ютерного моделювання із використанням розроблених математичних моделей досліджуваного об'єкта.

*У третьому розділі* розглянуто модифікації класичних алгоритмів спостерігачів із використанням підходів нечіткої логіки. Показано, що нечітка логіка дозволяє перемикає матриці коефіцієнтів спостерігача Люенбергера, що забезпечують різну швидкодію спостереження, в залежності від знаходження похибки оцінювання в одному із визначених діапазонів. Завдяки застосуванню такого підходу вдалося зменшити вплив завад в сигналах давачів та підвищити швидкодію системи керування у цілому. Доведено шляхом комп'ютерного моделювання, що нечіткий спостерігач фільтра частинок забезпечує задовільну точність спостереження і має обчислювальні затрати на порядок менші від класичного підходу.

*У четвертому розділі* представлені експериментальні дослідження модифікованого алгоритму фільтра частинок із динамічною зміною кількості частинок та змінним розподілом частинок на експериментальній установці MTS Flat-Trac в Національному дослідному центрі шин, Алтон, США. Експерименти підтвердили результати математичного моделювання. Також, запропоновано визначати поверхню руху на основі експериментальних даних, знятих на мобільній роботизованій платформі.

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

### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- отримала подальший розвиток теорія синтезу спостерігачів шляхом застосування теорії 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 маневреної динаміки шин (agile tire dynamics) при застосуванні різних типів спостерігачів в системі «електропривод-колесо».

**Практична цінність роботи полягає у тому, що синтезовані спостерігачі забезпечують оцінювання значень невимірювальних координат стану динамічної системи електроприводу колеса електромобіля в режимі реального часу, що дає змогу формувати закон керування за повним вектором стану системи і уникати небажаних режимів, які призводять до втрати мобільності і зменшення безпеки руху. Отримані результати можуть бути використанні при розробці бездавачевих систем керування електроприводом електромобілів.**

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

Достовірність отриманих автором наукових результатів, висновків та рекомендацій підтверджена співпадінням математичного та фізичного моделювання. Теоретичне обґрунтування отриманих в роботі результатів проведене з застосуванням фундаментальних методів класичної та сучасної теорії автоматичного керування.

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

У 7 наукових публікаціях повністю відображені основні результати дисертації, 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 Scopus та 3 матеріали міжнародних науково-практичних конференцій.

Основні результати досліджень доповідались та отримали позитивну оцінку на: спільній робочій зустрічі-семінарі учасників проекту за грантом NATO SPS G5176 “Agile Tyre Mobility for Severe Terrain Environments” та професорсько-викладацького складу Міланської політехніки, Мілан, Італія, 2018; міжнародній конференції «The Joint 10th Asia-Pacific Conference of The International Society for Terrain-Vehicle Systems (ISTVS) and 39th Annual Meeting of Japanese Society for Terramechanics (APISTVS 2018)», Кіото, Японія, 2018; спільній робочій зустрічі-семінарі учасників проекту за грантом NATO SPS G5176 “Agile Tyre Mobility for Severe Terrain Environments” у м. Ковентрі, Великобританія, 2019; міжнародній конференції «The 15th IFToMM World Congress», Краків, Польща, 2019; міжнародній конференції «The 15th European-African Regional Conference of the International Society of Terrain-Vehicle Systems (ISTVS2019)», Прага, Чехія, 2019; науковому семінарі НАН України, Львів, 2019; міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційно-вимірювальні технології ІВТ-2022» (09-10 листопада 2022 р., Львів).

### Зауваження та пропозиції до дисертаційної роботи

1. У перелік порівнюваних спостерігачів стану варто було б додати Sliding-mode Observers (спостерігачі, що працюють у ковзному режимі).

2. З дисертації не зрозуміло, який фізичний сенс має індекс мобільності колеса, який діапазон його значень можна вважати задовільним?

3. Рекомендації для налаштування синтезованих в роботі спостерігачів стану не конкретні, наприклад, «Діагональний елемент матриці налаштовується шляхом призначення більш високого значення, ніж значення інших елементів матриці. Початкові умови матриці коваріації  $P_x$  визначаються як високі значення для збільшення швидкості збіжності спостережених станів до реальних величин. Величини матриць коваріацій налаштовувалися експериментальним шляхом для мінімізації похибки спостереження».

4. В дисертації не зазначено, як і при яких параметрах отримані графіки на рис. 2.6-2.9. Чим відрізняються один від одного з розглянутих профілі поверхні руху, які параметри від них залежать?

5. Спостерігач Люенбергера, досліджений в дисертації налаштований за допомогою кореневого методу із забезпечення реакції спостерігача, яка у 10 разів швидша, ніж реакція замкненої системи, із метою зменшення впливу спостерігача на поведінку системи. Така висока швидкодія сприяє значному підвищенню рівня перешкод. Насправді швидкодію спостерігачів Люенбергера достатньо обрати з умови перевищення швидкодії системи, замкненої за власними координатами, у 2-3 рази, а для підвищення точності оцінювання застосувати, наприклад, оцінювання збурень, та компенсацію похибок спостереження.

6. У роботі не обґрунтовано вибір для досліджень шуму вимірювань на рівні 80 дБ.

7. У роботі зазначається, що спостерігачі, синтезовані для визначення координат руху колеса електромобіля, є необхідні для визначення рівня мобільності колеса. Проте, як і в комп'ютерному моделюванні, так і в експериментальному дослідженні визначення індексу мобільності не наведено.

8. Доцільно було б детальніше описати визначення параметрів моделі динаміки шини.

9. Автор наводить значення коефіцієнту жорсткості системи диференційних рівнянь, що описують колісний модуль ( $K=503,7333$ ), розрахованого як відношення максимального власного числа матриці стану до мінімального, але не наводить ні полюсів системи, ні їхніх амплітуд, ні параметрів системи, для яких ця інформація є справедливою.

10. В дисертації не показано, як здійснювався синтез цифрових спостерігачів стану з моделі об'єкту регулювання, тобто спочатку виконувався синтез аналогового спостерігача, а потім його дискретна апроксимація або

спочатку виконувалась дискретизація об'єкту, а потім синтез цифрового спостерігача.

11. В розділі 3 не показано, як розраховано матриці коефіцієнтів спостерігача Люенбергера (3.2)-(3.4). Дивно, що третій коефіцієнт спостерігача обертальної динаміки змінює знак при переході значення похибки оцінювання з діапазону "Small" до "Medium". На жаль для перевірки отриманих даних в роботі не вистачає інформації.

12. У висновках бракує кількісних показників.

13. У другому розділі варто було б провести порівняння спостерігачів при різних періодах дискретності. Наприклад, спостерігач Люенбергера має меншу обчислювальну складність в порівнянні із фільтром частинок, що дозволяє частіше отримувати дані із давачів для зменшення похибки спостереження.

14. Варто було б проаналізувати вплив вибору функцій належності у нечіткому спостерігачі фільтра частинок на точність визначення станів системи та динаміки системи в загальному.

### Зауваження до оформлення дисертації

1. У роботі відсутній список позначень і скорочень.

2. Деякі позначення сигналів є невдалими і відрізняються від загально прийнятих, що ускладнює розуміння формул. Наприклад, напругу батареї позначено  $k_{bat}$ , складові моменту тертя –  $\alpha_{0m}$ ,  $\alpha_{1m}$ , стала часу тертя Штрібека –  $\alpha_{2m}$ ; активний опір та індуктивність якоря двигуна постійного кола позначені  $R_a$ ,  $L_a$ , а струм якоря –  $i_m$ .

3. Інколи автор невдало застосовує технічну термінологію, наприклад, «колова сила» замість «тангенціальна сила», «пружний демпфуючий момент» замість «пружно-в'язкий момент», «швидка динаміка шин» замість «маневрена динаміка обода колеса» тощо.

4. При аналізі стійкості систем зі спостерігачами Люенбергера автор посилається на теореми Гурвіца, Ляпунова, Акермана. Насправді теореми Акермана не існує. Існує формула Акермана, яка не має ніякого відношення до визначення стійкості.

5. У розділі 2 для двигуна постійного струму наведені усім відомі формули електромагнітного моменту і проти-ЕРС:  $T_m = k_t i_m$  і  $e = k_{emf} \omega_m$  з різними коефіцієнтами моменту та ЕРС, хоча в системі СІ вони є однаковими.

6. В додатках до другого розділу, присвяченому розробці моделей колісного модуля, варто було б навести значення параметрів досліджуваного об'єкту та методика їх визначення, а в додатках до третього розділу – бажані стандартні характеристичні поліноми, їх середньгеометричні корені, матриці коваріації, програми для розрахунку коефіцієнтів спостерігачів.

Вказані зауваження, не знижують загального позитивного враження від дисертації.

## Висновки щодо дисертації в цілому

Дисертація 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 аналізу та синтезу інтелектуального спостерігача координат вектору стану системи керування рухом колеса електромобіля, що дозволяє створювати бездавачеві системи керування електроприводом транспортних засобів навіть в умовах бездоріжжя та відповідає спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Особливої уваги заслуговує експериментальна частина дисертації, виконана за допомогою системи тестування шин MTS FlatTrac® LTR в Національному центрі досліджень шин (NTRC) у місті Алтон (США, штат Вірджінія) та чотрьохколісної платформи, оснащеної автономною системою електроприводу.

Робота достатньо добре ілюстрована за допомогою рисунків та таблиць. За обсягом, структурою, мовою та стилем викладання дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», виконана за допомогою

За обсягом виконаних досліджень та значенням отриманих результатів дисертаційна робота відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, зокрема, 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), 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.  
професорка кафедри автоматизації  
електромеханічних систем та електроприводу  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»

*Григорина*  
*засвідчено*  
*Внешній секретар*  
*КМІ ім. Ігоря Сікорського*



*Толочко*

О.І. Толочко

*В.Х.*

*Валерія Холєвко*