

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БОРОВЕЦЬ ТАРАС ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 62-83-52

681.5.015

ДИСЕРТАЦІЯ

**СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СПОСТЕРІГАЧІВ
КООРДИНАТ ВЕКТОРУ СТАНУ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РУХОМ КОЛЕСА
ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ**

141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Боровець Т.В.

Наукові керівники:

Лозинський Андрій Орестович, доктор технічних наук, професор

Ванцевич Володимир Володимирович, доктор технічних наук, професор

Львів - 2023

АНОТАЦІЯ

Боровець Т.В. Синтез та аналіз інтелектуальних спостерігачів координат вектору стану системи керування рухом колеса електромобіля. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2023.

Дисертаційна робота присвячена синтезу та аналізу спостерігачів вектору стану системи керування рухом колеса електромобіля для покращення енергоощадності, прохідності, мобільності та підвищення безпеки руху транспортного засобу. Отримані результати дослідження дозволяють покращити точність спостереження невимірювальних величин у системах керування електромобілем, що дозволить синтезувати систему керування за повним вектором стану із врахуванням запасу мобільності.

У першому розділі розкрито проблеми вимірювання величин у системах електромобілів, обґрунтовано необхідність використання алгоритмів спостереження невимірювальних координат. Наведено аналіз літературних джерел, у яких розглянуто використання класичних та інтелектуальних алгоритмів спостереження у системах керування колісним транспортом. Показано, що математичні моделі транспортних засобів та динаміка взаємодії колеса з дорогою є нелінійними, що суттєво обмежує використання лінійних спостерігачів. Реалізація нелінійних методів спостереження призводить до збільшення обчислювальних затрат, що спричинює зростання кроку дискретизації i , відповідно, негативно впливає на точність оцінки.

Встановлено, що використання каскадних схем спостерігачів дозволяє уникнути проблеми спостережності системи, покращує моделювання різнотемпових підсистем, спрощує налаштування параметрів спостерігача.

Показано, що недослідженими все ще залишаються питання ефективності застосування класичних спостерігачів в умовах бездоріжжя, зокрема при русі колеса по деформованому ґрунті. Враховуючи можливості представлення нелінійної

системи як сімейства лінійних систем при застосуванні теорії нечітких множин, зроблено висновок про доцільність застосування нечітких спостерігачів в умовах бездоріжжя. Висунуто припущення, що використання нечіткої логіки дозволить зменшити обчислювальну складність алгоритмів, які апроксимують нелінійну модель набором точок.

Другий розділ присвячений дослідженню математичних моделей, які описують динаміку руху транспортного засобу по деформованих поверхнях руху, з урахуванням відмінностей різних поверхонь руху. Отримав подальший розвиток підхід зворотної динаміки для аналізу запасу мобільності транспортного засобу та розроблення методики обмеження обертового моменту колеса для підтримання індексу мобільності у прийнятних межах. Обґрунтовано необхідність використання спостерігача для визначення компонентів індексу мобільності у режимі реального часу. Проаналізовано точність класичних спостерігачів для спостереження обертового моменту та нормальної реакції, яка діє у контакті шина-поверхня, під дією збурень на сигнали із давачів, негаусівських шумів, та у випадку неточних початкових умов. Встановлено, що при виконанні досліджень з однаковим кроком інтегрування, спостерігач на основі фільтра частинок показав на відміну від фільтра Калмана і спостерігача Люенбергера найкращу точність спостереження при дії гаусових і довільних за природою збурень на датчики системи керування, а також найкращу збіжність при невідомих початкових значеннях спостережених координат. У той же час спостерігач на основі фільтра частинок має високу обчислювальну складність на відміну від інших досліджуваних алгоритмів, що може зменшити його привабливість і потребує удосконалення даного алгоритму. Враховуючи особливості моделі колісного модуля, показано що в алгоритмі роботи спостерігача доцільним є використання неявних методів чисельного інтегрування з низькими обчислювальними затратами.

У третьому розділі розглянуто модифікації класичних алгоритмів спостереження із використанням нечіткої логіки. Показано використання нечіткого підходу для синтезу лінійного спостерігача Люенбергера, яке полягає у проектуванні спостерігача з декількома матрицями посилення, які налаштовані на різну

швидкодію. Нечітка логіка здійснює перемикання між декількома можливими матрицями спостерігача залежно від похибки між оціненими значеннями координат системи та вимірюваннями, отриманих із датчиків. Встановлено, що використання нечіткої логіки дозволило зменшити вплив шуму сенсорів на точність спостереження, покращило швидкість збіжності спостерігача, проте, погіршило вплив на динаміку всієї системи керування. Однак, нечітка логіка була налаштована методом «спроб і помилок», тому висунуто припущення, що використання методів оптимізації, дозволить покращити параметричний та структурний синтез нечіткої частини алгоритму спостереження. Також, розглянуто використання нечіткої логіки для адаптації класичного спостерігача Люенбергера до нелінійних систем. У даній версії спостерігача, нелінійна модель апроксимується декілька лінійними, для яких синтезовані локальні матриці спостерігача. Водночас перемикання між цими коефіцієнтами спостерігача, здійснюється нечіткою логікою залежно від вектору стану системи. Використання теорії нечітких множин для реалізації нечіткого спостерігача Люенбергера дає змогу підвищити точність спостереження у нелінійних системах «електропривод-колесо» у порівнянні із класичним спостерігачем.

Алгоритм спостереження фільтра частинок характеризуються високою точністю визначення координат динамічної системи, проте, вимагає значних обчислювальних затрат. Запропонований модифікований алгоритм фільтра частинок із динамічною зміною кількості частинок та змінним розподілом частинок під час обчислення дозволяє зменшити середній час обчислення на 53% відносно класичного підходу, водночас забезпечуючи високу точність оцінки. Алгоритм перевірений шляхом моделювання для спостереження станів динамічної системи електроприводу колеса електромобіля. Отримані результати засвідчили ефективність пропонованих рішень. Перспектива подальших досліджень є модернізація алгоритму на основі методу кластеризації.

У четвертому розділі представлено результати експериментальних досліджень роботи модифікованого алгоритму фільтра частинок із динамічною зміною кількості частинок та змінним розподілом частинок. Алгоритм був реалізований на контролері dSPACE MicroAutobox II з використанням MATLAB/Simulink. Алгоритм перевірений

на експериментальній установці MTS Flat-Trac в Національному дослідному центрі шин, Алтон, США. Вибір тестової установки зумовлений тим, що концепція стенду для випробування шин на плоскій доріжці краще наближається до реальних дорожніх умов, одночасно зберігаючи переваги лабораторного тестування шин.

Реалізований спостерігач був протестований в двох режимах роботи: (i) із незначним вертикальним навантаженням 100 кг та (ii) зі значним навантаженням 2690 кг. У кожному режимі розглядалися чотири швидкості обертання колеса та перехід від однієї швидкості до іншої. Оцінені значення кутової швидкості, отримані спостерігачем, надають дані для розрахунку ковзання шин та радіуса кочення з високою точністю. Результати підтверджують можливість використання алгоритму нечіткого фільтра частинок для визначення характеристик взаємодії колеса із поверхнею у реальному часі, що дозволяє синтезувати контролер мобільності транспортного засобу.

Іншим напрямком експериментальних досліджень було встановлення залежностей координат електроприводу колеса транспортного засобу від поверхні руху. Для досягнення цієї мети було розроблено чотирьохколісну мобільну платформу із індивідуальним електроприводом коліс. Встановлено, що рух колісного транспортного засобу по різних поверхнях руху спричиняє різну динаміку координат вектору стану системи електроприводу колеса. Для руху по асфальтованому дорожньому покритті характерні вищі значення кутової швидкості колеса та менші значення струму ніж для руху по трав'яному покритті. Рух по похилій поверхні спричиняє вищі значення струмів драйвера двигуна. При цьому, відмінність між кривими струму для різних покриттів залишається очевидною. Дані результати експериментів можуть слугувати для розробки інтелектуальних естиматорів поверхні руху, що дозволять формувати керуючий вплив із врахуванням поверхні руху.

Ключові слова: система керування, транспортний засіб, машинне навчання, моделювання, електромобіль, давачі, модуль «електропривод-колесо», електричний двигун, спостерігач, методи естимування, мобільність, нечітка логіка, електромеханічні системи, енергоефективність, ідентифікація.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

- в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Vantsevich, V., Gorsich, D., Lozynsky, A., Demkiv, L., & Borovets, T. (2019). State observers for terrain mobility controls: a technical analysis. In *Advances in Mechanism and Machine Science: Proceedings of the 15th IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science 15* (pp. 3681-3690). Springer International Publishing.

2. Lozynsky, A. O., Demkiv, L. I., Vantsevich, V. V., Borovets, T. V., & Gorsich, D. J. (2019). An estimation accuracy of state observers under uncertain initial conditions. *Math. Model. Comput*, 6(2), 320-332.

3. Боровець Т. В. Застосування нечіткого фільтра частинок для спостереження станів динамічної системи в режимі реального часу. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2020. Вип. 2, № 1. С. 18–26.

4. Vantsevich, V., Gorsich, D., Lozynsky, A., Demkiv, L., Borovets, T., & Klos, S. (2020). Agile Tyre Mobility: Observation and Control in Severe Terrain Environments. In *Advanced Technologies for Security Applications: Proceedings of the NATO Science for Peace and Security'Cluster Workshop on Advanced Technologies', 17-18 September 2019, Leuven, Belgium* (pp. 247-258). Springer Netherlands.

- які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Vantsevich, V., Gorsich, D., Lozynsky, A., Demkiv, L., & Borovets, T. (2018). State observers: an overview and application to agile tire slippage dynamics. In *Proceeding of 10th Asia-Pacific Conference of ISTVS* (pp. 1-18).

2. Vantsevich V., Gorsich D., Lozynsky A., Demkiv L., Borovets T., Klos S. (2019). Reference torque history for sustainable mobility and energy efficiency under target velocity profiles. In: *Proceedings of the ISTVS 15-th European-african regional conference, Prague, Czech Republic, September 9–11*.

3. Borovets T., Lozynskyi A., Demkiv L. (2022). Real-time estimation and control for autonomous mobile robots and vehicles. *Інформаційно-вимірювальні технології IBT-2022 : тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції, 09-10 листопада 2022 р., Львів, 21–22*.

ABSTRACT

Borovets T.V. Design and analysis of intelligent state observers for the motion control system of electric vehicles. - Qualifying scientific work in the form of a manuscript.

Thesis for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 "Electrical energetics, Electrical Engineering, and Electromechanics". – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2023.

The dissertation work is dedicated to the synthesis and analysis of state vector observers for the motion control system of an electric vehicle's wheel to improve energy efficiency, passability, mobility, and enhance the safety of the vehicle's movement. The obtained research results allow improving the accuracy of observing immeasurable quantities in electric vehicle control systems, enabling the synthesis of a full-state control system considering the mobility reserve.

In the first chapter, the problems of measuring quantities in automotive systems are disclosed, and the need for using algorithms to observe immeasurable coordinates is justified. An analysis of literary sources has been presented, in which the use of both classical and intelligent observation algorithms in wheeled vehicle control systems is considered. It is demonstrated that the mathematical models of vehicles and the dynamics of wheel-road interaction are nonlinear, which significantly limits the use of linear observers. The implementation of nonlinear observation methods leads to an increase in computational costs, which causes an increase in the discretization step and, consequently, adversely affects the accuracy of the estimate.

It has been established that the use of cascade observer schemes allows one to avoid the observability problem of the system, improves the modeling of different-rate subsystems, and simplifies the tuning of observer parameters.

It is shown that questions regarding the efficiency of applying classical observers in off-road conditions remain unexplored, especially during wheel motion on deformed ground. Considering the capability of representing a nonlinear system as a family of linear systems when applying fuzzy theory, a conclusion about the appropriateness of using fuzzy observers in off-road conditions is drawn. A hypothesis is proposed that the use of fuzzy

logic will reduce the computational complexity of algorithms that approximate the nonlinear model with a set of points.

The second chapter is dedicated to the study of mathematical models that describe the dynamics of vehicle motion on deformed surfaces, taking into account the differences of various road surfaces. The approach of inverse dynamics has been further developed for analyzing the mobility margin of the vehicle and for devising methods to limit the wheel torque in order to maintain the mobility index within acceptable bounds. The need to use an observer to determine the components of the mobility index in real-time has been justified. The accuracy of classical observers for estimating rotational torque and the normal reaction, which operates at the tire-surface contact under the influence of disturbances on signals from sensors, non-Gaussian noises, and in the case of imprecise initial conditions, has been analyzed. It was found that during the experiments with the same integration step, the observer based on the particle filter, in contrast to the Kalman filter and the Luenberger observer, showed the best observation accuracy under the influence of Gaussian and arbitrary nature disturbances on the control system sensors, as well as the best convergence with unknown initial values of observed coordinates. At the same time, the observer based on the particle filter has a high computational complexity unlike other studied algorithms, which may reduce its attractiveness and necessitates improvement of this algorithm. Considering the features of the wheel module model, it is shown that in the observer's operation algorithm, it is advisable to use implicit numerical integration methods with low computational costs.

In the third chapter, modifications of classical observation algorithms using fuzzy logic are considered. The use of the fuzzy approach for the synthesis of the Luenberger linear observer is shown, which involves designing an observer with several gain matrices that are adjusted for different performance levels. Fuzzy logic switches between several possible observer matrices depending on the error between the estimated values of the system coordinates and the measurements obtained from the sensors. It was found that the use of fuzzy logic reduced the impact of sensor noise on observation accuracy, improved the convergence speed of the observer, but adversely affected the dynamics of the entire control system. However, fuzzy logic was set up using the "trial and error" method, so it is

assumed that the use of optimization methods will improve the parametric and structural synthesis of the fuzzy part of the observation algorithm. Also, the use of fuzzy logic to adapt the classic Luenberger observer to nonlinear systems is considered. In this version of the observer, the nonlinear model is approximated by several linear ones, for which local observer matrices are synthesized. At the same time, switching between these observer coefficients is carried out by fuzzy logic depending on the state vector of the system. Using the theory of fuzzy sets to implement the fuzzy Luenberger observer allows for improved observation accuracy in nonlinear "electric drive-wheel" systems compared to the classic observer.

The particle filter observation algorithm is characterized by high accuracy in determining the coordinates of a dynamic system, but it requires significant computational resources. The proposed modified particle filter algorithm with dynamic changes in the number of particles and a variable distribution of particles during computation allows reducing the average computation time by 53% compared to the classical approach, while ensuring high estimation accuracy. The algorithm has been tested by modeling for observing the states of the dynamic system of an electric vehicle's wheel drive. The obtained results confirmed the effectiveness of the proposed solutions. The prospect of further research is the modernization of the algorithm based on the clustering method.

In the fourth chapter, the results of experimental studies on the modified particle filter algorithm with dynamic changes in the number of particles and variable particle distribution are presented. The algorithm was implemented on the dSPACE MicroAutobox II controller using MATLAB/Simulink. The algorithm was tested on the MTS Flat-Trac experimental setup at the National Tire Research Center in Alton, USA. The choice of the test rig is justified by the fact that the concept of a tire testing stand on a flat track is closer to real road conditions while retaining the advantages of laboratory tire testing.

The implemented observer was tested in two operating modes: (i) with a minor vertical load of 100 kg and (ii) with a significant load of 2690 kg. In each mode, four wheel rotation speeds were considered, as well as transitions between these speeds. The estimated values of the angular velocity, obtained by the observer, provide data for calculating the tire slip and rolling radius with high precision. The results confirm the feasibility of using the

fuzzy particle filter algorithm to determine the wheel-surface interaction characteristics in real-time, allowing for the synthesis of a vehicle mobility controller.

Another direction of experimental research was to determine the dependencies of the wheel's electric drive coordinates of a vehicle from the surface. To achieve this goal, a four-wheel mobile platform with individual wheel drives was developed. It was found that the movement of a wheeled vehicle on different surfaces causes different dynamics of the state vector coordinates of the wheel's electric drive system. For movement on asphalt road surfaces, higher angular wheel velocities and lower current values are typical compared to movement on a grassy surface. Movement on an inclined surface results in higher motor driver currents. At the same time, the difference between the current curves for different terrains remains evident. These experimental results can serve as the basis for the development of intelligent surface estimators, allowing for the formulation of control effects taking into account the driving surface.

Key words: control system, vehicle, machine learning, modeling, electric vehicle, sensors, electric drive-wheel module, electric motor, observer, estimation techniques, mobility, fuzzy logic, electromechanical systems, energy efficiency, and identification.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ABSTRACT	7
ВСТУП	14
Розділ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СПОСТЕРІГАЧІВ ТА ЕСТИМАТОРІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ РУХУ КОЛЕСА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ.....	19
1.1 Проблеми вимірювання величин у системах керування рухом транспортного засобу.....	19
1.2 Аналіз існуючих спостерігачів та естиматорів.....	20
Висновки	35
Розділ 2 ПОБУДОВА МОДЕЛІ СИСТЕМИ, ЩО ВРАХОВУЄ ВЗАЄМОДІЮ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КОЛЕСА ТА ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ ПІДРЕСОРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ.....	37
2.1 Модель модуля	37
2.1.1 Модель двомасової система електроприводу колеса електромобіля.	38
2.1.2 Модель колеса і системи підресорювання	43
2.1.3 Аналіз динаміки отриманої моделі з врахуванням поверхні руху колеса	44
2.1.3.1 Встановлення меж обертового моменту колеса	48
2.2 Застосування традиційних методів спостереження для моделі модуля ..	52
2.2.1 Синтез спостерігачів.....	59
2.2.1.1 Налаштування спостерігачів.....	62
2.2.1.2 Аналіз роботи спостерігачів при зашумлених сигналах давачів	64
2.2.1.3 Вплив негаусового шуму сенсора на точність спостереження ..	68
2.2.1.4 Порівняльне дослідження спостерігачів станів при невідомих початкових умов	70

2.2.1.5 Порівняння обчислювальних затрат спостерігачів	74
2.3 Вплив вибору чисельного методу на результати спостереження компонентів вектору стану динамічної системи в режимі реального часу	75
2.4 Висновки	81
Розділ 3 СИНТЕЗ СПОСТЕРІГАЧІВ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ТЕОРІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ	83
3.1 Синтез нечітких спостерігачів Люенбергера та можливість їхнього застосування для систем, що працюють в режимі реального часу.....	83
3.1.1 Нечіткий спостерігач Люенбергера для лінійних систем.....	83
3.1.2 Нечіткий спостерігач Люенбергера для нелінійних моделей	88
3.2 Нечіткий спостерігач на основі методу фільтра частинок зі змінною кількістю частинок.....	90
3.3 Нечіткий фільтр частинок із змінною функцією розподілу частинок	96
3.4 Висновки	100
Розділ 4 ЕСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СПОСТЕРІГАЧІВ.....	101
4.1 Опис випробувальної установки шин на плоскій доріжці та розроблення програми дослідження	101
4.1.1 Вибір тестової установки	101
4.1.2 Опис випробувальної установки	103
4.1.3 Програма досліджень.	109
4.1.4 Імплементация спостерігача.	111
4.1.5 Результати.....	116
4.2 Експериментальна установка – чотирьохколійний робот.....	120
4.2.1 Опис експериментальної установки	120
4.2.2 Результати.....	123
4.3 Висновки	125
ВИСНОВКИ.....	127

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	129
ДОДАТКИ.....	142
ДОДАТОК А.....	143
ДОДАТОК Б	144
ДОДАТОК В	145

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні автомобілі - це високотехнологічні системи, де електроніка, механіка та програмне забезпечення об'єднані в єдиний організм. Із розвитком технічних можливостей автомобілів виникають і постійно зростаючі вимоги до безпеки руху, адаптації до різних дорожніх умов, мобільності, прохідності, енергоощадності. Потреба в застосуванні автомобілів в специфічних сферах промисловості та воєнних цілях вимагають нових технологічних рішень. Відмова від двигунів внутрішнього згоряння та перехід на електричний привід зумовлює перегляд стратегій керування транспортним засобом.

В цьому контексті спостерігачі станів динамічної системи автомобіля стають невід'ємною частиною сучасних транспортних рішень. Їх здатність точно визначати координати, параметри руху автомобіля та взаємодії з навколишнім середовищем відкриває нові горизонти для підвищення безпеки, мобільності та ефективності транспортних систем. Спостерігачі станів можуть відстежувати різні параметри автомобіля, такі як стан гальм, стан шин, а також динамічні характеристики руху. Це дозволяє вчасно виявляти та прогнозувати потенційні небезпеки і проблеми. Враховуючи дані про дорожнє покриття, які отримуються за допомогою спостерігачів, системи керування можуть автоматично коригувати режими руху, що дозволяє оптимально пристосовуватися до різних умов дорожнього покриття. Спостерігачі станів можуть забезпечувати систему інформацією, яка необхідна для побудови оптимальної траєкторії руху, максимізуючи ефективність руху, мобільність і мінімізуючи споживану енергію.

Враховуючи наведене, дисертаційна робота, присвячена вивченню та вдосконаленню алгоритмів спостереження змінних стану динамічної системи автомобіля для покращення безпеки руху, підвищення мобільності та енергоефективності, а також здатності адаптуватися до різних умов руху, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку «Розробка систем керування міським електротранспортом, систем програмного керування

транспортними засобами та електрообладнання і автоматики автотранспортних засобів» кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем.

Дисертаційна робота проводилась у рамках гранту NATO SPS MYP G5176 «Agile Tire Mobility for Severe Terrain Environments».

Мета роботи полягає у синтезі інтелектуального спостерігача координат вектору стану системи руху колеса електромобіля.

Для досягнення мети потрібно розв'язати такі **завдання**:

- здійснити огляд вітчизняних та зарубіжних джерел за цією тематикою;
- проаналізувати існуючі методи спостереження станів динамічних систем та визначити перспективні напрями підвищення якості оцінки;
- побудувати математичну модель електроприводу колеса електромобіля із врахування взаємодії колеса і поверхні руху та дослідити закономірності роботи електроприводу;
- синтезувати алгоритм інтелектуального спостерігача із врахуванням необхідних показників швидкодії і адаптивності алгоритму;
- дослідити роботу запропонованого алгоритму системи руху колеса електромобіля, що перебуває під дією зовнішніх збурень та за необхідності провести адаптацію розробленого алгоритму;
- розробити лабораторний стенд для дослідження поверхонь руху та провести дані дослідження;
- провести експериментальні дослідження синтезованого алгоритму спостерігача на лабораторному стенді дослідження шин транспортного засобу.

Об'єктом дослідження є динаміка системи руху колеса електромобіля.

Предметом дослідження є синтез інтелектуального спостерігача координат вектору стану системи руху колеса електромобіля.

Методи досліджень. У дослідженні використано методи класичної теорії автоматичного керування (для аналізу алгоритмів спостереження та синтезу оптимальних спостерігачів), натурні дослідження (для апробації модифікованого

алгоритму фільтру частинок), методи машинного навчання (для побудови суміші гаусівських розподілів), теорії нечітких множин (для розробки перемикача кількості частинок), математичне моделювання (для створення комп'ютерних моделей досліджуваних об'єктів), методи імітаційного моделювання (для порівняння модифікованого алгоритму із традиційними підходами).

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що:

- 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».

Практичне значення одержаних результатів:

- створені спостерігачі забезпечують обчислення 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.
- застосування теорії нечітких множин в алгоритмі фільтру частинок дає змогу збільшити швидкодію на 56.5% у порівнянні з класичним алгоритмом, що забезпечує реалізацію системи в режимі реального часу;
- використання теорії нечітких множин для реалізації нечіткого спостерігача Люенбергера дає змогу підвищити точність спостереження у нелінійних системах «електропривод-колесо» на 10.3% у порівнянні із

класичним спостерігачем і забезпечує високу швидкодію системи та вимагає меншої обчислювальної складності у порівнянні із фільтром частинок.

- створено експериментальний взірець та проаналізовано можливість ідентифікації поверхні руху на основі вимірювальних величин.

Особистий внесок здобувача.

Основні результати дисертаційного дослідження отримані автором самостійно. У написаних у співавторстві роботах, внесок автора полягає у наступному: [116] – проаналізовано наявні методи спостереження, які використовуються для транспортних засобів, програмно реалізовано класичні методи спостереження і проведено математичне моделювання роботи цих спостерігачів на спрощеній моделі приводу колеса електромобіля, [113] – створено і програмно реалізовано математичну модель зворотної динаміки колісного модуля електромобіля, реалізовано метод обмеження крутного моменту колеса на основі спостережуваної мобільності транспортного засобу для підпорядкованої системи керування приводом колеса; [122] – проведено порівняльний аналіз робастності класичних методів спостереження до рівня шуму у сигналі з датчиків, на основі яких відбуваються корекція оцінених значень величин в алгоритмі спостерігачів; [123] – досліджено вплив неточних початкових умов на збіжність алгоритмів спостереження, реалізовано нечіткий спостерігач Люенбергера для лінійної та нелінійної моделі системи; [125] – проаналізовано вплив точності спостерігача на динаміку електроприводу; [124] – реалізовано нечіткий спостерігач фільтру частинок та проведено порівняльний аналіз із класичним спостерігачем, [126] – проаналізовано вплив нечіткої логіки на динаміку системи електромобіля в цілому.

Апробація результатів досліджень. 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 IBT-2022» (09-10 листопада 2022 р., Львів).

Публікації. 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 та 3 матеріали міжнародних науково-практичних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 129 найменувань та додатків. Повний обсяг роботи становить 145 сторінок, яка містить 75 рисунків і 6 таблиць.

Розділ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СПОСТЕРІГАЧІВ ТА ЕСТИМАТОРІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ РУХУ КОЛЕСА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

1.1 Проблеми вимірювання величин у системах керування рухом транспортного засобу

Сучасні транспортні засоби інтегрують у себе численні технології для підвищення продуктивності та безпеки, зокрема: гальмівні системи із антиблокувальною функцією (ABS), системи контролю тяги (TCS), яка контролює пробуксовування ведучих коліс і призначена для запобігання втрати зчеплення коліс з дорогою та зменшення динамічних навантажень на елементи трансмісії на неоднорідному дорожньому покритті, системи електронного стабілізатора (ESC), що запобігає заносу автомобіля шляхом пригальмовування окремих коліс та комплекси векторизації крутного моменту (TVS), що дає змогу контролювати крутний момент, який надходить на колеса або вісь, для поліпшення продуктивності автомобіля, зчеплення, керованості і стійкості. Розвиток технологій авто-пілота в сучасних автомобілях вимагає значно більше інформації про ситуацію на дорозі, стан дорожнього покриття. Не вся ця інформація може бути отримана шляхом безпосереднього вимірювання. Важливим чинником покращення якості керування, особливо в умовах бездоріжжя, стає врахування динаміки шин [1], що забезпечує як можливість вдосконалення існуючих систем так і покращення роботи розроблюваних систем автоматичного керування автомобілем.

Підхід на основі швидкої динаміки ковзання шин запропонована в роботі [1] для швидкої та доволі точної ідентифікації та контролю параметрів та координат динаміки взаємодії шини і поверхні руху протягом періоду, що близький до величини поздовжньої релаксації шини на ґрунтовій поверхні. Для забезпечення значного зменшення часу реакції потрібне швидке прийняття рішення та формування керуючого впливу з метою уникнення значного ковзання шин та покращення мобільності транспортного засобу.

Питання покращення мобільності для керованих та безпілотних колісних транспортних засобів має значну історію. Перші роботи [2] стосувалися різних методів визначення мобільності в офлайн-режимі. Проте така оцінка мобільності не забезпечує оцінку мобільності транспортного засобу в реальному часі. Дослідження оцінки мобільності в режимі реального часу започатковано в роботі [3]. Така оцінка вимагає як знання характеристики шин так і середовища руху. Значна частина необхідних параметрів не можуть бути безпосередньо виміряні з певних технічних та економічних причин, наприклад, відсутність відповідного давача, умови експлуатації, що обмежують використання давачів, економічна доцільність та технічна можливість встановлення давачів на шинах транспортних засобів, спотворення сигналів давачів в реальних умовах експлуатації, тощо.

Для визначення координат стану системи, які не можуть бути безпосередньо виміряні, використовуються різні типи спостерігачів та естиматорів, які реалізують відповідний математичний алгоритм. Цей алгоритм на основі відомих параметрів та характеристик системи, а також даних вимірювань, отриманих з давачів, забезпечує в реальному часі обчислення невідомих змінних стану системи. Зазвичай такий спостерігач є складовою сучасних бездавачевих систем керування електроприводами і застосовується для формування зворотних зв'язків в системі керування.

1.2 Аналіз існуючих спостерігачів та естиматорів.

Для спостереження невимірювальних координат стану системи можливим є застосування різних підходів. Зазвичай ці підходи ділять на чотири групи: засновані на кінематичних моделях, засновані на динамічних моделях, комбіновані кінематично-динамічні моделі та немодельні підходи [4]. Враховуючи задачі дисертаційної роботи, наші дослідження зосереджені на спостерігачах, які базуються на динамічних моделях системи.

Вибір спостерігача для конкретної технічної системи, зокрема і системи керування транспортним засобом, є досить складним завданням. Особлива увага повинна бути приділена як точності відтворення координат змінних стану, які неможливо виміряти безпосередньо, так і здатності спостерігачів працювати в

реальному часі. Для забезпечення роботи в реальному часі синтез спостерігача повинен забезпечити компроміс між обчислювальною складністю, точністю, застосовністю до нелінійних та лінійних систем, стійкістю до зовнішніх збурень та змін параметрів систем, тощо. Досягнення цього компромісу часто важко забезпечити з технічної точки зору та обґрунтувати аналітично. Крім того, необхідно дослідити вплив зміни параметрів системи та шуму сигналу датчика на точність обчислення спостережуваних змінних.

Традиційно в системах керування застосовують спостерігачі Люенбергера, спостерігачі на основі фільтрів Калмана. Останнім часом все частіше в задачах отримання інформації про стан системи застосовують еволюційні алгоритми.

Як відомо, фільтр Калмана (KF) є одним з найпоширеніших підходів для спостереження змінних стану та ідентифікації невідомих параметрів і використовується ще з 1960 року [5]. KF дозволяє оцінювати невимірювані елементи вектора стану, який містить шум процесу, за допомогою моделі системи та вимірюваних змінних, що містять шуми вимірювання. Алгоритм передбачає представлення лінійної системи у дискретній формі і складається з двох кроків: передбачення та корекції. Матриця коваріації шуму вимірювання R_k використовується для відображення шуму датчиків, тоді як матриця коваріації шуму процесу Q_k використовується для опису невизначеності моделі. На першому кроці розраховується апріорна оцінка стану на основі моделі об'єкта та попередньо оціненої оцінки стану X_{k-1} . Водночас визначається матриця коваріації помилки апріорної оцінки P_k^- на основі матриці коваріації шуму процесу Q_k . На наступному кроці апріорна оцінка стану коригується за допомогою зворотного зв'язку K_k та вектора вимірювання Z_k . Також розраховується матриця коваріації помилки після корекції P_k .

Фільтр Калмана, завдяки кращій технічній реалізації, виявився більш ефективним у порівнянні з фільтром Вінера [6]. Найвідомішим практичним застосуванням фільтра Калмана є його використання у системі навігації для точного визначення місцезнаходження космічного корабля в програмі "Аполлон" [6].

Застосування алгоритму лінійного фільтра Калмана (KF) до моделей одноколісного транспортного засобу розглядаються у [7-10]. Основним елементом алгоритму є коефіцієнт зворотного зв'язку Калмана K_k , який визначає більш точні дані: або дані передбачення, або дані вимірювання. Якщо значення коефіцієнта Калмана високе, спостерігач більше “довіряє” вимірюванням. В іншому випадку спостерігач спирається на дані передбачення, які надходять з моделі. Налаштування алгоритму полягає у налаштуванні матриць коваріації шумів і початкової матриці коваріації оцінки. У статті [11] розглядається проблема налаштування матриць коваріації, і для визначення відповідних матриць пропонується генетичний алгоритм. Реалізація алгоритму вимагає множення матриць великого розміру на кожному кроці, що збільшує вимоги до процесора. Для зменшення цього недоліку, в тій же статті [11] для визначення швидкості руху транспортного засобу пропонується використовувати KF з фіксованим коефіцієнтом зворотного зв'язку. Фіксований коефіцієнт визначається шляхом вирішення рівняння Рікаті. Однак це усуває позитивні аспекти алгоритму, такі як самоналаштування для досягнення задовільної точності, оскільки вага вимірювання та передбачення у значенні оцінки є постійною на кожному кроці.

Однак, варто відзначити, що математичні моделі транспортних засобів та динаміка взаємодії шин з поверхнею руху зазвичай є нелінійними, що обмежує використання фільтра Калмана [12-15]. У цьому випадку може бути використаний розширений фільтр Калмана (EKF).

Алгоритми оцінювання на основі EKF є дуже популярними серед дослідників завдяки можливості оцінювання стану нелінійної моделі та фільтрації сигналів шумів. На практиці припускається, що шуми є адитивними та незалежними [16]. Алгоритм складається з тих самих кроків що і KF. Нелінійну модель об'єкта та нелінійну модель вимірювання на кожному кроці лінеаризують із використанням розкладу у ряд Тейлора. При цьому виникає необхідність обчислення Якобіана F_k часткових похідних функції $f(\hat{X}_{k-1}, U_k)$, що описує нелінійну систему відносно $\hat{X}_{k-1}$ та матрицю Якобі H_k часткових похідних функції $h(X_k)$ відносно $\hat{X}_k$. Основним недоліком EKF є залежність точності від апроксимації нелінійної системи через

розклад в ряд Тейлора в околі останнього значення оцінки. Велике відхилення оціненого стану від реального стану призводить до розходження алгоритму. Щоб збільшити точність апроксимації нелінійної моделі, крок обчислення повинен бути зменшений [17]. Обчислювальна складність зростає також внаслідок необхідності визначення матриці Якобі.

Застосування спостерігача на основі ЕКФ запропоновано у роботі [18] для оцінки коефіцієнта ковзання для електричного транспортного засобу з системою «двигун-колесо» без визначення швидкості транспортного засобу. В якості вхідних даних використано крутний момент та обертова швидкість коліс. Однак миттєві значення швидкості транспортного засобу часто використовуються в системі керування, наприклад, для розрахунку ефективного радіуса кочення колеса. Тому в більшості випадків визначення швидкості є необхідним. Тестування такого спостерігача проводилося лише в середовищі MATLAB/Simulink, і робота в реальному часі не розглядалася.

У роботі [19] проаналізовано спостерігач коефіцієнта тертя на основі ЕКФ та його перевірку в середовищі апаратно-програмної імітації. Розглядаються гальмівні маневри, при цьому не враховується бічна динаміка. Запропонований спостерігач тестувався на твердій дорожній поверхні. Продемонстровано, що алгоритм спостереження може працювати без вимірювання крутних моментів коліс (зменшений вектор вимірювань) та з шумами сигналів від датчиків.

У статті [20] використовується ЕКФ для вимірювання поздовжньої та нормальних сил колеса. Застосована нелінійна модель транспортного засобу, яка враховує модель колеса, вертикальну та бічну динаміку транспортного засобу. Алгоритм показав високу точність оцінювання, але без врахування сили опору повітря та опору кочення.

У статті [21] описано вплив моделі взаємодії між колесом і дорогою на точність визначення коефіцієнта ковзання, кута ковзання та максимального коефіцієнта тертя в бічному та поздовжньому напрямках. Робота алгоритму представлена лише в режимі моделювання. Алгоритм реалізовано шляхом інтегрування рівнянь моделі об'єкта, а також відповідних рівнянь Рікаті, що вимагає застосування відповідних

методів чисельного інтегрування. У роботі автори тільки прогнозують можливість реалізація такого спостерігача на основі EKF в реальному часі.

У статті [22] для обчислення вертикальних, поздовжніх та бічних сил пропонується використовувати каскадний спостерігач, що складається з трьох спостерігачів на основі EKF. Кожен із спостерігачів призначений для визначення одного з перерахованих вище параметрів на основі інформації з датчиків та даних інших двох спостерігачів. Для визначення вертикальної сили на основі відношення між силами використовується оцінка значень спостерігачів з певною затримкою часу. Автори використовують цей підхід для вирішення проблеми спостережності системи та уникнення використання стохастичних моделей для опису невідомої динаміки. Запропоновану структуру спостерігача [22] порівнюють з прямим каскадним спостерігачем на основі EKF, розробленим в [23], який оцінює вертикальні та бічні сили з урахуванням кута нахилу та нерівностей дороги. Перевагою першої структури є урахування поздовжньої динаміки та взаємозв'язок вертикальної, поздовжньої та бічної динаміки, а також більш точний результат спостереження порівняно з першою структурою. У роботі [24] автори вдосконалили алгоритм, наведений у [22], врахувавши нахил дороги. Для оцінки нахилу дороги спостерігач вертикальних сил на основі EKF був замінений на двохетапний розширений фільтр Калмана (TSEKF), який базується на алгоритмі окремо-зміщеної оцінки, запропонованому Бернардом Фрідлендом в [25]. Цей алгоритм вимагає значно більше обчислювальних витрат, ніж EKF (обчислення додаткових матриць Якобі, налаштування матриць коваріації невідомого вхідного сигналу). Автори вказують, що зміна кута нахилу дороги має досить низьку динаміку, тому отримується висока точність розрахунку. Проте дослідження в умовах бездоріжжя не проводилися. Перевірку адекватності алгоритму виконано в середовищі MATLAB/Simulink з реальними даними, отриманими на тестовому транспортному засобі [22]. Оцінені дані кутів нахилу дороги підтверджуються даними, отриманими з алгоритмів RLS (Regularized Least Square) [26], [27]. Алгоритм TSEKF показує кращу точність та меншу чутливість до зміни динаміки.

У статті [26] використовується каскадна структура спостерігача для оцінки вертикальних сил. Алгоритм спостереження складається з трьох блоків. Перший блок базується на алгоритмі RLS для ідентифікації параметрів, таких як кути нахилу дороги, положення центру ваги. Другий блок використовує EKF для визначення бічних та поздовжніх навантажень. Третій блок визначає вертикальну силу кожного колеса за допомогою EKF. Перевагою алгоритму є використання блока ідентифікації параметрів моделі під час руху, оскільки вони зазвичай не є постійними. Також іншою перевагою є уникнення проблеми спостереження. Перевірка алгоритму також виконана в середовищі MATLAB/Simulink із використанням реальних даних, знятих на тестовому транспортному засобі, аналогічно до [22-24].

Інший підхід до ідентифікації параметрів онлайн - це подвійний розширений фільтр Калмана (DEKF), запропонований Ваном і Нельсоном [28-30]. Особливістю цього підходу є використання двох EKF, які працюють одночасно. У цьому випадку один з них оцінює невідомі параметри, а інший – змінні стану вектору координат системи транспортного засобу (поздовжнє і бокове прискорення, швидкість, ковзання в двох напрямках, вертикальні сили, поздовжню і бокову швидкість). Співпраця спостерігачів полягає у взаємному обміні інформацією. На кроці передбачення стану використовується інформація з кроку передбачення параметрів. У роботах [28-29] було встановлено, що переваги такого підходу полягають у кращій точності оцінки стану, що викликана миттєвою інформацією про параметри транспортного засобу, та можливість вимкнення оцінювача параметрів, коли результат оцінки стану є точним або сигнал датчика занадто зашумлений. У цьому випадку оцінювач стану використовує останнє значення оцінювача параметрів. У статті [28] продемонстровано реалізацію алгоритму в середовищі пакету Matlab/Simulink. Для роботи в реальному часі автори зауважують, що для зниження обчислювальних затрат необхідно застосовувати спрощена модель транспортного засобу з трьома ступенями свободи і спрощену модель шини. У статті [31] оцінка маси здійснюється шляхом додавання цього параметра до вектору стану EKF (цей підхід відомий як Joint-EKF). Такий алгоритм спостереження дозволяє враховувати зміну маси і поліпшує

результат оцінки. Недоліки полягають у розширенні вектора стану та проблемі спостережуваності динамічної системи.

Як вже було зазначено, матриці коваріації шумів, при припущенні про гаусівський шум, враховують невизначеність моделі та шум сигналів датчиків. В більшості випадків матриці є сталими значеннями і не враховують зміни умов середовища руху транспортного засобу. Наприклад, модель дає адекватні результати в певному діапазоні вхідних даних, тому логічним є змінити значення коваріації, коли модель відтворює поведінку системи за межами прийнятих допущень. Цей підхід реалізований у статті [32] для оцінки поздовжньої сили, де використовується схема каскадного спостерігача [22-23, 27]. Подібна адаптація застосовується в статті [33] для оцінки стану динаміки керування автомобілем. Цей підхід отримав назву "параметро-змінний розширений фільтр Калмана" (PVEKF) [32] або "адаптивний розширений фільтр Калмана" (AEKF) [33-35].

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що у випадку систем зі значними нелінійностями, реалізація EKF у системах реального часу стає складним завданням, оскільки потрібно обчислювати матриці Якобі. Крім того, точність EKF суттєво залежить від частоти дискретизації. Згаданих недоліків позбавлений Unscented Kalman Filter, UKF, розроблений Джулієром та Ульманном [36, 37]. Цей алгоритм застосовує «беззапахове» перетворення (unscented transformation) [38], що дозволяє уникнути обчислення матриць Якобі, однак вимагає обчислення великої кількості точок на кожному обчислювальному кроці, що зумовлює більший час обчислень. Існують два основних типи UKF: розширений та нерозширений, які залежать від представлення моделі системи. Нерозширений тип UKF має меншу обчислювальну складність і при цьому дає досить точний результат оцінки [39]. Результати, наведені в роботах [40-47] підтвердили вищу точність та надійність UKF порівняно з EKF. Зокрема, у роботі [47] спостерігач на основі UKF застосовується для виміру поздовжньої та поперечної швидкостей автомобіля з чотирьохколісним гібридним приводом. Розроблений алгоритм протестований на контролері MicroAutoBox з використанням інструментів dSPACE для тестування у реальних умовах. Виміряна швидкість зіставляється з актуальною, при цьому відхилення не перевищує 5%.

Зазначається, що цей спостерігач здатний функціонувати в режимі реального часу. У публікаціях [48-49] представлено методику оцінки швидкості руху електромобіля з незалежним приводом (4WID EV) з використанням UKF. Робота [50] пропонує використовувати спостерігач UKF, для визначення поперечної, поздовжньої та кутової швидкостей, а також сил, які діють на автомобіль під час руху. У дослідженні [44] використовується спостерігач на базі UKF для виміру поздовжньої та поперечної швидкостей. EKF, UKF проаналізовані із часом дискретизації 5 мс та 40 мс. Виявлено, що зростання часу дискретизації при використанні EKF веде до суттєвого збільшення помилок через лінеаризацію моделі. На відміну від EKF, UKF здатний ефективно працювати при більших інтервалах дискретизації.

В дослідженні [51] запропоновано використовувати UKF для визначення швидкостей та сил у поперечному та поздовжньому напрямках, не використовуючи моделей шин. Такий метод спрощує алгоритм спостереження, проте не включає в себе динаміку та інші взаємодії в шинах.

У статті [52], спостерігач UKF, синтезований на моделі транспортного засобу та на стохастичній моделі шини, використовується для обчислення сил, що діють на шину. У роботі продемонстровано, що точність визначення сил, що діють на шину корелює з точністю задання параметрів автомобіля. Тому, для покращення результатів спостереження, автори пропонують комбінований підхід: основний алгоритм доповнюється паралельним спостерігачем параметрів системи автомобіля.

У статтях [40, 53] розроблено метод оцінки на основі UKF для визначення максимального коефіцієнта тертя для автомобіля з незалежним приводом. Два спостерігачі на основі UKF використовуються для визначення максимального коефіцієнта тертя в поздовжньому та поперечному напрямках відповідно. Для отримання більш точного результату оцінки використовується метод зваженого об'єднання середньоквадратичної похибки [54] (a mean-square-error-weighted fusion method). Даний метод поєднує результати з поздовжнього та поперечного оцінювачів максимального коефіцієнта тертя в одне значення, використовуючи відповідні середньоквадратичні похибки для результатів вимірювань.

Для підвищення точності спостереження, необхідно враховувати різноманітні параметри автомобіля та шини. Таким чином, для спостереження параметрів в [55] запропоновано використовувати адаптивний UKF (ALM-UKF). UKF має розширений вектор стану, який включає параметри. Для визначення статистики шумів в режимі онлайн використовується підхід адаптивного фільтру з обмеженим запам'ятовуванням [56]. В [57-58] використовується інший підхід для налаштування матриці коваріації вимірювань. Система нечіткої логіки налаштовує матрицю коваріації вимірювань, адаптуючи матрицю до зміни динаміки системи. Алгоритми реалізовані на мікроконтролері dSPACE MicroAutoBox і протестовані на електричному одноколісному тракторі з одним приводом RigiTrac EWD 120. Результати, наведені в статті [59] демонструють ефективність UKF для оцінювання поздовжнього ковзання та кута ковзання, на відміну від EKF.

У роботі [39] наведене порівняння ефективності застосування EKF, UKF та їх модифікації для оцінки сили тертя. EKF та UKF порівнюються в двох аспектах: обчислювальний час та частота дискретизації. EKF потребує менше часу обчислення, ніж UKF, проте EKF потребує менший крок дискретизації, ніж UKF.

У роботі [60] запропоновано використання UKF для визначення бічних сил шин та кута ковзання. Автори обрали цей метод через високу нелінійність моделі та складність обчислення матриць Якобі для EKF. Адекватність роботи спостерігача підтверджується порівнянням з експериментальними даними, зібраними на тестовому автомобілі. У роботі [46] на основі аналізу результатів порівняння EKF та UKF автори роблять висновок меншу чутливість UKF до зміни параметрів моделі.

Спільним недоліком EKF та UKF є допущення, що шуми системи та вимірювання є гаусівськими шумами з нульовим математичним сподіванням. Як вказано в [61, 62], у випадку системи зі значними нелінійностями та негаусівськими шумами для оцінювання стану системи слід використовувати фільтр частинок (PF). При такому підході задачу оцінювання розглядають як знаходження функції густини ймовірності, яка може бути апроксимована великою кількістю зважених точок.

У статті [63] продемонстроване використання фільтра частинок для оцінки поздовжньої швидкості, бокової швидкості, бокової сили та кутової швидкості.

Запропонований алгоритм включає UKF та PF, які працюють як єдиний спостерігач UPF. Такий підхід дозволяє здійснювати оцінку стану для систем зі значними нелінійностями та є точнішим ніж EKF або UKF, але значно збільшує обчислювальні витрати. У [64] наведено результати оцінки поздовжньої швидкості та поздовжньої сили за допомогою UPF, при цьому матриці коваріації шумів налаштовують на основі припущення про гаусівський розподіл.

У статтях [65-66] наведено порівняння PF та EKF для оцінювання бічної сили і показано, що PF дає точніші результати.

Для покращення точності спостереження запропоновано ряд модифікацій фільтра частинок, проте це поліпшення часто збільшує обчислювальні витрати. Наприклад, у [67] запропоновано фільтр частинок з додатковою кількістю частинок для оцінювання кута ковзання. Натомість, у статті [68] пропонується використовувати box-PF на основі інтервального підходу для оцінювання стану автомобіля, що суттєво спрощує алгоритм і зменшує необхідну кількість частинок. Однак інтервальний підхід має недоліки, пов'язані з використанням інтервальної арифметики. Фільтр частинок також може розглядатися у контексті розширеної задачі оцінювання, коли невідомі параметри об'єкта включені у вектор координат, так само як для EKF та UKF. Однак це збільшує обчислювальні витрати.

Ще одна модифікація фільтра частинок - це Rao-Blackwellized фільтр часток [69], який полягає в розбитті моделі системи на дві частини: лінійну та нелінійну. Для оцінювання станів нелінійної моделі використовується фільтр частинок, а для оцінювання станів лінійної моделі - фільтр Калмана. Об'єднання обох методів виконується за допомогою факторизації апостеріорної густини. Такий підхід дозволяє зменшити обчислювальну складність алгоритму спостереження.

Таким чином основною проблемою застосування PF у системах реального часу залишається обчислювальна складність такого спостерігача.

Ще одним широкоживим підходом для побудови систем керування є застосування спостерігача Люенбергера [70], який демонструє високу ефективність для оцінювання стану лінійної системи. Існують два підходи до проектування спостерігача, які розглядаються в [70-71]. Перший може бути використаний для

проектування спостерігача для оцінювання всіх станів системи (спостерігач повного порядку). Другий підхід - це спостерігач зі зменшеним порядком, який оцінює лише ті стани, які не можуть бути безпосередньо виміряні, і доступні стани не враховуються при обробці спостерігачем. У роботі [71] доводиться, що процес синтезу системи керування складається з двох незалежних процедур (відомих зараз як принцип розділення): синтез контролера та синтез спостерігача. Синтез контролера виконується за допущення, що всі стани можуть бути визначені. Синтез спостерігача залежить від кількості станів, які не вимірюються за допомогою давачів (спостерігач повного порядку або спостерігач зі зменшеним порядком) і базується на використанні кореневого методу. Традиційно приймається умова, що швидкодія спостерігача повинна бути на порядок вищою швидкодії системи.

У роботі [72] спостерігач Люенбергера використано для оцінки нахилу дороги для лінеаризованої моделі транспортного засобу. Проте, така лінеаризація моделі та прийняті допущення суттєво обмежують область використання спостерігача. Вибір такого спостерігача обґрунтовано зменшенням обчислювальної складності. Корекція в алгоритмі спостерігача базується на вимірюваннях, отриманих від стандартних давачів, таких як акселерометр і енкодери. У роботі [73] проаналізовано ефективність застосування спостерігача Люенбергера для оцінки кута нахилу дороги. Результати оцінки порівнювалися з реальними вимірюваннями, отриманими з тестового автомобіля, обладнаного стандартними давачами і продемонстрували задовільну точність та швидку збіжність синтезованого спостерігача.

У той же час взаємодія шина-грунт зазвичай описується нелінійною моделлю. Тому більш цікавим є модифікації спостерігача Люенбергера для нелінійних систем. Для оцінки стану нелінійної системи застосовують розширений спостерігач Люенбергера (ELO). У роботі [74] показано синтез розширеного спостерігача Люенбергера на основі допущень про локальну спостережуваність та застосуванні для лінеаризації нелінійної моделі похідних Лі. У роботі [75] показане використання ELO для системи з кількома входами та виходами. Однак наведені алгоритми мають недоліки, пов'язані з диференціюванням входів та n -диференціюванням нелінійних функцій, що викликає проблему обчислення Лі-похідних.

ELO можна спростити, використовуючи лінеаризацію на основі ряду Тейлора. Такий розширений спостерігач Люенбергера розроблений у [76] для оцінювання кута бокового зсуву. В роботі наведене порівняння такого спостерігача з високопідсиленним спостерігачем (HGO) та ЕКФ. Зазначено, що оптимальним є використання HGO через однакову точність та меншу обчислювальну складність. У роботі показано, що середній час обчислення HGO становить 0,51 мс, для ELO - 1,0 мс, і ЕКФ займає 1,15 мс. Результати оцінювання трьох спостерігачів порівняно з експериментальними результатами, отриманими від реального давача на автомобілі. Однак, експеримент проводиться лише на сухому асфальті, і вплив шуму на спостерігач не враховується. У [77], розширений спостерігач Люенбергера був використаний для оцінювання кута бокового схилу та тертя дороги на основі локальної лінійної апроксимації сил в шинах за допомогою ряду Тейлора. Для синтезу спостерігача застосовано критерій Рауса-Гурвіца та метод спроб та помилок. Запропонований ELO продемонстрував хорошу робастність при варіації параметрів.

У статті [79] порівняно чотири спостерігачі кута бокового схилу та поперечних сил автомобіля: лінійний спостерігач Люенбергера, розширений спостерігач Люенбергера, розширений фільтр Калмана та спостерігач із ковзним методом (SMO). Продемонстровано, що ELO має деякі проблеми із збіжністю при неточних початкових умовах. Нелінійні спостерігачі кута бокового схилу (ELO, ЕКФ та SMO) дають приблизно однакові результати, які є кращими, ніж результати, надані лінійним LO. Якість роботи спостерігачів оцінена також при різних наборах вимірювальних координат і показано, що ЕКФ дає менш точні оцінки, ніж ELO та SMO, коли доступною є лише одна вимірювальна координата.

Таким чином спостерігач Люенбергера чутливий до шумів давача та початкових умов.

Враховуючи те, що спостерігачі в системах автоматичного керування відіграють ключову роль у забезпеченні визначення станів об'єктів за спостережуваними виходами при їх застосуваннях в нелінійних системах на практиці все частіше використовують інтелектуальні методи та машинне навчання для

адаптації традиційних підходів до параметричних збурень, неточностей у вимірюваннях чи побудові моделі об'єкта. Серед згаданих підходів можна виділити:

- *Спостерігачі на основі нейронних мереж* [78], які здатні адаптуватися до нелінійних систем, забезпечують велику гнучкість в моделюванні складних динамічних процесів, можуть навчатися з реальних даних без необхідності заздалегідь визначеної моделі системи, а також мають можливість виявляти та враховувати невідомі або непередбачені динамічні процеси. Серед недоліків таких спостерігачів можна зазначити схильність до перенавчання, особливо при недостатньому обсязі даних, та потреба значних обчислювальних ресурсів. Ці системи часто важко інтерпретувати, можуть виявитися чутливими до незначних відхилень у вхідних даних і вимагають тривалого часу для навчання. Додатково, якість їх роботи сильно залежить від якості тренувальних даних, а процес їх синтезу може бути доволі складним.
- *Спостерігачі на основі теорії нечітких множин*. У таких спостерігачах поєднуються класичні методи спостереження змінних стану і принципів нечіткої логіки, що дає змогу ефективно вирішувати питання впливу нелінійності системи на якість спостереження, забезпечити більшу робастність оцінки стану системи в умовах невизначеності параметрів. Проте, такі спостерігачі можуть вимагати значних обчислювальних ресурсів і мають потенційний ризик надмірної узагальненості, що ускладнює точне моделювання деяких систем.
- *Спостерігачі на основі навчання з підсиленням*: машинне навчання використовується для оптимізації параметрів спостерігача у реальному часі. Такі спостерігачі характеризуються високою адаптивністю, навчаючись і адаптуючись до нових умов в реальному часі, без потреби в явному моделюванні всіх аспектів системи. Вони взаємодіють із середовищем, отримуючи відгук, що забезпечує робастність перед невизначеностями, і фокусуються на оптимізації своєї роботи на основі принципу нагороди або покарання. Цей підхід надає гнучкість та

ефективність у відтворенні станів системи, враховуючи реальну взаємодію з середовищем. Незважаючи на значні переваги, спостерігачі із підсиленням мають ряд обмежень. Основним недоліком є їх потреба в значній кількості даних для тренування, що може виявитися проблематичним у реальних умовах, де дані обмежені або дороговартісні. Більше того, навчання з підсиленням може призвести до непередбачуваних або небезпечних дій під час процесу навчання, оскільки модель спробує різні стратегії, щоб максимізувати нагороду. Також існує ризик перенавчання, коли спостерігач оптимізується під конкретне середовище на стадії тренування та може не враховувати нові, непередбачені обставини. Нарешті, вибір правильної функції нагороди може виявитися значною проблемою.

- *Гібридні моделі:* Спостерігачі, які комбінують параметричні моделі (наприклад, на основі диференціальних рівнянь) із не параметричними моделями (наприклад, нейронними мережами) для покращення загальної продуктивності. Спостерігачі із гібридними моделями комбінують переваги різних методів, надаючи гнучкість, робастність та покращену ефективність при моделюванні систем [80]. Водночас, їхній комбінований підхід може привести до збільшення обчислювальної складності, ризику перенавчання, потреби в додатковій координації між моделями та збільшеному використанні обчислювальних ресурсів.
- *Спостерігачі на основі глибокого навчання:* Використовують складні архітектури, такі як LSTM, CNN або Transformer, для обробки послідовностей даних та забезпечення спостереження станів у складних динамічних системах [81]. Переваги такого поєднання включають підвищену здатність до узагальнення, здатність опрацьовувати складні нелінійності та відкриті для користувача моделі. До недоліків слід віднести перенавчання, великі обчислювальні витрати та складність інтерпретації.

Серед перерахованих вище структур спостерігачів на основі інтелектуальних технологій в електромобілях значне зацікавлення викликає створенням спостерігачів з застосуванням принципів нечіткої логіки, оскільки вони поєднують традиційні математичні підходи до спостереження із нечіткими алгоритмами, що дозволяють уникати проблем пов'язаних з нелінійностями об'єкта та невизначеностями в даних. У статтях [82-83] розглянуте використання нечіткого спостерігача для визначення змінних стану бокової динаміки автомобіля. Спостерігач використовує нелінійну модель автомобіля, наближену за допомогою нечіткої моделі виду Такагі-Сугено. Модель спостерігача представлена у формі лінійних матричних нерівностей (LMI). Проектування такого спостерігача базується на формуванні квадратичної функції Ляпунова, яка гарантує асимптотичну збіжність нечіткого спостерігача або на застосуванні норми H_∞ , як це показано в [84]. У роботі [83] автори використовували нечіткий спостерігач для визначення кута бокового ковзання та швидкості руху. У роботі продемонстровано, що спостерігач стійкий до зміни параметрів. У статті запропоновано новий метод оцінки поздовжньої швидкості автомобіля на основі сигналів швидкості коліс та визначає їхні інтервали довіри за допомогою нечіткої моделі Такагі-Сугено-Канга (TSK).

У статті [85] запропоноване використання нечіткого фільтра Калмана для оцінки абсолютної швидкості автомобіля. Вхідні дані надходять від давачів швидкості та прискорення. Застосований підхід точно розраховує швидкість при поганих умовах руху та зашумленому сигналі від давачів, адаптуючи матриці коваріації шумів Q та R в залежності від умов дороги. В [86] автори пропонують використовувати нечітку модель для визначення поздовжніх сил, бокових сил.

У статтях [87-90] запропонований каскадний нечіткий спостерігач для оцінки параметрів взаємодії шини з поверхнею дорожнього покриття. Використання такої моделі вимагало складного процесу налаштування та значного об'єму експериментальних даних. У статтях розглядають використання нечіткого спостерігача при русі транспортного засобу і в умовах бездоріжжя.

У статті [91] акцентовано увагу на складності технічного впровадження нелінійних спостерігачів та проблемах їхньої роботи в реальному часі. Для

використання простих лінійних спостерігачів нелінійна модель автомобіля наближена двома лінійними моделями, на основі яких будуються два спостерігачі на основі теорії фільтра Калмана. Для представлення нелінійної системи за допомогою локальних лінійних систем використовується модель Т-С із адаптацією функцій належності нечіткої логіки відповідно до змін умов тертя дороги.

В оглядовій роботі [92] про застосування нечіткої логіки в автомобільному машинобудуванні зроблено висновок, що основним напрямком у сучасних конструкціях спостерігачів є поєднання нечіткої логіки з класичними алгоритмами.

Висновки

Результати аналізу доступних літературних джерел дають змогу стверджувати, що застосування існуючих методів спостереження змінних стану при роботі в реальному часі в системах транспортних засобів вимагають дослідження не тільки якості оцінки змінних стану, але й оцінки обчислювальних затрат для отримання відповідної точності оцінки.

Математичні моделі транспортних засобів та динаміка взаємодії колеса з дорогою є нелінійними, що суттєво обмежує використання фільтра Калмана та спостерігача Люенбергера. Реалізація розширеного фільтра Калмана EKF, який широко використовується в нелінійних системах, внаслідок значної нелінійності досліджуваної системи, є складним завданням через затрати на обчислення та визначення матриці Якобі, яка не завжди може бути визначена. Збільшення обчислювальних затрат призводить до зростання кроку дискретизації, що негативно впливає на точність спостереження. Застосування інших модифікацій фільтра Калмана при великій розмірності вектора стану, що характерно для систем керування рухом, вимагає генерування великої кількості точок на кожному кроці обчислення і призводить до зростання обчислювальних затрат.

Недослідженими залишилися питання ефективності застосування класичних спостерігачів в умовах бездоріжжя, зокрема при русі колеса по деформованому ґрунті. Враховуючи можливості представлення нелінійної системи як сімейства

лінійних систем при застосуванні теорії нечітких множин, доцільно проаналізувати ефективність застосування нечітких спостерігачів в умовах бездоріжжя.

У випадку нелінійної системи високого порядку та негаусових шумів рекомендується використовувати фільтр часток для оцінки стану системи. Проте, класичне застосування цього методу вимагає більш тривалого обчислювального часу, ніж EKF та UKF, тому доцільним є виконання досліджень щодо оптимізації кількості частинок та зменшення обчислювальних затрат.

РОЗДІЛ 2 ПОБУДОВА МОДЕЛІ СИСТЕМИ, ЩО ВРАХОВУЄ ВЗАЄМОДІЮ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КОЛЕСА ТА ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ ПІДРЕСОРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

2.1 Модель модуля

Аналіз сучасних підходів до моделювання та проектування наземних транспортних засобів продемонстрував перспективність застосування модульного підходу. Система «електропривод – колесо» становить окремий модуль, який живиться від акумуляторної батареї та керується від системи керування верхнього рівня для забезпечення бажаної траєкторії руху. До складу модуля входить: саме колесо; електромеханічний перетворювач; підвіска; система гальмування; система повороту колеса; система керування із набором датчиків та спостерігача станів динамічної системи колісного модуля [93-94]. Для проведення досліджень, без втрати загальності, будемо використовувати математичну модель модуля, що описує переднє ліве колесо вантажного транспортного засобу масою 9 тонн. Структурна схема такого модуля показана на рис. 2.1 та відповідає підходові до проектування відкритої модульної архітектури [93-94].

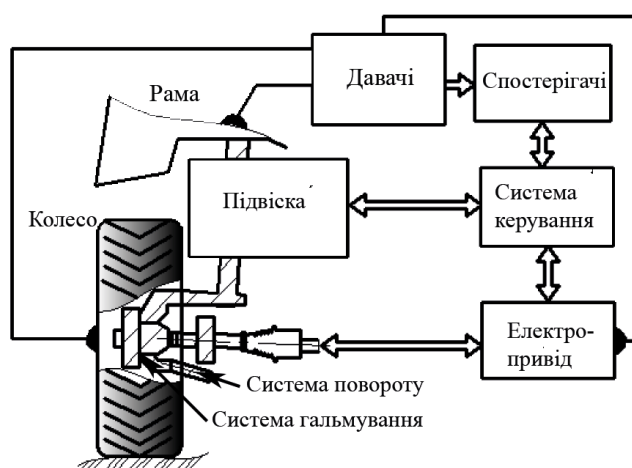


Рис. 2.1 – Структурна схема колісного модуля

Підсистема приводу включає в себе електричний двигун зі системою керування (в даному випадку постійного струму) та редуктор. Модель механічної частини

доцільно розглядати як модель двомасової системи з зосередженими параметрами (рис. 2.2).

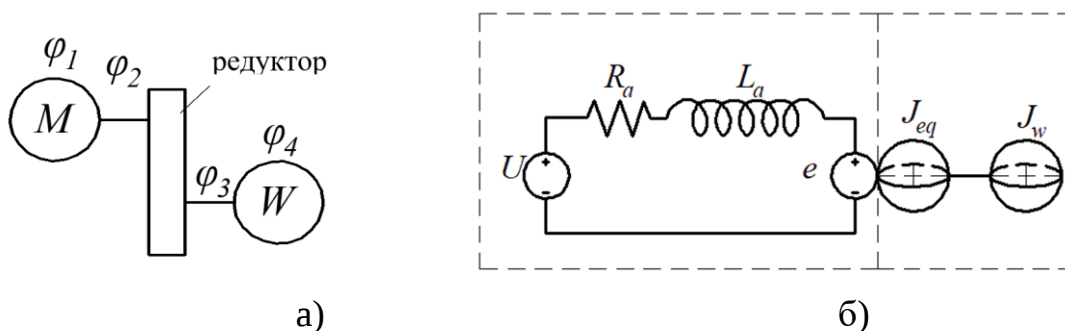


Рис. 2.2 – Модель двомасової системи

2.1.1 Модель двомасової система електроприводу колеса електромобіля

Модель двомасової системи включає масу колеса з моментом інерції J_w та еквівалентну масу, яка включає масу ротора двигуна і, крім того, обертальну масу редуктора і з'єднувальних валів, які приводяться до валу ротора. Інерція обертання еквівалентної маси дорівнює J_{eq} :

$$J_{eq} = J_m + \sum_{l=1}^k \frac{J_l}{i_l^2} \quad (2.1)$$

де, J_m – момент інерції ротора двигуна; J_l – момент інерції l – го редуктора із набору редукторів, $l = 1, k$; i_l передавальне число між валом l -редуктора і валом двигуна. Передавальне число між швидкостями валу двигуна і колеса рівне

$$i = \frac{\omega_m}{\omega_w} \quad (2.2)$$

де, ω_m і ω_w – кутові швидкості ротора і колеса відповідно.

Дві маси з'єднані валом з еквівалентною жорсткістю кручення k_{eq} , і еквівалентним демпфуванням c_{eq} , що обчислюються шляхом приведення жорсткостей і демпфувань до валу ротора. Між двома обертовими масами виникає внутрішній пружний демпфуючий момент T_s .

$$T_s = k_{eq}(\varphi_m - i\varphi_w) + c_{eq}(\omega_m - i\omega_w) \quad (2.3)$$

де, $\varphi_m = \varphi_1 - \varphi_2$ і $\varphi_w = \varphi_3 - \varphi_4$ – кути обертання валу двигуна та валу колеса відповідно.

Обертання лівої маси (рис. 2.2) відбувається під дією крутного моменту, що створюється електроприводом. При незмінному потоці, крутний момент електричного двигуна постійного струму пропорційний струму якірного кола i_m

$$T_m = k_t i_m.$$

де k_t – стала двигуна.

Модель для аналізу електромагнітних процесів в електромеханічному перетворювачі при живленні від акумуляторної батареї описується наступним рівнянням:

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{1}{L_a} \left(\frac{uk_{bat}}{u_{max}} - R_a i_m - e \right) \quad (2.4)$$

де, u – керуюча напруга, k_{bat} – максимальна вихідна напруга акумулятора із ШІМ-перетворювачем, u_{max} – максимальна напруга керування, R_a і L_a – опір та індуктивність якірного кола; e – зворотна електрорушійна сила, яка є добутком коефіцієнта ЕРС k_{emf} та кутової швидкості електромотора ω_m . Таким чином, напругу якірного кола двигуна можна визначити як $U = uk_{bat} / u_{max}$.

У підшипниках електричного двигуна та редукторів завжди існує механічний момент тертя $T_{fm}(\omega_m)$ [95-96]:

$$T_{fm}(\omega_m) = \alpha_{0m} \text{sign}(\omega_m) + \alpha_{1m} \exp(-\alpha_{2m} |\omega_m|) \text{sign}(\omega_m). \quad (2.5)$$

де α_{0m} – константа, яка представляє кулонівський момент тертя, α_{1m} – константа, яка представляє різницю між кулонівським моментом тертя і моментом статичного тертя, α_{2m} – константа часу.

Таким чином, обертання лівої маси двомасової системи описується рівнянням:

$$J_{eq} \dot{\omega}_m = k_t i_m - k_{eq}(\varphi_m - i\varphi_w) - c_{eq}(\omega_m - i\omega_w) - \alpha_{0m} \text{sign}(\omega_m) - \alpha_{1m} \exp(-\alpha_{2m} |\omega_m|) \text{sign}(\omega_m), \quad (2.6)$$

Динаміка обертання колеса описується наступною системою рівнянь

$$\begin{cases} J_w \dot{\omega}_w = ik_{eq}(\varphi_m - i\varphi_w) + ic_{eq}(\omega_m - i\omega_w) - T_{wl} - \\ \quad - \alpha_{0w} \text{sign}(\omega_w) - \alpha_{1w} \exp(-\alpha_{2w}|\omega_w|) \text{sign}(\omega_w), \\ T_{fw}(\omega_w) = \alpha_{0w} \text{sign}(\omega_w) + \alpha_{1w} \exp(-\alpha_{2w}|\omega_w|) \text{sign}(\omega_w), \end{cases} \quad (2.7)$$

де T_{wl} – крутний момент навантаження, спричинений дорожнім покриттям місцевості [97], T_{fw} – це механічний момент тертя в підшипниках колеса, компоненти якого представляють собою кулонівське тертя, α_{0w} , різницю між кулонівським моментом тертя і статичним моментом тертя, α_{1w} та постійну сталу часу α_{2w} .

Взаємозв'язок обертальної, нормальної і поступальної динамік модуля реалізовано у виразах для моменту навантаження і моменту інерції колеса. Момент інерції колеса є змінним за рахунок зміни радіуса колеса під дією зовнішніх збурень. Для моделювання динаміки взаємодії колеса із поверхнею руху прийнято використовувати радіус кочення колеса у веденому режимі [98], доцільність використання якого для умов бездоріжжя обґрунтована у роботі [98-99]. Слід підкреслити, що на радіус кочення шини в такому режимі впливає тиск накачування шини, p_w , і нормальна реакція шини, R_z , на яку впливають стохастичний рельєф, піддресорена та невіддресорена маси модуля, а також характеристики підвіски та характеристики жорсткості та демпфування ґрунту. Для опису радіусу кочення у веденому режимі як функції тиску шини та нормальної реакції використовується емпіричне рівняння, представлене у роботах [98, 100],

$$r_w^0 = r \frac{rp_w + v_1 R_z}{rp_w + v_2 R_z} \quad (2.8)$$

де, r – радіус ненавантаженої шини, v_1 і v_2 – апроксимаційні коефіцієнти, отримані експериментальним шляхом.

Тоді, момент інерції колеса визнається згідно рівняння

$$J_w(R_z) = m_w (r_w^0)^2 = m_w \left(r \frac{rp_w + v_1 R_z}{rp_w + v_2 R_z} \right)^2 \quad (2.9)$$

Взаємодія поступальної і обертальної динаміки відбувається через зміну моменту навантаження. Для знаходження цієї координати скористаємося діаграмою руху модуля. На рис. 2.3 зображено модуль у нестационарному режимі руху, у якому лінійна швидкість V_x забезпечується дією крутного моменту T_w , прикладеного до колеса. Розглядається лише прямолінійний рух транспортного засобу. Також, перерозподіл ваги автомобіля враховується зміною загальної ваги (W_w), яка є компонентом нормальної реакції (R_z).

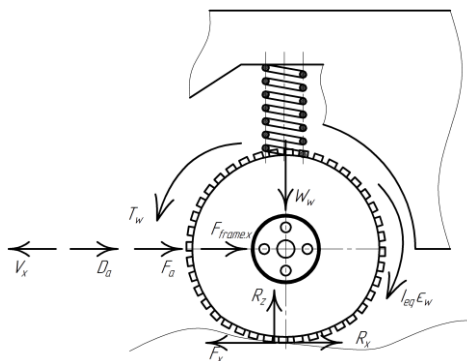


Рис. 2.3 – Діаграма сил при нестационарному русі колісного модуля

Згідно з рис. 2.3 колова сила F_x , яка отримується під дією різниці моментів T_w і $J_{eq}\epsilon_w$, компенсується дією сил опору руху. У такому випадку, момент навантаження рівний

$$T_{wl} = F_x r_w^0 = (R_x + F_{frame.x} + D_a + F_a) r_w^0 \quad (2.10)$$

де, R_x – це опір кочення, що обчислюється з моделі «Bekker-Wong model» [101], $F_{frame.x}$ – сила, яка враховує прискорення тіла транспортного засобу і передається через раму автомобіля, D_a – сила опору повітря, $F_a = M \frac{dv_x}{dt}$ є сила, яка враховує прискорення транспортного засобу (сила необхідна для збільшення кінетичної енергії колісного модуля при поступальному русі), M – вага модуля, r_w^0 – радіус кочення шини у веденому режимі, відповідно до класифікації наведеної в роботах [98, 101-103], J_{eq} – сумарний момент інерції обертання колеса і електропривода, який приведений до осі колеса, ϵ_w – кутове прискорення колеса.

З рівняння (2.10) і рис. 2.3, вираз в дужках – це колова сила колеса, F_x , яка діє у контакті шина/грунт і може бути обчислена як

$$F_x = R_x + F_{frame.x} + D_a + F_a \quad (2.11)$$

Зазвичай колова сила колеса математично пов'язана з ковзанням шини, s_δ і може бути описана за допомогою наступної нелінійної функції [98]:

$$F_x = \mu_{px} R_z (1 - e^{-ks_\delta}) \quad (2.12)$$

де, k є емпіричним фактором, який залежить від властивостей шини та поверхні; μ_{px} – коефіцієнт пікового тертя, k , μ_{px} були отримані на основі наближення експериментальних даних. Ковзання шини легко визначити з рівняння (2.12) наступним чином:

$$s_\delta = -\frac{1}{k} \ln \left(1 - \frac{F_x}{R_z \mu_{px}} \right) \quad (2.13)$$

Обчислення крутного моменту навантаження у рівнянні (2.10) вимагає значення лінійного прискорення, a_w , яке можна визначити, диференціюючи лінійну швидкість, V_w . Останню можна визначити з відомої кутової швидкості, якщо радіус кочення шини в режимі руху, r_w , було б відомо:

$$\omega_w = \frac{V_x}{r_w} \quad (2.14)$$

де r_w – радіус уявного жорсткого колеса, який рухається без ковзання і має однакову лінійну швидкість V_x як швидкість фактичного пружного колеса. Радіус кочення r_w визначається з рівняння (2.15), що визначає ковзання шини

$$s_\delta = \frac{V_t - V_x}{V_t} = \frac{\omega_w r_w^0 - V_x}{\omega_w r_w^0} = 1 - \frac{r_w}{r_w^0} \quad (2.15)$$

Розв'язавши рівняння (2.15) можна отримати:

$$r_w = (1 - s_\delta) r_w^0 \quad (2.16)$$

У рівнянні (2.15), теоретична лінійна швидкість при нульовому проковзуванні, V_t , визначається кутовою швидкістю із радіусом кочення у веденому режимі на асфальті [98].

Рівняння (2.1) – (2.16) складають основу для синтезу системи керування рухом транспортного засобу при застосуванні естиматора. Однак вимірювання пружного

моменту T_s (див. рівняння (2.3)), необхідного для синтезу контролера та спостерігача, безпосередньо із використанням датчика є неможливим. Тому постає необхідність синтезу спостерігачів пружного моменту.

2.1.2 Модель колеса і системи підресорювання

Вище розглянута підсистема електроприводу передає енергію від електричного двигуна до колеса, забезпечуючи поступальний рух колісного модуля. Поступальний рух відомий як позовжня динаміка автомобіля [98, 104]. Поздовжня динаміка значно залежить від коливальних рухів модуля, викликаних профілем місцевості в напрямку, нормальному до позовжнього напрямку.

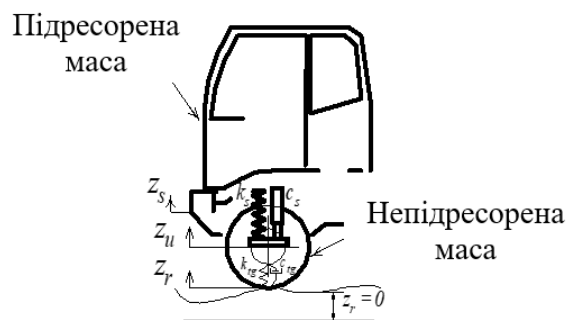


Рис. 2.4 – Нормальна динаміка колісного модуля

На рис. 2.4 наведена двомасова (підресорена і непідресорена маси) коливальна система колісного модуля, яка застосовується в терамеханіці для вивчення нормальної динаміки транспорту [98, 104-106]. Модель такої системи формується наступними рівняннями [97, 107]:

$$\begin{cases} R_z = W_w \cos \theta_n + k_{tg} (z_r - z_u) + c_{tg} (\dot{z}_r - \dot{z}_u) \\ m_s \ddot{z}_s = k_s (z_u - z_s) + c_s (\dot{z}_u - \dot{z}_s), \\ m_u \ddot{z}_u = k_{tg} (z_r - z_u) + c_{tg} (\dot{z}_r - \dot{z}_u) - k_s (z_u - z_s) - c_s (\dot{z}_u - \dot{z}_s). \end{cases} \quad (2.17)$$

тут R_z – нормальна динамічна реакція, θ_n – нахил поверхні руху, W_w – статичне навантаження на колесо, спричинене підресореною масою і непідресореною масою, k_{tg} – нормальна жорсткість шини-грунт, c_{tg} – коефіцієнт демпфування шини-грунт, z_s і z_u – переміщення підресорених і непідресорених мас, m_s і m_u ; z_r – висота

мікропрофілю місцевості, k_s і c_s – відповідно коефіцієнти жорсткості і демпфування підвіски.

Стохастичні характеристики профілю місцевості та типу поверхні, а також коефіцієнти жорсткості ґрунту моделюються за методом, описаним у [3, 98, 104, 108]. Нормальна реакція шини є однією з основних координат для оцінки мобільності колісного модуля.

2.1.3 Аналіз динаміки отриманої моделі з врахуванням поверхні руху колеса

Сформована модель колісного модуля (2.1)-(2.17) є основою для моделювання динаміки руху колеса на різних дорожніх покриттях, а також для синтезу спостерігачів станів динамічної системи. Проаналізуємо застосування цієї моделі для визначення відмінності руху бездоріжжям від руху по нормальному дорожньому покриттю (асфальт). Результати даного аналізу опубліковані у роботі [113].

У роботах [99, 110, 111] для аналізу характеристик динамічної системи автомобіля використовується підхід зворотної динаміки, зокрема підхід обчислення сил і крутних моментів на основі заданих/цільових кінематичних параметрів тіла, включаючи швидкість і прискорення. Нами згаданий підхід застосовується для обчислення обертового моменту, який слід прикласти до колеса для забезпечення заданого профілю швидкості, тобто заданої часової функції $V_x = f(t)$ за різних умов та місцевостей руху транспортного засобу. В цьому випадку визначений обертовий момент служить сигналом задання в системі керування рухом при заданому профілі швидкості.

Модель (2.1) - (2.17) дає змогу визначати межі зміни обертового моменту колеса, які встановлюються умовами дорожнього покриття. Для цього використовується індекс мобільності коліс (WMI) [109], який для нестационарного руху визначається у такому вигляді:

$$WMI = 1 - \frac{T_w - J_{eq} \varepsilon_w}{r_w^0 R_z \mu_{px}} \quad (2.18)$$

Ще одним із важливих показників динаміки руху транспортного засобу є енергоефективність, яка часто закладається у функцію критерію оптимізації при синтезі контролера. У роботі ми обмежилися тільки розглядом втрат потужності на проковзування колеса, які математично можна виразити як [98]

$$P_{\delta} = F_x \omega_w (r_w^0 - r_w) \quad (2.19)$$

Слід підкреслити, що всі параметри у наведених рівняннях є миттєвими параметрами і визначаються для кожного кроку [1, 112].

Дослідження прискорення колісного модуля від нульової швидкості до 64,37 км/год (40 миль/год) при різних профілях швидкості [98] виконано для двох поверхонь руху. Профілі швидкості, як правило, пов'язані з конструктивними специфікаціями позашляховиків [98]. Обчислені цільові часові залежності обертового моменту колеса можуть використовуватися також для визначення запасів мобільності, яка визначає здатність модуля "пройти" або "не пройти" задані умови місцевості при заданих профілях швидкості. Лінійна швидкість і прискорення прийняті як характеристики ефективності руху на даній місцевості.

На рис. 2.5 представлені основні характеристики стохастичного профілю дороги/місцевості, сформованого згідно методу [3] для асфальтової дороги та луку; характеристики включають висоту профілю дороги, коефіцієнт пікового тертя, μ_{px} , і коефіцієнт опору кочення, f , який обчислено із сили опору кочення, R_x .

На рис. 2.6 та рис. 2.7 проілюстровані перехідні процеси руху модуля за трьома заданими профілями швидкості, при цьому модуль прискорюється від 0 до 64.37 км/год (40 миль/год) на асфальтовій дорозі та лузі відповідно.

На рис. 2.6 представлені перехідні процеси динаміки колісного модуля та зміни індексу мобільності модуля на асфальтовій дорозі. Задані цільові профілі швидкості характеризуються різними величинами поздовжнього прискорення модуля (див. верхній лівий графік на рис. 2.6). У верхньому центральному графіку на рис. 2.6 показано зміну задання крутного моменту, який слід застосувати до колеса для забезпечення цільових профілів швидкості руху. Великі величини крутного моменту викликають різке збільшення ковзання шини до 10% та зменшення еквівалентного

значення радіусу кочення у ведучому режимі. Відповідно, втрата потужності на ковзання в шинах збільшується, а запаси мобільності знижуються до 45%.

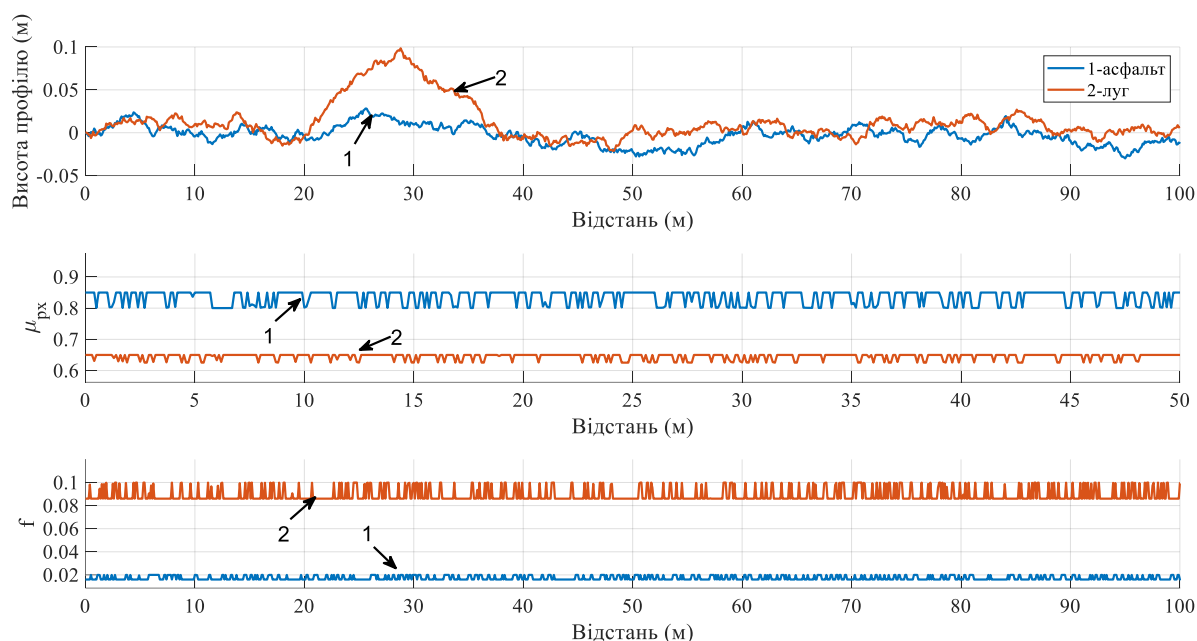


Рис. 2.5 – Характеристики поверхні асфальту і лугу

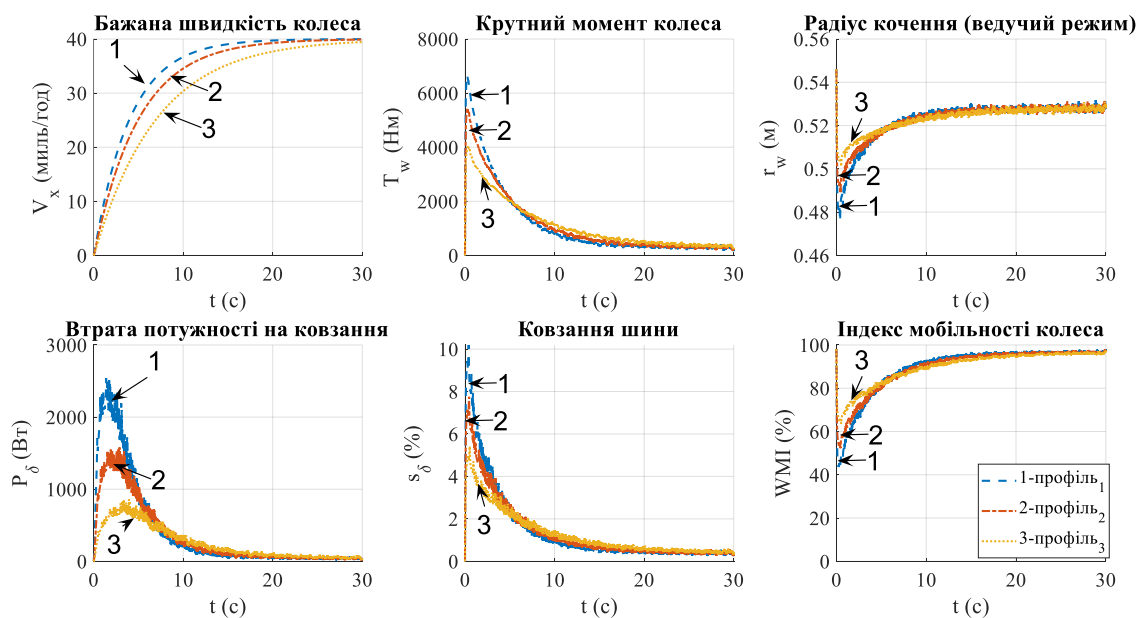


Рис. 2.6 – Перехідні процеси при прискоренні модуля від 0 до 40 миль/год на асфальтній дорозі

Зменшення індексу мобільності колеса в більшій мірі спостерігається, коли модуль рухається по луговій місцевості, що показано на рис. 2.7.

Обчислене значення сигналу задання обертового моменту забезпечує цільові профілі швидкості руху при прискоренні від 0 миль/год до 40 миль/год і викликає різке збільшення проковзування шини до 24% на ранній стадії прискорення; ковзання шини зменшується до 2,5% при стабільній швидкості (40 миль/год). Межі запасу мобільності знижуються до 20% (див. графік внизу праворуч на рис. 2.7) на самому початку прискорення колеса. Таке збільшення проковзування шини та зниження межі мобільності зазвичай трапляються, якщо на електричний привід подається невідповідний сигнал завдання.

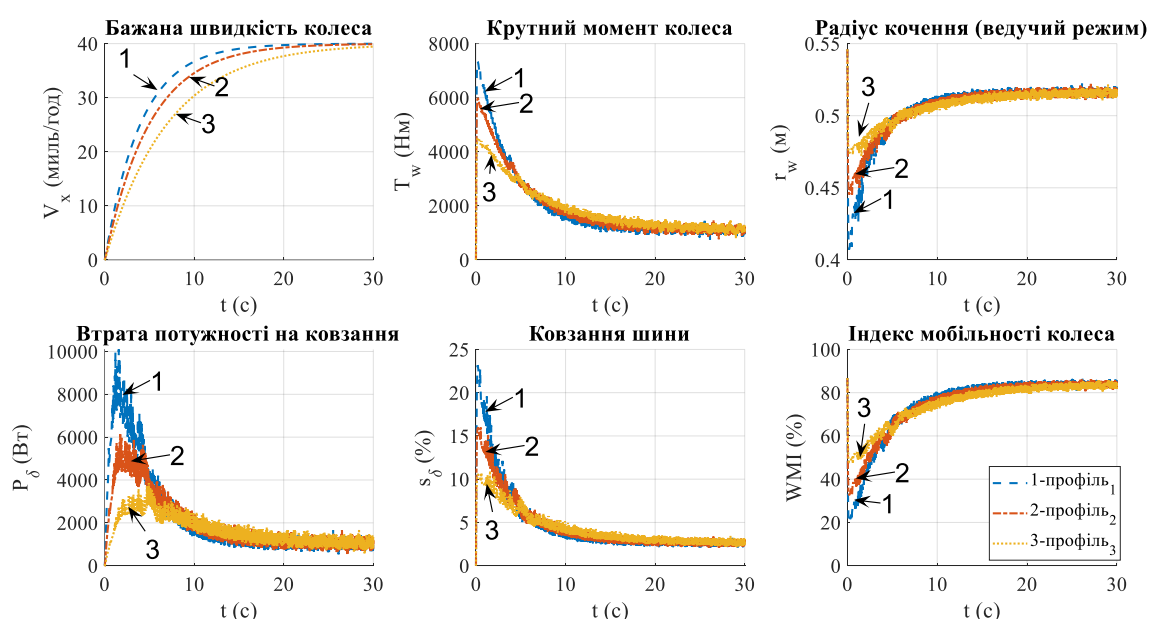


Рис. 2.7 – Перехідні процеси при прискоренні модуля від 0 до 40 миль/год на луговій дорозі

Для аналізу запасів мобільності колісного модуля було розраховано взаємозв'язок між цільовою швидкістю та індексом мобільності, що представлено на рис. 2.8. Результати аналізу втрати потужності внаслідок ковзання шини наведені на рис. 2.9.

Як видно з рис. 2.8, для забезпечення цільових профілів швидкості крутний момент колеса, що обчислюється за допомогою підходу зворотної динаміки, викликає значне зменшення мобільності особливо на луговій місцевості (див. рисунок рис. 2.8б). У той же час модуль забезпечує рух за бажаними профілями швидкості, проте

такі профілі швидкості спричиняють значні втрати електроенергії через ковзання шини, як показано на рис. 2.9б.

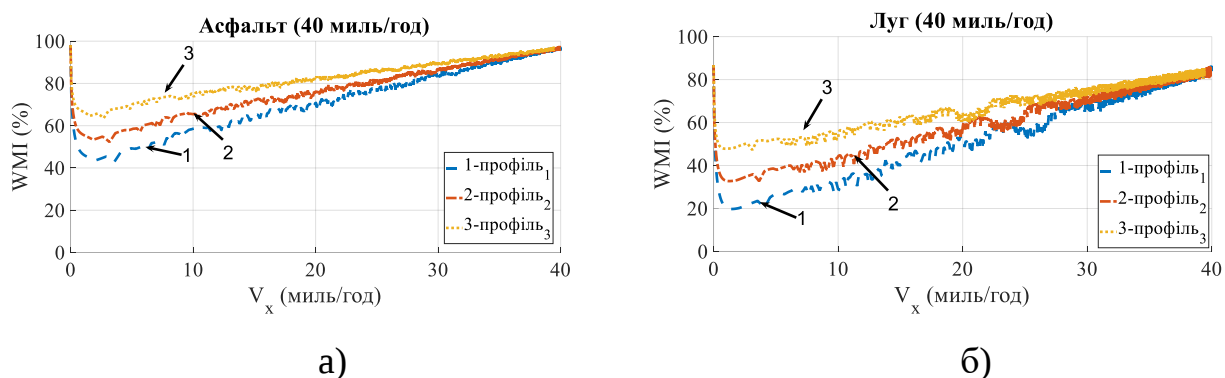


Рис. 2.8 – Залежності між WMI і лінійною швидкістю модуля а) на асфальтній дорозі та б) на лужному покритті

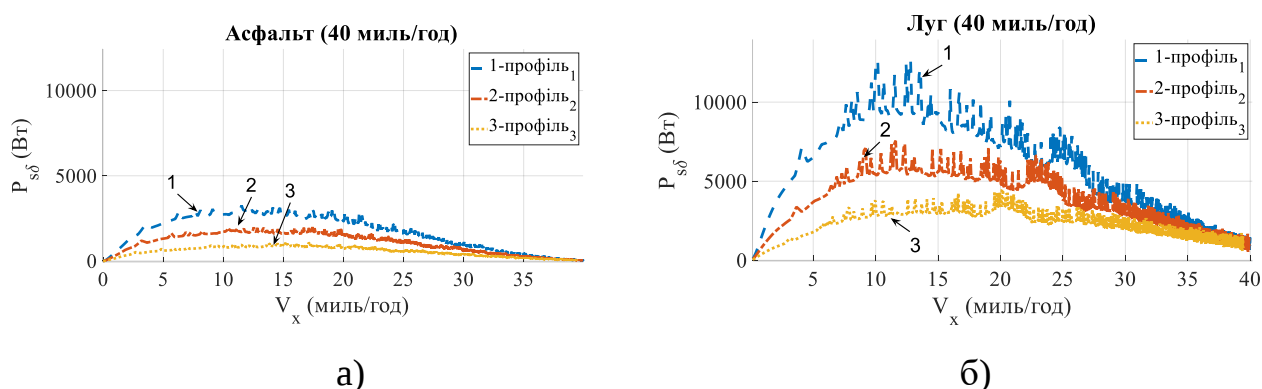


Рис. 2.9 – Залежності між втратами потужності на проковзування і лінійною швидкістю модуля а) на асфальтній дорозі та б) на лужному покритті

Отримані результати підтверджують необхідність пошуку нового підходу до формування сигналу завдання крутного моменту, який забезпечуватиме досить швидке прискорення до цільової лінійної швидкості, і, в той же час, підтримуватиме запас мобільності на якомога вищому рівні та підвищуватиме енергоефективність.

2.1.3.1 Встановлення меж обертового моменту колеса

Для підтримання прийнятного запасу мобільності необхідно забезпечити зміну крутного моменту колеса таким чином, щоб підтримувати ковзання шини досить далеко від величин, що відповідають повній втраті мобільності модуля. Допустимі

запаси мобільності можна отримати, обмежуючи сигнал завдання крутного моменту. На основі даних з рис. 2.6 та рис. 2.7 побудовані залежності зміни індексу мобільності колеса від зміни крутного моменту колеса (рис. 2.10).

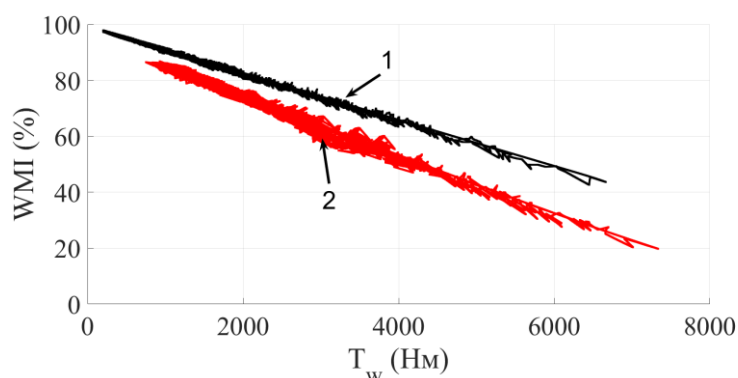


Рис. 2.10 – Залежності між WMI і заданим обертовий момент колеса, отримані для прискорення модуля на 1 – асфальтній дорозі та 2 – лузі

Як видно з рис. 2.10, взаємозв'язок між WMI та заданим обертовим моментом колеса утворює дві області даних. Область 1 представляє результати обчислень в умовах асфальтової дороги, а область 2 дає дані про лугову місцевість. З наведених даних видно, що обертовий момент опорного колеса на лузі піднімається до 7000 Нм, що спричиняє значне падіння запасу мобільності колеса до 20%. З цієї причини цільовий обертовий момент колеса на луговій місцевості повинен бути обмежений значеннями, нижчими ніж 7000 Нм.

Зрозуміло, що межі для обертового моменту колеса повинні бути відрегульовані, якщо умови місцевості продовжують погіршуватися. Для вивчення впливу такого погіршення на межі обертового моменту області даних на рис. 2.10 заміщені лінійними функціями. Цю заміну можна обґрунтувати на основі рівнянням (2.18), в якому індекс мобільності колеса визначається як лінійна функція обертового моменту, якщо інші змінні рівняння підтримуються постійними. У випадку, коли всі змінні у рівнянні (2.18) не постійні, а стохастично змінюються (зауважимо, що на рис. 2.5 показані стохастичні характеристики рельєфу місцевості), їх зміни призводять до зміни індексу рухливості коліс у областях, утворених лініями на рис. 2.11.

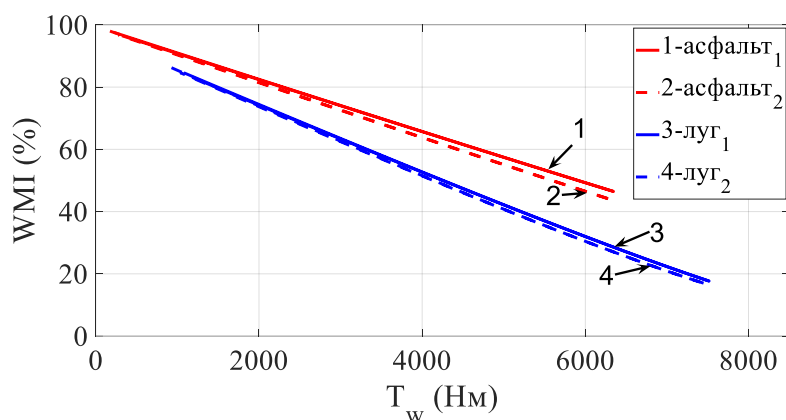


Рис. 2.11 – Залежність між WMI і заданим обертовим моментом колеса на дорогах із незмінним покриттям

Площі та нахили графіків на рис. 2.11 можуть бути корисними для встановлення меж границь мобільності колеса та заданого значення обертового моменту колеса, коли модуль рухається в різних умовах. Щоб проілюструвати це, на рис. 2.12а наведено три графічні лінії, які відповідають трьом різним умовам місцевості. Верхні межі моменту колеса можуть бути встановлені для запобігання падіння індексу мобільності колеса нижче певного бажаного значення, $WMI^{desired}$. Як видно з рисунку 2.12а, задані значення крутного моменту T_{w1} та T_{w2} є верхніми межами в умовах місцевості, представлених лініями 1 та 2.

Коли стан місцевості погіршується (тобто модуль переміщається від місцевості 2 до місцевості 3, рис. 2.12а), верхня межа опорного моменту не може бути витримана на рівні, що гарантує бажане значення $WMI^{desired}$. Для забезпечення руху модуля з заданими профілями швидкості верхню межу крутного моменту слід збільшити до значення T_{w3} а запас мобільності слід знизити до WMI^* , гарантуючи рух модуля по цій місцевості. Таке регулювання меж зумовлене в першу чергу змінами опору кочення та ковзання шини. Під час коригування меж необхідно забезпечити, щоб крутний момент колеса був достатнім для подолання підвищеного опору руху (див. рівняння (2.10)), але не більший, ніж T_{w3} , що спричиняє великі проковзування шин та падіння індексу мобільності. Щоб утримувати цей баланс крутного моменту в реальному русі, потрібно знизити швидкість i , таким чином, зменшити вплив

інерційних компонент в рівнянні (2.10). Однак підтримка балансу крутного моменту порушує цільовий профіль швидкості, тобто впливає на мобільність.

Графічно описаний вище алгоритм встановлення та, за необхідності, коригування меж відображений на рисунку 2.12б. Зміну в часі сигналу завдання крутного моменту колеса визначається блоком "зворотної динаміки" на основі заданих цільових профілів швидкості. Блок "Обмеження крутного моменту" являє собою встановлення та коригування меж.

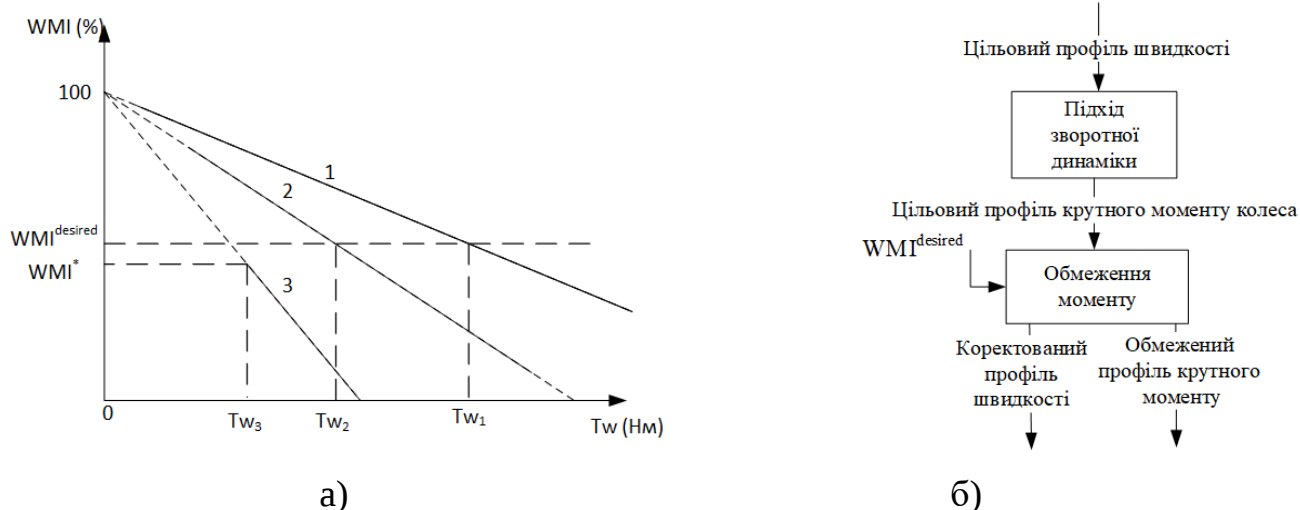


Рис. 2.12 – а) Ілюстрація залежності між індексом мобільності і крутним моментом колеса; б) Блок-діаграма алгоритму встановлення обмежень крутного моменту колеса

Демонстрація розробленого алгоритму встановлення та регулювання меж крутного моменту колеса та межі мобільності показана в роботі [113].

Отже, визначення індексу мобільності в режимі реального часу дозволяє уникнути ситуацій втрати мобільності транспортного засобу, накладаючи обмеження на величину обертового моменту колеса, проте вимагає визначення поверхні руху. Естиматори мобільності в режимі реального часу були розроблені зокрема у роботах [3, 98, 109]. Одними із ключових координат, необхідних для функціонування зазначених естиматорів мобільності, є обертовий момент колеса і нормальна реакція шини.

2.2 Застосування традиційних методів спостереження для моделі модуля

Як показав виконаний у Розділі 1 аналіз літератури, найбільш відомими та вживаними в сучасних системах електроприводу є спостерігачі Люенбергера (LO), фільтр Калмана, фільтр частинок (Particle filter, надалі PF). Тому саме ці типи спостерігачів будуть синтезовані на основі математичних моделей досліджуваного колісного модуля. Дослідження ефективності застосування спостерігачів проведено як для нелінійних, так і для лінійних систем, щоб показати універсальність алгоритмів або розкрити їх недоліки. Для оцінки станів нелінійної моделі були синтезовані спостерігачі: EKF, UKF, PF; для лінійної моделі синтезовано: KF, PF, LO.

Фільтр Калмана (KF)

Алгоритм передбачає представлення лінійної системи у дискретній формі таким чином [5]:

$$\begin{cases} X_k = A_k X_{k-1} + B_k U_k + w_k \\ Y_k = C_k X_k + v_k \end{cases} \quad (2.20)$$

де X_k - це вектор стану, U_k - вектор вхідних сигналів, Y_k - вектор виходів, A_k - значення матриці системи в момент часу t_k , B_k - значення матриці входів в момент часу t_k , C_k - значення матриці вимірювання в момент часу t_k . При формулюванні фільтра Калмана припускається, що шум процесу w_k та шум вимірювання v_k є незалежними білими гаусівськими розподілами з нульовим середнім значенням.

Алгоритм (рис. 2.13) складається з двох кроків: передбачення та корекції. На першому кроці розраховується апріорна оцінка стану на основі моделі об'єкта та попередньо оціненої оцінки стану X_{k-1} . Водночас визначається матриця коваріації помилки апріорної оцінки P_k^- на основі матриці коваріації шуму процесу Q_k . На наступному кроці апріорна оцінка стану коригується за допомогою зворотного зв'язку Калмана K_k та вектора вимірювання Z_k . Також розраховується матриця коваріації помилки після корекції P_k .

Передбачення:

$$\hat{X}_k^- = A_k \hat{X}_{k-1} + B_k U_k \quad (2.21)$$

$$P_k^- = A_k P_{k-1} A_k^T + Q_k \quad (2.22)$$

Корекція:

$$K_k = P_k^- C_k^T [C_k P_k^- C_k^T + R_k]^{-1} \quad (2.23)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k [Z_k - C_k \hat{X}_k^-] \quad (2.24)$$

$$P_k = [I - K_k C_k] P_k^- \quad (2.25)$$

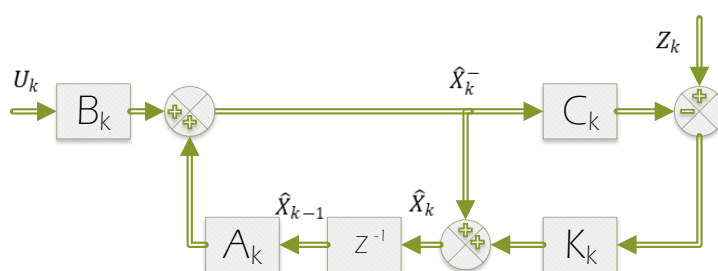


Рис. 2.13 – Схема дискретного лінійного фільтра Калмана

Основним елементом алгоритму є коефіцієнт зворотного зв'язку Калмана K_k , який визначає більш точні дані: або дані передбачення, або дані вимірювання. Якщо значення коефіцієнта Калмана високе, спостерігач більше “довіряє” вимірюванням. В іншому випадку спостерігач спирається на дані передбачення, які надходять з моделі. Матриця коваріації шуму вимірювання R_k використовується для відображення шуму датчиків, тоді як матриця коваріації шуму процесу Q_k використовується для опису невизначеності моделі. Налаштування алгоритму полягає у налаштуванні матриць коваріації шумів і початкової матриці коваріації оцінки.

Розширений фільтр Калмана (EKF)

Алгоритми оцінювання на основі EKF є дуже популярними серед дослідників завдяки можливості оцінювання стану нелінійної моделі та фільтрації сигналів шумів, які описуються наступним чином [36, 37]:

$$\begin{cases} X_k = f(X_{k-1}, U_k, w_k) \\ Y_k = h(X_k, v_k) \end{cases} \quad (2.26)$$

Однак на практиці припускається, що шуми є адитивними та незалежними, тому рівняння (2.26) можна записати так:

$$\begin{cases} X_k = f(X_{k-1}, U_k) + w_k \\ Y_k = h(X_k) + v_k \end{cases} \quad (2.27)$$

Таке подання нелінійної системи значно спрощує алгоритм оцінювання на основі ЕКФ [36]. ЕКФ складається з тих самих кроків, що і КФ, але нелінійна модель об'єкта та нелінійна модель вимірювання є лінеаризованими із використанням розкладу у ряд Тейлора. Для лінеаризації потрібно обчислити матрицю Якобі F_k часткових похідних функції $f(\hat{X}_{k-1}, U_k)$ відносно $\hat{X}_{k-1}$ та матрицю Якобі H_k часткових похідних функції $h(X_k)$ відносно $\hat{X}_k$.

Передбачення:

$$\hat{X}_k^- = f(\hat{X}_{k-1}, U_k) \quad (2.28)$$

$$P_k^- = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_{k-1} \quad (2.29)$$

$$F_k = \frac{\partial f(\hat{X}_{k-1}^-, U_k)}{\partial \hat{X}_{k-1}^-} \quad (2.30)$$

Корекція:

$$K_k = P_k^- H_k^T [H_k P_k^- H_k^T + R_k]^{-1} \quad (2.31)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k [Z_k - h(\hat{X}_k^-)] \quad (2.32)$$

$$P_k = [I - K_k H_k] P_k^- \quad (2.33)$$

$$H_k = \frac{\partial h(\hat{X}_{k-1}^-)}{\partial X} \quad (2.34)$$

Unscented Kalman Filter (UKF)

Існують два основних типи UKF, які залежать від представлення моделі системи. Перший тип використовує рівняння (2.26) і називається розширеним UKF, оскільки вектор сигма-точок включає точки, які пов'язані з шумами. Коли вводиться припущення про незалежні адитивні шуми, як у рівнянні (2.27), вплив шумів

враховується в алгоритмі шляхом додавання матриць коваріації вимірювань та коваріацій процесу до матриць коваріації попередньої оцінки та попередньої матриці коваріації спостережень відповідно. Цей тип UKF називається не-розширеним UKF. У роботі розглядається другий тип UKF, оскільки він має меншу обчислювальну складність і надає досить точний результат оцінки [39]. Алгоритми складаються з таких кроків, як:

1. Розрахунок сигма-точок та відповідних їм вагових коефіцієнтів:

$$\chi_k^- = \left[\hat{X}_{k-1}, \hat{X}_{k-1} + \sqrt{(n+\lambda)P_{xx,k-1}}, \hat{X}_{k-1} - \sqrt{(n+\lambda)P_{xx,k-1}} \right] \quad (2.35)$$

$$W_0^{(c)} = \lambda / (n+\lambda) + (1-\alpha^2 + \beta) \quad (2.36)$$

$$W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = \frac{1}{\{2(n+\lambda)\}}, i=1, \dots, 2n \quad (2.37)$$

де χ_k^- - це набір сигма-точок, розрахованих за допомогою станів, n - це кількість елементів у векторі стану, $\alpha^2(n+k) - n$ - є масштабним коефіцієнтом. Масштабний коефіцієнт α визначає розподіл сигма-точок навколо $\hat{X}_{k-1}$. Коефіцієнт k надає можливість "налаштувати" вищий порядок апроксимації. Методи налаштування цих коефіцієнтів описаний у [39].

2. Розрахунок попередньої оцінки стану:

$$\chi_k^{*-} = f(\chi_k^-, U_k) \quad (2.38)$$

де χ_k^{*-} - набір сигма-точок після обчислення рівняння моделі системи.

$$\hat{X}_k^- = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} \chi_{i,k}^{*-} \quad (2.39)$$

$$P_{xx,k}^- = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} \left[\chi_{i,k}^{*-} - \hat{X}_k^- \right] \left[\chi_{i,k}^{*-} - \hat{X}_k^- \right]^T + Q_k \quad (2.40)$$

де $P_{xx,k}^-$ - це попередня матриця коваріації.

3. Генерація нового набору сигма-точок для врахування шуму процесу перед оновленням вимірювання:

$$\chi_k^+ = \left[\hat{X}_k^-, \hat{X}_k^- + \sqrt{(n + \lambda) P_{xx,k-1}}, \hat{X}_k^- - \sqrt{(n + \lambda) P_{xx,k-1}} \right] \quad (2.41)$$

4. Оновлення вимірювань:

$$Z_k^- = h(\chi_k^+) \quad (2.42)$$

$$\hat{Z}_k^- = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} Z_{i,k}^- \quad (2.43)$$

$$P_{zz,k}^- = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [Z_k^- - \hat{Z}_k^-] [Z_k^- - \hat{Z}_k^-]^T + R_k \quad (2.44)$$

$$P_{xz,k}^- = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [\chi_{i,k}^+ - \hat{X}_k^-] [Z_k^- - \hat{Z}_k^-]^T \quad (2.45)$$

$$K_k = P_{xz,k}^- (P_{zz,k}^-)^{-1} \quad (2.46)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k [z_k - \hat{Z}_k^-] \quad (2.47)$$

$$P_{xx,k} = P_{xx,k}^- - K_k P_{zz,k}^- K_k^T \quad (2.48)$$

де Z_k^- - це сигма-точки після обчислення моделі вимірювання, $\hat{Z}_k^-$ - середнє спостережень, $P_{zz,k}^-$ - коваріаційна матриця спостережень, $P_{xz,k}^-$ - матриця перехресної кореляції.

Спостерігач Люенбергера (LO)

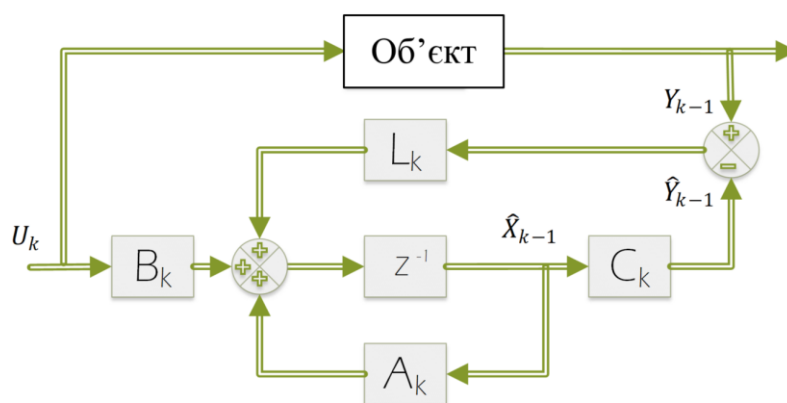


Рис. 2.14 – Діаграма алгоритму спостерігача Люенбергера

Дискретизований спостерігач повного порядку (див. рис. 2.14) може бути описаний у просторі стану, як [70-71]:

$$\hat{X}_k = A_k \hat{X}_{k-1} + B_k U_k + L_k (Y_k - \hat{Y}_k) \quad (2.49)$$

$$\hat{Y}_k = C_k \hat{X}_k \quad (2.50)$$

де L_k - матриця коефіцієнтів спостерігача, яка синтезується для мінімізації помилки спостереження e_k , яка представлена як різниця між реальними станами системи та оціненими станами. Таким чином, рівняння помилки спостереження може бути отримане з рівнянь системи та спостерігача, враховуючи однакові входи для обох. Помилку оцінювання можна визначити наступним чином:

$$e_k = X_k - \hat{X}_k = (A_k - L_k C_k) e_{k-1} \quad (2.51)$$

Для того щоб задовольнити умову мінімізації e_k , принаймні в усталеному стані, L_k повинно бути визначено таким чином, щоб матриця $(A_k - L_k C_k)$ відповідала критеріям стійкості динамічної системи. Для досягнення цього може бути використаний наступний алгоритм, такий як метод розміщення полюсів, теорема Гурвіца, теорема Ляпунова, Акермана.

Метод розміщення полюсів (кореневий метод) є найпростішим методом, який розміщує полюси спостерігача відповідно до бажаного характеристичного поліному матриці $(A_k - L_k C_k)$. Полюси повинні бути розташовані якнайдалі далі вздовж негативної частини дійсної осі порівняно з полюсами системи $(A_k - K_k C_k)$, у випадку неперервної системи (див. рис. 2.15а). Для дискретизованого спостерігача полюси повинні бути розташовані в межах одного кола, як на рис. 2.15б.

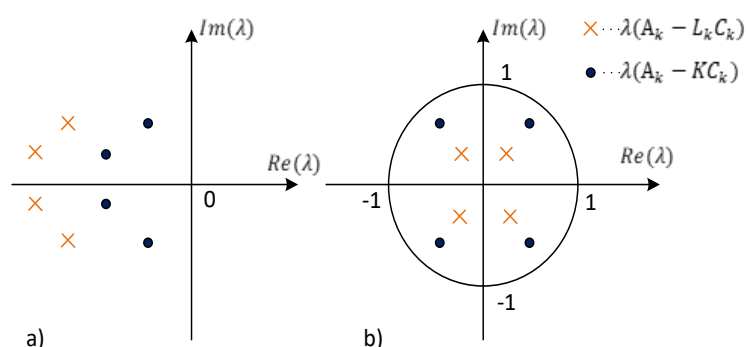


Рис. 2.15 – Місця полюсів спостерігача Люенбергера: а) для неперервного спостерігача; б) для дискретизованого спостерігача

Фільтр частинок (PF)

Фільтр частинок, або Particle Filter (PF), - це метод для оцінки стану нелінійних і негаусових динамічних систем на основі стохастичного наближення [61]. PF використовує множину випадкових "частинок" для представлення апостеріорної функції розподілу стану динамічної системи.

Основні кроки алгоритму фільтра частинок (рис. 2.16):

1. Ініціалізація:

Генерація N частинок з припущення про початковий стан системи. Кожна частина представляє можливий стан системи. Кожній частинці присвоюється вагу (зазвичай початково однакову).

2. Прогноз:

Для кожної частинки, використовуючи модель системи, розраховується наступний стан на основі поточного стану та вхідного сигналу управління. Це може включати в себе додавання шуму для врахування несталості моделі або невизначеності у вхідних даних.

3. Оновлення ваг:

Коли виміри із давачів стають доступними, оновлюються ваги всіх частинок на основі їх відповідності вимірам із сенсорів. Це зазвичай робиться шляхом обчислення відносної ймовірності спостереження при даному стані частинки. Частинки, які добре відповідають вимірюванням, отримують більшу вагу, тоді як інші отримують меншу.

4. Рісемплінг:

Щоб уникнути деградації фільтра, де декілька частинок мають високу вагу, а інші мають дуже низьку, проводиться рісемплінг частинок. Генерується новий набір частинок із поточного розподілу, де ймовірність вибору частинки пропорційна її вазі. Після ресемплінгу всі частинки отримують (можуть отримувати) однакову вагу.

5. Повторення кроків 2-4.

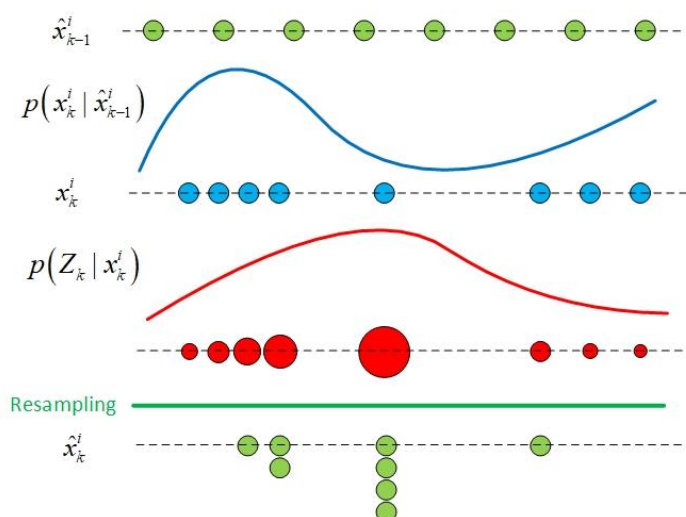


Рис. 2.16 – Графічне представлення алгоритму фільтра частинок

2.2.1 Синтез спостерігачів

Спостерігач нормальної реакції шини та пружного моменту були розроблені шляхом поєднання двох спостерігачів у каскадній схемі, яка була інтегрована з математичною моделлю колісного модуля (див. підрозділ 2.1). Використання каскаду спрощує процедуру налаштування спостерігачів і дозволяє вирішити проблему спостережності системи.

Обертова та нормальна динаміка колісного модуля поєднанні впливом нормальної реакції шини на опір кочення шини та силу тяги. Крім того, інерція обертання колеса змінюється внаслідок зміни радіусу кочення шини, викликаній динамічними змінами нормальної реакції шини. Система керування за повним вектором стану (рис. 2.17) синтезована кореневим методом для задоволення бажаного профілю швидкості руху колісного модуля [107, 116].

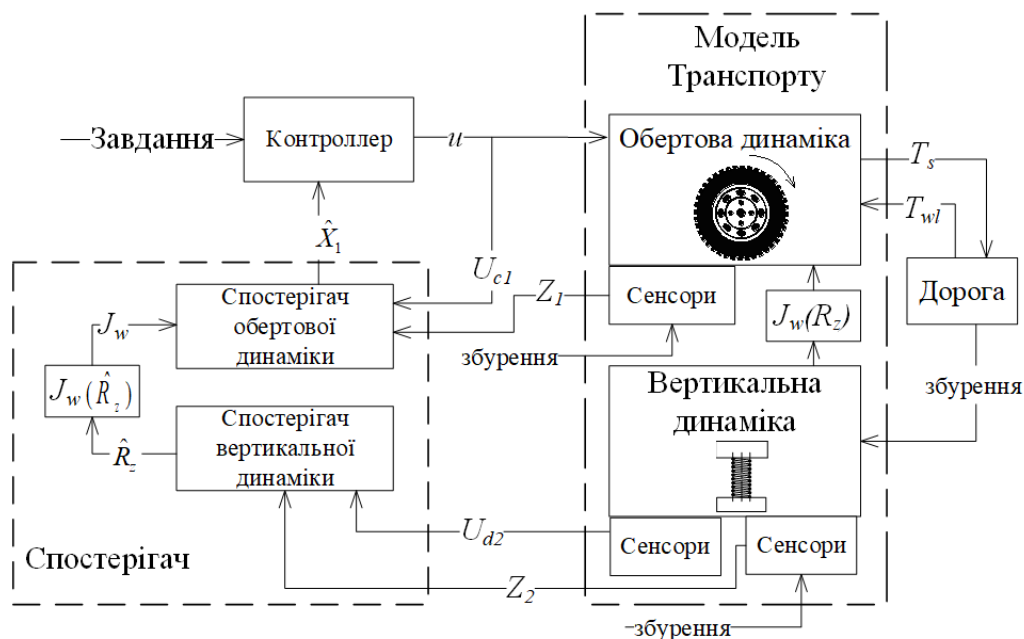


Рис. 2.17 – Діаграма моделі колісного модуля з системою керування та моделлю спостерігача

Для синтезу спостерігача необхідно вибрати вектори входів, виходів та координат станів. Вектори стану (рис. 2.17) та вектори входів системи описуються наступним чином

$$\hat{X}_1 = [i_m, \omega_m, T_s, \omega_w]^T \quad (2.52)$$

$$\hat{X}_2 = [z_s, \dot{z}_s, z_u, \dot{z}_u, R_z]^T \quad (2.53)$$

Рівняння (2.54) – (2.55) описують вектори входів спостерігача

$$U_{c1} = [u]^T \quad (2.54)$$

$$U_{d2} = [z_r, \ddot{z}_r, \ddot{z}_u, \theta_n, \dot{\theta}_n]^T \quad (2.55)$$

які включають керуючий вхід u та величини, які впливають на нормальну динаміку (див. рис. 2.17) і представляють характеристики профілю місцевості та типу поверхні.

Білий гаусівський шум використаний для моделювання інших можливих збурень, які не можуть бути включені до математичної моделі модуля через їх невідому природу, але можуть впливати на динаміку модуля та сигнали датчиків.

Синтез спостерігача із замкненою структурою коригування передбачає вибір вихідних координат спостерігача за якими відбувається коригування. Вихідні сигнали повинні відповідати величинам, вимірювання яких доступне із стандартного набору

сенсорів. У цьому дослідженні оберտальна динаміка колісного модуля характеризуються вимірюваннями на основі енкодерів та віртуальних датчиків електричного струму. Одним із доступних віртуальних датчиків нормальної динаміки є вимірювання профілю місцевості за допомогою двох віртуальних датчиків відстані, розміщених на підресореній масі з обох боків колеса в поздовжньому напрямку транспортного засобу, висота якої задається як нульове значення на сухому плоскому асфальті

$$Z_1 = [i_m, \omega_w]^T \quad (2.56)$$

$$Z_2 = z_r \quad (2.57)$$

Передбачається, що віртуальні датчики для вимірювання компонентів векторів Z_1 , Z_2 мають ідеальні функції передачі; отже, виміряні значення компонентів Z_1 , Z_2 приймаються рівними значенням, які обчислюються з диференціальних рівнянь моделі колісного модуля. Відповідно до обраних сенсорних сигналів у рівняннях (2.56) – (2.57) та векторів оцінки станів у рівняннях (2.54) – (2.55), моделі спостережень Y_1 та Y_2 (див. рис. 2.17) можна записати так:

$$Y_1 = h_1(\hat{X}_1) = [i_m \quad \omega_w]^T \quad (2.58)$$

$$Y_2 = h_2(\hat{X}_2, U_2) = \frac{1}{k_{tg}} (R_z - W_w \cos \theta_n + k_{tg} z_u - c_{tg} (\dot{z}_r - \dot{z}_u)) \quad (2.59)$$

Для обраних вище станів (див. рівняння (2.54) – (2.55)) нелінійна модель $f(\hat{X}_1, U_{c1})$ для оцінки обертової динаміки та нелінійна модель $f(\hat{X}_2, U_{d1})$ для оцінки нормальної динаміки відповідно описуються системами рівнянь

$$f(\hat{X}_1, U_{c1}) = \begin{cases} \frac{di_m}{dt} = \frac{1}{L_a} \left(\frac{uk_{bat}}{u_{max}} - R_a i_m - k_{emf} \omega_m \right), \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J_{eq}} (k_t i_m - T_s - c_{eq} (\omega_m - i\omega_w) - T_{fm}), \\ \frac{dT_s}{dt} = k_{eq} (\omega_m - i\omega_w) \\ \frac{d\omega_w}{dt} = \frac{1}{J_w} (iT_s + ic_{eq} (\omega_m - i\omega_w) - T_{fw}). \end{cases} \quad (2.60)$$

$$f(\hat{X}_2, U_{d2}) = \begin{cases} \frac{dR_z}{dt} = -W_w \theta_n \sin \theta_n + k_{tg}(\dot{z}_r - \dot{z}_u) + c_{tg}(\ddot{z}_r - \ddot{z}_u) \\ \ddot{z}_s = \frac{k_s}{m_s}(z_u - z_s) + \frac{c_s}{m_s}(\dot{z}_u - \dot{z}_s), \\ \ddot{z}_u = \frac{k_{tg}}{m_u}(z_r - z_u) + \frac{c_{tg}}{m_u}(\dot{z}_r - \dot{z}_u) - \frac{k_s}{m_u}(z_u - z_s) - \frac{c_s}{m_u}(\dot{z}_u - \dot{z}_s). \end{cases} \quad (2.61)$$

Лінійні моделі колісного модуля отримуються шляхом нехтування нелінійного тертя у системі рівнянь (2.60).

2.2.1.1 Налаштування спостерігачів

Крутний момент навантаження T_{wl} - невідоме стохастичне збурення, яке впливає на динаміку обертання колеса колісного модуля, як показано на рис. 2.17. Для налаштування KF, EKF та UKF вплив стохастичного моменту навантаження на кутову швидкість колеса враховується діагональним елементом у матриці коваріації системних збурень Q_k , яка відповідає варіації швидкості колеса. Діагональний елемент матриці налаштовується шляхом призначення більш високого значення, ніж значення інших елементів матриці. Початкові умови матриці коваріації P_k визначаються як високі значення для збільшення швидкості збіжності спостережених станів до реальних величин. Величини матриць коваріацій налаштовувалися експериментальним шляхом для мінімізації похибки спостереження.

Кількість точок фільтру частинок слід вибирати із міркувань зменшення часу на обчислення із збереження бажаної точності спостереження. Корінь середньоквадратичної похибки спостереження (RMSE) та середній обчислювальний час були розраховані для вирішення задачі вибору кількості частинок. Формула для обчислення RMSE представлена нижче

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_k^{N_t} (X_k - \hat{X}_k)^2}{N_t}} \quad (2.62)$$

де N_t - це кількість ітерацій, які залежать від кроку інтегрування, $k=1,2; i=1,2,\dots,N_t$.

Середній час обчислення обрахований як сума часів, затрачених на обчислювання кожної ітерації, поділену на кількість ітерацій. Налаштування проводилися із забезпеченням роботи фільтра частинок в режимі реального часу на експериментальному контролері dSPACE MicroAutoBox II 1513/1514 (див. підрозділ 4.1.2). Як видно з рис. 2.17, після збільшення кількості частинок понад 250 точність оцінки повільно змінюється, тоді як середній час обчислення значно збільшується. Час обчислення повинен бути меншим, ніж крок інтегрування (показаний пунктирною лінією на рисунку 2.18), щоб задовольнити обчислення в реальному часі. Тому кількість частинок PF було обрано як 250. Метод рісемплінгу на базі розширеного методу Монте Карло [114] використовувався для заміни одного набору частинок іншим набором. Початковий набір частинок зазвичай розподіляється відповідно до розподілу Гауса. У цій роботі пропонується вибрати функцію густини ймовірності суміші Гаусівських розподілів для початкового розподілу, як показано на рисунку 2.19. Переваги застосування такого підходу для спостереження координат стану показані зокрема у роботі [115]. Результати для PF з цим початковим розподілом суміші позначаються як PF*.

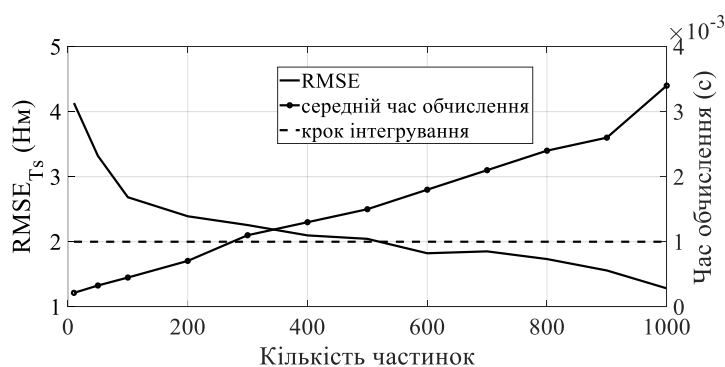


Рис. 2.18 – Налаштування фільтра частинок: RMSE від кількості частинок, і середній час обчислення від кількості частинок

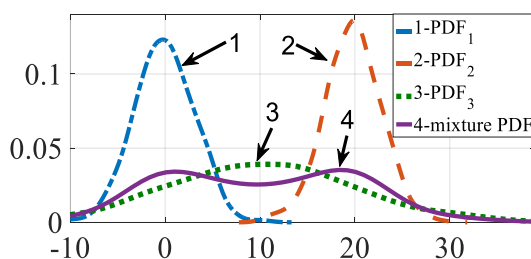


Рис. 2.19 – Діаграма функцій густини ймовірності (PDF) для початкового розподілу частинок

Спостерігач Люенбергера 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.

2.2.1.2 Аналіз роботи спостерігачів при зашумлених сигналах давачів

Порівняльний аналіз представлений для наступних чотирьох спостерігачів: розширений фільтр Калмана (EKF), Unscented Kalman Filter (UKF), фільтр частинок (PF) та спостерігач Люенбергера (LO). Моделі спостерігачів були інтегровані в замкнуту систему керування, ефективність якої перевірялася при наявності невідомих збурень руху по місцевості та зашумлення сигналів давачів.

Для демонстрації переваг використання тих чи інших спостерігачів виконано дослідження для двох випадків: (i) замкнена система обладнана ідеальними датчиками для визначення всіх станів без фільтрації сигналів та (ii) замкнена система керування використовує спостерігачі для оцінки невідомих станів системи без фільтрації сигналів із давачів.

Початкові значення змінних стану системи для початкового моменту часу, коли колісний модуль не рухається, є нульовими.

Рівень шуму у векторах спостереження та векторах стану встановлювався як відношення сигнал/шум у децибелах

$$SNR_{sensor} = 20 \log_{10} \left(\frac{Z_k}{Z_{k_noise}} \right) \quad (2.63)$$

$$SNR_{system} = 20 \log_{10} \left(\frac{X_k}{X_{k_noise}} \right) \quad (2.64)$$

тут Z_{k_noise} – вектор амплітуд шуму у векторах спостереження, X_{k_noise} – вектор амплітуд шуму у векторах стану, $k = 1, 2$. Всі дослідження були виконані за рівнем шуму системи SNR_{system} рівним величині 80 Дб.

Для порівняння бажаного виходу системи та системи, у якій ідеальні датчики вимірюють компоненти станів була використана середньоквадратична похибка (RMSE). На рис. 2.20а наведені результати для RMSE між бажаним виходом системи та вихідним сигналом системи, коли сигнали окремих давачів зашумлені і не

фільтруються. Як показано на рис. 2.20а, система керування є чутливою до зашумлення сигналу давача. Розглядаючи замкнену систему керування з спостерігачами (див. рис. 2.20б), видно, що динаміка спостерігача впливає на динаміку всієї системи. Рис. 2.20б представляє RMSE між бажаною швидкістю колеса та швидкістю колеса, якщо у системі є спостерігач. Як видно, замкнена система керування із спостерігачами може забезпечувати бажану динаміку при низьких рівнях шуму датчика. При високому рівні шуму система з LO є менш надійною порівняно з іншими спостерігачами. На відміну від EKF, UKF, динаміка системи з PF відрізняється від бажаної динаміки системи при низьких рівнях шуму. Порівнюючи рис. 2.20а та рис. 2.20б, можна помітити, що система, що базується на спостерігачах, менш чутлива до шуму сигналів давачів, ніж система з ідеальними датчиками, але без фільтрації.

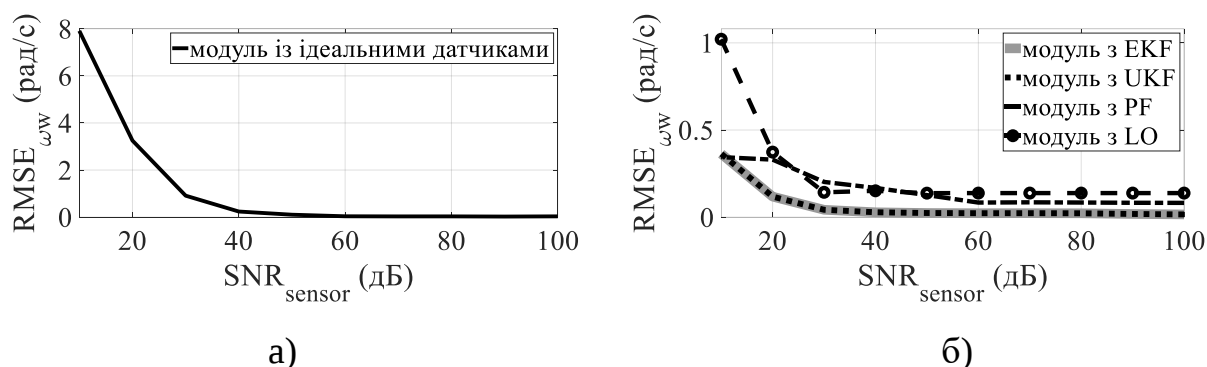


Рис. 2.20 – RMSE між бажаною швидкістю колеса в замкненій системі керування з ідеальними датчиками та а) швидкістю колеса замкненої системи із зашумленими ідеальними датчиками, і б) система із спостерігачами, які функціонують на основі зашумлених сигналів датчиків. Вихідна кутова швидкість колеса дорівнює 20 с-1 в стаціонарному режимі

Аналогічний підхід на основі середньоквадратичної похибки використаний і для порівняння точності розроблених спостерігачів для визначення пружного моменту та нормальної реакції системи. Оцінка точності EKF, UKF, PF та LO наведена на рисунку 2.21. PF забезпечує найбільш точні результати для оцінки крутного моменту демпфування при високому рівні шуму (рис. 2.21а). Для оцінки нормальної реакції в шинах (рис. 2.21б) робота LO не є задовільною при високих рівнях шуму датчика. Спостерігач Люенбергера з великими значеннями коефіцієнтів

в матриці спостерігача не працює належним чином при значному шумі, а використання менших значень коефіцієнтів впливає на динаміку замкнутої системи.

На рисунках 2.22 та 2.23 представлені результати оцінки нормальної реакції шини та оцінки моменту пружності при використанні EKF, UKF, PF, LO. SNR станів системи дорівнює 80 децибелам, а SNR сигналів датчика дорівнює 20 децибелам. З рисунків 2.22 та 2.23 видно, що EKF, UKF, PF дають більш точні результати, на відміну від результатів, наданих LO.

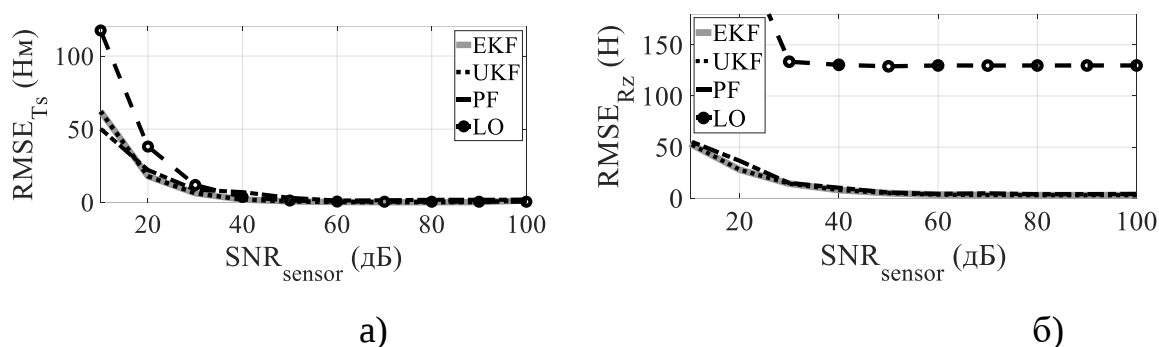


Рис. 2.21 – а) RMSE між пружним моментом та спостереженим моментом (максимальне значення крутного моменту дорівнює 1,26 кНм), б) RMSE між обчисленою нормальною реакцією та спостереженою нормальною реакцією (максимальне значення нормальної реакції дорівнює 20,36 кН)

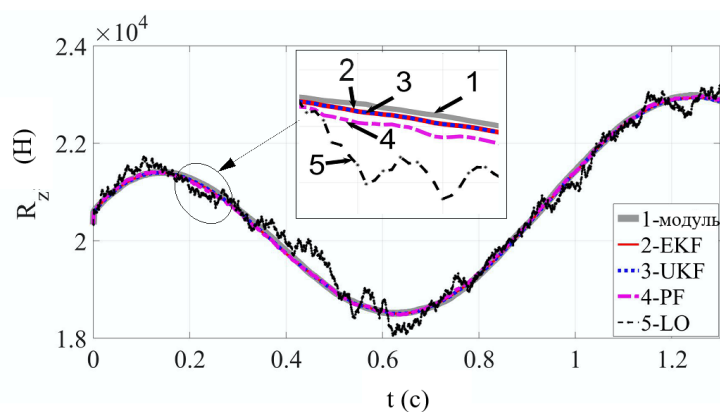


Рис. 2.22 – Оцінка нормальної реакції за допомогою EKF, UKF, PF та LO

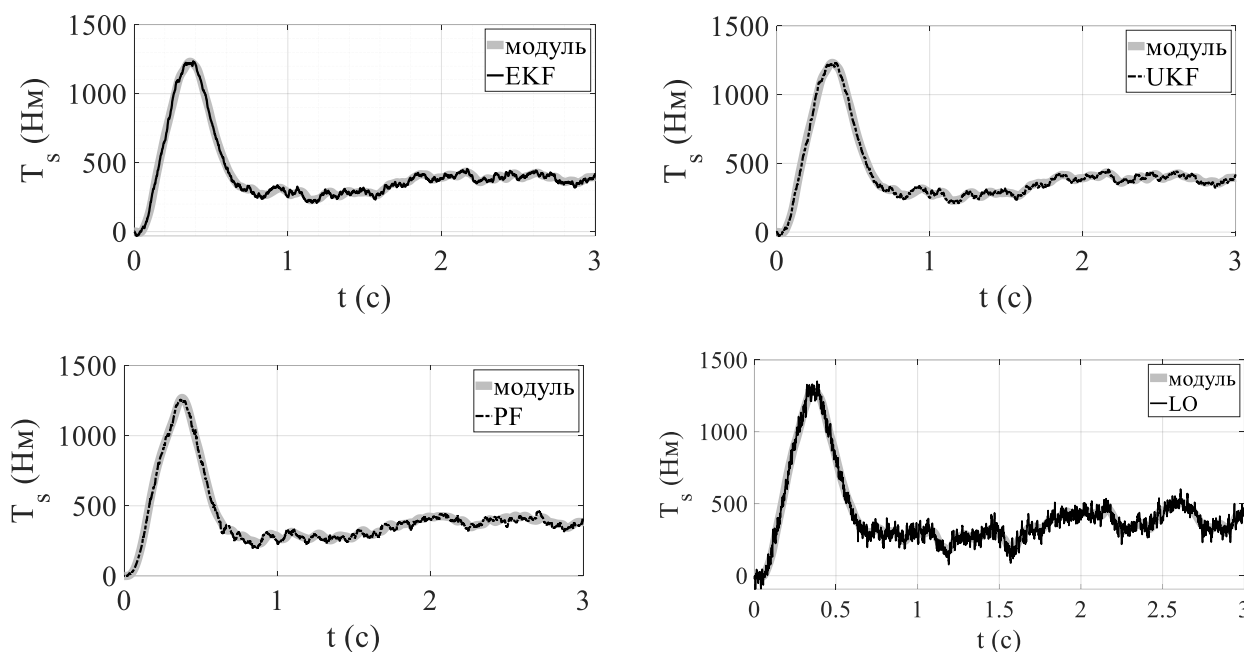


Рис. 2.23 – Оцінка пружного моменту із використанням EKF, UKF, PF та LO: сірі лінії - це обчислені стани колісного модуля на основі моделі; чорні лінії - це оцінені стани спостерігачами у замкнені системі керування

Порівняння системи з ідеальними датчиками без шуму та системи зі спостерігачами за наявності шуму показано на рисунку 2.24. Виходи системи на базі спостерігачів близькі до виходу системи з ідеальними датчиками. SNR сигналів датчика в системах, що базуються на спостерігачах, дорівнює 20 децибелам. Крім того, на рисунку 2.24 видно, що система з LO є більш чутливою до коливань моменту навантаження в час від 1,5 до 2,5 с.

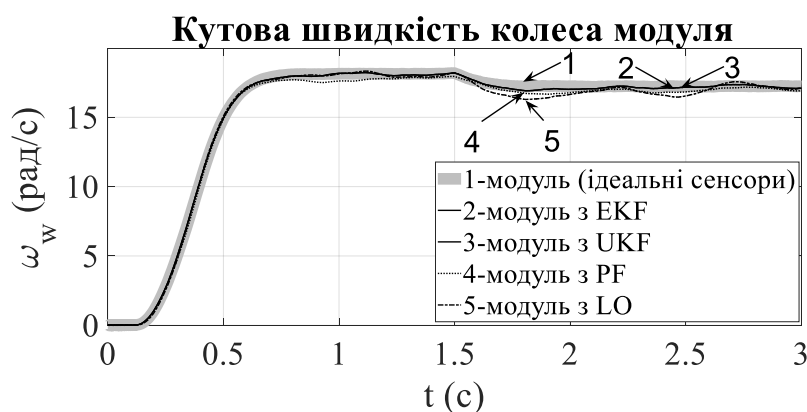


Рис. 2.24 – Динаміка системи з ідеальними датчиками та системи з EKF, UKF, PF та LO

2.2.1.3 Вплив негаусового шуму сенсора на точність спостереження

Синтез спостерігачів Калмана відбувається із припущенням, що збурення, які діють на систему та сенсори за природою відповідають білому гаусівському шуму. Проте, характер збурень може мати інший характер зміни. На приклад, розглянемо трикутний розподіл шуму давачів, функції густин яких представлені на рис. 2.25 і мають форму нерівносторонніх трикутників, які значно відрізняються від форми нормального розподілу. Медіани трикутників проходять через нульове значення. Розглядається некореляційний шум, який додається до сигналу шумів сенсорів в кожній точці інтегрування. Налаштування спостерігачів Калмана і Люенбергера залишаються без змін. Натомість, фільтр частинок може бути адаптований до цього шуму і для цього функцію обрахунку ваг частинок вибрано відповідно до функцій розподілів шуму сенсорів.

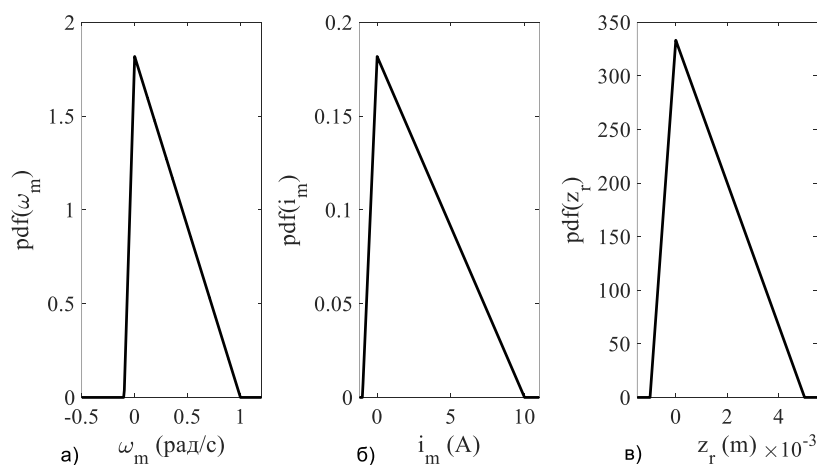


Рис. 2.25 – Функції густини розподілів шумів сенсорів а) кутової швидкості колеса, б) струму якірного кола, в) величини нерівності профілю дороги

Розглянемо для спрощення лише лінійні спостерігачі, адже модифікації спостерігачів для нелінійних моделей матимуть однакові припущення щодо шуму сенсорів як і для лінійних моделей. На рис. 2.26 показано результати оцінки пружного моменту і нормальної реакції. Як видно із графіків, протягом усього часу моделювання найкраще відтворює значення координат спостерігач на основі фільтру частинок. Фільтр Калмана і Люенбергера дають відмінні від реальної криві, особливо

на початку розгону колісного модуля, як для оцінки нормальної реакції, так і для пружного моменту.

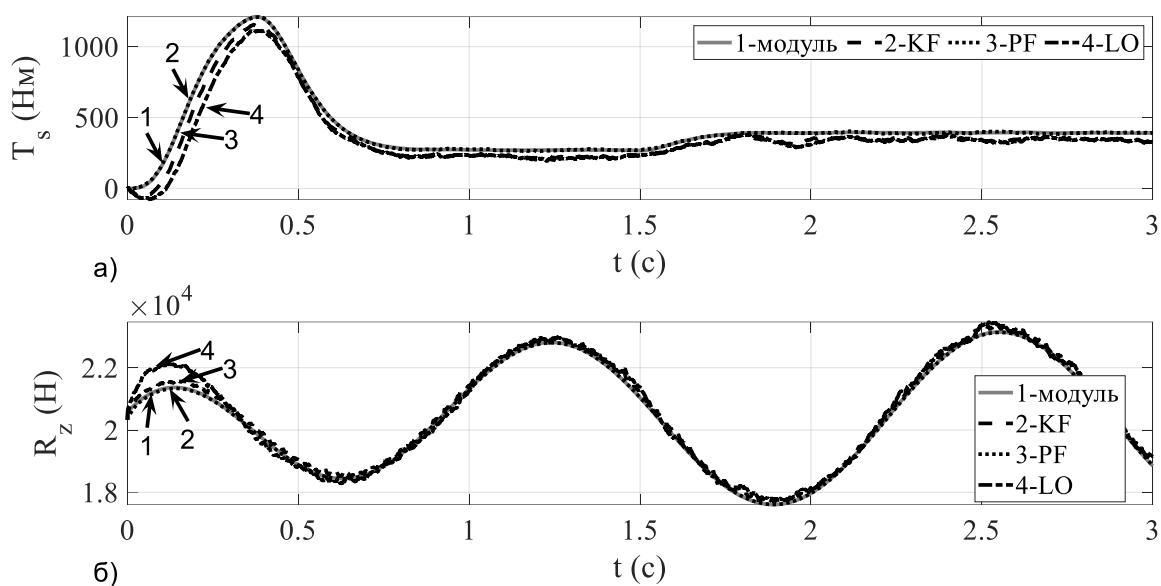


Рис. 2.26 – Графіки оцінених спостерігачами значень а) пружного моменту та б) нормальної реакції

На рис. 2.27 показано графіки середньоквадратичної похибки спостереження для кожного із спостерігачів. Фільтр частинок дає найкращу точність спостереження при дії негаусового розподілу збурень.

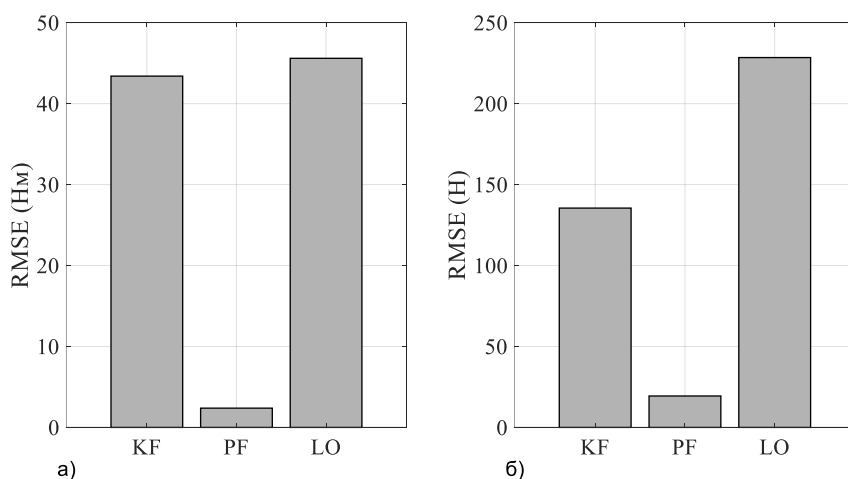


Рис. 2.27 – Графіки RMSE а) для оцінки крутного моменту та б) для оцінки нормальної реакції

2.2.1.4 Порівняльне дослідження спостерігачів станів при невідомих початкових умов

Швидка збіжність спостерігача допомагає поліпшити можливість відстеження станів системи для довільного розходження між реальним та оціненим початковими умовами. Ця властивість спостерігачів істотно важлива, якщо система має швидку динаміку і її стани швидко змінюються. Таким чином, час збіжності є одним з основних критеріїв ефективності спостерігачів лінійного та нелінійного динамічного об'єкту.

Недостатня швидкість збіжності може негативно впливати на процес спостереження у режимі реального часу. Аналіз часу збіжності виконано для наступних спостерігачів: фільтр Калмана (KF), розширений фільтр Калмана (EKF), Unscented Kalman Filter (UKF), фільтр частинок (PF), спостерігач Люенбергера (LO). Дослідження проводилися при використанні як нелінійної математичної моделі колісного модуля, переміщення якого моделювалося в умовах стохастичної місцевості, так і спрощеної лінійної моделі для оцінки ефективності лінійних спостерігачів.

Для порівняння ефективності алгоритмів спостереження час збіжності вивчався за різних значень початкових розбіжностей між спостереженими і дійсними станами. Час збіжності визначався як час, необхідний для остатнього входження до зони 5% похибки спостереження. Початкова розбіжність оцінюваного стану δ була визначена у відсотках від максимально можливого значення змінної стану. Рисунки 2.28 - 2.33 ілюструють результати обчислень вище обраних критеріїв для оцінки спроектованих спостерігачів. Крім того, на рис. 2.33 показано вплив результатів спостерігачів на вихід системи (тобто швидкість колеса).

Спостерігачі для лінійної моделі. Порівняння між PF * з початковою функцією густини розподілу як суміші функцій нормального розподілу та PF з початковим гаусовим розподілом частинок наведено на рисунку 2.28, де PF * демонструє кращі показники збіжності для всього можливого діапазону відхилення початкових умов. Тому, лише PF* буде розглядатися надалі у дослідженні.

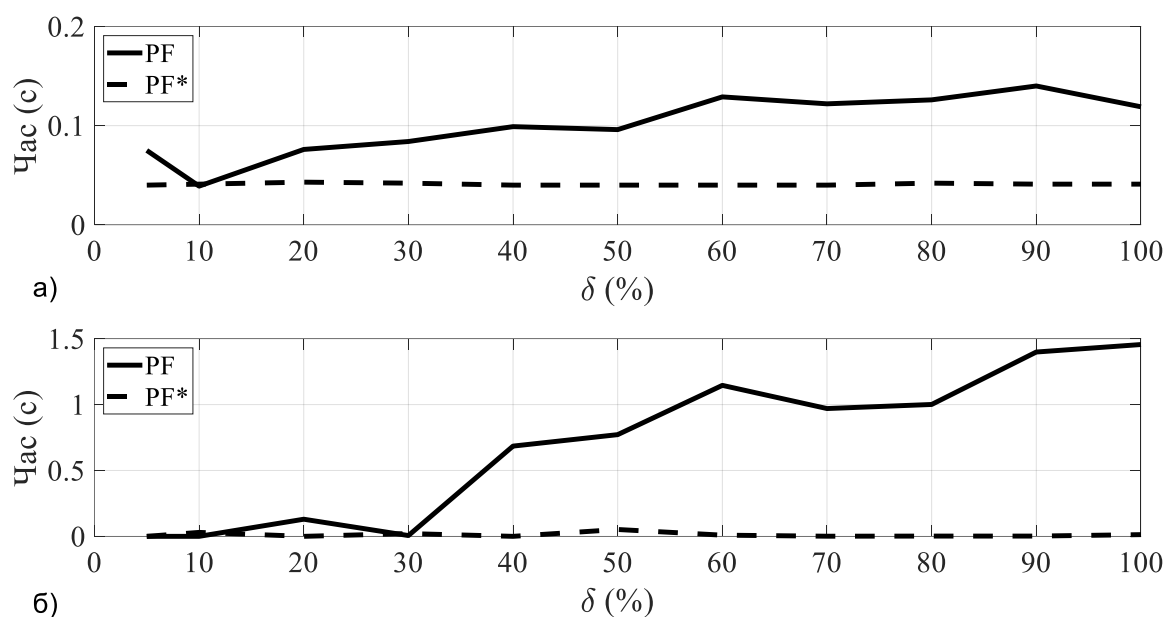


Рис. 2.28 – Час збіжності а) розрахункового пружного моменту і б) розрахункової нормальної реакції PF з Гауссовим початковим розподілом та PF* з функцією густини ймовірності суміші

Час збіжності спостерігачів для лінійної моделі модуля наведено на рисунку 2.29. Можна зробити висновок, що спостерігачі забезпечують різні значення часу збіжності, щоб спостерігати пружний момент і нормальну реакцію шини. Як видно, PF* дає найкращі результати збіжності. KF дає дещо гірші результати збіжності, ніж PF*, але він все ще швидший ніж LO. На рис. 2.30 представлені результати оцінки пружного моменту та нормальної реакції шини у часовій області. Як видно, PF* забезпечує найшвидшу збіжність спостережуваних координат до реальних значень.

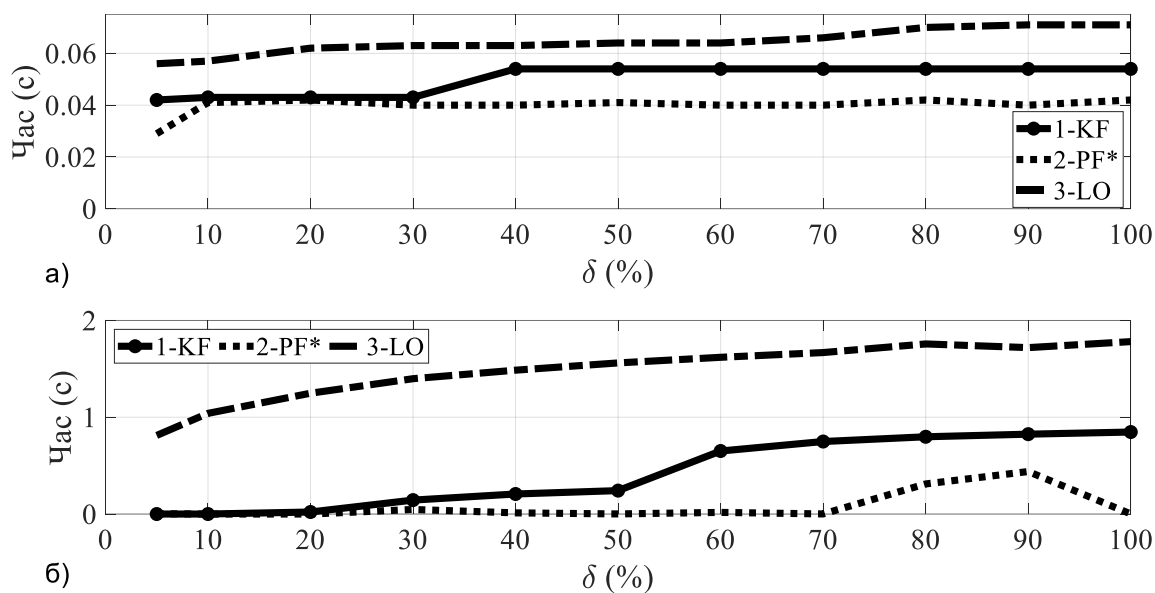


Рис. 2.29 – Час збіжності а) пружного крутного моменту та б) нормальної реакції, оціненої лінійними спостерігачами, в зону п'ятипроцентної помилки

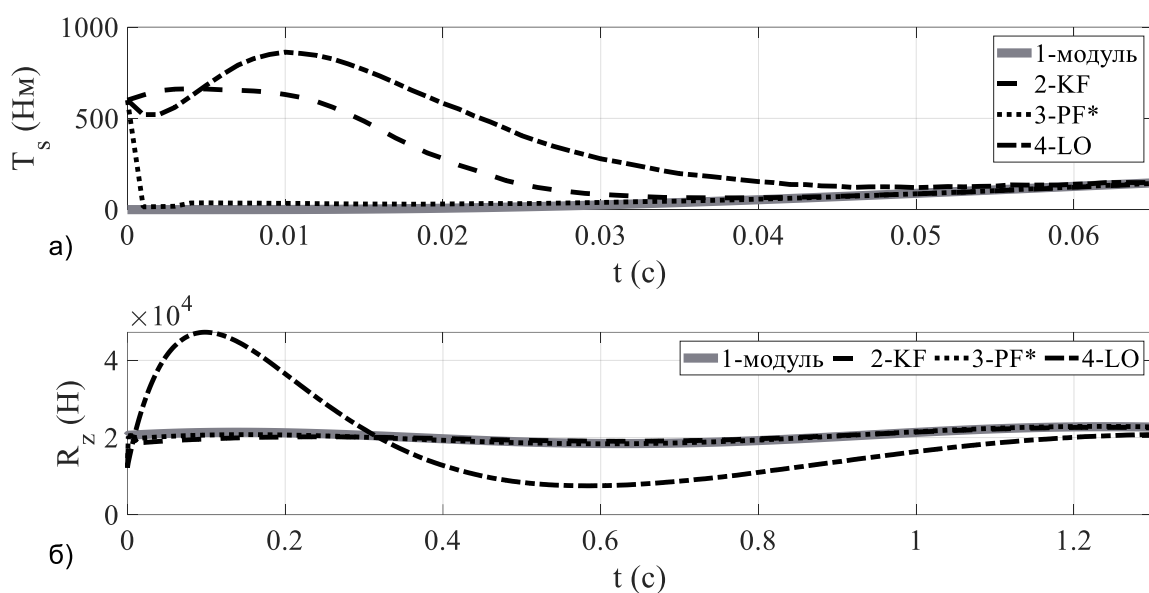


Рис. 2.30 – а) Пружний момент і б) нормальна реакція шини, оцінена лінійними спостерігачами

На рис. 2.31 - 2.32 представлені результати оцінки станів у випадку нелінійної моделі. Як показано на рис. 2.31, EKF та UKF дають подібні результати з результатами, отриманими для KF, показаними на рисунку 2.29. PF* показує найкращі результати.

Порівнюючи результати лінійної та нелінійної моделей, можна зробити висновок, що три спостерігачі, засновані на фільтрі Калмана, мали однакові властивості збіжності, коли початковий стан відрізняється від реального стану. PF* дає найкращі результати як для лінійних, так і для нелінійних моделей. Натомість, спостерігач Люенбергера показав найгірші показники збіжності.

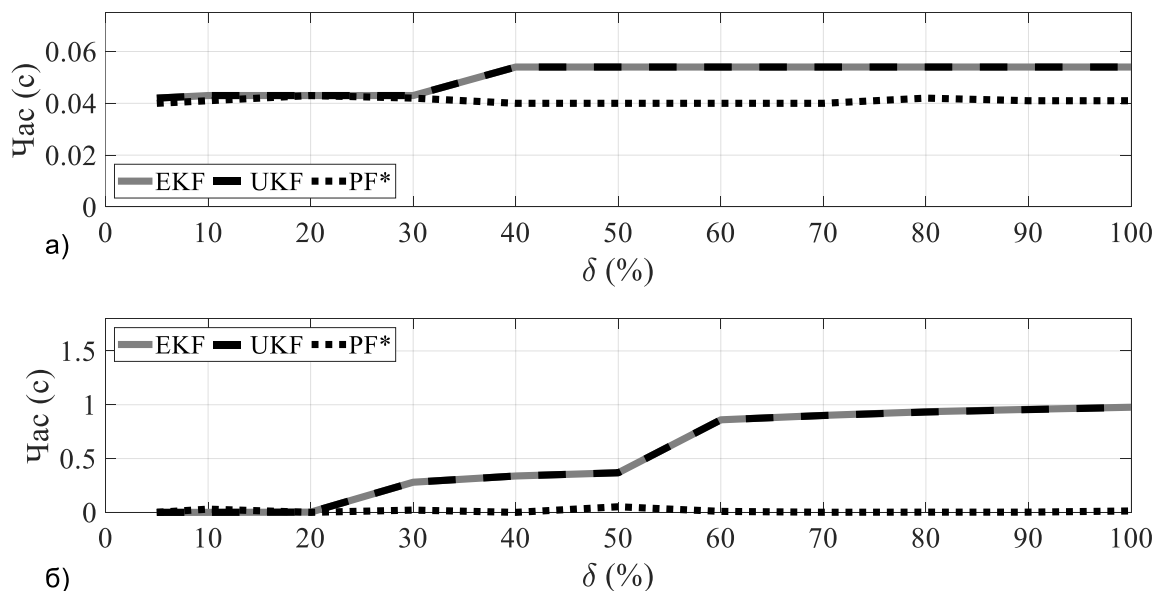


Рис. 2.31 – Час збіжності спостережених а) пружного моменту та б) нормальної реакції нелінійними спостерігачами до 5% зони відхилення

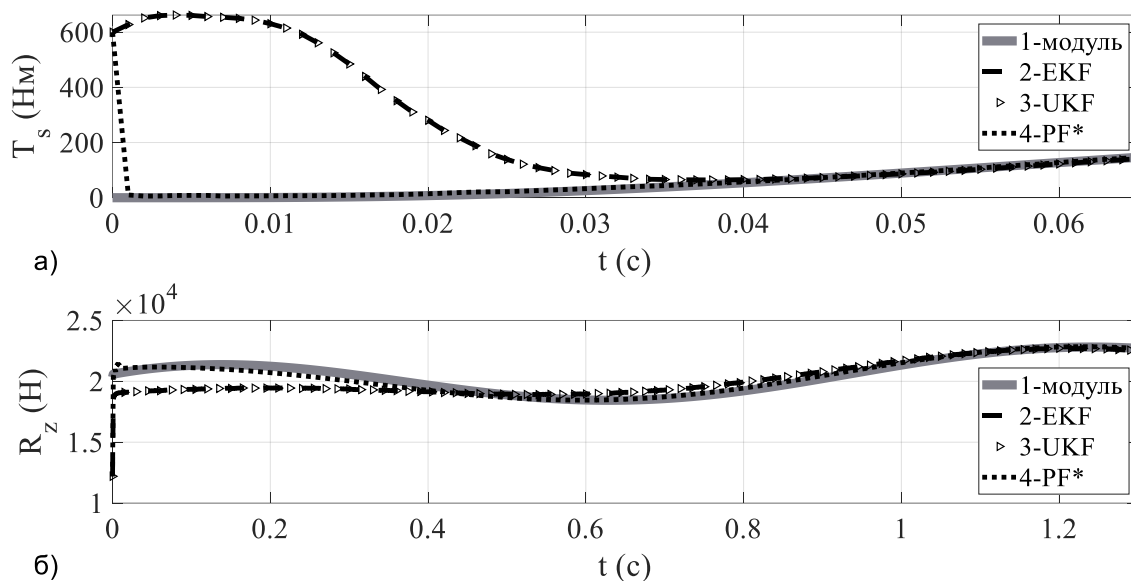


Рис. 2.32 – а) Крутний момент та б) нормальна реакція оцінені нелінійними спостерігачами

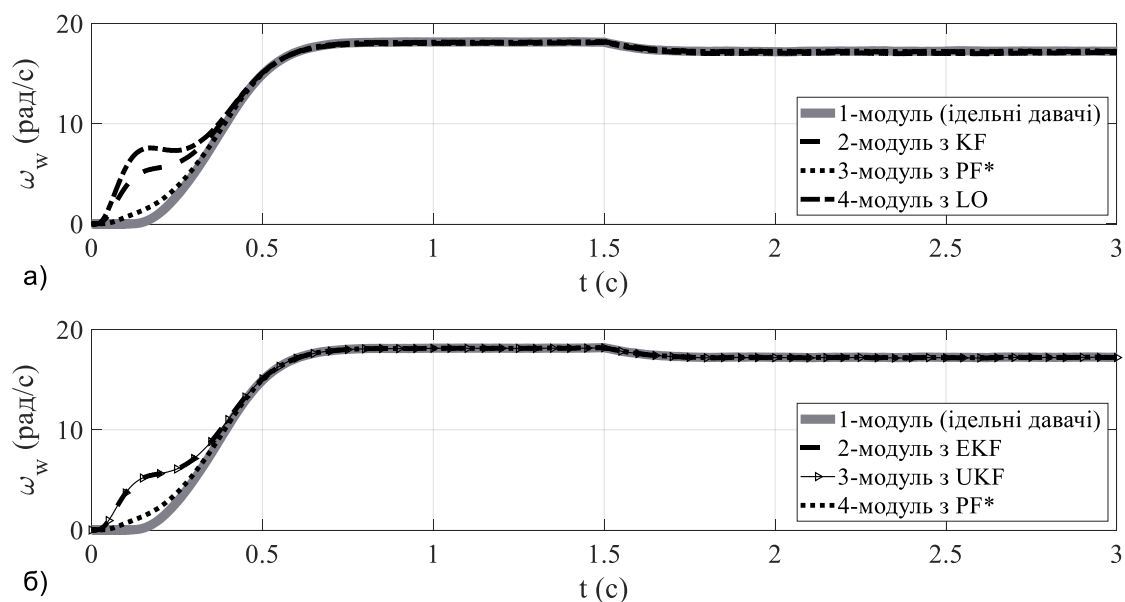


Рис. 2.33 – Вихід динамічної системи (швидкість колеса), при застосуванні а) лінійних і б) нелінійних спостерігачів

Для замкнених систем керування швидкість збіжності впливає на якісні характеристики системи (рис. 2.33).

2.2.1.5 Порівняння обчислювальних затрат спостерігачів

Щоб забезпечити функціонування спостерігача в режимі реального часу, алгоритм спостереження повинен оцінити стани швидше за встановлений обладнанням крок інтегрування. З іншого боку, чим менше обчислювальна складність алгоритму спостереження, тим більше часу залишається на формування керуючого впливу. Тому, у роботі проведено порівняння часів обрахунку, затрачених на функціонування різних алгоритмів спостереження. В якості порівняльної величини вибраний середній час обчислення, який можна визначити як

$$ACT = \frac{\sum_i^{N_t} time_i}{N_t} \quad (2.65)$$

де N_t – це кількість ітерацій, $k=1,2$; $i=1,2,\dots,N_t$; $time_i$ – обчислювальний час однієї ітерації.

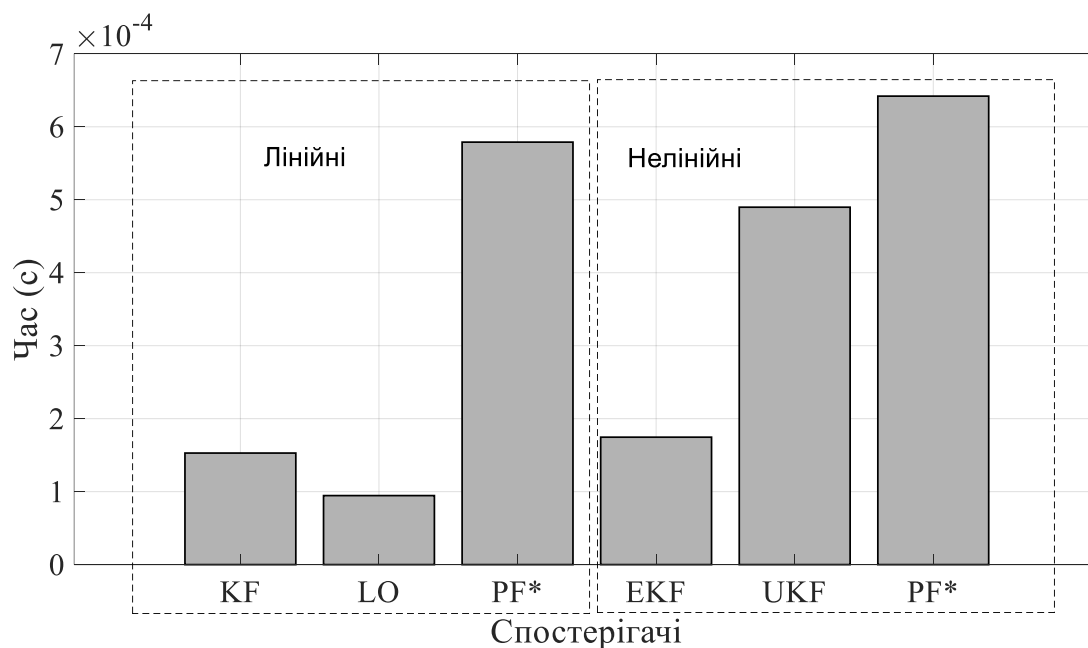


Рис. 2.34 – Середній обчислювальний час

На рисунку 2.34 показані результати середнього обчислювального часу для лінійних та нелінійних спостерігачів. Як видно з рисунку, використання лінійних спостерігачів значно скорочує час обчислення на відміну від нелінійних спостерігачів. Однак слід зазначити, що використання лінійних спостерігачів обмежене точністю оцінки координат в нелінійних системах, зокрема і для транспортних засобів. Для обчислення PF потрібно більше часу, ніж для інших спостерігачів, що накладає певні обмеження його використання для задач реального часу.

2.3 Вплив вибору чисельного методу на результати спостереження компонентів вектору стану динамічної системи в режимі реального часу

Реалізація алгоритму спостереження на мікроконтролері або симуляція в режимі реального часу передбачає переведення моделі досліджуваного об'єкта в дискретну область. Вибір чисельного методу є доволі складною задачею, яка передбачає врахування багатьох факторів таких як обсяг обчислень, порядок точності, стійкість до похибок заокруглення, особливість задачі, яка розв'язується та ін. [117-121]. У середовищі імітаційного моделювання Simulink реалізовано низка чисельних методів, які підтримують симуляцію в режимі реального часу і дозволяють

генерувати розроблений в середовищі MATLAB/Simulink алгоритм в C code для подальшого завантаження на мікроконтролер.

Як відомо, використання неявного чисельного методу характеризується високою обчислювальною складністю, яка в декілька разів перевищує складність явних методів. Необхідність застосування неявного метода зумовлюється жорсткістю системи диференціальних рівнянь. У літературі жорсткою задачею називають модель із дуже рознесеними сталими часу або з великою константою Лібшиця, яка є нормою матриці Якобі для правої частини диференціальних рівнянь. Також, жорсткою задачею називають розв'язок із повільним характером зміни, на який накладаються швидкозмінні збурення [117-118].

Розглядаючи лінійну модель колісного модуля, жорсткість системи можна визначити відносно критерію жорсткості, який полягає у знаходженні власних значень матриці системи A . Параметром, який характеризує жорсткість системи, є коефіцієнт жорсткості:

$$K = \frac{\max_k |Re(\lambda_k)|}{\min_k |Re(\lambda_k)|}$$

Систему вважають жорсткою, якщо коефіцієнт жорсткості значно більше одиниці. Коефіцієнт жорсткості моделі модуля становить 503,7333. Якщо розглядати окремо обертову і нормальну моделі динаміки модуля, то коефіцієнти жорсткості становлять 503,7333 і 7,8242 відповідно. Як видно із числових значень, коефіцієнт жорсткості усієї системи значно зумовлений обертовою динамікою. Тому, розбивання моделі на дві під-моделі дозволяє використовувати локальні методи інтегрування до кожної із них. Такому підходу сприяє використання каскадної структури спостерігача, для яких можна використовувати різні чисельні методи.

Якщо ж розглядати нелінійну модель модуля, то для оцінки жорсткості обчислюються локальні коефіцієнти жорсткості на основі матриці Якобі правої частини задачі Коші. На рис. 2.35 представлені залежності коефіцієнта жорсткості системи від станів динамічної системи, так як матриця Якобі системи є функцією від швидкості колеса і швидкості ротора двигуна. Для отримання залежності від одного параметру, прийнято використати розбіжності швидкостей. Жорсткість нелінійної

моделі модуля зменшується із наростанням кутової швидкості валу двигуна і колеса, проте є доволі значною на всьому діапазоні зміни станів.

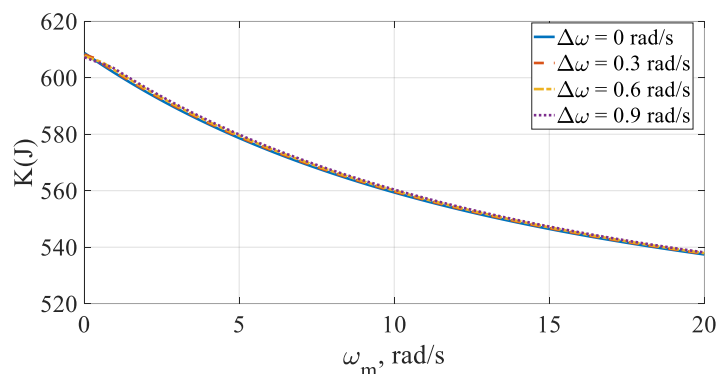


Рис. 2.35 – Коефіцієнт жорсткості нелінійної моделі колісного модуля

Виходячи із вищесказаного, динаміка модуля описується системою жорстких диференціальних рівнянь, для розв'язку яких необхідний неявний метод. Широкого застосування набули методи: неявний метод Ейлера, неявний метод середньої точки, методи Гіра, метод трапецій. Проте, обчислювальні затрати таких методів є великими, що зумовлено необхідністю розв'язувати систему нелінійних рівнянь на кожному кроці розрахунку. З іншого боку, при використанні явних методів для жорстких задач накладається обмеження на крок інтегрування, що може збільшити обсяг обчислень за рахунок малого кроку інтегрування. Таке обмеження на крок також впливає на точність розрахунку при використанні багатокрокових методів, адже збільшується вплив локальної похибки заокруглення. Тому, для синтезу спостерігачів станів системи, яка відповідає жорсткій задачі, необхідно використовувати неявний метод.

Для аналізу вибрано неявний метод Ейлера для синтезу спостерігача фільтра частинок і проведено його порівняння із явними методами: методом Ейлера і методами прогноз-корекція від першого до четвертого. Методи із вищим порядком не розглядалися, тому що не значно підвищують точність розв'язку [120-121] і зокрема у [119] показано, що збільшення порядку методу призводить до зниження стійкості числового методу.

Для простоти розглянуто спостерігач станів обертальної системи, який входить до каскадної схеми спостерігача [123-125]. Проведено дослідження для лінійної і нелінійної моделі модуля. Розглянуто розімкнену систему на вхід якої подано

сигнали, зображені на рис. 2.36, де u_1 – це напруга керування, T_{w1} – момент навантаження. У середовищі MATLAB знайдено перехідну характеристику системи на задані сигнали (рис. 2.37). Отримані числові значення реакції системи використанні для дослідження роботи спостерігача (вхід і корекція), а також для оцінки точності спостереження.

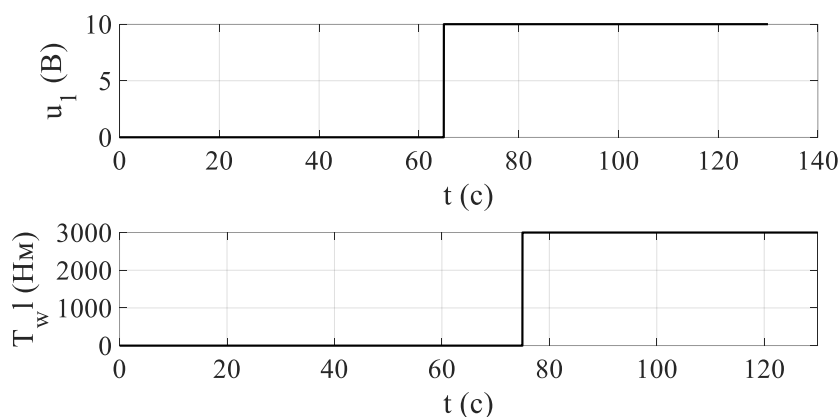


Рис. 2.36 – Вхідний сигнал керування і сигнал збурення

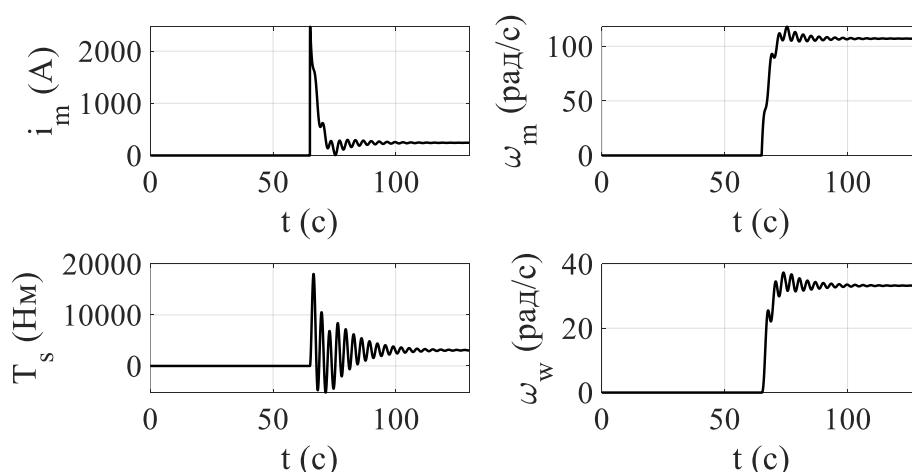


Рис. 2.37 – Перехідні характеристики розімкненої системи

Для оцінки точності було розраховано середньоквадратичне відхилення спостережених координат, нормалізоване до відхилення отриманого явним методом Ейлера. Як видно із результатів рис. 2.38, використання методів прогноз-корекція підвищує точність спостереження порівняно із методом Ейлера. При цьому підвищення порядку методу не призводить до значного підвищення точності оцінки. Тому, раціональним є використання методу першого порядку. Також, як зазначено у [117] використання багатокрокових методів для розв'язку негладких функцій є

небажаним через низьку точність. Алгоритм фільтру частинок на відміну від інших методів спостереження, таких як фільтр Калмана, спостерігач Люенбергера, передбачає довільний характер зміни оцінюваної величини, збіжність якої необов'язково описується гладкою функцією. Тому, використання багатокрокових методів для фільтру частинок є обмеженим і небажаним. Використання неявного методу дає задовільні результати для оцінки всіх станів системи, на відміну від явних методів, які призводять до більшої похибки спостереження струму якірного кола, якому притаманна швидка динаміка.

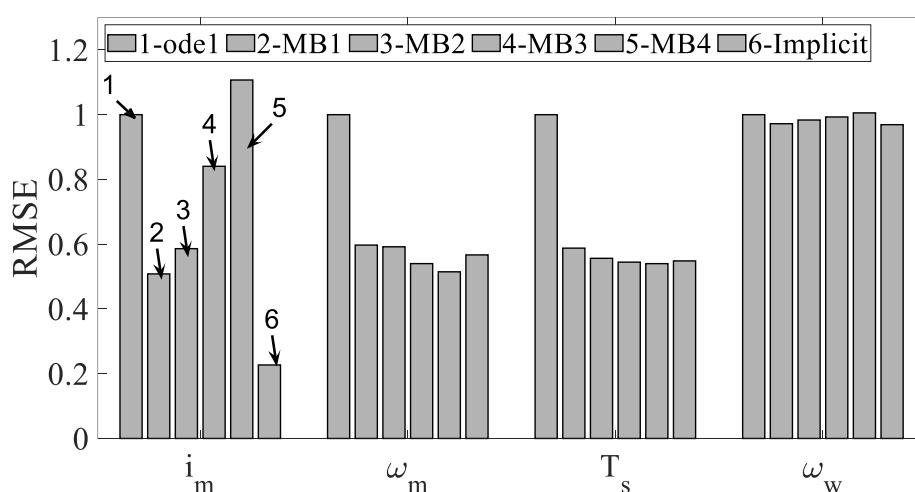


Рис. 2.38 – RMSE чисельних методів для лінійної моделі із використанням спостерігача частинок (ode1 – явний метод Ейлера, MB1-MB4 – методи прогноз-корекція відповідних порядків, Implicit – неявний метод Ейлера)

Ще одним фактором, який необхідно враховувати при виборі методу є обчислювальна складність. На рис. 2.39 представлено середній час обчислення для спостереження координат спостерігачем із різними чисельними методами. Зрозуміло, що підвищення порядку збільшує обчислювальні затрати. Доцільність використання методу прогноз-корекція першого порядку на відміну від вищих порядків є у тому, що він не значно підвищує час розрахунку і забезпечує задовільну точність спостереження. Використання неявного методу Ейлера потребує часу розрахунку незначно більшого ніж інші методи, при цьому забезпечуючи хорошу точність спостереження.

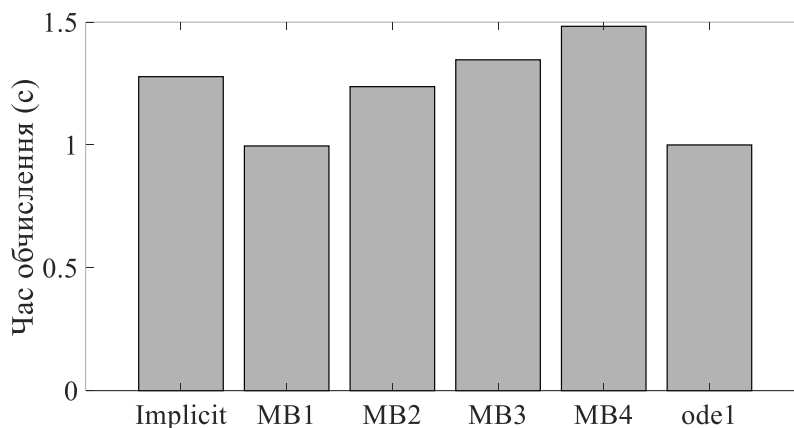


Рис. 2.39 – Обчислювальний час чисельних методів для лінійної моделі (ode1 – явний метод Ейлера, MB1-MB4 – методи прогноз-корекція відповідних порядків, Implicit – неявний метод Ейлера)

Для нелінійної моделі модуля неявний метод потребує більшого часу розрахунку, як видно із рис. 2.40. Проте, неявний метод дозволяє використовувати більший крок інтегрування не втрачаючи бажаної точності спостереження, як це видно із рис. 2.41. Зміна кроку інтегрування від половини найменшої сталої часу до 1.5 сталої не значно впливає на точність спостереження, у той час як для явних методів, використання кроку інтегрування більшого ніж найменша стала часу призводить до різкого збільшення похибки спостереження.

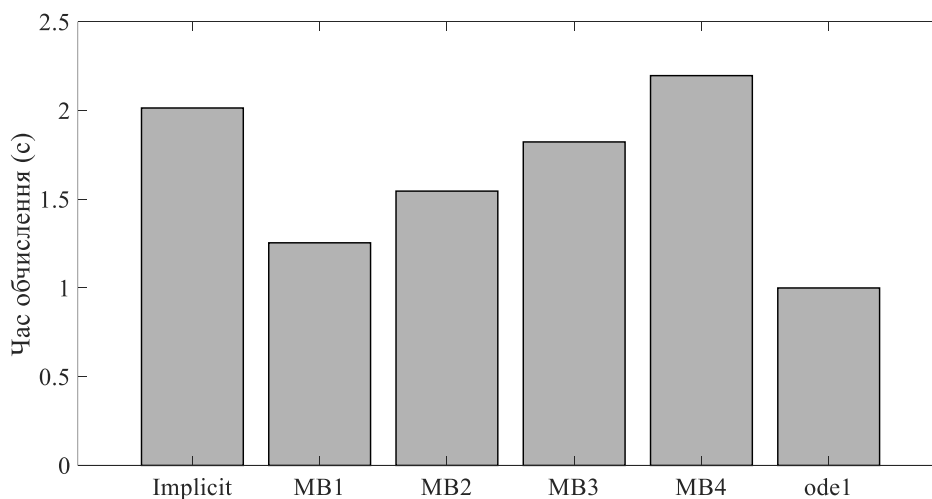


Рис. 2.40 – Обчислювальний час чисельних методів для нелінійної моделі (ode1 – явний метод Ейлера, MB1-MB4 – методи прогноз-корекція відповідних порядків, Implicit – неявний метод Ейлера)

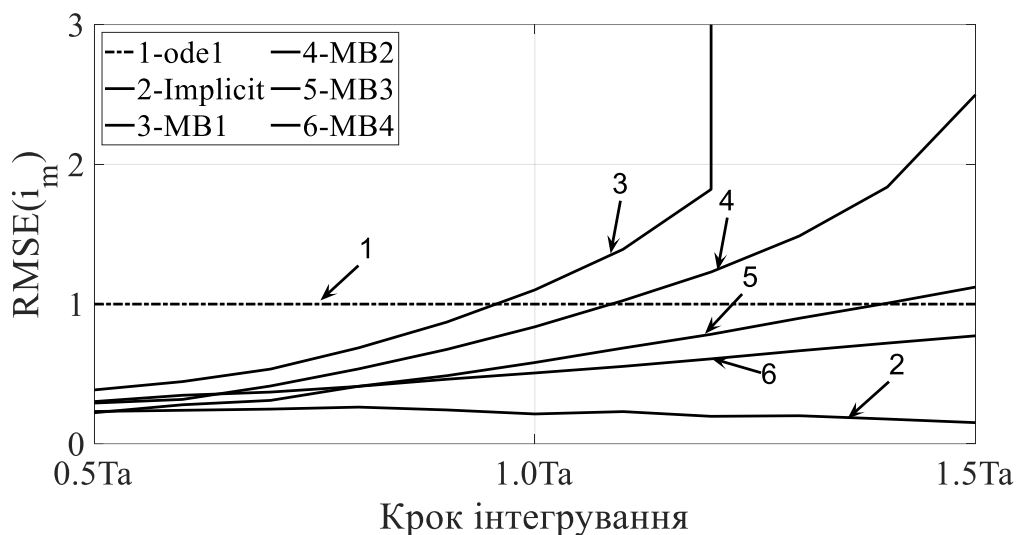


Рис. 2.41 – Залежність точності спостереження струму фільтром частинок із використанням різних чисельних методів від кроку інтегрування (ode1 – явний метод Ейлера, MB1-MB2 – методи прогноз-корекція відповідних порядків, Implicit – неявний метод Ейлера)

2.4 Висновки

На основі проведених досліджень із використанням комп'ютерної моделі колісного модуля можна зробити наступні висновки:

- 1) Складні дорожні умови вимагають швидкої реакції системи керування для забезпечення задовільного рівня мобільності транспортного засобу. Для функціонування такої системи необхідним є визначення коефіцієнта мобільності в режимі реального часу.
- 2) При виконанні досліджень з однаковим кроком інтегрування, спостерігач на основі фільтра частинок показав на відміну від фільтра Калмана і спостерігача Люенбергера найкращу точність спостереження при дії гаусових і довільних за природою збурень на датчики системи керування, а також найкращу збіжність при невідомих початкових значеннях спостережених координат. У той же час спостерігач на основі фільтра частинок має високу обчислювальну складність на відміну від інших досліджуваних алгоритмів, що може зменшити його привабливість і потребує удосконалення даного алгоритму.

- 3) Враховуючи особливості моделі колісного модуля, в алгоритмі роботи спостерігача доцільним є використання неявних методів чисельного інтегрування з низькими обчислювальними затратами.

РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ СПОСТЕРІГАЧІВ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ТЕОРІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

3.1 Синтез нечітких спостерігачів Люенбергера та можливість їхнього застосування для систем, що працюють в режимі реального часу

3.1.1 Нечіткий спостерігач Люенбергера для лінійних систем

Традиційний підхід на основі методу Люенбергера для синтезу спостерігачів (рис. 3.1.а) використовує одну матрицю коефіцієнтів підсилення, яка повинна забезпечити нульову похибку спостереження щонайменше у статичному режимі. Покращити якість спостереження змінних стану можна, налаштувавши матрицю спостерігача L_k на вищу швидкодію. Однак, як показано в Розділі 2.2, при цьому на роботу системи впливатиме як динаміка самого спостерігача, викликана наявністю нулів передавальної функції, так і його чутливість до шумів сигналів датчиків вимірюваних координат системи та збурень у самій системі. Менші значення коефіцієнтів елементів матриці L_k робить спостерігача менш чутливим до збурюючих впливів, проте, зменшується швидкість збіжності спостерігача. Для усунення згаданих недоліків пропонується застосування теорії нечітких множин для проектування спостерігача Люенбергера з декількома матрицями посилення. Синтезоване сімейство спостерігачів Люенбергера мають на різну швидкодію. Нечітка логіка здійснює перемикавання між можливими матрицями коефіцієнтів спостерігача залежно від похибки між оціненими значеннями координат системи та вимірюваннями, отриманих із датчиків. Для налаштування коефіцієнтів матриці спостерігача діапазон похибок можна розділити на багато відрізків, яким призначені відповідні функції належності. Однак велика кількість функцій належності ускладнює налаштування алгоритму і не у всіх випадках підвищує його точність [92]. У цьому дослідженні були використані три функції належності (рис. 3.1б.). Таким чином, похибку можна охарактеризувати як "Мала" (Small), "Середня" (Medium) та "Велика" (High). Якщо похибка спостереження в діапазоні "Мала", коефіцієнти

посилення спостерігача приймають невеликі значення, щоб зробити спостерігача більш стійким до збурюючих впливів і уникнути коливних перехідних процесів. Значення коефіцієнтів матриці спостерігача слід збільшувати, коли значення похибки змінюється з діапазону "Small" до "Medium", щоб збільшити швидкодію спостерігача. Коли похибка між спостереженими і вимірними виходами системи у зоні " High ", а значення коефіцієнтів матриці спостерігача Люенбергера матимуть значення співвідносні із налаштуваннями для попередньої зони, вихід спостерігача може мати коливні процеси. Щоб уникнути такої розбіжності і зменшити вихідну похибку сигналу системи, значення матриці спостереження знижується порівняно зі значенням для області значень "Medium". Нечіткий спостерігач Люенбергера (Fuzzy-LO) працює за схемою традиційного підходу LO, але на відміну від якого, у нечіткому спостерігачі матриця посилення L_k розраховується як вихід нечіткої моделі Takagi-Sugeno (T-S):

$$L_k = \frac{v_1 L_s + v_2 L_m \dots + v_N L_h}{\sum_j v_j} \quad (3.1)$$

де, v_j - функція належності j -го правила бази правил, $j = 1, 2, \dots, N$, N - кількість правил $N=M^2$, M – кількість вимірювань (датчиків); $L_{s,m,h}$ - матриця спостерігача, позначена як s, m, h для кожної нечіткої множини. У випадку одного вимірювання значення v_j є рівним значенню функції належності входу відповідній μ_i .

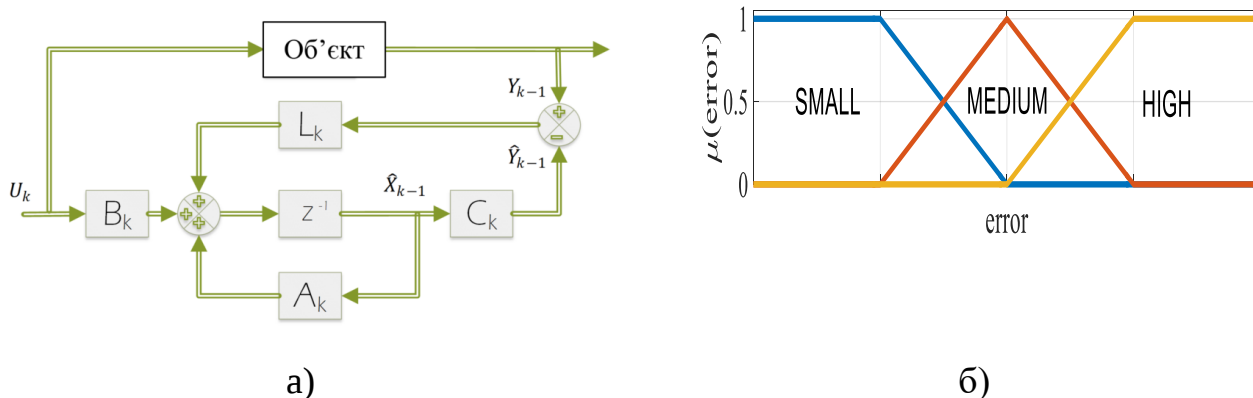


Рис. 3.1 – Структура спостерігача Люенбергера; б) функції належності входу нечітким множинам

Синтезовані значення коефіцієнтів спостерігача для різних областей зміни похибки спостереження координат наведені у (3.2)-(3.4).

$$L_s = \begin{bmatrix} -137.59 & -104.65 \\ 151.74 & 125.39 \\ -2113.69 & 140.96 \\ 150.45 & 0.14 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$L_m = \begin{bmatrix} -647.49 & -1927.30 \\ 213.94 & 1001.02 \\ 5808.55 & 18212.13 \\ 501.93 & 2.21 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$L_h = \begin{bmatrix} -470.30 & -1206.40 \\ 194.36 & 750.89 \\ 2249.74 & 8956.26 \\ 401.45 & 1.39 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

На рис. 3.2а представлена похибка оцінки крутного моменту, яка отримана при застосуванні нечіткого спостерігача Люенбергера. Із графіка похибки видно, що запропонований нечіткий спостерігач зумовлює кращу швидкодію та забезпечує меншу похибку оцінювання в стаціонарних станах системи на відміну від класичного спостерігача LO. Така динаміка нечіткого спостерігача виходить із властивостей нечіткої логіки, яка дозволяє плавно переходити від одного налаштування матриці спостерігача до іншого, не зумовлюючи втрати стійкості системи. Наприклад, на рис. 3.2б представлені залежності крутного моменту, які отриманні при використанні нечіткого спостерігача і трьох традиційних спостерігачів Люенбергера, матриці посилення яких тотожні компонентам нечіткої моделі Takagi-Sugeno, яка використовується для розрахунку матриці нечіткого спостерігача.

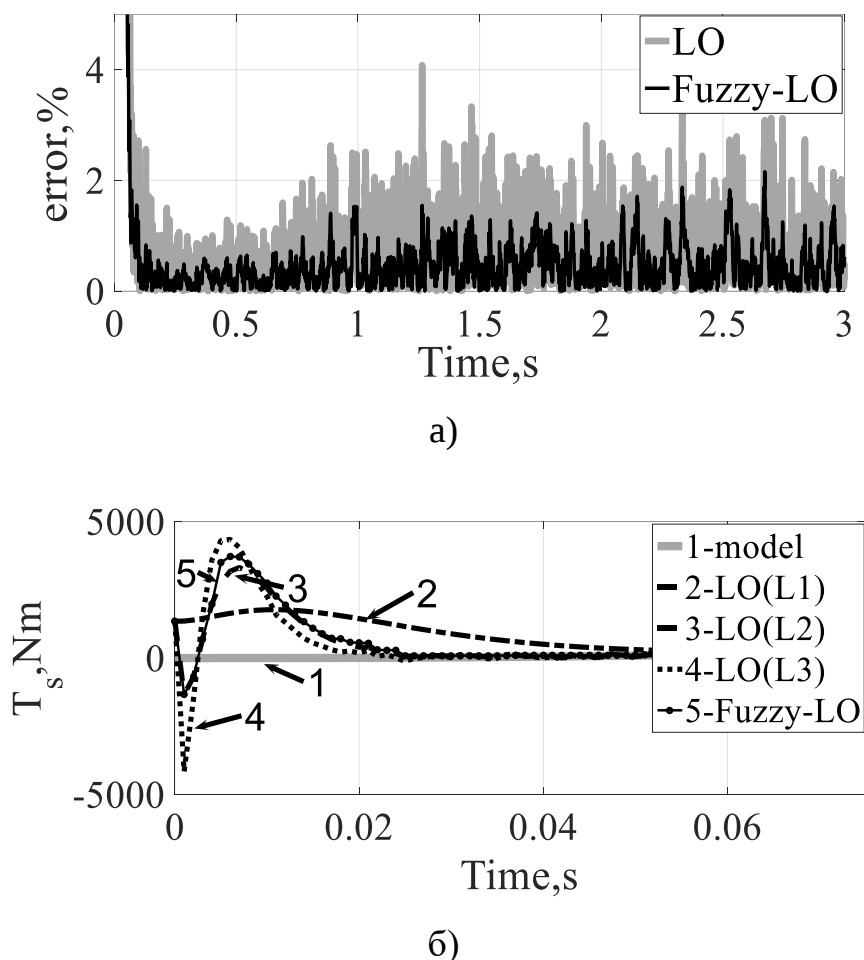


Рис. 3.2 – а) Похибка спостереження для спостерігача Люенбергера та нечіткого спостерігача Люенбергера; б) Динаміка зміни похибки спостереження крутного моменту нечітким спостерігачем і спостерігачами з сімейства спостерігачів, які утворюють нечіткий спостерігач

На рис. 3.3 представлено динаміку роботи спостерігачів при оцінці пружного крутного моменту у часовій області із припущенням про неправильні початкові умови. Нечіткий спостерігач Люенбергера забезпечує менший час збіжності порівняно з KF та класичним LO. Можна сказати, що використання нечіткої логіки для синтезу спостерігача Люенбергера дозволяє зменшити чутливість до збурень, збільшити збіжність алгоритму і, навіть, забезпечити аналогічну KF збіжність при відповідному налаштуванні параметричних (параметри функцій належності, коефіцієнти матриць спостерігачів сімейства) ступенів свободи нечіткого спостерігача.

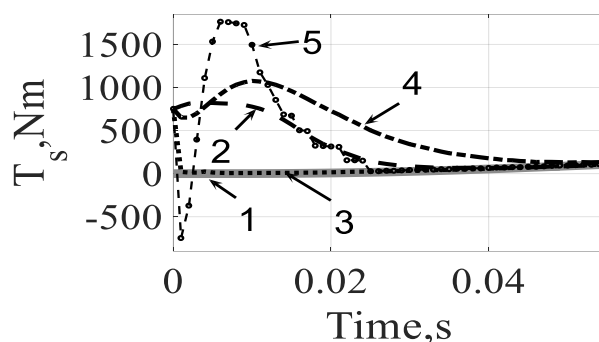


Рис. 3.3 – Динаміка зміни похибки спостереження при оцінці пружного моменту (1 – модуль, 2 – KF, 3 – PF*, 4 – LO, 5 – Fuzzy-LO) при неправильних початкових умовах

Як відомо, спостерігачі використовують для отримання інформації про координати вектора змінних стану для реалізації зворотного зв'язку у синтезованій системі. Як зазначалося вище, динамічні процеси в спостерігачі впливають на динаміку замкненої системи керування. На рис. 3.4 представлені перехідні процеси вихідної координати системи керування, які отриманні при застосуванні спостерігачів Калмана, фільтру частинок, лінійного спостерігача Люенбергера та нечіткого спостерігача Люенбергера при розбіжності у значеннях початкових умов спостерігача і системи модуля колеса.

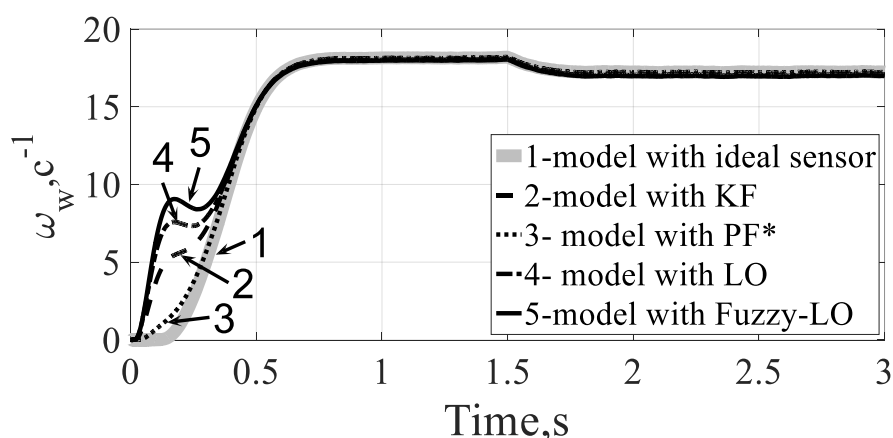


Рис. 3.4 – Графік вихідної координати лінійної системи керування із нечітким спостерігачем Люенбергера

Недоліком нечіткого спостерігача LO є велика початкова миттєва похибка спостережуваної координати від її фактичного значення величини (як показано на рис. 3.3). Це у свою чергу негативно впливає на динаміку вихідної координати

системи, як показано на рис. 3.4. Варто зауважити, що система з синтезованим нечітким спостерігачем демонструє гіршу якість керування. Цей недолік буде зменшуватися при ускладненні структури нечіткого спостерігача. Проте це призведе до збільшення обчислювальних затрат при його реалізації.

3.1.2 Нечіткий спостерігач Люенбергера для нелінійних моделей

Як показано в Розділі 1, для спостереження станів нелінійної системи може використовуватися розширений спостерігач Люенбергера (“extended Luenberger observer”). При синтезі такого спостерігача необхідно обчислювати похідні Лі, що суттєво ускладнює процес синтезу. Для уникнення обчислення похідних Лі, можна використовувати нечіткий спостерігач Люенбергера для нелінійних систем. Цей спостерігач поєднує кілька лінійних спостерігачів, які синтезуються в певних точках лінеаризованої нелінійної системи із використання підходу Тейлора. Нечітка логіка виконує перемикування між локальними спостерігачами залежно від того у якій області простору станів знаходиться систем. Розбивання простору стану на підобласті для формування функцій належності базується на станах або на входах, які є складовими нелінійностей. На відміну від відомих нечітких спостерігачів Люенбергера [86], у цій роботі пропонується обчислити лише коефіцієнт посилення спостерігача, використовуючи нечітку логіку. Таким чином, рівняння спостерігачів можна спростити і записати як

$$\begin{aligned}\hat{X}_k &= f(\hat{X}_{k-1}, U_k) + L_k(Y_{k-1} - \hat{Y}_{k-1}) \\ \hat{Y}_k &= h(\hat{X}_k, U_k) \\ L_k &= \frac{\beta_1 L_1 + \beta_2 L_2 \dots + \beta_K L_K}{\sum_l \beta_l}\end{aligned}\tag{3.5}$$

де β_l - функція приналежності для нечіткого набору правила l , $l = 1, 2, \dots, K$ і K - кількість правил $K = S$, S - кількість лінеаризованих моделей; L_l - матриця посиленням спостерігача для l -ї лінійної моделі. У випадку одного нечіткого входу (вхід, який визначає, в якій області лінійної моделі розташовані стани), значення β_l дорівнює функції належності μ_l . Коефіцієнт посилення спостерігача для i -ї лінійної моделі

визначається аналогічно як для лінійного нечіткого спостерігача Люенбергера. Коефіцієнти матриці спостерігача є наступними:

$$L_{11} = \begin{bmatrix} -1027.45 & -2740.95 \\ 292.95 & 770.84 \\ -1693.05 & -523.37 \\ 151.04 & 0.14 \end{bmatrix}, L_{12} = \begin{bmatrix} -2136.44 & -6820.77 \\ 376.72 & 1645.82 \\ 13040.75 & 17506.17 \\ 503.16 & 2.20 \end{bmatrix}, L_{13} = \begin{bmatrix} -1778.51 & -5455.48 \\ 352.09 & 1395.89 \\ 6642.61 & 8272.24 \\ 402.4 & 1.39 \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

$$L_{21} = \begin{bmatrix} -283.65 & -467.99 \\ 179.60 & 292.74 \\ -2036.41 & -31.19 \\ 150.86 & 0.14 \end{bmatrix}, L_{22} = \begin{bmatrix} -933.21 & -2876.23 \\ 251.59 & 1168.21 \\ 7399.73 & 18031.38 \\ 502.48 & 2.21 \end{bmatrix}, L_{23} = \begin{bmatrix} -712.61 & -1988.14 \\ 229.94 & 918.13 \\ 3190.12 & 8780.15 \\ 401.96 & 1.39 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Як було згадано раніше, недоліком нечіткого спостерігача LO є велика миттєва похибка спостережуваної величини від фактичної величини; такий недолік притаманний і нелінійному спостерігачу (рис. 3.5). Це у свою чергу негативно впливає на поведінку керованої вихідної координати системи, як показано на рис. 3.6

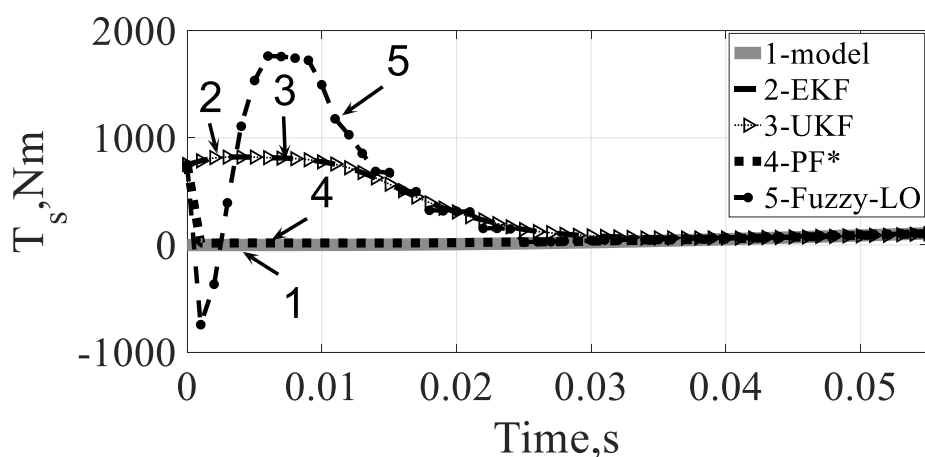


Рис. 3.5 – Динаміка зміни похибки спостереження крутного моменту

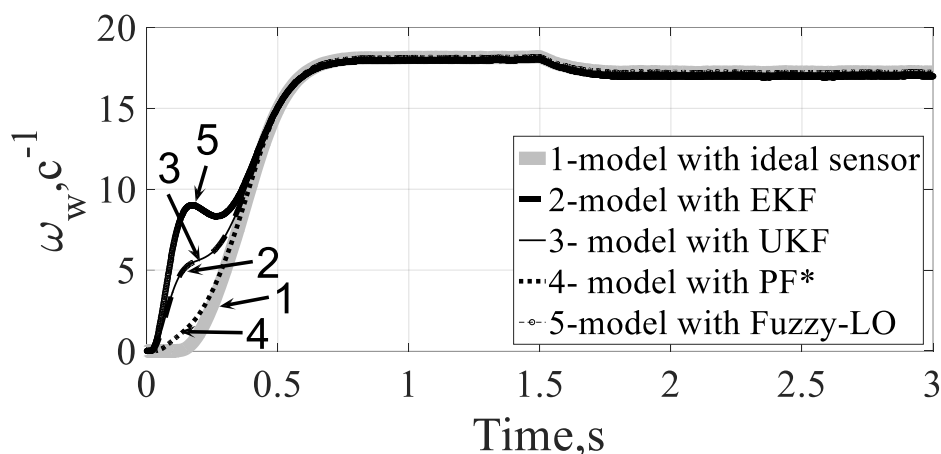


Рис. 3.6 – Залежність зміни регульованої координати у системі керування із нечітким спостерігачем Люенбергера

3.2 Нечіткий спостерігач на основі методу фільтра частинок зі змінною кількістю частинок

Вибір кількості частинок є одним із основних процесів налаштування спостерігача на основі методу фільтра частинок. При цьому необхідно знайти оптимальне співвідношення між точністю спостереження і часом розрахунку [114]. Це співвідношення змінюється при зміні умов спостереження, а саме при зміні сигналів збурення, які діють на систему або отримуються з датчиків. При цьому визначена кількість частинок може уже не задовольняти попередньо встановлені вимоги щодо точності або часу розрахунку. Базуючись на залежності точності спостереження від кількості частинок, можна забезпечувати заданий рівень точності спостереження координат стану, змінюючи кількість частинок, при цьому змінювати і час розрахунку. Відомо, що зручним і плавним способом перемикавання між різними станами може слугувати алгоритм нечіткої логіки. Тому, у даній роботі вибрано саме цей метод, як перемикач між різною кількістю частинок.

Як було сказано раніше, перемикавання кількості частинок може відбуватися залежно від величин розузгодження між спостереженими і виміряними координатами стану [127]. Проте, у випадку використання декількох датчиків, перемикач на основі нечіткої логіки із багатьма вхідними сигналами вимагає великої кількості правил. Для

зменшення бази правил запропоновано використовувати нечіткий перемикач із одним входом. Як варіант вибору входу є спроба взяти до уваги виміри лише одного сенсора. Однак, у такому випадку не враховуватиметься виміри інших сенсорів, що є не бажаним, коли сенсори вимірюють координати підсистем різнотемпної динаміки системи. Тому, у такому випадку необхідно вибрати величину, яка б ідентифікувала похибку спостереження усіх координат.

Провівши аналіз різних методів спостереження, було встановлено, що таким індикатором може слугувати один із параметрів методу рісемплінгу, а саме розширеного методу Монте-Карло [114]. На відміну від звичайних методів рісемплінгу, вищевказаний метод передбачає генерування випадкових частинок, якщо точність спостереження знижується. Одним із параметрів, які ідентифікують зміну точності, є середнє значення ваг частинок, яке обчислюється на основі густин розподілів відносних ймовірностей появи в околі виміряного значення координат стану. Тобто, ваги характеризують те, як близько частинка розміщена до виміряного значення, і в свою чергу, похибку оцінки стану кожною окремою частинкою. Зменшення середнього значення ваг усіх частинок відповідає збільшенню похибки спостереження. У такому випадку необхідно генерувати нові частинки, щоб збільшити ймовірність попадання частинок у область реального стану системи. Для зменшення впливу шуму на частоту генерації нових випадкових точок, у роботі [114] було запропоновано знаходити співвідношення між середніми значеннями ваг частинок, обчислених на декількох w_{fast} чи багатьох w_{slow} попередніх кроках оцінки.

$$w_{fast} = w_{av} + \alpha_{fast} (w_{fast} - w_{av}) \quad (3.8)$$

$$w_{slow} = w_{av} + \alpha_{slow} (w_{slow} - w_{av}) \quad (3.9)$$

де w_{av} є середніми значеннями ваг частинок на поточному кроці обчислення, α_{fast} і α_{slow} коефіцієнти, що визначають скільки попередніх кроків береться до уваги при обчисленні середніх значень ваг ($\alpha_{fast} \gg \alpha_{slow}$). Співвідношення між w_{fast} і w_{slow} характеризує зміну похибки. Якщо $w_{fast}/w_{slow} = 1$, тоді на визначеному діапазоні похибка без змін, якщо $w_{fast}/w_{slow} < 1$ - похибка збільшилася, якщо $w_{fast}/w_{slow} > 1$ - похибка зросла.

Таблиця 3.1 – Правила нечіткого перемикача

w_{fast}/w_{slow}	Small	Medium	High
$N_{particles}$	50	100	250

Таким чином, співвідношення між короткостроковим w_{fast} та довгостроковим w_{slow} середнім значеннями ваг точок було обрано як нечіткий вхід для визначення кількості частинок на кожній ітерації спостереження. Функції належності для вибраного входу нечіткого перемикача показані на рис 3.7.

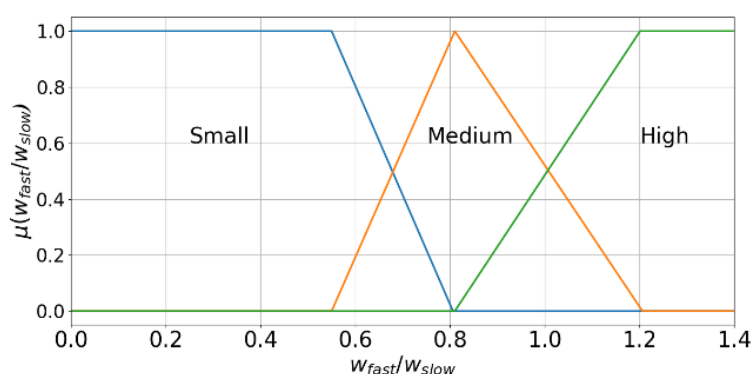


Рис. 3.7 – Функції належності

Вхідний сигнал може належати до трьох множин: малі (Small), середні (Medium), великі (High) значення. Правила нечіткої логіки наведені у Таблиці 3.1 ($N_1 > N_2 > N_3$). Якщо співвідношення між короткостроковим та довгостроковим середнім значенням ваг частинок належить малим значенням, то кількість частинок є найбільшою. У випадку належності входу до середній або малих значень кількість частинок зменшується. Кількість частинок обчислюється як вихід нечіткої моделі Такагі-Сугено (T-S):

$$N_{particles} = \frac{\mu_1 N_1 + \mu_2 N_2 \dots + \mu_N N_j}{\sum_j \mu_j} \quad (3.10)$$

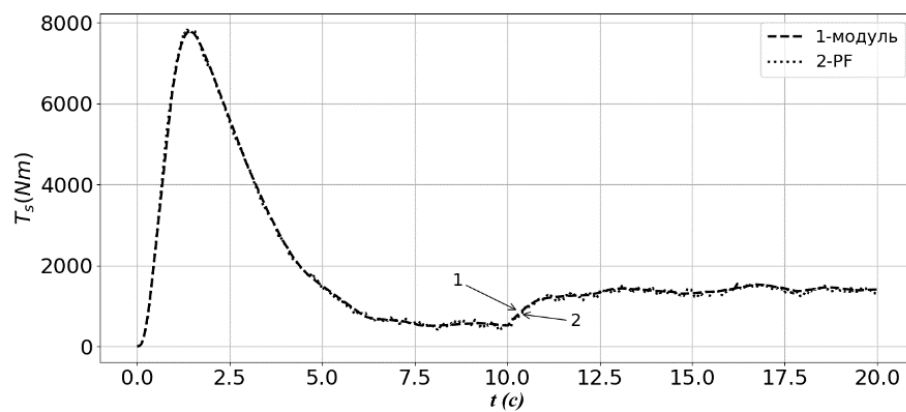
де, μ_j є функція належності j -правила, $j = 1, 2, \dots, F$, F це кількість правил, N_j є вихід j -го правила. У даному випадку кількість правил дорівнює кількості термів.

Для проведення порівняльного аналізу традиційного фільтра частинок і фільтра частинок із нечіткою логікою шляхом моделювання у середовищі MATLAB була

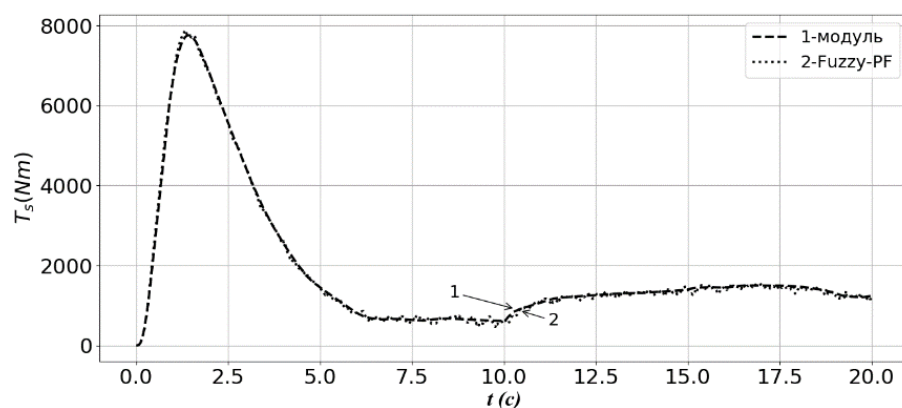
використана модель системи керування рухом модуля приводу електромобіля по стохастичній поверхні (див. підрозділ 2.1). Модель складається із моделі динаміки модуля, регулятора за повним вектором стану, на вхід якого подаються визначені спостерігачем координати стану системи, моделей давачів та дороги. Регулятор за повним вектором стану було синтезовано на біноміальну форму перехідного процесу із використанням кореневого методу. Давачі моделюються як ланки із одиничним коефіцієнтом передачі. Сигнали із давачів є спотворені під дією збурень, які змодельовані за нормальним розподілом із нульовим середнім значенням і відхиленням рівним 10% від корисного сигналу датчика. Взаємодія колеса із дорожнім покриттям моделюється згідно підходів описаних у [3], які враховують проковзування шини і зміну коефіцієнтів ковзання та кочення під час руху. При виконанні досліджень розглянуто рух модуля електроприводу автомобіля на асфальтному покритті та трав'яному покритті (луг).

Варто зазначити, що порівняльний аналіз проведено на основі результатів математичного моделювання отриманих із трьох комп'ютерних моделей. У першому випадку, блок спостерігача замінений блоком сенсорів, які визначають усі координати стану системи. У другому випадку, блок спостерігача містить алгоритм фільтру частинок, для якого кількість частинок було вибрано 250 із метою обчислення одного значення вектора $\hat{X}$ за час менший ніж крок дискретизації [116]. Третій випадок передбачає дослідження спостерігача частинок із нечіткою логікою. Виходи нечітких правил N_1 , N_2 , N_3 вибрані як 250, 100, 50 відповідно. Отримані результати представлені на рис. 3.8 -рис. 3.10. та в табл. 3.2.

На рис. 3.8а та рис. 3.8б зображені результати спостереження обертового моменту при використанні фільтру частинок та фільтру частинок із нечіткою логікою відповідно. Як видно із графіків, обидва спостерігачів дають достатньо добру оцінку моменту скручування під час розгону модуля електроприводу автомобіля на асфальті та переїзді із асфальту на луг в момент часу 10 секунд, якому відповідає збільшення моменту колеса.



а)



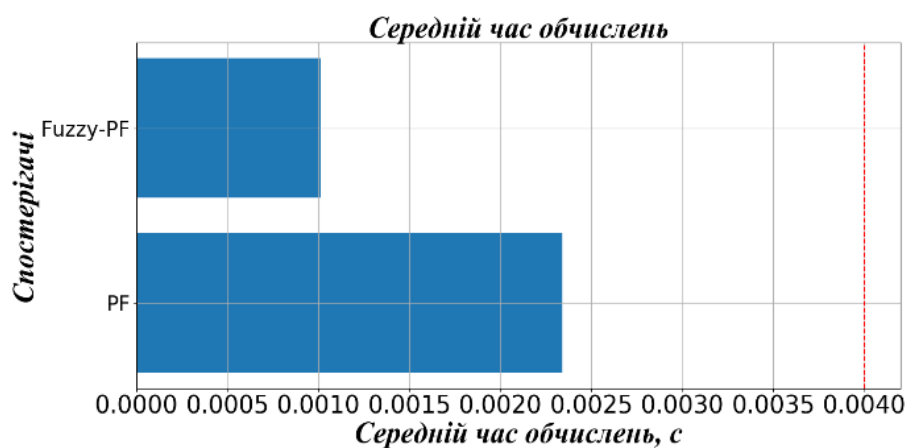
б)

Рис. 3.8 – Графіки моменту скручування валу, які спостережені а) PF, б) Fuzzy-PF

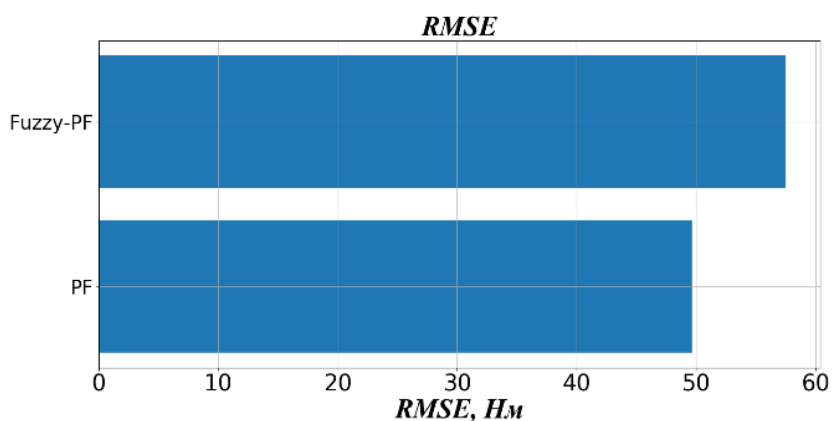
Для кількісного порівняння двох алгоритмів спостереження було розраховані показники наведені у таблиці 3.2 та графічно представлені на рис. 3.9. Зокрема, фільтр частинок із нечіткою логікою дає вииграш у середньому часі обчислення у 2.3 разів в порівнянні із традиційним алгоритмом, проте поступається у точності оцінки. Середнє значення похибки оцінки $mean(|error|)$ із використанням модифікованого методу Fuzzy-PF є на 0.211% більшого ніж із використанням PF. Максимальна похибка оцінки $max(|error|)$ обертового моменту запропонованим спостерігачем становить 31.642 і є 1.807% меншою за похибку, яку забезпечує традиційний підхід. Таким чином можна стверджувати, що при незначній втраті в якості оцінки спостережуваних координат, запропонований алгоритм дає змогу отримати значний вииграш в часі обчислень.

Таблиця 3.2 – Результати порівняння фільтру частинок синтезованого за традиційним підходом та із використанням нечіткої логіки.

Спостерігач	RMSE, H_m	mean(error), %	max(error), %	Середній час обчислення
PF	49.649	3.665	33.449	0.0023
Fuzzy-PF	57.52	3.877	31.642	0.0010



а)



б)

Рис. 3.9 – RMSE та середній час розрахунку

У попередніх дослідженнях [116] було доведено, що у випадку значно зашумлених сигналів сенсорів використання спостерігача фільтру частинок покращує динаміку системи і забезпечує кращу точність керування в порівнянні до системи керування, в якій усі виміри здійсненні виключно сенсорами. На рис. 3.10

представлені результати перехідних процесів керованої координати – кутової швидкості колеса, які забезпечуються системою керування із фільтром частинок (крива 2) та фільтру частинок із нечіткою логікою (крива 3). Крива 1 на рис. 3.10 відповідає бажаній кривій швидкості, яка повинна забезпечуватися синтезованою системою керування.

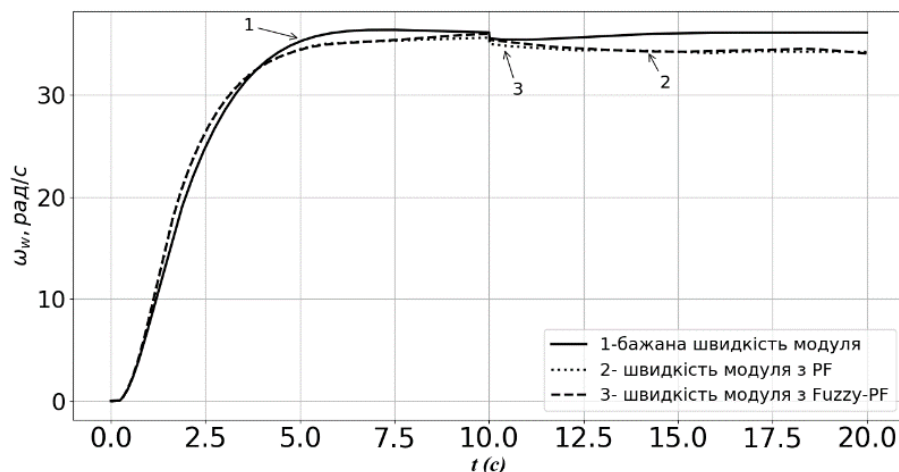


Рис. 3.10 – Графік кутової швидкості колеса модуля

Як видно із рис. 3.10 криві 2 і 3 практично співпадають і доволі якісно відтворюють бажану криву 1 із незначною статичною похибкою, максимальне значення якої становить 5.8% для системи із PF та 6.1% - з Fuzzy-PF.

3.3 Нечіткий фільтр частинок із змінною функцією розподілу частинок

Нечіткий спостерігач на основі фільтра частинок із змінною кількістю частинок потребує меншого часу обчислення, що дозволяє зменшити інтервал дискретизації і за рахунок цього покращити якість керування. Однак, ще одним із недоліків використання фільтра є обчислювальна складність процедури відбору (рісемплінгу), яка полягає у виборі частинок з найбільшою вагою для наступного кроку обчислення або генерації нових випадкових частинок, якщо значна кількість частинок вироджується в попередньому наборі. Щоб уникнути процедури повторної вибірки, у даній роботі запропоновано генерувати новий набір точок за гаусівським розподілом, який формується за допомогою нечіткої логіки. Середнє значення розподілу — це оцінене значення координат вектора стану на основі попереднього

набору точок, а відхилення розподілу частинок було визначене на основі нечіткої логіки. Запропонована модифікація алгоритму скорочує час обчислень і дозволяє генерувати частинки із довільного розподілу. Змінюючи функцію густини, розкид частинок можна збільшити, коли похибка оцінки значна. Такий підхід вирішує проблему виродження частинок і підвищує збіжність оцінки за некоректних початкових умов або при швидкій зміні координат системи. На основі запропонованих удосконалень, алгоритм роботи спостерігача прийме наступний вигляд.

Алгоритм: *Нечіткий фільтр частинок із змінною функцією розподілу частинок*

1. Ініціалізація: генерація набору частинок, використовуючи функцію густини розподілу як суміш Гаусівських розподілів $x_0^i \sim p_0(x_0)$, $i \in \{1, \dots, N\}$

for $k = 1, 2, \dots$ **do**

2. На основі попереднього набору точок і функції відносної густини розподілу $\hat{x}_k^i \sim p(x_k^i | x_{k-1}^i)$ для $i \in \{1, \dots, N\}$ згенерувати новий набір точок, використовуючи модель системи $f(\hat{X}, U)$ і функцію щільності ймовірності системного шуму.

3. Оновлення вимірювань: обчислити ваги частинок як умовну ймовірність $w_k^i = p_n(Z_k | x_k^i)$ за допомогою моделі вимірювання $h(\hat{X}, U)$ і функції щільності ймовірності шуму вимірювання.

4. Нормалізація ваги важливості: $\hat{w}_k^i = \frac{w_k^i}{\sum_{j=1}^N w_k^j}$, $i \in \{1, \dots, N\}$. Сума ваг важливості дорівнює одиниці.

5. Розрахувати стан оцінки як $\hat{X}_k = \sum_{j=1}^N \hat{X}_k^j \hat{w}_k^j$.

6. Обчислити довгострокову ω_{slow} і короткочасну ω_{fast} середні ваги частинок.

7. Визначити нову кількість частинок за допомогою нечіткого перемикача, входом якого є співвідношення $\omega_{fast}/\omega_{slow}$.

8. Визначити нову функцію густини ймовірності розподілу частинок за допомогою нечіткого перемикача, входом якого є співвідношення $\omega_{fast}/\omega_{slow}$.

5. Згенеруйте новий набір частинок $\{\hat{x}_k^i\}$ відповідно до нової функції густини ймовірності розподілу частинок.

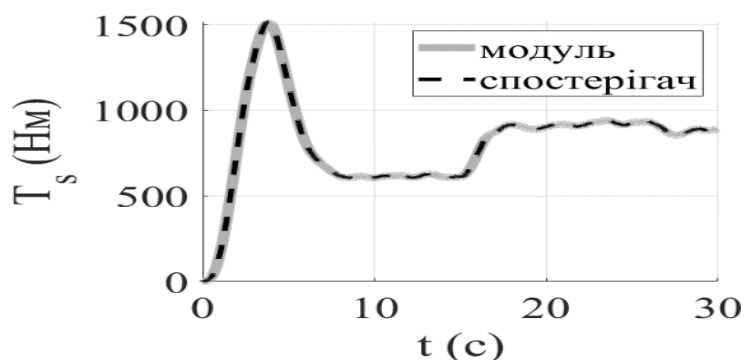
end

Після модифікації алгоритму фільтра частинок необхідно налаштувати нечіткий перемикач, який визначає новий розподіл частинок. Входом такого нечіткого блоку є співвідношення між довгостроковим і короткостроковим середніми

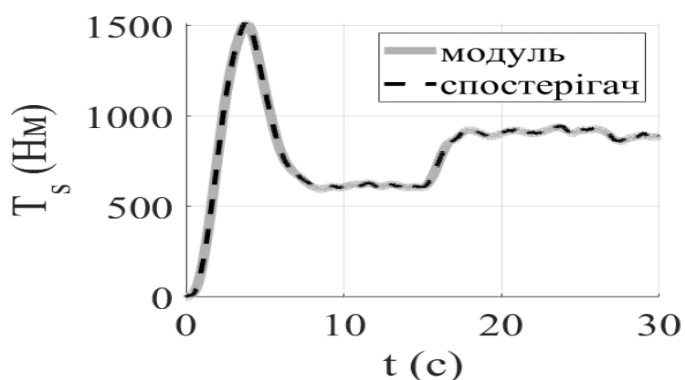
значеннями ваг частинок. Виходами блоку нечіткої логіки є кількість частинок і стандартне відхилення гаусівського розподілу для координати швидкості колеса автомобіля. Нечіткі функції належності вибираються так само, як і для нечіткого перемикача кількості частинок, представленого у попередньому підрозділі. Вихід формується за базою правил, представленою в таблиці 3.3. Зі збільшенням співвідношення між ваговими коефіцієнтами (збільшується похибка спостереження), збільшується кількість частинок і збільшується значення стандартного відхилення для розподілу нового набору точок.

Таблиця 3.3 – Правила нечіткого перемикача

w_{fast} / w_{slow}	Small	Medium	High
$N_{particles}$	50	100	250
Variations	0.5	2	5



а)



б)

Рис. 3.11 – Графіки обертового моменту системи електроприводу колеса автомобіля, з застосуванням спостерігача на основі: а) фільтра частинок зі змінною їх кількістю та б) фільтра частинок із змінним розподілом

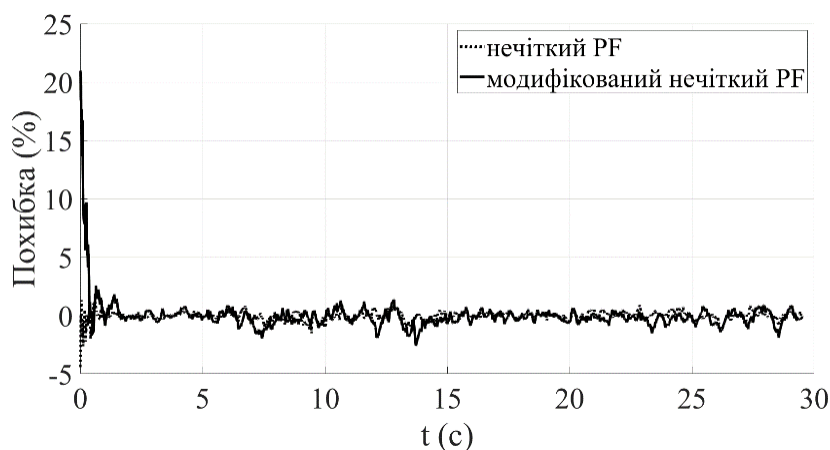


Рис. 3.12 – Динаміка зміни похибки спостереження обертового моменту

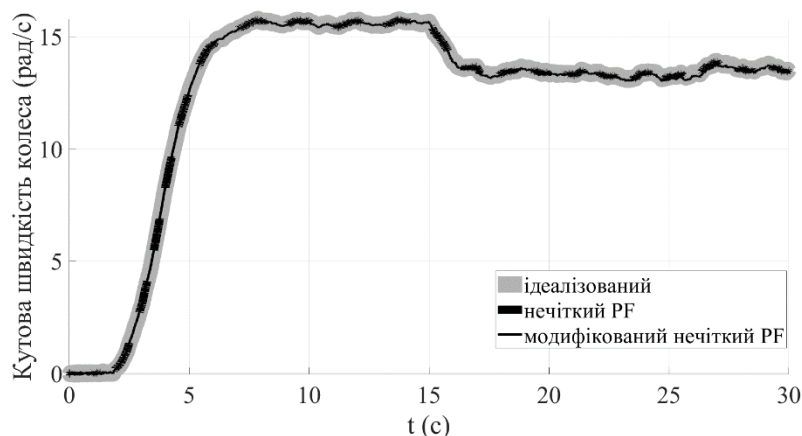


Рис. 3.13 – Графіки кутової швидкості колеса для замкненої системою керування, у зворотному зв'язку якої ввімкнений або нечіткий спостерігач частинок, або його модифікація

На рис. 3.11 зображені графіки обертового моменту системи електроприводу колеса автомобіля, оціненого нечітким спостерігачем частинок та нечітким спостерігачем частинок із змінним розподілом. Як видно із рис. 3.12 модифікований нечітким спостерігачем частинок із змінним розподілом зумовлює більшу похибку спостереження 21% при початку руху на відміну від попередньої версії спостерігача, в якого похибка спостереження не перевищує 4.7%. Проте, якщо порівнювати бажане завдання швидкості колеса автомобіля із швидкостями колеса, які контролюється контролером за повним вектором стану із нечіткими спостерігачами відповідно, можна стверджувати, що таке початкове відхилення не є критичним і не зумовлює відхилення між бажаним і реальним значенням координати більше ніж 5% (рис. 3.13).

Також, варто відзначити, що така модифікація алгоритму нечіткого фільтра частинок дозволила зменшити обчислювальний час на 11.5 % відносно до попередньої версії нечіткого спостерігача.

3.4 Висновки

Використання нечіткої логіки у підходах синтезу спостерігача Люенбергера дозволяє адаптуватися до змінних умов середовище, використовувати традиційні підходи спостереження для нелінійних систем, збільшувати швидкодію збіжності координат спостереження. Ускладнення нечіткого спостерігача Люенбергера для підвищення точності відтворення невимірюваних координат призведе до збільшення обчислювальних затрат і зростання часу дискретизації.

Методи оцінки на основі алгоритму фільтра частинок характеризуються високою точністю визначення координат динамічної системи, проте, вимагають значних обчислювальних затрат.

Запропонований модифікований алгоритм фільтра частинок із динамічною зміною кількості частинок та змінним розподілом частинок під час обчислення дозволяє зменшити середній час обчислення, забезпечуючи при цьому високу точність оцінки, що підтверджено результатами виконаних досліджень.

РОЗДІЛ 4 ЕСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СПОСТЕРІГАЧІВ

4.1 Опис випробувальної установки шин на плоскій доріжці та розроблення програми дослідження

4.1.1 Вибір тестової установки

Для експериментальних вимірювань характеристик взаємодії шини із дорожнім покриттям та дослідження систем керування рухом колеса автомобіля в промисловості використовуються різноманітні обладнання та засоби. Для подібних експериментів є поширеними чотири експериментальні стенди: випробувальна машина-причіп, внутрішні та зовнішні барабанні стенди і стенд для випробування шин на плоскій доріжці.

У конфігурації випробувального причепа для шин, обчислювальне та вимірювальне обладнання встановлюється у причепі вантажівки (див. рис. 4.1). Основною перевагою випробувального причепа є можливість проводити експерименти на реальних дорогах. Однак, це стикається з труднощами, пов'язаними з відтворюваністю результатів та значною складністю налаштування обладнання для отримання точних результатів вимірювань. А, як відомо, найважливішою вимогою до випробувального обладнання є забезпечення точного вимірювання та кореляції результатів тестування з фактичними значеннями характеристик руху.

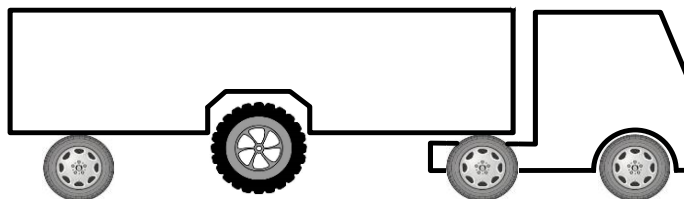


Рис. 4.1 – Випробувальна машина-причіп

Як зазначено вище, ще одним підходом дослідження руху шин є застосування експериментального стенду, що базується на використанні барабанів діаметром від 2 до 4 метрів. Такі діаметри барабана обираються для кращого наближення поверхні руху шини до фактичних дорожніх умов. Така експериментальна установка може бути налаштована як внутрішній барабанний стенд, де шина рухається по внутрішній

поверхні барабана (рис. 4.2а), або зовнішній барабанний стенд, де шина котиться по зовнішній поверхні барабана (рис. 4.2б). Для наближення експериментів до реальних умов на дорозі, поверхня барабана, будь-то внутрішня або зовнішня, покрита матеріалом, схожим на корундову шкірку. Вимірювання на установці барабанного типу є простішими у порівнянні з випробувальним причепом, оскільки відтворюваність результатів краща завдяки контрольованим лабораторним умовам. Крім того, легше налаштувати умови роботи під час випробувань. Однак використання барабана може призводити до нереальних змін характеристик шини через кривизну барабана, що змінює форму та розподіл нормальних сил у зоні контакту. Крім вищезгаданих випробувальних установок барабанного типу, існує ще одна система, яка використовує два менших барабани. Як видно з рис. 4.2в, шина рухається по двох барабанах меншого діаметру, ніж сама шина. Ця концепція випробування зазвичай використовується для тестування більш ніж однієї шини, наприклад, для тестування загальної продуктивності транспортного засобу. Однак, під час тестування шина має дві зони контакту, що призводить до додаткових труднощів у кореляції вимірювань випробування з фактичними дорожніми умовами.

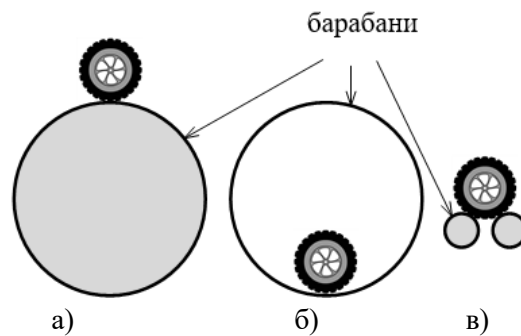


Рис. 4.2 – Ілюстрація експериментальних стендів барабанного типу

Проте, варто зазначити, що для випробувальних стендів на базі барабанів, є складність кореляції результатів, отриманих з випробувань на барабанних стендах, з фактичними результатами на дорогах, оскільки шина котиться по криволінійній поверхні.

Недолік, пов'язаний з приведенням результатів випробувань, отриманих на барабанній тестовій установці, до фактичних дорожніх умов, може бути в значній мірі подоланий за допомогою концепції стенду для випробування шин на плоскій доріжці,

розробленої компаніями MTS і Calspan, в якій два барабани приводять в рух сталеву стрічку, покриту матеріалом, що імітує дорожню поверхню (рис. 4.3).

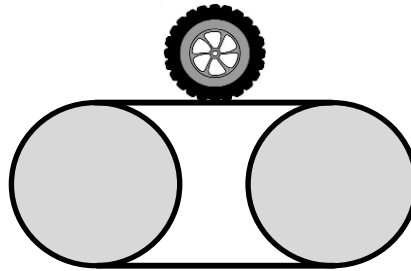


Рис. 4.3 – Концепція стенду для випробування шин на плоскій доріжці

Концепція стенду для випробування шин на плоскій доріжці краще наближається до реальних дорожніх умов, одночасно зберігаючи переваги лабораторного тестування шин. Тому для проведення експериментів у цьому дослідженні було обрано установку для випробування шин на плоскій доріжці.

Для всіх експериментальних випробувань нашого проекту була використана система тестування шин MTS FlatTrac® LTR в Національному центрі досліджень шин (NTRC) у місті Алтон, штат Вірджінія. NTRC розташований поряд з іншими дослідницькими центрами, які виконують різноманітні дослідження з застосуванням повних моделей шин та транспортних засобів, і формують Глобальний центр симуляції автомобільної продуктивності (GCAPS) [128].

4.1.2 Опис випробувальної установки

Система Flat-Trac LTR (див. рис. 4.4) є більшим, високосиловим варіантом технології Flat-Trac, спеціально розробленою для динамічних випробувань легковантажних автомобільних шин та шин для автогонок. Система Flat-Trac LTR дозволяє дослідникам динамічно змінювати положення та навантаження шини на постійній плоскій дорожній поверхні, одночасно вимірюючи сили та моменти, що генеруються шиною. Дані можуть бути зібрані в динамічних або стаціонарних умовах. Система також здатна виконувати симуляції відтворення файлів даних, зібраних в реальному часі при русі автомобіля по реальних дорожніх покриттях.



Рис. 4.4 – MTS Flat-Trac®

Цифрова система керування та збирання даних Flat-Trac LTR керує та отримує дані у системі координат шини. Калібровані дані машини компенсуються впливом таких факторів, як інерційні ефекти. Доступні параметри керування включають:

- Кут зносу або бічне навантаження.
- Кут нахилу осі колеса.
- Швидкість доріжки.
- Радіус навантаження або вертикальне навантаження.
- Крутний момент колеса.
- Тиск повітря у шині.

Ці параметри керування дозволяють дослідникам точно керувати та вимірювати різні аспекти продуктивності та поведінки шини під час випробувань.

Максимальна швидкість системи становить 320 км/год, максимальна вертикальна сила - 30 кН, а крутний момент - 10 000 Нм - це більш ніж достатньо для наших цілей моделювання шини MPT 81 на репрезентативному транспортному засобі 10 тонн. У Національному центрі дослідження шин (США) є різноманітні ремені, які

можуть використовуватися для дослідження, включаючи покриті абразивом ремені зернистістю 36, 120, 180 і 240, а також ремені з гумовими кілочками високої твердості.

У режимі керування переміщенням, частотна відповідь обмежується мінімальним/максимальним переміщенням, так що шпиндельна система шини може рухатися вертикально з максимальною швидкістю 160 мм/с (наприклад, 40 Гц з амплітудою синусоїди 1 мм або 8 Гц з амплітудою синусоїди 5 мм). У режимі керування силою, частотна відповідь обмежується роздільною здатністю та співвідношенням сигнал/шум системи збору даних датчика навантаження. Це може бути визначено точно лише після налаштування контролера, і зазвичай не використовується вище 5 Гц.

Система приводу ремня складається з двох великих барабанів, які приводять ремінь та мають високе інерційне навантаження. Це дозволяє спровокувати високодинамічні процеси шляхом маніпулювання привідним шпинделем, не суттєво впливаючи на швидкість руху привідного ремня. У режимі керування швидкістю привідний шпиндель зазвичай може реагувати лише на вхідні сигнали частотою < 5 Гц, але при використанні в режимі керування моментом система зазвичай може досягати частотної відповіді 30 Гц. Однак, система дозволяє працювати в режимі керування моментом з частотною відповіддю більше 100 Гц з невеликою амплітудою випадкового профілю, щоб імітувати поведінку шини при природніх частотах.

Система MTS FlatTrac LTR була використана як основне джерело збору даних. Частота дискретизації встановлена на рівні 1 кГц, всі канали даних та канали керування синхронізовані і записуються разом у текстових файлах. У цих файлах даних містяться приблизно 147 різних обчислених і прямих вимірювань та параметрів керування, які можна використовувати для аналізу і підтвердження експериментальних даних. Система збору даних, розташована на стенді системи MTS FlatTrac, має всі необхідні пристрої аналогової обробки сигналу, включаючи фільтри на всіх аналогових вхідних лініях сигналу.

Дослідження виконувалися для шини Continental 365/80 R20 MPT 81 (рис. 4.5). Шина розроблена як для звичайних дорожніх поверхонь руху так і для бездоріжжя і встановлюється на низку транспортних засобів, включаючи тактичні військові

машини. Дана шина має велику площу контакту протектора, поєднану з низьким рівнем шуму та вібрації, індекс навантаження 152 (3,550 кг) та індекс швидкості К (110 км/год).

У таблиці наведено технічні дані, що доступні публічно на веб-сайті Continental для цієї шини [129].



Рис. 4.5 – Шина Continental 365/80 R20 MPT 81

Таблиця 4.1 – Параметри колеса.

Шина	Коефіцієнт швидкості/навантаження	Протектор	Обід	Розміри (мм)					
				Стандартні значення		Фактичні значення			
				Ширина	Діаметр	Ширина	Діаметр	Статичний радіус	Довжина кола
365/80 R 20 TL	152 K	MPT 81	11 11 SDC 12 SDC	378	1116	365	1089	502	3275

Таблиця 4.2 – Навантажувальна спроможність шини.

Тиск, бар	2.0	2.5	3	3.5	3.75	4	4.25	4.5	5	5.25	6
Навантаження, кг	1445	1730	2000	2290	2430	2575	2650	2725	3000	3125	3550

Для перевірки алгоритму спостереження було обрано контролер dSPACE MicroAutoBox II 1513/1514, який є потужною апаратною платформою для розробки, перевірки та імплементації систем в реальному часі. Вона має наступні характеристики і особливості:

- Процесор: MicroAutoBox II оснащений потужним процесором PowerPC IBM PPC 750GL, 900 MHz, який забезпечує високу обчислювальну швидкість та широкі можливості обробки даних в реальному часі.
- Розширюваність: платформа підтримує розширення за допомогою модулів введення/виведення (I/O) (32 16-бітних каналів) і додаткових модулів зв'язку. Це дозволяє підключати різні пристрої та сенсори для збору даних і контролю системи.
- Реальний час: MicroAutoBox II забезпечує виконання алгоритмів в реальному часі з дуже низькою затримкою. Це важливо для дослідження систем з високими вимогами до часової відповіді, таких як автомобільні системи керування.
- Підтримка різних інтерфейсів: має різні інтерфейси зв'язку, такі як CAN, Ethernet, USB, для забезпечення взаємодії з іншими пристроями і системами.
- Середовище розробника: dSPACE надає повнофункціональне середовище користувача, яке дозволяє розробляти, тестувати та налагоджувати програмне забезпечення для MicroAutoBox II. Воно включає симуляційні інструменти та можливості автоматичного кодування.
- Надійність: Платформа має високу надійність і стійкість до екстремальних умов. Вона може працювати в широкому діапазоні температур і вологості, що дозволяє використовувати її в різних середовищах.

MicroAutoBox II є потужним інструментом для наукових досліджень в області автомобільної електроніки, автоматичного керування та багатьох інших галузей, де вимагається висока швидкість обробки даних і низька затримка в реальному часі.

Як згадувалося раніше, однією із важливих характеристик цієї платформи є можливість автоматичної компіляції розробленого алгоритму у середовищі MATLAB/Simulink безпосередньо у пакет, який необхідний для даного контролера. Це дозволяє користувачу розробляти алгоритми у зручному для наукових досліджень середовищі MATLAB і тестувати розроблені алгоритми на реальному обладнанні без необхідності імплементації на низькорівневій мові програмування. Згенерований код є спеціально оптимізованим для виконання на контролері реального часу.

Підключення та використання dSPACE MicroAutoBox II 1513/1514 в середовищі MATLAB відбувається за допомогою Real-Time Interface (RTI). Можна використовувати різні блоки Simulink для моделювання логіки керування та інших складових системи. MicroAutoBox II підтримує різноманітні інтерфейси введення-виведення, такі як аналогові, цифрові, CAN, LIN тощо. Платформа дозволяє встановити зв'язок між моделлю Simulink та цими пристроями для зчитування вхідних сигналів та керування виводами. RTI дозволяє моніторити та збирати дані з моделі Simulink під час її виконання на MicroAutoBox II. Також, можна візуалізувати результати, аналізувати дані та проводити інші дії, необхідні для перевірки функціональності усієї системи. RTI надає додаткові можливості для налаштування параметрів виконання моделі, налаштування графіків, роботи з подіями та багато іншого.

Ці особливості роботи з RTI в MATLAB із dSPACE MicroAutoBox II 1513/1514 дозволили зручно розробити, налагодити та протестувати алгоритми спостереження на потужному контролері реального часу. Алгоритм спостереження, розроблений у MATLAB/Simulink, був скомпільований на контролер dSPACE, який приєднаний до комп'ютера користувача через інтерфейс Ethernet. Таке підключення дозволило налаштовувати параметри спостерігача і монітори графіки зміни реальних і визначених спостерігачем координат в режимі реального часу. У свою чергу, контролер dSPACE приєднаний до системи MTS FlatTrac через аналогові входи/виходи.

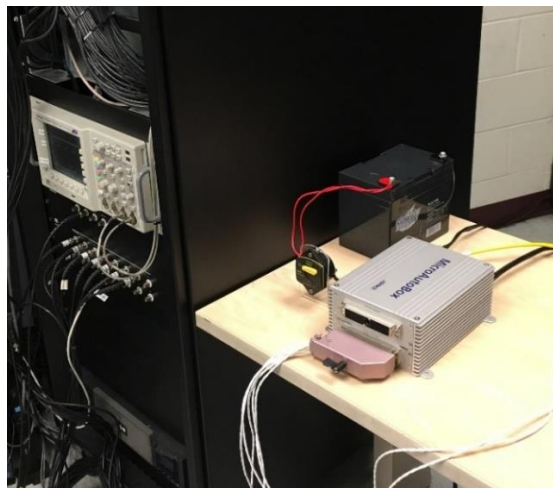


Рис. 4.6 – dSPACE MicroAutobox II

4.1.3 Програма досліджень.

Розроблений алгоритм спостереження координат стану системи керування колесом електромобіля використовує напругу привідного двигуна колеса, струм двигуна, швидкість шпинделя як основні вхідні дані, які надані у вигляді аналогових вихідних сигналів з системи MTS FlatTrac до контролера реального часу dSPACE MicroAutobox II 1513/1514. Під час цієї серії експериментів спостерігач не використовувався для формування керуючих сигналів.

Спостерігач є "модельно-орієнтованим" алгоритмом, який потребує побудови математичної моделі досліджуваного об'єкта та відповідного налаштування параметрів алгоритму. Оскільки лише деякі параметри математичної моделі можуть бути визначені на основі технічних характеристик системи, наданих MTS, значна частина параметрів отримана експериментальним шляхом на місці. Відповідно до підписаних нами документів про нерозголошення комерційної таємниці, детальні дані про установку наведені. Для наближеного отримання параметрів модулі об'єкту та налаштування спостерігача фільтра частинок була узгоджена наступна процедура налаштування із командою центру дослідження шин.

Процедура налаштування:

1. Накачати шину до потрібного тиску (5 бар).
2. Утримувати шину у повітрі над рухомим конвеєром.
3. Встановити швидкість колеса на рівень 600 об/хв із темпом наростання 200 об/хв. Утримувати цю швидкість, підлаштовуючи параметри спостерігача та моделі для досягнення точності.
4. Встановити швидкість колеса на рівень 400 об/хв із темпом гальмування 200 об/хв. Утримувати цю швидкість, підлаштовуючи параметри спостерігача та моделі для досягнення точності.
5. Встановити швидкість колеса на рівень 200 об/хв із темпом гальмування 200 об/хв. Утримувати цю швидкість, підлаштовуючи параметри спостерігача та моделі для досягнення точності.

6. Встановити швидкість колеса на рівень 50 об/хв із темпом гальмування 200 об/хв. Утримувати цю швидкість, підлаштовуючи параметри спостерігача та моделі для досягнення точності.
7. Повільно знизити швидкість колеса до нуля зі темпом гальмування 200 об/хв.
8. Повторити кроки 2-7, поки не буде потрібно більше налаштувань параметрів спостерігача.
9. Знизити шину до першого контакту з конвеєром.
10. Застосувати нормальне навантаження 2690 кг.
11. Відключити управління поверхнею дорожнього покриття системою MTS FlatTrac.
12. Встановити швидкість колеса на рівень 600 об/хв зі швидкістю 200 об/хв.
13. Утримувати цю швидкість, підлаштовуючи параметри спостерігача та моделі для досягнення точності.
14. Повторити кроки 11-13 для швидкостей колеса 400, 200 і 50 об/хв.
15. Зменшити нормальне навантаження до 2073 кг.
16. Встановити швидкість колеса на рівень 600 об/хв зі швидкістю 200 об/хв.
Утримувати цю швидкість, підлаштовуючи параметри спостерігача та моделі для досягнення точності.
17. Повторити кроки 15-16 для швидкостей колеса 400, 200 і 50 об/хв.

Процедура тестування:

1. Застосувати нормальне навантаження 100 кг.
2. Встановити швидкість колеса на рівень 600 об/хв із темпом наростання 200 об/хв із виходом у стаціонарний режим.
3. Встановити швидкість колеса на рівень 400 об/хв із темпом гальмування 200 об/хв із виходом у стаціонарний режим.
4. Встановити швидкість колеса на рівень 200 об/хв із темпом гальмування 200 об/хв із виходом у стаціонарний режим.
5. Встановити швидкість колеса на рівень 500 об/хв із темпом гальмування 200 об/хв із виходом у стаціонарний режим.

6. Встановити швидкість колеса на рівень 0 об/хв із темпом гальмування 200 об/хв із виходом у стаціонарний режим.
7. Повторити кроки 2-6 із застосуванням навантаження 2690 кг.

4.1.4 Імплементація спостерігача.

Алгоритм нечіткого фільтра частинок, розроблений у розділі 3, був реалізований у Simulink за допомогою користувацької функції MATLAB (user-defined function). Потім, використовуючи RTI, алгоритм був згенерований у С-код і встановлений на контролер. Під час реалізації алгоритму із використанням мови програмування MATLAB виникла проблема з генерацією масивів змінної розмірності, які б підтримувалися компілятором. Це спричинене динамічною зміною кількості частинок під час виконання алгоритму. Для вирішення цієї проблеми була використана функція MATLAB `coder.varsize()`, яка вказує, що масиви мають змінний розмір. Оголошення функції `coder.varsize()` вказує генератору коду дозволяти масивам змінювати розмір під час виконання скомпільованого коду.

Другою проблемою була обчислювальна складність процедури рісемплінгу, яка полягає в виборі частинок з найбільшими вагами для наступного кроку обчислення або генерації нових випадкових частинок, якщо значна кількість частинок вироджується у попередньому наборі. Щоб уникнути процедури рісемплінгу, було запропоновано генерувати новий набір точок за допомогою гаусового розподілу. Середнє значення розподілу є оцінкою значень координат вектора стану на основі попереднього набору точок, а середнє відхилення розподілу частинок визначалося на основі нечіткої логіки.

Вхідним значенням нечіткої логіки є співвідношення між середніми вагами частинок за короткострокові та довгострокові періоди часу, подібно до нечіткого перемикача кількості частинок. Ця модифікація алгоритму зменшує час обчислень і дозволяє генерувати частинки з довільного розподілу. Змінюючи середнє відхилення функції щільності, можна збільшити розкид точок, коли помилка оцінки є значною. Цей підхід вирішує проблему виродження частинок і збільшує збіжність оцінки при неправильних початкових умовах або швидкій зміні координат.

Під час реалізації алгоритму необхідно адаптувати спостерігач до експериментального стенду. Розроблений спостерігач є універсальним алгоритмом, який може використовуватися для визначення координат стану довільного фізичного об'єкта. Адаптація алгоритму передбачає розробку математичної моделі об'єкта, математичної моделі вимірювань з датчиків, а також процедуру налаштування параметрів алгоритму. Тому першим кроком для адаптації спостерігача до фізичного об'єкта є опис тестового стенду у вигляді моделі простору стану. Однією з метою управління динамікою швидкості колеса є визначення ковзання шини у реальному часі. Для цього необхідно знати значення кутової та лінійної швидкості колеса. Припускаючи, що лінійна швидкість визначається датчиком, кутова швидкість залишається невідомою. Тому необхідно сформулювати систему рівнянь, яка визначає кутову швидкість колеса.

У експериментальному стенді, кутове обертання колеса забезпечується безредукторним електроприводом, який включає безколекторний двигун постійного струму та вали. Зазвичай, така система приводу описується рівняннями як електромагнітної, так і механічної частини. Для опису синхронних моторів з постійними магнітами зазвичай використовуються два типи моделей: у миттєвих координатах та у фіксованих координатах (осі dq). Модель мотора у просторі координат dq використовується за замовчуванням на стенді, і, отже, контролер може отримати лише величини у системі координат осей dq з апаратного забезпечення тестової установки.

Модель електромагнітної частини в просторі стану представлена нижче:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d}(u_d - R_s i_d - N\omega i_q L_q), \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q}(u_q - R_s i_q - N\omega(i_d L_d + \psi_m)). \end{cases} \quad (4.1)$$

де, i_d - струм статора по осі d, i_q - струм статора по осі q, u_d - напруга статора по осі d, u_q - напруга статора по осі q, ω - механічна кутова швидкість обертання ротору, R_s - опір статора, L_d - індуктивність статора по осі d, L_q - індуктивність

статора по осі q , N - кількість пар полюсів постійного магніту ротору, ψ_m - постійний магнітний потік.

Електромагнітний момент обчислюється за формулою:

$$T = \frac{3}{2} N (i_q (i_d L_d + \psi_m) - i_d i_q L_q) \quad (4.2)$$

Механічну частину описує наступне рівняння:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_w} (T - B_w \omega - T_{load}) \quad (4.3)$$

де J_w - момент інерції, який включає обертальний момент ротора двигуна, з'єднувальних валів, обертальні маси колеса, а T_{load} - навантажувальний момент, який виникає від взаємодії шини/ременя.

Модель у просторі координат dq спрощує синтез керування двигуном і робить його схожим на керування двигуном постійного струму (DC). У такому представленні моделі двигуна можна окремо керувати крутним моментом і магнітним потоком. Струм i_d відповідає за формування магнітного потоку, а струм i_q - за формування електромагнітного моменту. У дані тестовій установці реалізовано пряме керування крутним моментом (Direct Torque Control), де струм i_d утримується системою керування на нульовому значенні, щоб створити постійний магнітний потік. Тому, для спрощення синтезу спостерігача, перше рівняння системи (4.1) може бути проігноровано, а в інші рівняння i_d прийнято за нуль. Після цього модель приводу можна записати таким чином:

$$f(\hat{X}, U) = \begin{cases} \frac{1}{L_q} (u_q - R_s i_q - N \omega (i_d L_d + \psi_m)), \\ \frac{1}{J_w} \left(\frac{3}{2} N i_q \psi_m - B_w \omega - T_{load} \right). \end{cases} \quad (4.4)$$

Де вектором стану є $\hat{X} = [i_q, \omega]^T$. Сигнал вимірювання - це струм i_q , тому модель вимірювання дорівнює:

$$h(\hat{X}, U) = [1, 0] \quad (4.5)$$

Наступним кроком адаптації є процес налаштування параметрів спостерігача. Спостерігач настроюється, як описано у розділі 3. Однак після модифікації алгоритму необхідно налаштувати нечіткий контролер (перемикач), який визначає новий розподіл частинок. Нечіткий контролер з одним входом і одним виходом визначає відхилення функції розподілу частинок, які апроксимують швидкість колеса. Функції належності вибираються так само, як і для нечіткого перемикача кількості частинок (рис. 4.7). Вихід формується відповідно до бази правил, представленої в таблиці 4.3. Чим більше співвідношення ваг зростає (помилка спостереження зростає), тим більше зростає кількість частинок і відхилення розподілу нового набору точок.

Таблиця 4.3 – Нечіткі множини.

w_{fast}/w_{slow}	Мала	Середня	Велика
$N_{particles}$	50	150	250
Середньоквадратичне відхилення функції розподілу частинок	0.5	5	50

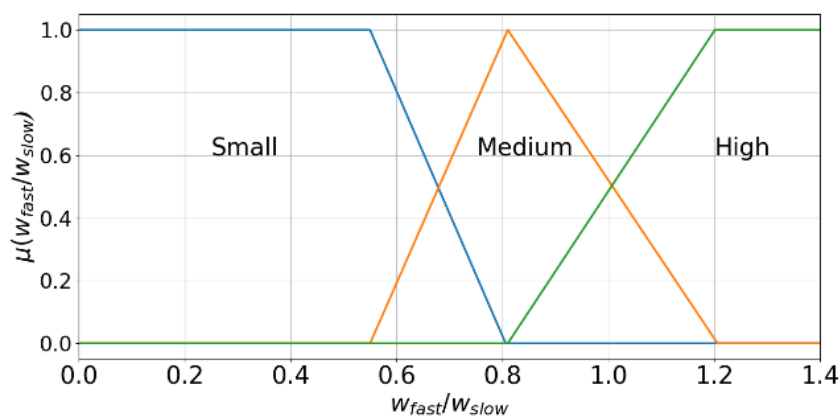


Рис. 4.7 – Функції належності

Модель Simulink/MATLAB із нечітким спостерігачем фільтру частинок та блоками комунікації між Simulink та контролером dSPACE MicroAutobox II 1513/1514 зображена на рис. 4.8. Ліворуч зображені блоки, як відповідають за

передачу даних із стенду, а саме напруги по осі q (Uq Voltage), струму по осі q (Iq Current) та швидкості колеса (Nm Speed). Усі інші компоненти між блоками комунікації і блоку спостерігача відповідають за приведення аналогового сигналу до величин із відповідною одиницею вимірювання (напруга у Вольтах, струм у Амперах, швидкість у рад/с).

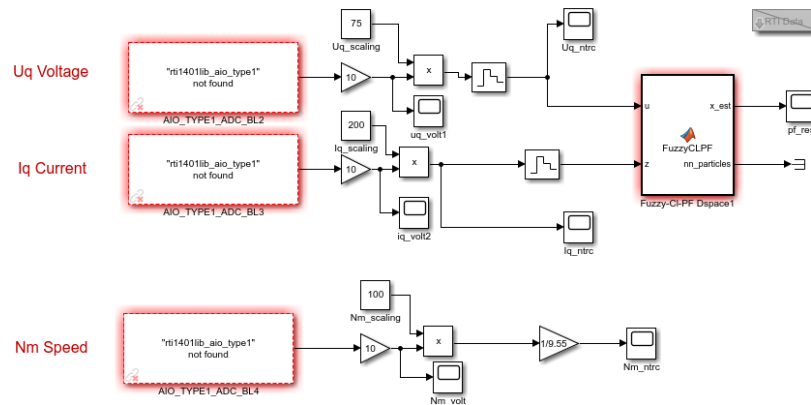


Рис. 4.8 – Модель Simulink/MATLAB із нечітким спостерігачем фільтру частинок та блоками комунікації між Simulink та контролером dSPACE MicroAutobox II 1513/1514

Як зазначалося раніше, контролер dSPACE MicroAutobox II 1513/1514 надає можливість використовувати середовище розробника для налагодження та моніторингу систем керування. А саме на рис. 4.9 зображена програмна інформаційна панель, на якій розміщені поля вводу параметрів спостерігача, таких як початкові умови координат, початкове відхилення розподілу частинок, коефіцієнти алгоритму рісемплінгу, і т.і. Також, праворуч на панелі розміщені поля виводу графіків струму і швидкості двигуна, для порівняння прямих вимірювань із значеннями, отриманих із алгоритму спостереження. Це дозволило підлаштовувати параметри спостерігача та моделі у режимі реального часу.

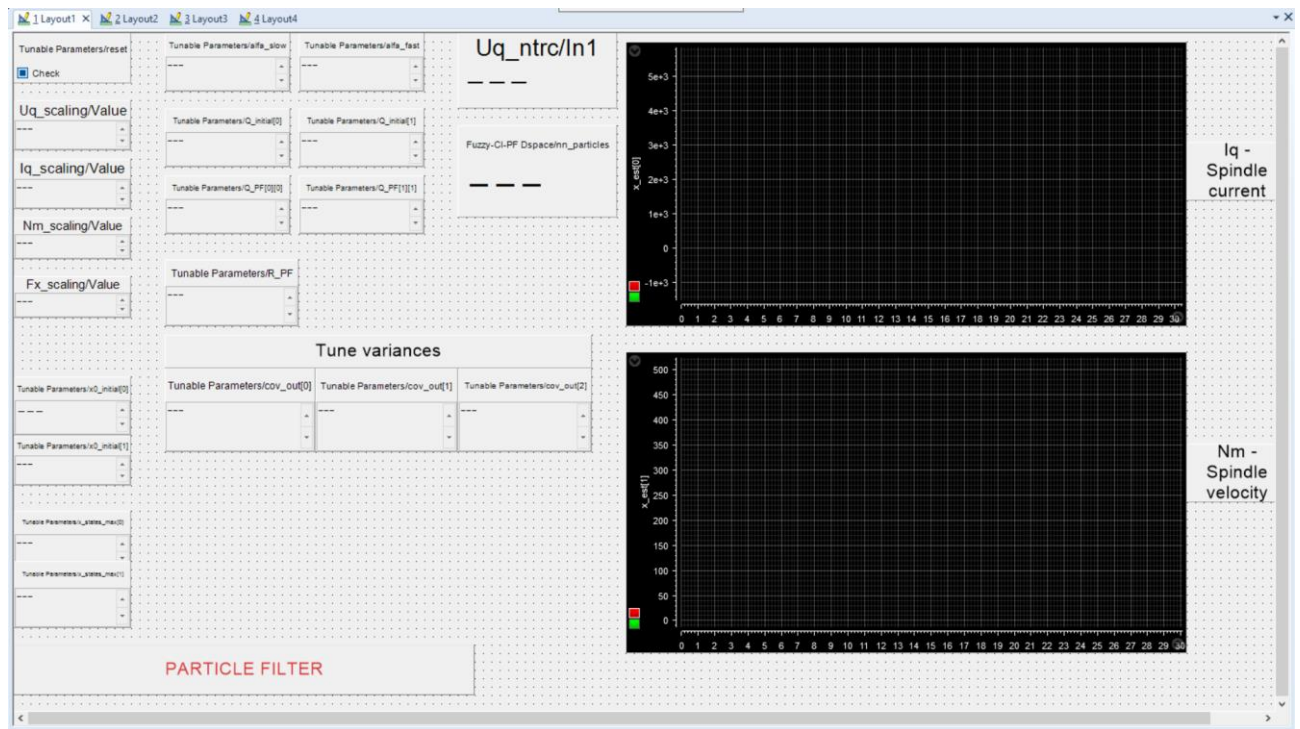


Рис. 4.9 – Ілюстрація середовище розробника для налагодження та моніторингу систем керування

Отже, розроблений спостерігач був реалізований на контролері dSPACE та протестований на MTS-стенді. Експериментальні результати представлені в наступному розділі.

4.1.5 Результати.

Реалізований спостерігач був протестований в двох режимах роботи: (i) із незначним вертикальним навантаженням 100 кг та (ii) зі значним навантаженням 2690 кг. У кожному режимі розглядалися чотири швидкості обертання колеса та перехід від однієї швидкості до іншої. На рис. 4.10 представлені результати оцінки кутової швидкості колеса та струму для першого режиму. Як видно з рис. 4.10, спостерігач надає близькі результати до реальних даних; незначне відхилення від реальних даних спостерігається при низьких швидкостях. Варто зазначити, що спостерігач фільтрує сигнал струму та надає згладжену криву струму. У цій системі приводу, крутний момент колеса пропорційний значенню струму. Тому, фільтроване значення може покращити характеристики налаштування системи керування, якщо спостерігач забезпечує зворотний зв'язок за моментом.

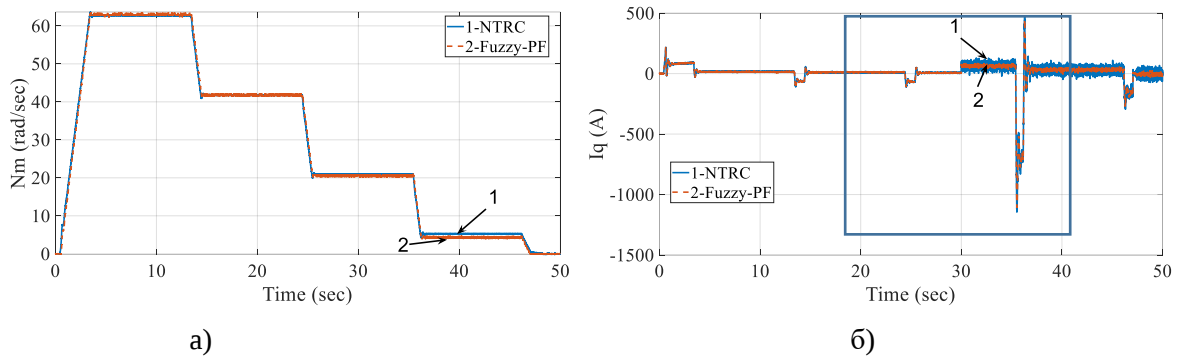


Рис. 4.10 – Визначені значення (а) кутової швидкості та (б) струму двигуна із незначним вертикальним навантаження (NTRC – дані із давачів стенда)

На Рис. 4.11 представлені результати оцінки у другому режимі роботи стенду. Особливістю експерименту було вивчення взаємодії колеса з ремнями при зміні нормального навантаження (див. рис. 4.12б). Нормальне навантаження періодично змінювалось від 2000 до 2600 Н. Як показано на рис. 4.11, спостерігач надає близькі криві оцінених координат до реальних значень майже на всьому діапазоні швидкостей, за винятком прискорення колеса до найвищої швидкості. Така неточність у оцінці може бути пов'язана з неповним врахуванням моделі, тому залишається проблема з уточнення моделі об'єкта.

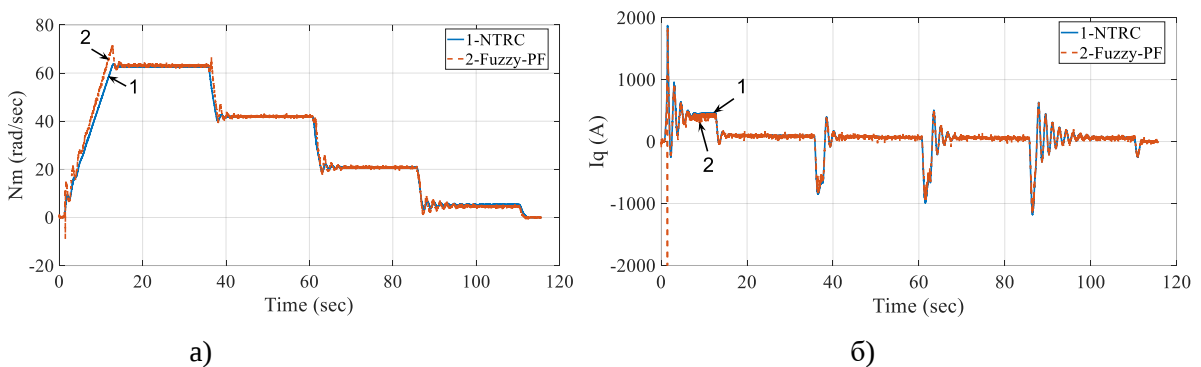


Рис. 4.11 – Визначені значення (а) кутової швидкості та (б) струму двигуна зі значним навантаженням 2690 кг (NTRC – дані із давачів стенда)

На рис. 4.12а показана зміна кількості частинок нечіткого спостерігача під час експерименту. Кількість частинок зменшувалась або збільшувалась для забезпечення задовільної точності. Як видно, кількість частинок майже завжди більша за 150, і лише іноді зменшується, якщо похибка відповідно зменшилася. Це означає, що співвідношення між середніми вагами на короткостроковому і довгостроковому

періодах частіше перебуває в областях "High" і "Medium", ніж в "Small". Інший розподіл частинок може бути отриманий з іншими налаштуваннями параметрів нечітких функцій належності; однак, часте перебування в області "Small" може призвести до низької точності спостереження через значне зменшення кількості частинок.

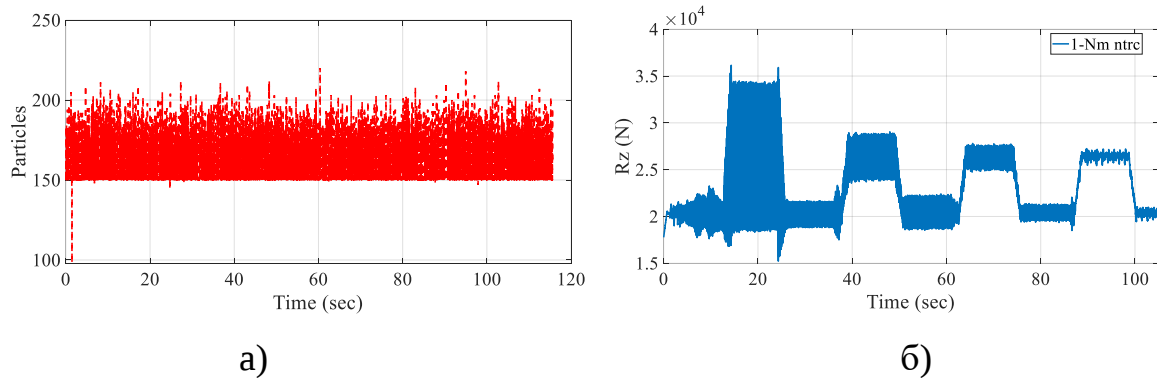


Рис. 4.12 – а) Кількість частинок нечіткого спостерігача, б) нормальна реакція (NTRC – дані із давачів стенда)

На рис. 4.13 показані результати оцінки під час прискорення колеса за впливу меншого нормального навантаження (1000 кг), ніж у попередньому тесті (див. рис. 4.11). Зменшення нормального навантаження призводить до збільшення коливних процесів на кривій кутової швидкості та струму (див. рис. 4.13б). Нормальне навантаження збільшувалося від 1000 кг до 2000 кг під час прискорення. Спостерігач визначає швидкість, згладжуючи криву швидкості. Для відстеження координат спостерігач використовує менше частинок, ніж у попередньому випадку (див. рис. 4.12а та рис. 4.14а). Для спостереження за кутовою швидкістю при зміні нормального навантаження в діапазоні 2000-3000 кількість частинок зросла понад 200, а при зміні нормального навантаження в діапазоні 1000-2000 кількість частинок зросла не більше 195.

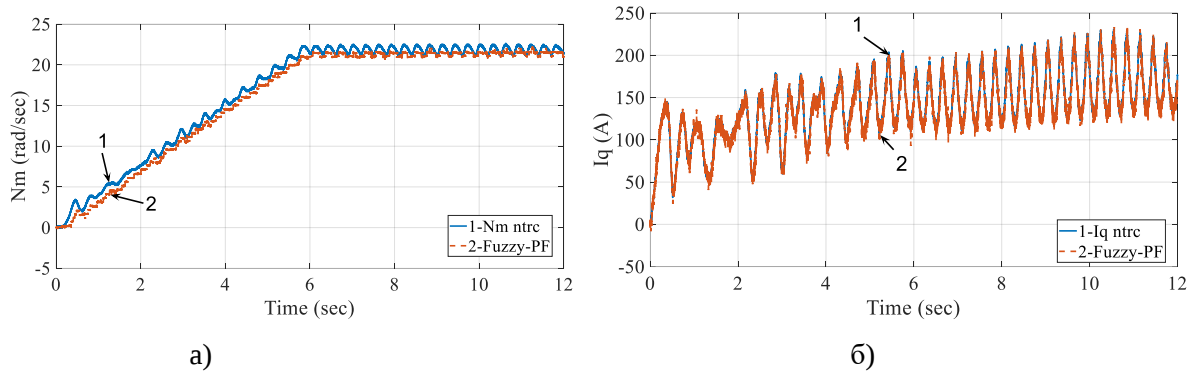


Рис. 4.13 – Визначені значення (а) кутової швидкості та (б) струму двигуна при вертикальному навантаженні 1000кг (NTRC – дані із давачів стенда)

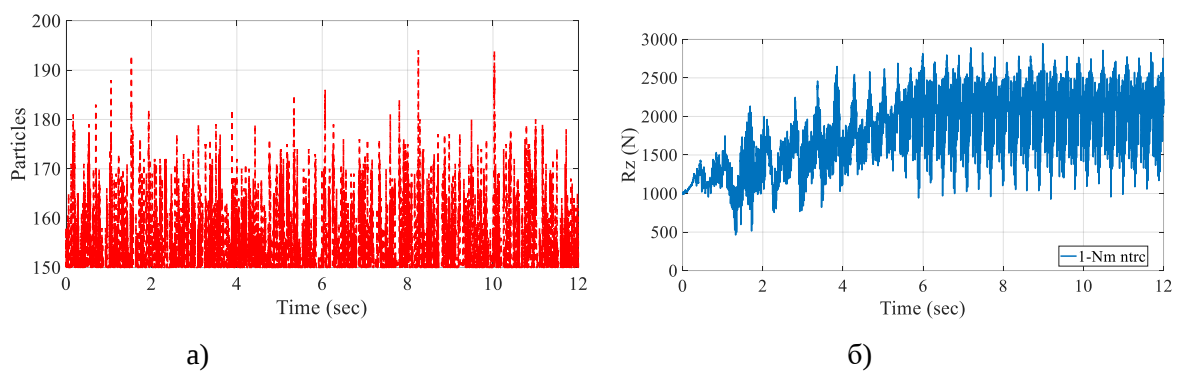
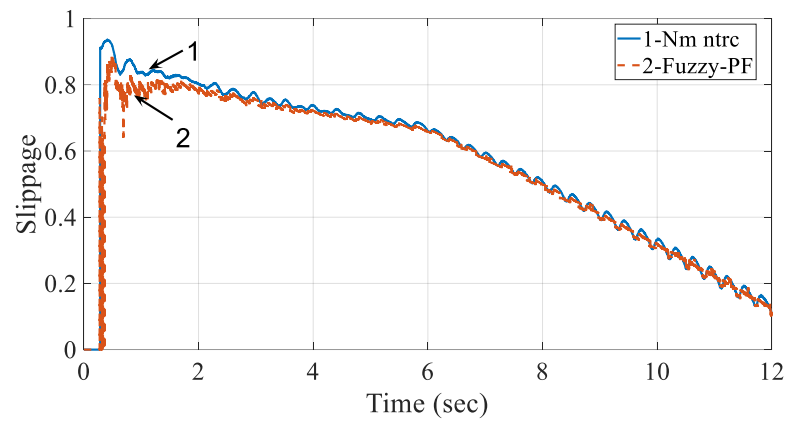
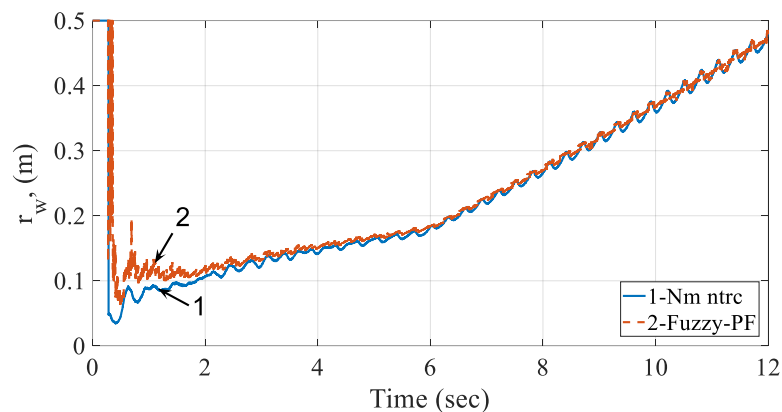


Рис. 4.14 – а) Кількість частинок нечіткого спостерігача, б) нормальна реакція

Визначення кутової швидкості необхідне для синтезу системи керування швидкості та розрахунку інших параметрів швидкісної динаміки шини, таких як ковзання, радіус кочення та інше. Крім того, необхідність в спостереженні швидкості виникає, коли відсутній давач кутової швидкості або давач пошкоджений. З іншого боку, спостерігач може виконувати функцію фільтрації сигналу швидкості, контролювати цілісність давача, що, в свою чергу, робить автономний транспорт безпечнішим. Тому синтезований спостерігач був використаний для визначення ковзання шин. На рис. 4.15а показане порівняння визначеного ковзання шин на основі даних від спостерігача (крива 2 на рис. 4.15а) та реальних значень ковзання шин (крива 1 на рис. 4.15а), визначених на основі сигналів від давачів. Спостерігач забезпечує добру точність визначення ковзання під час прискорення колеса. На рис. 4.15б показані обчислені значення радіуса кочення на основі вимірів давачів (крива 1 на рис. 4.15б) та оцінених значень (крива 2 на рис. 4.15б), спостерігач показав подібну точність, як і для оцінки ковзання шин.



а)



б)

Рис. 4.15 – а) проковзування, б) радіус кочення (NTRC – дані із давачів стенда)

4.2 Експериментальна установка – чотирьохколісний робот.

4.2.1 Опис експериментальної установки

Як було зазначено у попередніх розділах, визначення поверхні руху є однією із ключових завдань керування транспортним засобом. По-перше, це дозволяє зменшувати втрату енергії на пробуксовування коліс, що збільшує запас ходу засобу, зменшує пікові струми у системі живлення і позитивно впливає на ресурс акумуляторних батарей. По-друге, це дозволяє покращити мобільність транспортного засобу, підвищуючи його прохідність і безпеку руху.

Тому, одним із поставлених завдань у цьому дослідженні було дослідити можливість визначення поверхні, по якій переміщується транспортних засіб на основі доступних вимірів із давачів. Для даного дослідження була розроблена

чотирьохколісна платформа із індивідуальним приводом коліс (див рисунки 4.16 та 4.17).

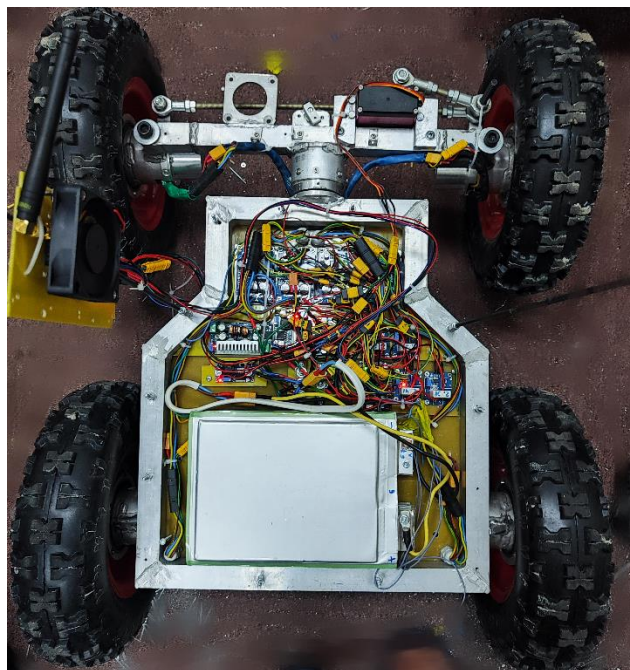


Рис. 4.16– Внутрішній вигляд колісної платформи



Рис. 4.17 – Зовнішній вигляд колісної платформи.

Експериментальна платформа складається із алюмінієвої рами із системою повороту оснащеною серводвигуном Dsservo марки DS51150 із номінальним зусиллям 150 см*кг, чотирьох коліс діаметром 30 см, які приводяться в рух безколекторними двигунами постійного струму номінальної потужності 180 Вт та номінальної напруги 18 В, які з'єднанні із колесами через редуктори зі передаточним числом 1:44. Живлення двигунів, серводвигуна, системи керування і зв'язку

здійснюється акумуляторною батареєю номінальної напруги 18 В та заявленої ємністю 17А*год. Елементи система керування і зв'язку живляться від акумулятора через перетворювачі напруги із вихідною величиною 5 В, для сервоприводу - 10 В. Платформа також оснащена давачами вимірювання фізичних величин, таких як кутове переміщення (швидкість) та струмів електричних кіл. Двигуни мають вбудовані давачі Хола для визначення кутового переміщення валу двигуна і надають 6 імпульсів за один оберт. Із врахуванням редукції, на один повний оберт колеса отримується 264 імпульсів, що дає змогу отримувати значення кута повороту колеса із дискретою 1.364 град.

Вимірювання стуму здійснюється давачами струму на ефекті Хола виробника Winsen марки WCS1800, який дозволяє виміряти струм у діапазоні від -30 до 30 А із роздільною здатністю 66мВ/А. Вимірянний струм пропорційний напрузі на аналоговому виході давача і змінюється в діапазоні 0-5В. Такі характеристики давачів повністю покривають діапазон струмів, які протікають у електричному колі драйвер-двигун. Однією із причин вибору даного давача була гальванічна розв'язка між силовим і інформаційним електричними колами. Давачі струму розміщені на одному із силових кабелів живлення на кожному індивідуальному контролері двигунів.

Керування двигунами виконується індивідуально драйверами безколекторних двигунів марки B07XP6VGYT виробника Vesna із номінальним струмом 15 А та напругою живлення 12-36В. В основі роботи цього контролера лежить принцип скалярного керування безколекторним двигуном.

Високорівневе керування рухом платформи, отримання і опрацювання інформації із пульта керування та давачів, формування керуючих імпульсів виконується контролером Arduino Mega Mini. Це компактна версія плати розробки Arduino Mega, яка базується на мікроконтролері Atmega2560 із тактовою частотою 16 МГц. Плата має 54 дискретних входів/виходів, 15 із яких підтримують формування ШІМ та 16 аналогових входів/виходів. Така велика кількість входів/виходів дозволяє керувати і обробляти інформацію для кожного колеса окремо. Зокрема, до дискретних виходів контролера приєднані входи драйверів моторів для формування сигналу керування швидкістю, напрямку руху, активацію драйвера. Також, до

дискретних входів контролера приєднанні виходи із давачів положення валу для кожного двигуна. До аналогових входів під'єднанні виходи давачів струму для зчитування величини значень струмів відповідного двигуна колеса.

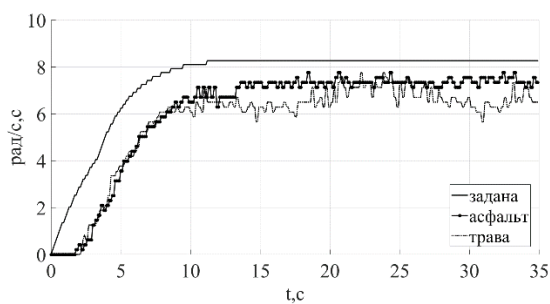
Завдання напрямку руху та швидкості подається із пульта керування, який передає інформацію через модуль Lora E32-433T20 оснований на технології LoRa, призначеним для бездротової передачі даних на частоті 433 МГц. Модуль Lora E32-433T20 може забезпечувати дальність передачі даних до 3 кілометрів у відкритому просторі, залежно від умов середовища та налаштувань передавача/приймача. Даний модуль через інтерфейс UART приєднаний до контролера Arduino Nano, який зчитує інформації про завдання руху із джойстика, кнопок та ретранслює на модуль Lora на аналогічний модуль, який встановлений на колісній платформі та приєднаний до контролера Arduino Mega Mini.

Arduino Mega Mini зчитує інформації із давачів та передає на комп'ютер за допомогою двох модулів E32-900T30D, які під'єднанні до контролера і комп'ютера відповідно. Даний тип передачі дозволив зчитувати інформації із частотою 10Гц.

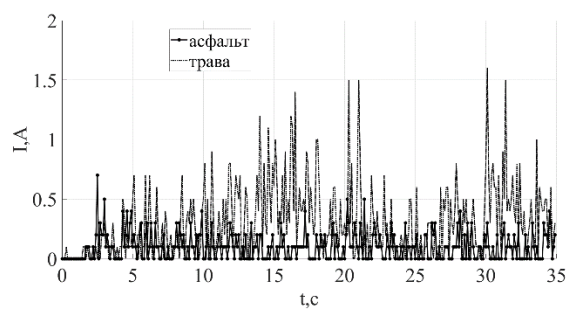
Фільтрація сигналу із давачів струму виконана програмно на контролері Arduino Mega Mini.

4.2.2 Результати

У даному дослідженні було розглянуто рух мобільної колісної платформи по двох поверхнях: асфальт і трава. Також, проведені експерименти руху транспортного засобу для цих двох поверхонь із нахилом поверхні +10 град. Процедура тестування полягала у розгоні платформи до двох швидкостей: 50 та 100 відсотків від максимально допустимого значення. Всі експерименти проводилися при однакових сигналах завдання швидкості. На рисунках 4.18-4.21, наведених нижче представлені відповідні результати.

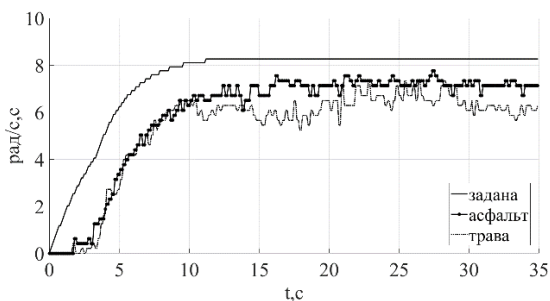


а)

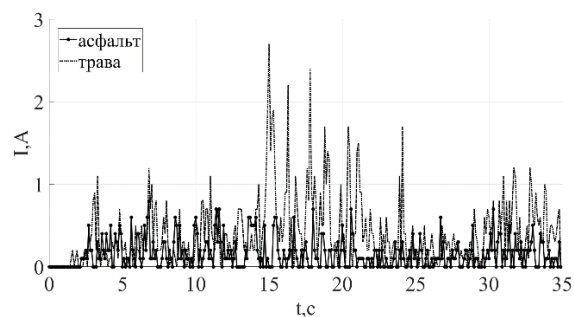


б)

Рис. 4.18 – а) Графіки швидкості колеса та б) графіки струму драйвера при русі колісної платформи по асфальту та траві при заданій швидкості 50% від максимально допустимої

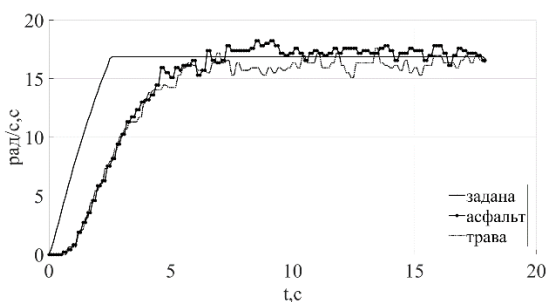


а)

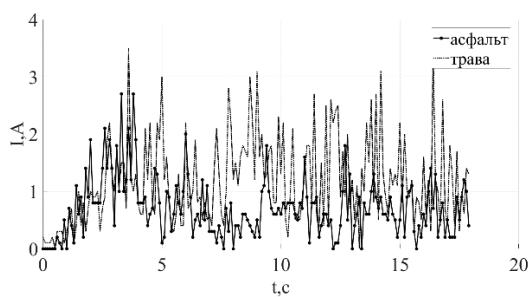


б)

Рис. 4.19 – а) Графіки швидкості колеса та б) графіки струму драйвера при русі колісної платформи по асфальту та траві при заданій швидкості 50% від максимально допустимої (рух по нахиленій площині)



а)



б)

Рис. 4.20 – а) Графіки швидкості колеса та б) графіки струму драйвера при русі колісної платформи по асфальту та траві при заданій швидкості 100% від максимально допустимої

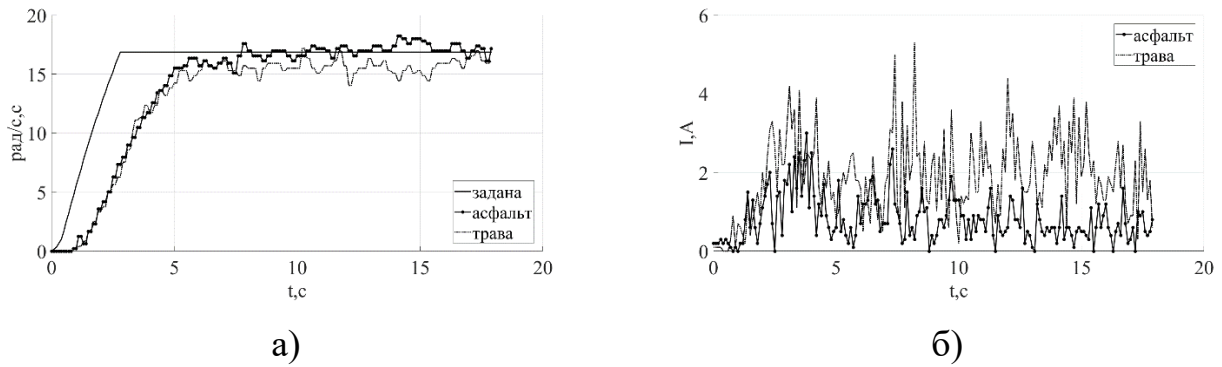


Рис. 4.21 – а) Графіки швидкості колеса та б) графіки струму драйвера при русі колісної платформи по асфальту та траві при заданій швидкості 100% від максимально допустимої (рух по нахиленій площині)

Із наведених результатів експериментів можна зробити наступні висновки. Рух колісного транспортного засобу по різних поверхнях руху спричиняє різну динаміку координат вектору стану системи електроприводу колеса. Для руху по асфальтованому дорожньому покритті характерні вищі значення кутової швидкості колеса та менші значення струму ніж для руху по трав'яному покритті. Із збільшенням сигналу завдання швидкості, графіки швидкості і струму є спів мірними відносно графіків для меншої величини керуючого впливу. Нахил по похилій поверхні спричиняє вищі значення струмів драйвера двигуна. При цьому, відмінність між кривими струму для різних покриттів залишається очевидною.

Тому, дані результати експериментів можуть слугувати для розробки інтелектуальних естиматорів поверхні руху, таких як нечіткі спостерігачі та естиматори із нейронними мережами, що дозволять формувати керуючий вплив із врахуванням поверхні руху.

4.3 Висновки

Модифікований алгоритм нечіткого фільтра частинок був реалізований на контролері dSPACE MicroAutobox II з використанням MATLAB/Simulink. Алгоритм перевірений на експериментальній установці MTS Flat-Trac в Національному дослідному центрі шин, Алтон, США. Спостерігач показав задовільну точність у всіх режимах; проте слід розглянути покращення точності оцінювання при низьких та високих швидкостях шляхом уточнення моделі тестового стенду.

Алгоритм спостереження Fuzzy-PF забезпечує оцінку стану динамічної взаємодії колеса/поверхні в режимі реального часу.

Значення кутової швидкості, отримані спостерігачем, надають дані для розрахунку ковзання шин та радіуса кочення з високою точністю. Результати підтверджують можливість використання алгоритму нечіткого фільтра частинок для визначення характеристик взаємодії колеса із поверхнею у реальному часі, що дозволяє синтезувати контролер мобільності транспортного засобу.

Наведені експерименти дослідження колісної платформи підтвердили можливість використання характеристики зміни координат системи електроприводу для визначення поверхні руху транспортного засобу.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведене теоретичне узагальнення та нове вирішення науково-прикладної задачі синтезу та аналізу інтелектуальних спостерігачів для ідентифікації координат стану електромеханічної системи «електропривод-колесо», що дає змогу формувати динамічні характеристики регульованих координат в системі керування за повним вектором стану.

Виконані в дисертаційній роботі дослідження дали змогу зробити наступні висновки:

1. Встановлені залежності між параметрами і координатами системи «електропривод-колесо» та типами поверхонь руху можуть слугувати для обмеження крутного моменту колеса для забезпечення високої мобільності транспортного засобу.
2. Проведений порівняльний аналіз використання класичних алгоритмів для визначення координат динамічної системи електротранспорту продемонстрував перспективність є використання теорії фільтру частинок завдяки високій робастності до збурень. Однак, використання цього підходу у режимі реального часу потребує потужних обчислювальних ресурсів.
3. Обчислювальна складність створених спостерігачів забезпечує ідентифікацію 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.
4. Застосування теорії нечітких множин в алгоритмі фільтру частинок дає змогу збільшити швидкодію на 56.5% у порівнянні з класичним алгоритмом, що забезпечує реалізацію системи в режимі реального часу;
5. Використання теорії нечітких множин для реалізації нечіткого спостерігача Люенбергера дає змогу підвищити точність спостереження у нелінійних системах «електропривод-колесо» на 10.3% у порівнянні із класичним

спостерігачем і забезпечує високу швидкодію системи та вимагає меншої обчислювальної складності у порівнянні із фільтром частинок.

6. Розроблена чотирьох колісна мобільна платформа із індивідуальним електроприводом коліс дає можливість проводити різноманітні експериментальні дослідження, зокрема впливу поверхні руху на динаміку зміни координат вектору стану. Встановлено, що рух колісного транспортного засобу по різних поверхнях руху спричиняє різну динаміку координат вектору стану системи електроприводу колеса, що може слугувати основою для розробки інтелектуальних естиматорів поверхні руху та подальшого розвитку автономних систем керування електромобілів.

Таким чином, виконані в дисертаційній роботі дослідження є подальшим розвитком теорії керування, зокрема ідентифікації координат стану в електро-механічних системах електромобілів, що дає змогу забезпечити покращення техніко-економічних показників функціонування таких систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gray, J. P., Vantsevich, V. V., & Paldan, J. (2016). Agile tire slippage dynamics for radical enhancement of vehicle mobility. *Journal of Terramechanics*, 65, 14-37.
2. Bekker, M. G. (1956). *Theory of land locomotion*, The University of Michigan press. *Ann Arbor*, 522.
3. Gray, J. P., Vantsevich, V. V., Opeiko, A. F., & Hudas, G. R. (2013, November). A method for unmanned ground wheeled vehicle mobility estimation in stochastic terrain conditions. In *Proc. of the 7th Americas Regional Conference of the ISTVS, Tampa, Florida, USA*
4. Zhang, X., Göhlich, D., & Fu, C. (2017). Comparative study of two dynamics-model-based estimation algorithms for distributed drive electric vehicles. *Applied Sciences*, 7(9), 898.
5. Kalman, R. E. (1961). A new approach to liner filtering and prediction problems, transaction of ASME. *Journal of Basic Engineering*, 83(1), 95-108
6. McGee, L. A. (1985). *Discovery of the Kalman filter as a practical tool for aerospace and industry* (Vol. 86847). National Aeronautics and Space Administration.
7. Reina, G., Gentile, A., & Messina, A. (2015). Tyre pressure monitoring using a dynamical model-based estimator. *Vehicle system dynamics*, 53(4), 568-586.
8. Doumiati, M., Victorino, A., Charara, A., & Lechner, D. (2011, June). Estimation of road profile for vehicle dynamics motion: experimental validation. In *Proceedings of the 2011 American control conference* (pp. 5237-5242). IEEE
9. Klomp, M., Gao, Y., & Bruzelius, F. (2014). Longitudinal velocity and road slope estimation in hybrid electric vehicles employing early detection of excessive wheel slip. *Vehicle System Dynamics*, 52(sup1), 172-188.
10. Delvecchio, D., Spelta, C., & Savaresi, S. M. (2011, September). Estimation of the tire vertical deflection in a motorcycle suspension via Kalman-filtering techniques. In *2011 IEEE International Conference on Control Applications (CCA)* (pp. 532-537). IEEE
11. Hodgson, D., Mecrow, B. C., Gadoue, S. M., Slater, H. J., Barrass, P. G., & Giaouris, D. (2013). Effect of vehicle mass changes on the accuracy of Kalman filter estimation of electric vehicle speed. *IET Electrical Systems in Transportation*, 3(3), 67-78.

12. Wielitzka, M., Dagen, M., & Ortmaier, T. (2014, December). State estimation of vehicle's lateral dynamics using unscented Kalman filter. In *53rd IEEE Conference on Decision and Control* (pp. 5015-5020). IEEE
13. Aljamal, M. A., Abdelghaffar, H. M., & Rakha, H. A. (2020). Estimation of traffic stream density using connected vehicle data: Linear and nonlinear filtering approaches. *Sensors*, 20(15), 4066.
14. El Hajjaji, A., Chadli, M., Oudghiri, M., & Pages, O. (2006, June). Observer-based robust fuzzy control for vehicle lateral dynamics. In *2006 American Control Conference* (pp. 6-pp). IEEE.
15. Berntorp, K. (2015, July). Particle filter for combined wheel-slip and vehicle-motion estimation. In *2015 American Control Conference (ACC)* (pp. 5414-5419). IEEE.
16. Nuthong, C. (2009). *Estimation of tire-road friction forces using Kalman filtering for advanced vehicle control* (Doctoral dissertation, München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2009).
17. Liu, W., He, H., & Sun, F. (2016). Vehicle state estimation based on minimum model error criterion combining with extended Kalman filter. *Journal of the Franklin Institute*, 353(4), 834-856.
18. Zhang, Y., Zhao, H., Yuan, L., & Chen, H. (2016, May). Slip ratio estimation for electric vehicle with in-wheel motors based on EKF without detection of vehicle velocity. In *2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)* (pp. 4427-4432). IEEE.
19. Enisz, K., Szalay, I., Kohlrusz, G., & Fodor, D. (2015). Tyre–road friction coefficient estimation based on the discrete-time extended Kalman filter. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 229(9), 1158-1168.
20. Turnip, A., & Fakhrurroja, H. (2013). Estimation of the wheel-ground contact tire forces using extended kalman filter. *International Journal of Instrumentation Science*, 2(2), 34-40.
21. Qi, Z., Taheri, S., Wang, B., & Yu, H. (2015). Estimation of the tyre–road maximum friction coefficient and slip slope based on a novel tyre model. *Vehicle System Dynamics*, 53(4), 506-525

22. Cordeiro, R. A., Victorino, A. C., Ferreira, P. A., de Paiva, E. C., & Bueno, S. S. (2016). Tire-ground forces estimation in a 4-wheel vehicle using a delayed interconnected cascade-observer structure. *IFAC-PapersOnLine*, 49(15), 139-144.
23. Jiang, K., Pavelescu, A., Victorino, A., & Charara, A. (2014, October). Estimation of vehicle's vertical and lateral tire forces considering road angle and road irregularity. In *17th international IEEE conference on intelligent transportation systems (ITSC)* (pp. 342-347). IEEE.
24. Cordeiro, R. A., Ribeiro, A. M., Azinheira, J. R., Victorino, A. C., Ferreira, P. A., de Paiva, E. C., & Bueno, S. S. (2017, June). Road grades and tire forces estimation using two-stage extended Kalman filter in a delayed interconnected cascade structure. In *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* (pp. 115-120). IEEE.
25. Friedland, B. (1969). Treatment of bias in recursive filtering. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 14(4), 359-367.
26. Jiang, K., Victorino, A. C., & Charara, A. (2015, September). Adaptive estimation of vehicle dynamics through RLS and Kalman filter approaches. In *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems* (pp. 1741-1746). IEEE.
27. Jiang, K., Victorino, A. C., & Charara, A. (2016, June). Real-time estimation of vehicle's lateral dynamics at inclined road employing extended kalman filter. In *2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* (pp. 2360-2365). IEEE.
28. Wenzel, T. A., Burnham, K. J., Blundell, M. V., & Williams, R. A. (2006). Dual extended Kalman filter for vehicle state and parameter estimation. *Vehicle system dynamics*, 44(2), 153-171.
29. Zong, C., Hu, D., & Zheng, H. (2013). Dual extended Kalman filter for combined estimation of vehicle state and road friction. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 26(2), 313-324.
30. Wan, E. A., & Nelson, A. T. (2001). Dual extended Kalman filter methods. *Kalman filtering and neural networks*, 123-173.
31. Reina, G., Paiano, M., & Blanco-Claraco, J. L. (2017). Vehicle parameter estimation using a model-based estimator. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 87, 227-241.

32. Jiang, K., Victorino, A., & Charara, A. (2016, November). Robust estimation of vehicle's dynamics states employing a parameter-variable EKF observer. In *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (pp. 2219-2224). IEEE.
33. Best, M. C., Gordon, T. J., & Dixon, P. J. (2000). An extended adaptive Kalman filter for real-time state estimation of vehicle handling dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 34(1), 57-75.
34. Wang, Y., Masoud, N., & Khojandi, A. (2020). Real-time sensor anomaly detection and recovery in connected automated vehicle sensors. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 22(3), 1411-1421.
35. Feng, K., Huang, B., Li, Q., & Yan, H. (2019). Online Estimation of Li-ion Battery SOC for Electric Vehicles Based on An Improved AEKF. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 118, p. 02025). EDP Sciences.
36. Julier, S. J., Uhlmann, J. K., & Durrant-Whyte, H. F. (1995, June). A new approach for filtering nonlinear systems. In *Proceedings of 1995 American Control Conference-ACC'95* (Vol. 3, pp. 1628-1632). IEEE.
37. Julier, S. J., & Uhlmann, J. K. (1997, July). New extension of the Kalman filter to nonlinear systems. In *Signal processing, sensor fusion, and target recognition VI* (Vol. 3068, pp. 182-193). Spie.
38. Uhlmann, J. K. (1994). *Simultaneous map building and localization for real time applications*. Technical report, University of Oxford, 1994. Transfer thesis.
39. Nuthong, C. (2009). *Estimation of tire-road friction forces using Kalman filtering for advanced vehicle control* (Doctoral dissertation, München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2009).
40. Chen, L., Bian, M., Luo, Y., & Li, K. (2016). Real-time identification of the tyre-road friction coefficient using an unscented Kalman filter and mean-square-error-weighted fusion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 230(6), 788-802.

41. Tian, K., Radovnikovich, M., & Cheok, K. (2022, April). Comparing EKF, UKF, and PF Performance for Autonomous Vehicle Multi-Sensor Fusion and Tracking in Highway Scenario. In *2022 IEEE International Systems Conference (SysCon)* (pp. 1-6). IEEE.
42. Liu, X., Bai, D., Lv, Y., Jiang, R., & Ge, S. S. (2021). UKF-based vehicle pose estimation under randomly occurring deception attacks. *Security and Communication Networks*, 2021, 1-12.
43. Wielitzka, M., Dagen, M., & Ortmaier, T. (2014, December). State estimation of vehicle's lateral dynamics using unscented Kalman filter. In *53rd IEEE Conference on Decision and Control* (pp. 5015-5020). IEEE.
44. Antonov, S., Fehn, A., & Kugi, A. (2011). Unscented Kalman filter for vehicle state estimation. *Vehicle System Dynamics*, 49(9), 1497-1520.
45. Zhu, T., & Zheng, H. (2008, October). Vehicle state estimation based on unscented Kalman state estimation. In *2008 International Symposium on Computational Intelligence and Design* (Vol. 1, pp. 42-46). IEEE.
46. Doumiati, M., Victorino, A. C., Charara, A., & Lechner, D. (2010). Onboard real-time estimation of vehicle lateral tire-road forces and sideslip angle. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 16(4), 601-614.
47. Zhao, Z., Chen, H., Yang, J., Wu, X., & Yu, Z. (2015). Estimation of the vehicle speed in the driving mode for a hybrid electric car based on an unscented Kalman filter. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of automobile engineering*, 229(4), 437-456.
48. Xin, X., Zhang, W., Shen, C., & Zheng, H. (2017). Control strategy of four-wheel independent drive electric vehicle based on vehicle velocity estimation and switchover. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 39(7), 965-975.
49. Xin-Yi, Z., & Wei-Wen, D. (2013, January). Study on velocity estimation for four-wheel independent drive electric vehicle by UKF. In *2013 Fifth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation* (pp. 1111-1114). IEEE.
50. Ren, H., Chen, S., Liu, G., & Zheng, K. (2014). Vehicle state information estimation with the unscented Kalman filter. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 589397.

51. Gao, Z., & Wu, T. (2011, August). Soft sensor of vehicle state based on UKF and vehicle dynamics. In *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology* (Vol. 4, pp. 2143-2147). IEEE.
52. Hamann, H., Hedrick, J. K., Rhode, S., & Gauterin, F. (2014, June). Tire force estimation for a passenger vehicle with the unscented kalman filter. In *2014 IEEE intelligent vehicles symposium proceedings* (pp. 814-819). IEEE.
53. Chen, L., Bian, M., Luo, Y., & Li, K. (2015). *Estimation of road-tire friction with unscented Kalman filter and MSE-weighted fusion based on a modified Dugoff tire model* (No. 2015-01-1601). SAE Technical Paper.
54. Hall, D. L., & McMullen, S. A. (2004). *Mathematical techniques in multisensor data fusion*. Artech House.
55. You, C., & Tsiotras, P. (2017, May). Vehicle modeling and parameter estimation using adaptive limited memory joint-state UKF. In *2017 American Control Conference (ACC)* (pp. 322-327). IEEE.
56. Myers, K., & Tapley, B. D. (1976). Adaptive sequential estimation with unknown noise statistics. *IEEE transactions on automatic control*, 21(4), 520-523.
57. Osinenko, P., Geißler, M., Herlitzius, T., & Streif, S. (2016, July). Experimental results of slip control with a fuzzy-logic-assisted unscented Kalman filter for state estimation. In *2016 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)* (pp. 501-507). IEEE.
58. Osinenko, P., Geissler, M., & Herlitzius, T. (2014, July). Adaptive unscented Kaiman filter with a fuzzy supervisor for electrified drive train tractors. In *2014 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)* (pp. 322-331). IEEE.
59. Song, S. H., Ahn, M., Kim, K., & Park, J. B. (2016). Performance Analysis of EKF and UKF for Estimating Tire Longitudinal and Side Angle Slip. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 70, p. 04002). EDP Sciences.
60. Doumiati, M., Victorino, A., Charara, A., & Lechner, D. (2009, June). Unscented Kalman filter for real-time vehicle lateral tire forces and sideslip angle estimation. In *2009 IEEE intelligent vehicles symposium* (pp. 901-906). IEEE.

61. Gordon, N. J., Salmond, D. J., & Smith, A. F. (1993, April). Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation. In *IEE proceedings F (radar and signal processing)* (Vol. 140, No. 2, pp. 107-113). IET Digital Library.
62. Qi, G., Fan, X., & Li, H. (2022). A comparative study of the unscented Kalman filter and particle filter estimation methods for the measurement of the road adhesion coefficient. *Mechanical Sciences*, 13(2), 735-749.
63. Chu, W., Luo, Y., Dai, Y., & Li, K. (2015). In-wheel motor electric vehicle state estimation by using unscented particle filter. *International Journal of Vehicle Design*, 67(2), 115-136.
64. Lin, F., & Huang, C. (2013). Slip-Slope Estimation of Mutative Road Friction Coefficient Based on Unscented Particle Filter. *Applied Mechanics and Materials*, 249, 337-342.
65. Wang, B., Cheng, Q., Victorino, A. C., & Charara, A. (2012, September). Nonlinear observers of tire forces and sideslip angle estimation applied to road safety: Simulation and experimental validation. In *2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems* (pp. 1333-1338). IEEE.
66. Jiang, K., Victorino, A. C., & Charara, A. (2016, June). Real-time estimation of vehicle's lateral dynamics at inclined road employing extended kalman filter. In *2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* (pp. 2360-2365). IEEE.
67. Cheng, Q., Victorino, A. C., & Charara, A. (2011). Nonlinear observer of sideslip angle using a particle filter estimation methodology. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 6266-6271.
68. Dandach, H., Abdallah, F., De Miras, J., & Charara, A. (2012, December). Vehicle dynamics estimation using box particle filter. In *2012 12th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)* (pp. 118-123). IEEE.
69. Schon, T., Gustafsson, F., & Nordlund, P. J. (2005). Marginalized particle filters for mixed linear/nonlinear state-space models. *IEEE Transactions on signal processing*, 53(7), 2279-2289.

70. Luenberger, D. G. (1964). Observing the state of a linear system. *IEEE transactions on military electronics*, 8(2), 74-80.
71. Luenberger, D. (1971). An introduction to observers. *IEEE Transactions on automatic control*, 16(6), 596-602.
72. Barrho, J., Hiemer, M., Kiencke, U., & Matsunaga, T. (2005). Estimation of elevation difference based on vehicle's inertial sensors. *Ifac Proceedings Volumes*, 38(1), 117-121..
73. Sebsadji, Y., Glaser, S., Mammari, S., & Dakhilallah, J. (2008, June). Road slope and vehicle dynamics estimation. In *2008 American control conference* (pp. 4603-4608). IEEE
74. Zeitz, M. (1987). The extended Luenberger observer for nonlinear systems. *Systems & Control Letters*, 9(2), 149-156.
75. Birk, J., & Zeitz, M. (1988). Extended Luenberger observer for non-linear multivariable systems. *International Journal of Control*, 47(6), 1823-1836.
76. Gao, X., Yu, Z., Neubeck, J., & Wiedemann, J. (2010). Sideslip angle estimation based on input–output linearisation with tire–road friction adaptation. *Vehicle System Dynamics*, 48(2), 217-234.
77. Ding, N., Chen, W., Zhang, Y., Xu, G., & Gao, F. (2014). An extended Luenberger observer for estimation of vehicle sideslip angle and road friction. *International Journal of Vehicle Design*, 66(4), 385-414.
78. How, D. N., Hannan, M. A., Lipu, M. S. H., Sahari, K. S., Ker, P. J., & Muttaqi, K. M. (2020). State-of-charge estimation of li-ion battery in electric vehicles: A deep neural network approach. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(5), 5565-5574.
79. Stephant, J., Charara, A., & Meizel, D. (2004). Virtual sensor: Application to vehicle sideslip angle and transversal forces. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 51(2), 278-289.
80. Or, B., & Klein, I. (2022). A hybrid model and learning-based adaptive navigation filter. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1-11.
81. Bertipaglia, A., Alirezai, M., Happee, R., & Shyrokau, B. (2023). An Unscented Kalman Filter-Informed Neural Network for Vehicle Sideslip Angle Estimation. *arXiv preprint arXiv:2303.05238*.

82. El Youssfi, N., Oudghiri, M., Aitouche, A., & El Bachtiri, R. (2018, June). Fuzzy Sliding-Mode Observer for Lateral Dynamics of Vehicles with Consideration of Roll Motion. In *2018 26th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)* (pp. 861-866). IEEE.
83. El Hajjaji, A., Chadli, M., Oudghiri, M., & Pages, O. (2006, June). Observer-based robust fuzzy control for vehicle lateral dynamics. In *2006 American Control Conference* (pp. 6-pp). IEEE.
84. Du, H., & Li, W. (2014, July). Model-based Takagi-Sugeno fuzzy approach for vehicle longitudinal velocity estimation during braking. In *2014 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)* (pp. 1851-1858). IEEE.
85. Kobayashi, K., Cheok, K. C., & Watanabe, K. (1995, June). Estimation of absolute vehicle speed using fuzzy logic rule-based Kalman filter. In *Proceedings of 1995 American Control Conference-ACC'95* (Vol. 5, pp. 3086-3090). IEEE.
86. Jayachandran, R., Ashok, S. D., & Narayanan, S. (2013). Fuzzy logic based modelling and simulation approach for the estimation of tire forces. *Procedia Engineering*, 64, 1109-1118.
87. Ivanov, V. (2011). Fuzzy architecture of systems with alterable information: case study for tyre- ground friction estimators. *International Journal of Reliability and Safety*, 5(3-4), 398-419.
88. Ivanov, V. G. (2005). Investigation into tyre-road interaction based on fuzzy logic methods. *International journal of vehicle autonomous systems*, 3(2-4), 198-215.
89. Ivanov, V., & Shyrokau, B. (2010, March). Fuzzy architecture of safety-relevant vehicle systems. In *Proceedings of 4th International Workshop on Reliable Engineering Computing (REC 2010), Singapore* (pp. 3-5).
90. Ivanov, V., Shyrokau, B., Augsburg, K., & Algin, V. (2010). Fuzzy evaluation of tyre-surface interaction parameters. *Journal of Terramechanics*, 47(2), 113-130.
91. Geng, C., Mostefai, L., Denäi, M., & Hori, Y. (2009). Direct yaw-moment control of an in-wheel-motored electric vehicle based on body slip angle fuzzy observer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(5), 1411-1419.

92. Ivanov, V. (2015). A review of fuzzy methods in automotive engineering applications. *European Transport Research Review*, 7(3), 1-10.
93. Belousov, B., Ksenevich, T. I., & Vantsevich, V. (2013). Load estimation of an open-link locomotion module for robotic and commercial multi-wheel applications. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 6(2013-01-2358), 301-307.
94. Belousov, B., Ksenevich, T. I., Vantsevich, V., & Naumov, S. (2014). *An active long-travel, two performance loop control suspension of an open-link locomotion module for off-road applications* (No. 2014-01-2288). SAE Technical Paper.
95. Buechner, S., Schreiber, V., Amthor, A., Ament, C., & Eichhorn, M. (2013, November). Nonlinear modeling and identification of a dc-motor with friction and cogging. In *IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 3621-3627). IEEE.
96. Kara, T., & Eker, I. (2004). Nonlinear modeling and identification of a DC motor for bidirectional operation with real time experiments. *Energy Conversion and Management*, 45(7-8), 1087-1106.
97. Paldan, J. R., Gray, J. P., & Vantsevich, V. V. (2015, October). Sensor signal limitations in wheel rotational kinematics estimation model. In *Dynamic Systems and Control Conference* (Vol. 57267, p. V003T45A001). American Society of Mechanical Engineers.
98. Andreev, A. F., Kabanau, V., & Vantsevich, V. (2010). *Driveline systems of ground vehicles: theory and design*. Crc Press.
99. Vantsevich, V. V. (2006, January). Inverse wheel dynamics. In *ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (pp. 227-238). American Society of Mechanical Engineers.
100. Petrushov, V. A., Shuklin, S. A., Moskovkin, V. V., Rolling Resistance of Automobiles and Trucks, *Mashinostroenie Publishing House*, Moscow, Russia, 1975.
101. Bekker, M. G. (1969). Introduction to Terrain-Vehicle Systems. Part I: The Terrain. Part II: The Vehicle. *MICHIGAN UNIV ANN ARBOR*.
102. Chudakov, E. A., Theory of Automobile, *State Publishing House of Machine-Building Literature*, 1950

103. Kutzbach, H. D., Bürger, A., & Böttinger, S. (2019). Rolling radii and moment arm of the wheel load for pneumatic tyres. *Journal of Terramechanics*, 82, 13-21.
104. Gillespie, T. D. (1992). Fundamentals of vehicle dynamics (Vol.114). *SAE Technical Paper*.
105. Zhao, L., & Vantsevich, V. V. (2020). A robust real-time estimation of the dynamic normal reaction for an open-link locomotion module with an E-drive. *Vehicle System Dynamics*, 58(9), 1451-1476.
106. Zhao, L., Qin, P., Gao, S., Zhang, S., Vantsevich, V. V., & Liu, Z. (2023). A Linear Variable Parameter Observer-Based Road Profile Height Estimation for Suspension Nonlinear Dynamics Improvements. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
107. Vantsevich, V., Lozynskyy, A., & Demkiv, L. (2017). A wheel rotational velocity control strategy for an open-Link locomotion module. In *19th International and 14th European-African Regional Conference of the ISTVS*.
108. Wong, J. Y. (2009). *Terramechanics and off-road vehicle engineering: terrain behaviour, off-road vehicle performance and design*. Butterworth-heinemann.
109. Gray, J. P., Vantsevich, V. V., & Overholt, J. L. (2013, August). Indices and computational strategy for unmanned ground wheeled vehicle mobility estimation and enhancement. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 55935, p. V06AT07A068). American Society of Mechanical Engineers.
110. Bernard, J., & Pickelmann, M. (1986). An inverse linear model of a vehicle. *Vehicle System Dynamics*, 15(4), 179-186.
111. Karnopp, D. (1991). On inverse equations for vehicle dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 20(6), 371-379.
112. Vantsevich, V. V., Gray, J. P., & Paldan, J. R. (2015). An agile tyre slippage estimation based on new tyre and wheel rolling characteristics. In *ISTVS 13th European Conference Rome, Italy*.
113. Vantsevich V, Gorsich D, Lozynskyy A, Demkiv L, Borovets T, Klos S (2019) Reference torque history for sustainable mobility and energy efficiency under target velocity

- profiles. In: *Proceedings of the ISTVS 15-th European-african regional conference, Prague, Czech Republic*, September 9–11, 2019.
114. Fox, D., Thrun, S., & Burgard, W. (2005). Probabilistic robotics. MIT Press.
 115. Liu, J., & Guo, G. (2021). Vehicle localization during GPS outages with extended Kalman filter and deep learning. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-10.
 116. Vantsevich, V., Gorsich, D., Lozynskyy, A., Demkiv, L., & Borovets, T. (2018). State observers: an overview and application to agile tire slippage dynamics. In *Proceeding of 10th Asia-Pacific Conference of ISTVS* (pp. 1-18).
 117. Гаврилюк І.П., Макаров В.Л. (1995). Методи обчислень. *Вища школа*, ч.1, ч.2.
 118. Фельдман Л.П., Петренко А.І., Дмитрієва О.А. (2006). Чисельні методи в інформатиці. *Київ, видавнича група BHV*.
 119. Задачин, В. М., Конюшенко, І. Г., & Конюшенко, І. Г. (2014). Чисельні методи: навчальний посібник
 120. Мороз В. (2003). Погляд інженера-електрика на числові методи розв'язування звичайних диференціальних рівнянь. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи"*. – No485. – 2003. – С. 208–213.
 121. Мороз, В. (2005). Особливості застосування числових методів у моделюванні сучасних електроприводів. *Теоретична електротехніка.—2005.—Вип, 58*, 130-137.
 122. Vantsevich, V., Gorsich, D., Lozynskyy, A., Demkiv, L., & Borovets, T. (2019). State observers for terrain mobility controls: a technical analysis. In *Advances in Mechanism and Machine Science: Proceedings of the 15th IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science 15* (pp. 3681-3690). Springer International Publishing.
 123. Lozynskyy, A. O., Demkiv, L. I., Vantsevich, V. V., Borovets, T. V., & Gorsich, D. J. (2019). An estimation accuracy of state observers under uncertain initial conditions. *Math. Model. Comput*, 6(2), 320-332.
 124. Borovets, T. (2020). Application of a Fuzzy Particle Filter to Observe a Dynamical System States in Real Time. *Electrical Power and Electromechanical Systems*. P.18-26, DOI: <https://doi.org/10.23939/sepes2020.01.018>.

125. Vantsevich, V., Gorsich, D., Lozynskyy, A., Demkiv, L., Borovets, T., & Klos, S. (2020). Agile Tyre Mobility: Observation and Control in Severe Terrain Environments. In *Advanced Technologies for Security Applications: Proceedings of the NATO Science for Peace and Security'Cluster Workshop on Advanced Technologies', 17-18 September 2019, Leuven, Belgium* (pp. 247-258). Springer Netherlands
126. Borovets T., Lozinskyi A., Demkiv L. Real-time estimation and control for autonomous mobile robots and vehicles // Інформаційно-вимірювальні технології IBT-2022 : тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції, 09-10 листопада 2022 р., Львів. – 2022. – С. 21–22.
127. Ma, J., & Zhao, Q. (2012). Robot Visual Servo with Fuzzy Particle Filter. *J. Comput.*, 7(4), 842-845.
128. Global Center for Automotive Performance Simulation (n.d.). *Global Center for Automotive Performance Simulation*. Tire Testing. <https://www.gcaps.net/>
129. Continental Truck (n.d.). *The MPT 81 is a high-tech Multi Purpose Tire which performs on-road and off-road and provides excellent winter traction*. Continental Truck Tires. <https://www.continental-tires.com/products/b2b/mpt/tires/mpt81/>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з науково-педагогічної роботи
 Національного університету «Львівська політехніка»
 Олег ДАВИДЧАК
 _____ 2023 р.



АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи

Боровця Тараса Васильовича

«Синтез та аналіз інтелектуальних спостерігачів координат вектору стану
 системи керування рухом колеса електромобіля»

Комісія у складі: голови комісії - д.т.н., проф., завідувача кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем Щура І.З., д.т.н., проф., професора кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем Куцика А.С., д.т.н., проф., професора кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем Маляра А.В. склала акт про те, що результати дисертаційної роботи Боровця Т.В. впроваджені у навчальний процес кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем 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. Зокрема, у навчальний процес впроваджено запропоновані Боровцем Т.В. алгоритми спостерігачів станів системи керування рухом колеса електромобіля, методичні рекомендації реалізації алгоритмів спостереження на апаратних засобах реального часу.

Голова комісії

Зав. кафедри електромехатроніки та
 комп'ютеризованих електромеханічних
 систем, д.т.н., професор

Ігор ЩУР

Члени комісії

д.т.н., професор, професор

Андрій КУЦИК

д.т.н., професор, професор

Андрій МАЛЯР

ДОДАТОК Б

softserve

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Боровця Тараса Васильовича

на тему:

«Синтез та аналіз інтелектуальних спостерігачів координат вектору стану системи керування рухом колеса електромобіля»

Розроблені алгоритми спостереження координат системи руху колеса електромобіля використовуються ТзОВ «СофтСерв Технології» для проектування систем керування електроприводом мобільних роботів. Зокрема, інтелектуальні алгоритми спостереження забезпечують систему керування невимірними станами системи для ідентифікації руху та покращення мобільності колісної роботизованої платформи.

Директор
ТОВ «СофтСерв Технології»



Стогній Ю.Ф.

ДОДАТОК В

Список публікацій здобувача за темою дисертації

- в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Vantsevich, V., Gorsich, D., Lozynsky, A., Demkiv, L., & Borovets, T. (2019). State observers for terrain mobility controls: a technical analysis. In *Advances in Mechanism and Machine Science: Proceedings of the 15th IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science 15* (pp. 3681-3690). Springer International Publishing.

2. Lozynsky, A. O., Demkiv, L. I., Vantsevich, V. V., Borovets, T. V., & Gorsich, D. J. (2019). An estimation accuracy of state observers under uncertain initial conditions. *Math. Model. Comput*, 6(2), 320-332.

3. Боровець Т. В. Застосування нечіткого фільтра частинок для спостереження станів динамічної системи в режимі реального часу. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2020. Вип. 2, № 1. С. 18–26.

4. Vantsevich, V., Gorsich, D., Lozynsky, A., Demkiv, L., Borovets, T., & Klos, S. (2020). Agile Tyre Mobility: Observation and Control in Severe Terrain Environments. In *Advanced Technologies for Security Applications: Proceedings of the NATO Science for Peace and Security'Cluster Workshop on Advanced Technologies', 17-18 September 2019, Leuven, Belgium* (pp. 247-258). Springer Netherlands.

- які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Vantsevich, V., Gorsich, D., Lozynsky, A., Demkiv, L., & Borovets, T. (2018). State observers: an overview and application to agile tire slippage dynamics. In *Proceeding of 10th Asia-Pacific Conference of ISTVS* (pp. 1-18).

6. Vantsevich V., Gorsich D., Lozynsky A., Demkiv L., Borovets T., Klos S. (2019). Reference torque history for sustainable mobility and energy efficiency under target velocity profiles. In: *Proceedings of the ISTVS 15-th European-african regional conference, Prague, Czech Republic, September 9–11*.

7. Borovets T., Lozynskyi A., Demkiv L. (2022). Real-time estimation and control for autonomous mobile robots and vehicles. *Інформаційно-вимірювальні технології IBT-2022 : тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції, 09-10 листопада 2022 р., Львів, 21–22*.