

ШУЛЯК М.Л.

ДИНАМІКА РУХУ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ ЗМІННОЇ МАСИ

МОНОГРАФІЯ



СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінжинірингу**

Михайло ШУЛЯК

**ДИНАМІКА РУХУ ТРАНСПОРТНО-
ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ
ЗМІННОЇ МАСИ**

Монографія

СУМИ – 2025

УДК 629.1.02

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Сумського національного аграрного університету
(протокол № 20 від «26» 05 2025 року)*

Рецензенти:

Калінін Є.І., д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою тракторів і автомобілів Національного університету біоресурсів і природокористування;

Кальченко Б.І., д-р техн. наук, професор, професор кафедри автомобіле- і тракторобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Ш 95 Шуляк М.Л. Динаміка руху транспортно-технологічних агрегатів змінної маси: монографія. Суми: Сумський НАУ, 2025. - 190 с.

У монографії досліджено динаміку руху транспортно-технологічних агрегатів змінної маси, що є актуальним для оптимізації їхньої. Запропоновано розглядати такі агрегати як багатомасові механічні системи, динаміку яких необхідно аналізувати за трьома координатами з урахуванням стохастичних впливів технологічного процесу. Визначено перспективні напрямки підвищення енергетичних показників агрегатів, включаючи використання часткових швидкісних характеристик двигуна та перерозподіл потужності між компонентами. Обґрунтовано умови руху з найменшими енергетичними втратами для агрегатів з активними колесами технологічної машини. Розроблено принципи формування функціональної стабільності агрегатів змінної маси на основі керування визначальними параметрами. Запропоновано метод геометричної інтерпретації стохастичного процесу руху для визначення керуючих впливів. Розроблено алгоритм керування режимами роботи агрегату, що прискорює аналіз та вибір оптимальної моделі. Розглянуто додаткові втрати енергії та напрямки їх зниження, а також особливості забезпечення функціональної стабільності для машин зі змінною масою.

УДК 629.1.02

ISBN

© М.Л. Шуляк, 2025

©Сумський національний аграрний університет, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. ПРОБЛЕМИ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ТА ТРАНСПОРТНО ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ	8
1.1 Аналіз тракторовикористання на транспортних та транспортно- технологічних роботах в рослинництві	9
1.2 Проблема функціональної стабільності.....	15
1.3 Проблема енергозбереження.....	21
1.4 Проблема динаміки	28
2. ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ТРАНСПОРТНО- ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ	36
2.1 Основні тенденції і напрямки покращення енергозбереження транспортно- технологічних агрегатів з технологічними машинами змінної маси.....	36
2.2 Підвищення енергетичних показників транспортно-технологічних агрегатів на базі оптимального перерозподілу потужності між компонентами агрегату...	46
2.3 Дослідження динаміки руху транспортно-технологічних агрегатів при використанні технологічних машин з ведучими колесами	51
2.3.1 Обґрунтування умов руху при використанні додаткових ведучих вісей агрегату при рівномірному русі	51
2.3.2 Динаміка буксування рушіїв трактора у складі транспортно- технологічного агрегату	61
2.3.3 Динамічна модель транспортно-технологічного агрегату з активними колесами	70
2.3.4 Визначення впливу швидкості руху транспортно-технологічного агрегату на зміни коливання поздовжніх сил	89

3. ДИНАМІЧНИЙ ПРОСТІР ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО АГРЕГАТУ	94
3.1 Динамічний простір функціонування транспортно-технологічного агрегату.....	94
3.2 Нестабільність функціонування транспортно-технологічного агрегату в динамічному просторі.....	102
3.3 Робота трактора в динамічному просторі функціонування	113
3.4 Використання поверхні другого порядку для апроксимації функціонування транспортно-технологічного агрегату в динамічному просторі	120
3.5 Аналіз параметричних еліпсоїдів функціонування трактора за допомогою елементів теорії множин.....	125
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ.....	134
4.1 Розробка вимірювально-керуючого комплексу	134
4.1.1 Елементи мобільного вимірювально-керуючого комплексу.....	135
4.1.2 Прилади для моніторингу швидкості руху та буксування трактора	145
4.2 Компонування елементів вимірювально-керуючого комплексу для моніторингу і аналізу динамічного простору функціонування.....	154
4.3 Методика та експериментальні дослідження транспортно-технологічних агрегатів з технологічними машинами змінної маси	160
4.3.1 Методика експериментальних досліджень.....	160
4.3.2 Експериментальні дослідження агрегатів з технологічними машинами змінної маси	161
ВИСНОВКИ.....	177
ІНФОРМАЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА.....	180

ВСТУП

Монографія «Динаміка руху транспортно-технологічних агрегатів змінної маси» є результатом виконання науково-дослідної роботи «Формування функціональної стабільності та енергоощадних режимів експлуатації транспортно-технологічних агрегатів у аграрному виробництві» в рамках іменної стипендії Верховної Ради України для молодих учених - докторів наук.

Тенденція останніх років показує, що формування транспортно-технологічних агрегатів відбувається на базі тракторів тягово-енергетичної концепції. Тобто, можливості по повній реалізації потужності їх двигунів передбачають одночасне використання трактора, як в режимі тягача, так і в режимі енергетичної установки. Проте на транспортних та транспортно-технологічних операціях рослинництва реалізувати повну потужність двигуна дуже важко, особливо, коли маса вантажу змінюється в процесі роботи. Аналіз методів підвищення реалізації потужності, тобто збільшення ступеня завантаження двигуна, показує пріоритетність використання активних робочих органів та приводів коліс сільськогосподарських машин. По-перше, такий підхід дозволяє передати частину надлишкової енергії двигуна, яку неможливо реалізувати в тяговому режимі. По-друге, дозволяє використати масу сільськогосподарської машини і за її рахунок підвищити показники зчіпної ваги агрегату.

Для транспортно-технологічного агрегату при використанні активних коліс технологічної машини, тобто агрегату з повним приводом, виявлені умови руху з найменшими додатковими витратами енергії з врахуванням динамічних складових руху. За результатами аналізу рух агрегату з передачею частини потужності на активні колеса технологічної машини необхідно реалізовувати за часткового недовантаження, оскільки при цьому режимі не виникає набігання технологічної машини на трактор, як наслідок, наявні найменші динамічні коливання та стабілізуючий ефект для поздовжніх сил. Дослідження динаміки буксування коліс дозволили визначити другу складовою ефективною роботи агрегату за умова

підключення активних коліс технологічної машини лише при досягненні буксування коліс трактора 12-15 %. Виконання цієї умови забезпечить максимальну реалізацію трактора у якості тягача, а при досягненні надмірного буксування, через обмеження по зчепленню, реалізацію надлишкової потужності двигуна у якості трактор – джерело енергії.

Процес руху транспортно-технологічного агрегату містить багато стохастичних факторів і його математичне моделювання ускладнюється невизначеністю умов. Особливо важко моделювати подібний рух при постійній зміні маси вантажу, яка виникає внаслідок виконання технологічної операції. Тому, запропоновано використовувати геометричну інтерпретацію стохастичного процесу руху, яка включає в себе представлення руху агрегату за одним визначальним параметром – прискоренням (сповільненням). Такий підхід дозволяє обмежити область функціонування агрегату за допомогою геометричної фігури, в межах якої визначається роботоздатність та енергоощадність.

Область функціонування транспортно-технологічного агрегату, апроксимована еліпсоїдом, задається множиною кінців радіус-векторів повного прискорення, що відтворені з центру мас агрегату. В середині цієї області визначається ядро (найбільша концентрація точок), за місцем розташування якого та характером його переміщення при зміні режимів, можна робити висновки по енергозбереженню та функціональній стабільності агрегату. Збільшення об'єму еліпсоїда буде характеризувати режими з великим коливанням прискорення, а значне відхилення ядра від центру буде характеризувати збільшення витрат енергії.

Розроблений комплекс керування та моніторингу динамічних параметрів роботи транспортно-технологічного агрегату, який може бути інтегрований у бортову систему трактора та інформує оператора про необхідність зміни режиму роботи чи проводити зміну автоматично, базується на синтезі вимірювальних датчиків та системи керування, яка включає програми моніторингу функціональних параметрів та дозволяє візуально аналізувати обрані режими. За необхідності

програмне забезпечення дозволяє корегувати вихідні дані, чи робити висновок по агрегуванню, безпосередньо при виконанні транспортно-технологічної операції.

При дослідженні роботи алгоритму керування та розробленого комплексу проведені експериментальні дослідження. За результатами визначено, що для машин зі змінною масою функціональна стабільність залежить від двох ключових факторів: значної ваги вантажу, особливо якщо вона співмірна або перевищує вагу трактора, а також від типу та властивостей вантажу, які можуть спричиняти динамічні відхилення функціональних параметрів, особливо при частковому завантаженні. Слід врахувати, що для перевезення рідких і сипких вантажів ємність або бункер необхідно заповнювати повністю. Якщо це неможливо, обирати режим роботи, враховуючи параметри функціональної стійкості, що особливо важливо для рідких вантажів.

Основна ідея роботи базується на необхідності оптимального керуванні режимами роботи транспортно-технологічних агрегатів з врахуванням того, що маса вантажу технологічної машини постійно змінюється при виконанні технологічної операції. Реалізація такого підходу можлива при інтеграції розробленого обладнання та алгоритму керування режимами роботи до бортових систем трактора у погодженні із системами точного землеробства.