

ГОРОХОВСЬКИЙ ВІКТОР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0002-0676-0038>e-mail: aigordeev54@ukr.net

ГОРДЄЄВ АНАТОЛІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4494-4348>e-mail: aigordeev54@ukr.net

СТВОРЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУХОМОМІХ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ ОБ'ЄМНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

В роботі розглянуто питання інженерного аналізу технічних систем засобами комп'ютерного моделювання, зокрема розрахунок кінематичних та динамічних характеристик рухомого транспорту з використання системи інженерного аналізу SOLIDWORKS, що дозволяє проводити чисельні експерименти визначення їх характеристик, а саме масових, координат центру ваги з метою підвищення точності розрахунків при аналізі дорожньо-транспортних пригод. Запропоновано методологію на основі комп'ютерного моделювання у SOLIDWORKS для вирішення завдання визначення критичних швидкостей при русі транспортного засобу на повороті з перекиданням. Отримані результати у вигляді графіків надають можливість аналізувати вплив різних параметрів складного рухомого об'єкту при повороті та можуть бути застосовані при проведенні експертно-криміналістичних досліджень для підвищення якості висновків.

Ключові слова: кінематика руху складного об'єкту, координати центру ваги, комп'ютерне моделювання.

HOROKHOVSKYI VIKTOR, HORDIEIEV ANATOLYI

Khmelnitskyi National University

USING THE SOLIDWORKS SOFTWARE PRODUCT FOR DETERMINING THE MASS, KINEMATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE MOVEMENT OF OBJECTS OF A COMPLEX VOLUME GEOMETRIC CONFIGURATIONS

Solving scientific tasks, which consist in the implementation of information technologies for support and decision-making in the synthesis and analysis of complex technological systems, taking into account the spatial geometry of components, is an urgent task for various technical branches of the national economy. The work deals with the issue of engineering analysis of technical systems by means of computer modeling, in particular, the calculation of kinematic and dynamic characteristics of complex objects, namely vehicles moving along different trajectories, using the SOLIDWORKS engineering analysis system, which allows using numerical experiments to determine their characteristics, namely mass, coordinates of the center of gravity of critical speeds in order to increase the accuracy of calculations in the analysis of a road traffic accident (traffic accident). To solve the problem of determining the critical speeds when the vehicle moves on a turn with a rollover, a technique based on computer modeling in SOLIDWORKS is proposed. For this, a 3-D model of a complex moving object is being built, to which various cargo can be added from a location in the desired city. The obtained results in the form of graphs make it possible to analyze the influence of various parameters of a complex moving object when turning and overturning, namely the height of the center of gravity, the radius of rounding of the road, the magnitude of the road slope, the condition of the road surface. The analysis of the results of the calculations of the critical rollover speed at the turn, according to the recommended range, showed that for the real values of the height of the center of gravity, obtained according to the proposed methodology, the critical speed is lower according to the upper limit of the range when the road is flat, and also lower when the road is inclined at an angle β . The obtained results can be applied when conducting expert forensic studies to improve the quality of conclusions.

Keywords: kinematics of the movement of a complex object, coordinates of the center of gravity, computer modeling.

Постановка проблеми

Вирішення наукових завдань, які полягають у впровадженні інформаційних технологій для підтримки та прийняття рішень при синтезі складних технологічних систем з врахуванням просторової геометрії компонентів при синтезі складних технологічних систем є актуальним завданням для різних галузей народного господарства.

Важливою сферою таких задач є транспортна та складська логістика, компонування аерокосмічних об'єктів, підвищення безпеки паливно-енергетичних комплексів, сучасні впровадження новітніх технологій 3D-друку, визначення критичних швидкостей при виконанні дорожньо-технічної експертизи.

Задачі аналізу кінематики та динаміки багатомасових і багатотільних систем є одним із класичних напрямків у галузі прикладної механіки. При моделюванні динаміки багатомасових систем застосовується метод кінцевих елементів, що дозволяє досліджувати концепцію всієї системи та оцінити її динамічну реакцію у лінійній, нелінійній постановках. Особливості поведінки можуть бути збережені і передані, як вхідні дані в МКЕ-аналіз для використання в якості динамічних навантажень, що забезпечить розуміння функціонування системи в більш детальному вигляді.

При аналізі руху та поведінки багатомасових і багатотільних систем необхідно вирішувати задачу визначення маси системи та координати центру ваги. Поряд із вимірюванням маси сьогодні постає ще один не менш важливий параметр – це положення центра ваги. Відомі нормативно-технічні вимоги для літаків, залізничного та автомобільного транспорту. Проаналізувавши їх можна винести одну найбільш важливу вимогу – це точне визначення ваги і координат центра ваги та особливо його відстані у вертикальній

площині. Положення центра ваги є дуже важливими та має піддаватися постійному контролю в рухомих об'єкті. Оскільки залізничний транспорт у наш час широко використовують для перевезення різних видів вантажів, тому у край важливо створити умови для безпечного руху поїздів. Визначення зміщення центру ваги вантажу відносно осей симетрії залізничного вагона дозволяє оперативно виявляти небезпечні відхилення в його стійкості й тим самим істотно збільшити безпеку під час руху поїзда. Контроль зміщення центру ваги дозволить підвищити швидкість перевезення вантажів залізничним шляхами України, а також підвищити експлуатаційний строк залізничного рухомого складу.

Також моделювання динаміки багатомасових систем використовується для передбачення та оптимізації руху неврівноважених систем та визначенню характеристик критичних параметрів руху складних рухомих об'єктів – завантажених транспортних засобів.

При визначенні положень центрів ваги тіл складної форми застосовують такі конкретні методи: метод симетрії; метод розбивання і доповнення. Якщо однорідне тіло має площину, вісь або центр симетрії, то його центр ваги знаходиться в площині, на осі або в центрі симетрії.

При застосуванні методу розбивання і доповнення тіло розбивають на скінчену кількість частин простої форми, центри ваги яких відомі або легко знаходяться. Якщо тіло має вирізи, пустоти, то їх вважають заповненими матеріалом з від'ємною масою. Координати центра ваги всього тіла обчислюють, застосовуючи формули де доданки для частин вирізів, пустот враховують з від'ємним значенням.

Розроблення сучасних інформаційних систем для розв'язання задач синтезу оптимальних конфігурацій складних просторових об'єктів потребує побудови математичних моделей в автоматичному режимі. При цьому процес комп'ютерного моделювання з урахуванням перетворення геометричної інформації та візуалізації отриманих рішень має творчий характер і є одним із найбільш складних і відповідальних етапів при проектуванні. Цей процес безпосередньо зв'язаний зі створенням інформаційної технології, яка будується на інформаційно-аналітичних і об'єктно-орієнтованих моделях предметної області й вимагає розроблення ефективних методів оптимізації рішень.

Використання моделювання динамічної поведінки багатотільних і багатомасових систем дозволяє: уникнути критичних помилок вже на ранніх етапах проектування і таким чином знизити вартість розробки виробів та зменшити кількість фізичних прототипів, що створюються, визначити масові та динамічні характеристики складних рухомих об'єктів та підвищити точність розрахунків параметрів руху системи з урахуванням змінних параметрів її об'ємної геометричної конфігурації.

Метою роботи є: вирішення науково-технічної задачі, яка полягає у створенні та впровадженні методології підтримки та прийняття рішень при проектуванні та аналізі кінематики руху складних технічних систем з урахуванням просторової форми складових об'єктів та урахуванням змінних параметрів об'ємної геометричної конфігурації.

Аналіз останніх джерел

Аналіз наукової літератури показав, що існує широкий спектр задач в яких необхідно враховувати просторові форми об'єктів, визначити масу та координати центру ваги та їх відстані у горизонтальних або вертикальних площинах. У вітчизняній науці основні результати в напрямку математичного та програмного забезпечення задач геометричного проектування були досягнуті в науковій школі Ю. Г. Стояна [1]. Значний внесок у розвиток теорій і методів розв'язання складних задач компоновання систем з урахуванням просторової геометрії об'єктів зробили М. І. Гіль, І. В. Гребенник, О. М. Кисельова, В. М. Комяк, О. В. Панкратов, Т. Є.[2-7]. Закордонні роботи, пов'язані з цим напрямком, виконані авторами: J. Bennell, C. Che, Y. Chen, G. M. Fadel, G. Fasano, L. Y. Wang [8-9]. Також у щорічних монографіях серії «Springer Optimization and Its Applications» [10-11] особлива увага приділяється моделям, методам та інформаційним технологіям компонування синтезу об'єктів аерокосмічної техніки з визначення маси та розташування координат центру ваги.

Для вирішення завдання визначення координат центру ваги та маси плоского або двомірного об'єкта, який описується простими фігурами, застосовують аналітичні або графічні методи теоретичної механіки [13-19]. Також застосовується багаторазовий експериментальний підбір координат центру ваги підвищенням фігури у різних точках. Отримав розвиток напрям визначення координат центру ваги та маси плоского створення програмного продукту на основі Python, в якому реалізовано методи комп'ютерного зору для сканування зображень, що зображують різні об'єкти, і визначення їх центрів мас. Для геометричних тіл результати, отримані програмою, узгоджуються з результатами, передбаченими інтегральними обчисленнями. Крім того, програма також здатна успішно позначити центри мас об'єктів довільної форми, тобто її можна застосувати до будь-якого можливого плоского об'єкта. Отримані результати підтверджені експериментальним шляхом.

Відомий графічний спосіб визначення координат центру ваги об'єкта, при якому все зводиться до побудови силового і мотузкового багатокутників Варіньйона. Недоліком такого способу є громіздкість виконання операцій при побудові силових і мотузкових багатокутників у двох взаємно перпендикулярних площинах або у зміні положення об'єкта, а паралельне перенесення ліній призводить до неточностей в розрахунку і низької продуктивності оператора, який визначає центр ваги об'єкта. Для багатомасових і багатотільних систем складної конфігурації а саме: складних по конфігурації спеціальних пристроїв, колісного та залізничного транспорту, аерокосмічних об'єктів цей процес має складну методіку та необхідність проводити довготривалі натурні дослідження з використанням спеціальних пристроїв та

вимірювальної апаратури.

За останні роки з'явилися патенти на способи натурального визначення положення координат центра ваги.

Відомий спосіб визначення положення координат центра ваги колісного транспортного засобу згідно якого визначають тиск повітря в кожній шині, порівнюють його значення з розрахунковим та визначають величини вертикальних навантажень на кожне з коліс [19-25]. Однак, одержані величини цих вертикальних навантажень є недостатніми, щоб точно знайти положення центра ваги у вертикальній площині, що не дає можливості визначати характеристики стійкості, керованості, критичних швидкостей руху складного об'єкта.

Під стійкістю розуміють здатність автомобіля протистояти заносу (бічному ковзанню) і перекиданню. Найчастіше порушення стійкості автомобіля виникає внаслідок дії бічних відцентрових сил і сили ваги. Стійкість рухомого автомобіля залежить від багатьох чинників: маси автомобіля, висоти його центру ваги, ширини колії, бази, розміру шин, їх конструкції й стану; радіусів кривизни дороги й стану її поверхні, швидкості та напрямку руху; уміння керувати автомобілем тощо.

При бічному (поперечному) перекиданні при повороті на транспортний засіб вагою G діє доцентрова сила, яка дорівнює інерційній відцентровій силі P_b . (рис. 1). На рисунку наведені такі умовні позначення: G – вага транспортного засобу; B – колія по зовнішніх шинах коліс; h_g – висота центру прикладення сили G над рівнем дорожнього покриття; R – сили реакції поверхні дороги. При русі транспортного засобу при повороті, що немає поперечний ухил, перекидання на бік управо визначається за нерівністю:

$$G \cdot 0,5B \leq P_b \cdot h_g \tag{1}$$

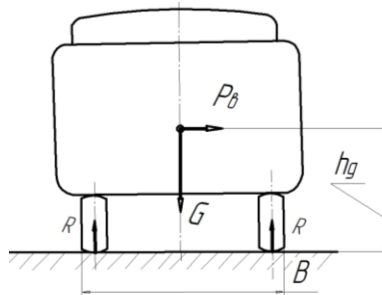


Рис. 1. Схема дії сил при русі транспортного засобу на повороті з перекиданням на бік управо, що немає поперечний ухил, : G – вага транспортного засобу; P_b – відцентрова сила, яка виникає при повороті; B – колія по зовнішніх шинах коліс; h_g – висота центру прикладення сили G над рівнем дорожнього покриття; R – сили реакції поверхні дороги

При русі транспортного засобу при повороті, що має поперечний ухил, перекидання на бік управо визначається нерівністю:

$$G \cdot (B + h_g \tan \beta) \leq P_b \cdot h_{g1} \tag{2}$$

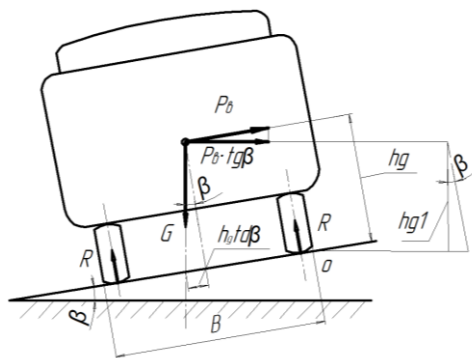


Рис. 2. Схема дії сил при русі транспортного засобу при повороті з перекиданням на бік управо, що має поперечний ухил під кутом β , : G – вага транспортного засобу; B – колія по зовнішніх шинах коліс; h_{g1} – висота центру прикладення сили G над рівнем дорожнього покриття; R – сили реакції поверхні дороги

Для визначення критичної швидкості руху при повороті радіусом R без поперечного ухилу, застосовується наступна залежність:

$$V_{кр.пер.} = 3,6\eta_{кк} \sqrt{\frac{0,5B}{h_g} \cdot g \cdot R}, \tag{3}$$

де B – ширина колії, м;

h_g – висота центру мас, м;
 η_{kc} – коефіцієнт поперечної стійкості рухомого транспорту.
 g – прискорення земного тяжіння, м/с²;
 R – радіус повороту, м.

Якщо транспорт рухається по дорозі, що має поперечний ухил, який сприяє стійкості, то критичну швидкість перекидання можна визначити за формулою:

$$V_{кр.пер.} = 3,6\eta_{kc} \sqrt{\frac{0,5B+h_g \cdot tg\beta}{h_g \cdot \cos \beta} \cdot g \cdot R}, \quad (4)$$

де η_{kc} – коефіцієнт поперечної стійкості рухомого транспорту;
 β – кут поперечного ухилу полотна дороги.

Під час руху транспортного засобу створюється комплексне уявлення про взаємодію елементів (ланок) системи водій – автомобіль – дорога – навколишнє середовище. З врахуванням цього вивчаються всі аспекти як транспортного процесу, так і дорожньо-транспортних пригод. Застосування спеціальних знань під час проведення експертизи, призначених за фактами порушення правил безпеки дорожнього руху або експлуатації транспорту особами, які керують транспортними засобами.

Так, відповідно до ст. 242 КПК України, експертиза у випадку порушення правил безпеки дорожнього руху або експлуатації транспорту особами, які керують транспортними засобами, необхідно відзначити, що у більшості випадків призначаються трасологічні, автотехнічні та транспортно-трасологічні експертизи. Зазначені експертні дослідження призначаються з метою підтвердження або спростування слідчих версій, а також уточнення механізму дорожньо-транспортної пригоди та вини правопорушника в ній. При цьому вирішальне значення у встановленні об'єктивної та суб'єктивної сторін пригоди, визначенні вини чи невинуватості водія можуть мати висновки судового експерта за напрямом автотехнічних досліджень [26–30].

Незважаючи на складність і різноманіття дорожньо-транспортних пригод, всі вони практично стереотипні за механізмом виникнення (механічної взаємодії об'єктів) і складом, що дозволяє виділити відносно невелику кількість типових ситуаційних моделей при вивченні дорожньо-транспортних пригод і описати їх з точки зору теорії механічного руху складних систем.

Мета роботи полягає у створенні методології визначення кінематичних характеристик руху об'єктів складної об'ємної конфігурації з підвищеною якістю рішень при визначенні розташування координат центра ваги складних систем шляхом розроблення моделей методом інформаційної технології компонуального синтезу просторових об'єктів.

Виклад основного матеріалу

Для вирішення поставленого завдання – створення методології аналізу кінематики руху складного тіла необхідно знати масові характеристики та особливо відстань координат центру ваги складного тіла в горизонтальній площині до основи. Для обчислення цих характеристик запропоновано використовувати комп'ютерну програму SOLIDWORKS.

Запропоновано загальні етапи методології визначення координат центру ваги та відстаней його у вертикальній до основи та горизонтальній площинах складного тіла за допомогою комп'ютерних програм.

1. Моделювання тіла об'єкту. Спершу необхідно створити комп'ютерну 3-D модель об'єкту, який досліджується. Це може бути 3D-модель у програмах для тривимірної графіки. Якщо об'єкт складається з різних вузлів або елементів, на початку будуються прості деталі потім збираються у вузли, які остаточно з'єднуються в одну збірку з можливістю додавати вид вантажу різного призначення. Також для більш точного аналізу можна додавати 3-D модель водія та пасажирів.

3. Обчислення маси та координат центра ваги. Для 3-D моделі об'єкту необхідно обчислити його масу та координати центру мас відносно до певної системи координат. Маса можна знайти, знаючи густину матеріалу і об'єм об'єкту. Система комп'ютерного моделювання SOLIDWORKS надає розширені можливості встановлення маси, координат центра ваги враховуючи геометрію моделі її об'єм, з урахуванням матеріалів, з яких виготовлені окремі її деталі за допомогою необхідних опцій.

4. Відображення результатів. Система комп'ютерного моделювання SOLIDWORKS має можливість конвертувати 3-D модель об'єкту у графічні креслення. За допомогою яких, застосувавши необхідні опції, є можливість з високою точністю визначити у певних проекціях відстані до основи та відстані від необхідних точок складного об'єкту.

5. Кінематичний аналіз. За допомогою вище наведених залежностей (3), (4) проводяться розрахунки та будуються порівняльні графіки критичних швидкостей руху при перекиданні на повороті з розрахунковими параметрами відстані центра мас до основи у горизонтальній проекції та з урахуванням характеристики полотна дороги.

6. Відображення результатів. Результати методології відображаються у вигляді 3-D моделей з координатами центра ваги у необхідних проекціях та цифровими результатами та порівняльними графіками висоти центра мас до основи у горизонтальній проекції для рекомендованого діапазону та розрахункового за 3-D моделлю і графіками критичних швидкостей руху складного багатомасового об'єкту при перекиданні на повороті різних радіусів та характеристик полотна дороги.

Треба відзначити, що найбільш складний етап за часом є створення комп'ютерних моделей

багатомасових і багатотільних систем, які досліджуються, але при застосуванні запропонованої методології отримаємо найбільш точне значення координат центру ваги та не потрібно проводити довготривалі натурні вимірювання.

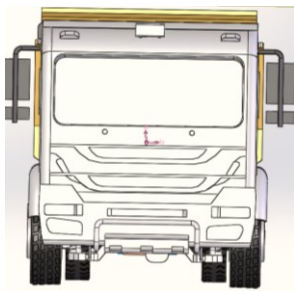
Наведемо приклад застосування методології визначення критичних параметрів руху об'єкту складної об'ємної конфігурації з метою отримати найбільш точні данні при проведенні експертно-криміналістичних досліджень руху транспортних засобів по складних траєкторіях, які є важливим результатом. Тому виникає завдання порівняння критичних швидкостей руху за залежностями (3,4), у яких присутня висота центру ваги від дорожнього покриття в порівнянні з рекомендаціями, які знаходяться у межах: для спорядженого вантажного транспорту від 0,6 до 1,0 м.; для легкового транспорту від 0,4 до 0,5 м. [31] та рекомендованих за таблицями [18] з визначеними за запропонованою методологією.

Як приклад, наведемо визначення координат центра ваги та маси для спорядженого вантажного транспортного засобу без вантажу та з вантажем. У програмному продукті CAD - системи (SolidWorks) будується 3D - модель складного рухомого об'єкта у масштабі 1:10 (рис. 3).



Рис. 3. Скріншот 3D-моделі транспортного засобу

Створюються графічні проєкції складного рухомого об'єкта (рис. 4), (рис. 5) та за допомогою опції CAD – системи визначається його маса та координати центру ваги для спорядженого вантажного транспортного засобу без вантажу (рис. 4), (рис. 5) та з вантажем - насипний гравій (рис. 6), (рис. 7). Для чого за допомогою опцій CAD – системи вибирається вид вантажу, його питома вага, геометрична конфігурація, та місце його розміщення у складному рухомому об'єкті.



Масові характеристики: Зборка 4
Конфігурація: по замовчуванню
Система координат: -- по замовчуванню --

Маса = 875808,17 грамів
Об'єм = 875808168, кубічні міліметри
Площа поверхні = 38208810, квадратні міліметри
Центр ваги: (міліметри)
X = 733,34
Y = 252,69
Z = 131,75

Рис. 4. Скріншот фронтального виду складного рухомого об'єкта без навантаження та результати визначення маси та координат центру ваги



Масові характеристики: Зборка 4
Конфігурація: по замовчуванню
Система координат: -- по замовчуванню --

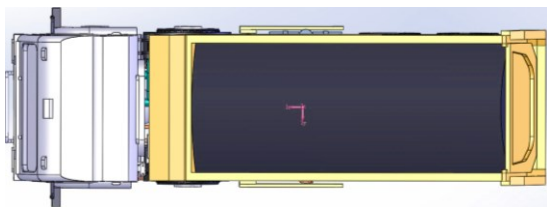
Маса = 875808,17 грамів
Об'єм = 875808168, кубічні міліметри
Площа поверхні = 38208810, квадратні міліметри
Центр ваги: (міліметри)
X = 733,34
Y = 252,69
Z = 131,75

Рис. 5. Скріншот виду з боку складного рухомого об'єкта без навантаження та результати визначення маси та координат центру ваги



Маса = 2260085,79 грамів
Об'єм = 1493789250,12 кубічні міліметри
Площа поверхні = 43054491,73 квадратні міліметри
Центр ваги: (міліметри)
X = 207,22
Y = 255,65
Z = 235,56

Рис. 6. Скріншот виду з боку складного рухомого об'єкта з навантаженням (гравій) та результати визначення маси та координат центру ваги



Маса = 2260085,79 грамів
 О'б'єм = 1493789250,12 кубічні міліметри
 Площа поверхні = 43054491,73 квадратні міліметри
 Центр ваги: (міліметри)
 X = 207,22
 Y = 255,65
 Z = 235,56

Рис. 7. Скріншот виду зверху складного рухомого об'єкта з навантаженням (гравій) та результати визначення маси та координат центру ваги

3-D модель рухомого об'єкта імпортується у графічні проекції об'єкта у CAD - системі (кресленики) та за допомогою опції постановки розміру визначаються відстані розташування центру ваги у вертикальній та горизонтальній проекції об'єкта (рис. 8). Надалі проводиться розрахунок критичної швидкості руху перекидання при повороті складного рухомого об'єкта за формулами (3) або (4).

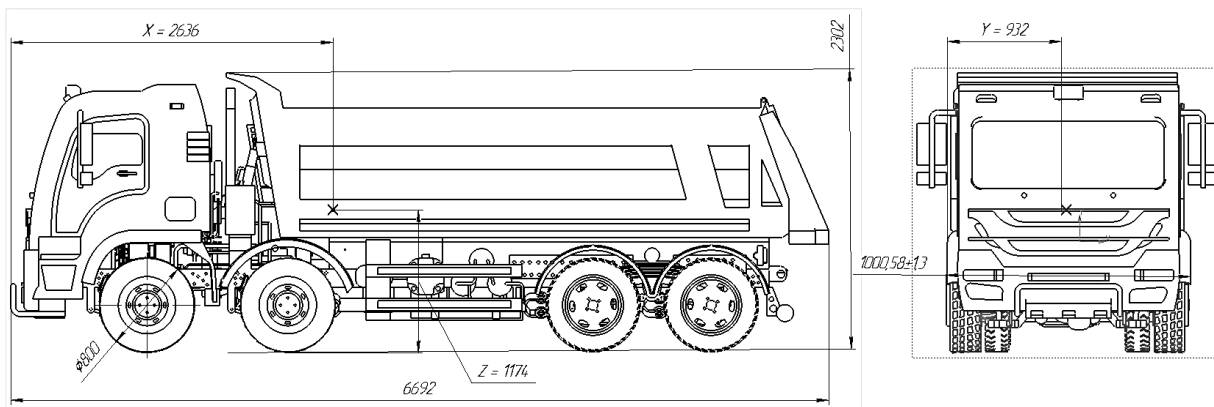


Рис. 8. Кресленник рухомого об'єкта без вантажу у двох проекціях з яких визначають відстані від центру ваги об'єкта до основи

На діаграмі (рис. 9) представлено результати порівняння зміни відстані від центру ваги досліджуваного об'єкта до основи для рекомендованих меж з результатами отриманими при застосуванні запропонованої методології. З наведеного прикладу, застосування методології для визначення висоти центру ваги до основи для спорядженої маси транспортного засобу без вантажу дало точну відстань висоти центру ваги до основи 1174 мм у порівнянні з рекомендованою 1000 мм., а з вантажем ще більшу відстань 1413 мм.

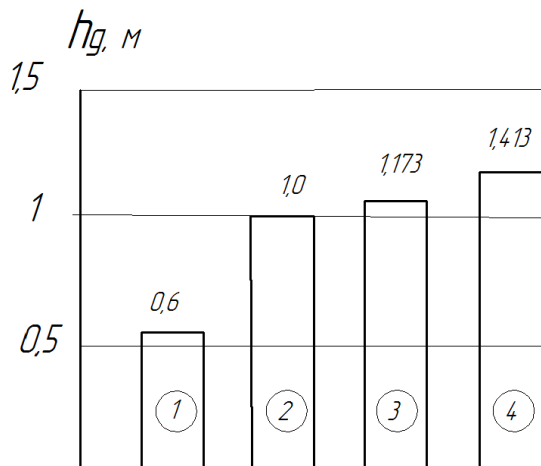


Рис. 9. Діаграма зміни відстані від центру ваги об'єкта до основи: 1 – нижнє значення відстані рекомендованого діапазону; 2 – верхнє значення відстані рекомендованого діапазону; 3 – величина відстані розрахована за запропонованою методологією для спорядженого транспортного засобу; 4 – величина відстані розрахована за запропонованою методологією для навантаженого транспортного засобу (гравій)

За допомогою програмного продукту MathCad, було проведено розрахунки критичних швидкостей руху в момент перекидання при проходженні криволінійного участка шляху, як без ухилу полотна (ф. 3), так і з ухилом (ф. 4). Було побудовано графік (рис. 10) для різних висот центра ваги та різних радіусів скруглення шляху та з різними кутами ухилу полотна.

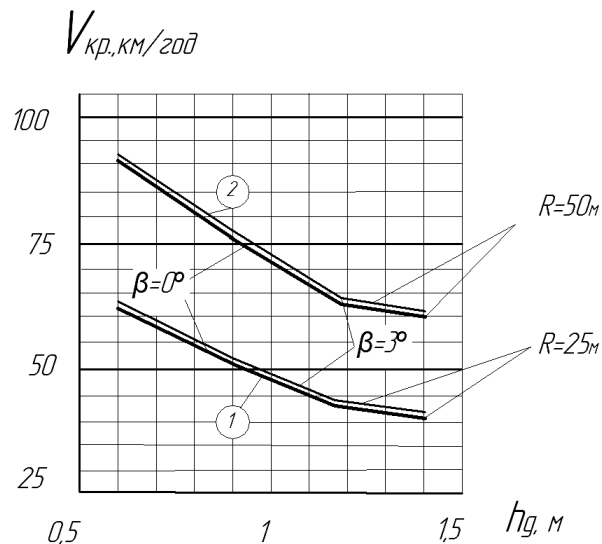


Рис. 10. Графік зміни критичної швидкості визначеною за формулами (3) та (4) для різних відстаней центру ваги об'єкта до основи h_g і від зміни різних параметрів: R – радіуса скруглення шляху; β – кута ухилу полотна шляху; 1 – крива розрахована за ф. (3); 2 – крива розрахована за ф. (4)

З аналізу графічних залежностей (рис. 10) встановлено, що чим вище розташований центр ваги автомобіля і чим вужча база, тим вища вірогідність бічного перекидання транспортного засобу при повороті, що має поперечний ухил. Наявність вантажу в кузові, особливо великогабаритного, збільшує висоту центру ваги, знижуючи тим самим стійкість.

Тому для проведення аналізу події, що сталася з певним транспортним засобом, запропоновано методологію визначення критичних параметрів руху з урахуванням ваги транспортного засобу, виду вантажу та місця його розташування у кузові, що дає точне визначення центра ваги та його координат, а в кінцевому результаті дає підвищення точності отриманих результатів.

Висновки і перспективи розвитку напрямку

Таким чином, застосування запропонованої методології визначення масових та кінематичних характеристик складного рухомого об'єкта в процесі експертного дослідження за допомогою програмного продукту SolidWorks, дає можливість скоротити витрати часу на визначення масових характеристик у порівнянні з натурними дослідженнями та підвищити точність розрахунків відстані розташування центру ваги у вертикальній та горизонтальній проекції об'єкта для конкретного випадку, завдяки заміні проведення натурних експериментів на комп'ютерний аналіз та впливу суб'єктивних факторів при вимірюванні, що дає можливість з більшою точністю розрахувати кінематичні характеристики об'єкта.

Аналіз результатів розрахунків висоти центра ваги та критичної швидкості перекидання на повороті, відповідно до рекомендованого діапазону, показав, що для реальних значень висоти центра ваги, отриманих за запропонованою методологією, критична швидкість нижче на 9 км./год. відповідно до верхньої границі діапазону при рівному полотні шляху і радіусі повороту 50 м., а також нижче на 9 км./год. при полотні шляху з нахилом під кутом β при радіусі повороту 50 м., а кут нахилу дороги $\beta = 3^\circ$ збільшує критичну швидкість на 2 км./год.

Література

1. Стоян Ю.Г., Яковлев С.В. Математичні моделі і оптимізаційні методи геометричного проектування // К.: Наук. думка., 1986. – С. 268.
2. Стоян Ю. Г. Яковлев С. В. Конфігураційний простір геометричних об'єктів. *Кібернетика та системний аналіз*. 54, вип. 5, 2018. С. 715–722.
3. Яковлев С. В. Метод штучного розширення простору в задачах оптимального пакування геометричних об'єктів. *Кібернетика та системний аналіз*. Вип. 53(5). 2017. С. 725–732.
4. Математичні методи оптимізації та інтелектуальні комп'ютерні технології моделювання складних процесів і систем з результат просторових форм об'єктів / В. В. Грицик та ін. Донецьк: ІПП "Наука і освіта". 2011. 650 с.
5. Яковлев С. В., Гиль Н. И., Комяк В. М. Елементи теорії геометричного проектування / Під ред. В. Л. Рвачева. Київ : наук. думка, 1995. 241 с.
6. Комбінаторные конфигурации в оптимизационных задачах балансной компоновки / Гребенник И. В., та ін. *Кібернетика та системний аналіз*. Т. 54, № 2. 2018. С. 55–67.
7. Коваленко А. А., Романова Т. Є., Стецюк П. І. Балансова задача компоновки 3D-об'єктів: Математична модель та методи розв'язання. *Кібернетика та системний аналіз*. 2015. Вип. 51, № 4. С. 556–565.

8. Інструменти математичного моделювання пакування довільних об'єктів проблеми. / Дж. Беннелл, Г. та ін. *Літопис. Дослідження операцій*. Springer, Нідерланди, Том. 179. № 1. 2010. С. 343–368.
9. Wang Y. S., Shi Y. J., Teng H. F. An improved scatter search for circles packing problem with the equilibrium constraint. *Chinese J Comput.* № 32. 2009. pp. 1214–1221. DOI: 10.3724/SP.J.1016.2009.01214.
10. Fasano G., Pinte'r J. D. Model Development and Optimization for Space Engineering: Concepts, Tools, Applications, and Perspectives". *Modeling and optimization in space engineering*. Series: Springer optimization and its applications. Vol. 73, 2012 pp. 1–32.
11. Optimization Models for the Three-Dimensional Container Loading Problem with Practical Constraints. / L. Junqueira., R. Morabito, D. S. Yamashita, H. H. Yanasse, *Modeling and optimization in space engineering*. Series: Springer optimization and its applications. Vol. 73, 2015. pp 271–294, 2013. Doi: 10.1007/978-1-4614-4469-5_12.
12. Павловський М. А. Теоретична механіка : підруч. для студ. вищ. навч. закл. / М. А. Павловський. – Київ : Техніка, 2002. – 512 с.: іл.
13. Теоретична механіка. Статика і кінематика : навч. посіб. / В. М. Іскрицький, С. В. Подлесний, О. Г. Водолазська, Ю. О. Єрфорт; Донб. держ. машинобуд. акад. - Краматорськ, 2008. - 204 с. - укр.
14. Дейниченко Г. В., Цвіркун Л. О., Омельченко О. В. Теоретична механіка : навч. посіб. - Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2021. - 107 с.
15. Теоретична механіка. Динаміка механічної системи та твердого тіла : навчальний посібник для студентів усіх спеціальностей / О.Г.Водолазська, С.В.Подлесний, В.М.Іскрицький. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – 312 с
16. Gahramanova Amina. Locating Centers of Mass with Image Processing. *Undergraduate Journal of Mathematical Modeling*. Vol. 10: Iss. 1, Article 1. 2019. pp.1–24. DOI: <https://doi.org/10.5038/2326-3652.10.1.4906>
17. Блинов И. А. Метод определения пространственного положения центра тяжести машин. *Механика. Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей»*. № 2, 2019. С. 71–82.
18. Леонтьев Д. М. Про розрахунковий спосіб визначення висоти координати центру ваги типових автомобілів. *Автомобільний транспорт*. Вып. 37, 2015. С. 101–107.
19. Ваги вагонні з цифровими датчиками з визначенням відхилення центру тяжіння вагона : пат. 116123 Україна : МПК G01G 19/00, G01G 19/04. № u2016 11505; заявл. 14.11.2016 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.
20. Спосіб визначення положення центра ваги колісного транспортного засобу у вертикальній площині : 19059 Україна : МПК B60C 23/0021. № u200500902; заяв. 01.02.2005; опубл.15.12.2006, Бюл. № 12.
21. Спосіб визначення положення центра ваги колісного транспортного засобу : пат. 19716 Україна : МПК B60C 23/00. № u200608557 ; заяв. 31.07.2006; опубл.15.12.2006, Бюл. № 12.
22. Спосіб визначення положення точки центру мас напівпричепа вантажного автомобіля : пат. 63957 Україна : МПК G01M 17/00. № u201103793 ; заяв. 29.03.2011; опубл.25.10.2011, Бюл. № 20.
23. Спосіб визначення положення центру ваги тіла : пат. 68193 Україна : МПК G01B; №u 201015512 заяв. 23.12.2010; опубл. 25.08.2011, Бюл. № 16.
24. Спосіб визначення повної маси автомобіля та маси вантажу в процесі руху : пат. 92259 Україна : МПК G01G 19/03 B60W 40/12. № u2014 01854; заяв. 25.02.20; опубл. 1411.08.2014, Бюл. № 15.
25. Стенд для вимірювання кута поперечної стійкості машин, що рухаються, методом послідовного зважування : пат. 122872 Україна : МПК G01M 1/00 G01M 17/00 G01B 5/24. №u201708979 ; заяв. 08.09.2017; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2
26. Коломієць В. В. Особливості використання спеціальних знань при розслідуванні порушення правил безпеки дорожнього руху або експлуатації транспорту особами, які керують транспортними засобами *Юридичний науковий електронний журнал*. № 10/2023. С. 718–723. DOI <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2023-10/174>.
27. Сумець О. М., Голодий В. Ф. Основи експертизи дорожньо-транспортних пригод: автотехнічна експертиза : навчальний посібник. К. : Хай-Тек Прес, 2008. 160 с.
28. Трофименко Н. С. Питання призначення та проведення деяких видів судових експертиз (за матеріалами узагальнення експертної практики). *Вісник Академії митної служби України. Серія: «Право»*. Дніпропетровськ : АМСУ, № 1 (10). 2013. С. 107–112.
29. Дячук В. І. Оцінка слідчим висновку експерта-автотехніка як джерела доказів. *Право і Безпека*. 2011. № 1. С. 168–173.
30. Галак І. І. Особливості призначення та проведення технічної експертизи та її роль при розслідуванні ДТП. *Вісник НТУ*. Вип. 26. 2012. С. 84–88.
31. Волков В. П., Вільський Г. Б. Теорія руху автомобіля. Суми. : Університетська книга, 2015. 320 с.

References

1. Stoian Yu.H., Yakovlev S.V. Matematychni modeli i optymizatsiini metody heometrychnoho proektuvannia // K.: Nauk. dumka., 1986. – S. 268.
2. Stoian Yu. H. Yakovlev S. V. Konfiguratsiinyi prostir heometrychnykh ob'ektiv. Kibernetika ta systemnyi analiz. 54, vyp. 5, 2018. S. 715–722.
3. Yakovliev S. V. Metod shtuchnogo rozshyrennia prostoru v zadachakh optimalne pakuvannia heometrychnykh ob'ektiv.

Kibernetyka ta systemnyi analiz. Vyp. 53(5). 2017. S. 725–732.

4. Matematychni metody optymizatsii ta intelektualni kompiuterni tekhnolohii modeliuвання skladnykh protsesiv i system z rezultat prostoroovykh form ob'ektiv / V. V. Hrytsyk ta in. Donetsk: IPII "Nauka i osvita". 2011. 650 s.

5. Yakovlev S. V., Hyl N. Y., Komiak V. M. Elementy teorii heometrychnoho proektuvannya / Pid red. V. L. Rvacheva. Kyiv : nauk. dumka, 1995. 241 s.

6. Комбинаторные конформации в оптимизационных задачах балансной компоновки / Hrebennyk Y. V., ta in. Kibernetyka ta systemnyi analiz. T. 54, № 2. 2018. S. 55–67.

7. Kovalenko A. A., Romanova T. Ye., Stetsiuk P. I. Balansova zadacha komponuvannya 3D-ob'ektiv: Matematychna model ta metody rozv'iazannya. Kibernetyka ta systemnyi analiz. 2015. Vyp. 51, № 4. S. 556–565.

8. Instrumenty matematychnoho modeliuвання pakuvannya dovilnykh ob'ektiv problemy. / Dzh. Bennell, H. ta in. Litopys. Doslidzhennia operatsii. Springer, Niderlandy, Tom. 179. № 1. 2010. S. 343–368.

9. Wang Y. S., Shi Y. J., Teng H. F. An improved scatter search for circles packing problem with the equilibrium constraint. Chinese J Comput. № 32. 2009. rr. 1214–1221. DOI: 10.3724/SP.J.1016.2009.01214.

10. Fasano G., Pinte'r J. D. Model Development and Optimization for Space Engineering: Concepts, Tools, Applications, and Perspectives". Modeling and optimization in space engineering. Series: Springer optimization and its applications. Vol. 73, 2012 rr. 1–32.

11. Optimization Models for the Three-Dimensional Container Loading Problem with Practical Constraints. / L. Junqueira, R. Morabito, D. S. Yamashita, H. H. Yanasse, Modeling and optimization in space engineering. Series: Springer optimization and its applications. Vol. 73, 2015. rr 271–294, 2013. Doi: 10.1007/978-1-4614-4469-5_12.

12. Pavlovskiy M. A. Teoretychna mekhanika : pidruch. dlia stud. vyshch. navch. zakl. / M. A. Pavlovskiy. – Kyiv : Tekhnika, 2002. – 512 s. : il.

13. Teoretychna mekhanika. Statyka i kinematyka : navch. posib. / V. M. Iskrytskyi, S. V. Podliesnyi, O. H. Vodolazska, Yu. O. Yerfort; Donb. derzh. mashynobud. akad. - Kramatorsk, 2008. - 204 c. - ukp.

14. Deinychenko H. V., Tsvirkun L. O., Omelchenko O. V. Teoretychna mekhanika : navch. posib. - Kryvyi Rih: DonNUET, 2021. - 107 s.

15. Teoretychna mekhanika. Dynamika mekhanichnoi systemy ta tverdoho tila : navchalnyi posibnyk dlia studentiv usikh spetsialnosti / O.H.Vodolazska, S.V.Podliesnyi, V.M.Iskrytskyi. – Kramatorsk : DDMA, 2012. – 312 s16. Gahramanova Amina. Locating Centers of Mass with Image Processing. Undergraduate Journal of Mathematical Modeling: One + Two: Vol. 10: Iss. 1, Article 1. 2019. pp. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.5038/2326-3652.10.1.4906>

17. Blynov I. A. Method of determining the spatial position of the center of gravity of machines Mechanics. Almaz-Antey VKO Concern Bulletin №2, 2019. pp. 71–82.

18. Leontiev D.M. About the calculation method of determining the height of the coordinate of the center of gravity of typical cars. Automobile transport, Vol. 37, 2015. pp. 101–107.

19. Wagon scales with digital sensors to determine the deviation of the center of gravity of the wagon: pat. 116123 Ukraine: IPC G01G 19/00, G01G 19/04. No. u2016 11505; statement 14.11.2016; published 10.05.2017, Bul. No. 9.

20. The method of determining the position of the center of gravity of a wheeled vehicle in a vertical plane: 19059 Ukraine: IPC B60C 23/0021. No. u200500902; statement 01.02.2005; publ. 15.12.2006, Bull. No. 12.

21. The method of determining the position of the center of gravity of a wheeled vehicle: pat. 19716 Ukraine: IPC B60C 23/00. No. u200608557; statement 31.07.2006; publ. 15.12.2006, Bull. No. 12.

22. The method of determining the position of the center of mass of a truck semi-trailer: pat. 63957 Ukraine: IPC G01M 17/00. No. u201103793; statement 29.03.2011; publ. 25.10.2011, Bull. No. 20.

23. The method of determining the position of the center of gravity of the body: pt. 68193 Ukraine: IPC G01B; Application No. 201015512 23.12.2010; published 25.08.2011, Bul. No. 16.

24. The method of determining the total weight of the car and the weight of the cargo during movement: pat. 92259 Ukraine : IPC G01G 19/03 B60W 40/12. No. u2014 01854; statement 25.02.20; published 14.11.08.2014, Bull. No. 15.

25. Stand for measuring the angle of transverse stability of moving machines by the method of sequential weighing: pat. 122872 Ukraine : IPC G01M 1/00 G01M 17/00 G01B 5/24. #u201708979; statement 09/08/2017; published 25.01.2018, Bul. No. 2

26. Kolomiets V. V. Peculiarities of using special knowledge in the investigation of violations of road traffic safety rules or the operation of transport by persons driving vehicles Legal scientific electronic journal №10. 2023. pp. 718–723. DOI <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2023-10/174>.

27. Sumets O. M., Holodyiy V. F. Basics of traffic accident examination: autotechnical examination: study guide. K.: Hi-Tech Press, 2008. 160 p.

28. Trofymenko N. S. The question of the appointment and conduct of certain types of forensic examinations (based on the materials of the generalization of expert practice). Bulletin of the Academy of the Customs Service of Ukraine. Series: "Law". Dnipropetrovsk: AMSU, №.1 (10). 2013. pp. 107–112.

29. Dyachuk V. I. Evaluation by an investigator of the opinion of an auto technician expert as a source of evidence. Law and Security. 2011. №.1. 2011. pp. 168–173.

30. Halak I. I. Peculiarities of appointment and carrying out of technical expertise and its role in the investigation of traffic accidents. Bulletin of NTU. Issue 26. 2012. pp. 84–88.

31. Volkov V. P., Vil'skiy G. B. Theory of car motion. Sumy. : University book, 2015. 320 p.