

**РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНИХ ПРОГРАМ ОПТИМАЛЬНОГО
ПРОЄКТУВАННЯ ПАСИВНОЇ ПІДВІСКИ КОЛІСНОГО РОБОТА**

Н.М. Єршова, Н.В. Ткачук, С.А. Ренгач

Придніпровська державна академія будівництва та архітектури
Дніпро, 49005, вул.Архітектора Олега Петрова, 24а, E-mail:
nersova107@gmail.com, tkachuk.nadya7@gmail.com, docker1280@gmail.com

Зараз широко використовуються мобільні роботи. На основі аналізу великої кількості можливих варіантів підвіски дійшли висновку про доцільність застосування колісних роботів з динамічною підвіскою. Для проектування систем, що перебувають під впливом випадкових обурень, розроблено метод стохастичного динамічного програмування. Метод дуже ефективний, оскільки дозволяє визначити закон оптимального управління параметрами підвіски робота. Відповідно до цього методу проектування підвіски робота має виконуватися поетапно: проектується пасивна підвіска на основі методу динамічного програмування для безперервних детермінованих систем та аналізу динамічних показників робота; перевіряється доцільність введення в пасивну підвіску пристроїв активного управління параметрами за алгоритмом Калмана-Бьюсі і приймається остаточне рішення про принцип дії підвіски; визначається закон оптимального управління параметрами підвіски робота, якщо прийнято рішення про проектування активної підвіски. В цьому випадку потрібно менше витрат зовнішньої енергії для зменшення шкідливих коливань. У існуючій науково-технічній літературі розглядаються математичні моделі роботів з активною підвіскою і неясно, на якій основі прийнято параметри підвіски вихідної системи. В даній роботі розглядається перший етап проектування підвіски колісного робота. Комп'ютерних програм для оптимального проектування пасивної підвіски колісного робота не існує. Отже, метою даної роботи є розробка комп'ютерних програм оптимального проектування пасивної підвіски колісного робота. В основу алгоритму пошуку проектних рішень закладено матричний метод динамічного програмування Р. Беллмана для неперервних динамічних систем, що є науковою новизною роботи. Створена комп'ютерна програма «ROBOT» призначена для вибору оптимальних параметрів підвіски за умови, що максимальні значення прискорення та коефіцієнта вертикальної динаміки центру мас робота не перевищують допустимих значень. Оцінка динамічних властивостей робота виконується за комп'ютерною програмою «DINAM», результати якої видаються у вигляді графіків та таблиці розрахунків. В якості моделі-аналога прийнято параметри колісного робота TIGER. На основі комп'ютерного моделювання, варіантного моделювання і оптимізації отримані параметри пасивної підвіски робота, що забезпечують йому найкращі динамічні властивості порівняно з моделлю-аналогом. Дана робота є важливим внеском в галузі комп'ютерних наук і програмної інженерії.

Ключові слова: оптимальне проектування підвіски колісного робота, комп'ютерна програма, матричний метод динамічного програмування

Вступ

В даний час широко використовуються мобільні роботи. Залежно від робочого середовища розрізняють п'ять типів мобільних роботів: наземні, підземні, літаючі, плаваючі та космічні. Наземні мобільні роботи, у свою чергу, залежно від способу пересування поділяються на такі класи: колісні, крокуючі, гібридні та спеціалізовані. Найбільшого поширення набули колісні мобільні наземні роботи. За способом управління роботою коліс розрізняють такі групи колісних роботів: з жорстко закріпленими колесами; автомобільна група (поворот

здійснюється лише за рахунок задніх коліс); з довільним незалежним керуванням поворотом кожного колеса вліво чи вправо; група роботів, здатних переміщатися у будь-яких напрямках. Друга та третя групи забезпечують найкращу динаміку машини. На основі аналізу великої кількості можливих варіантів підвіски зроблений висновок про доцільність застосування колісних роботів з динамічною підвіскою автомобільної групи управління.

Для проектування систем, що перебувають під впливом випадкових обурень, розроблено метод стохастичного динамічного програмування. Метод дуже ефективний, оскільки дозволяє визначити закон оптимального управління параметрами підвіски робота.

Відповідно до методу стохастичного динамічного програмування проектування підвіски робота виконується поетапно [1]:

- проектується пасивна підвіска на основі методу динамічного програмування для безперервних детермінованих систем та аналізу динамічних показників робота;

- перевіряється доцільність введення в пасивну підвіску пристроїв активного керування параметрами за алгоритмом Калмана-Бьюсі та приймається остаточне рішення про принцип дії підвіски;

- визначається закон оптимального управління параметрами підвіски робота, якщо прийнято рішення про проектування активної підвіски.

Задачі оптимального проектування зручно вирішувати за допомогою матричного методу динамічного програмування Р. Беллмана. Для реалізації алгоритмів пошуку проектних рішень необхідно створювати відповідні комп'ютерні програми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В останні роки роботи прискорили темпи заміни людей у виконанні завдань, орієнтованих на людину. Оскільки робот стає розумнішим, основна його місія не обмежується транспортуванням, а поширюється на маніпуляції. Одним із прикладів є гуманоїдний робот на колесах, який має гуманоїдний корпус на верхній частині робота, при цьому робот може як і пересуватися, так і виконувати маніпуляції [2, 3].

Проведені роботи над колісною мобільною платформою для стійкості можна розділити на два типи. У першому випадку стабільність забезпечується пасивним способом. До них відносяться збільшення ваги колісної мобільної платформи [4], а також збільшення площі опорного полігону [5]. У будь-якому випадку центр мас робота розташований більш стабільно в межах опорного полігону. Пасивне управління легко здійснити, якщо діапазон його застосування обмежений механічною конструкцією. В цих дослідженнях не використовується пасивне управління пружно-дисипативними параметрами підвіски робота.

Другий підхід, навпаки, – активне управління. Цей підхід гарантує стабільність шляхом активного управління розташуванням центра мас робота. До цього підходу відносяться численні публікації про стійкість гуманоїдних роботів [6, 7, 8]. Активне управління колісною мобільною платформою досліджувалось скоріше в контексті активної підвіски легкових автомобілів [9, 10]. Хоча його ефективність очевидна, активна підвіска не була впроваджена в колісних роботах. В роботах [11, 12] викладено принципи активного управління параметрами пасивної підвіски на основі методу стохастичного динамічного програмування.

У роботі [13] представлено гнучке активне управління колісним роботом TIGER за допомогою пружного приводного механізму. Робот (рис. 1) управляє обладнаною підвіскою та мінімізує кути крену та нахилу робота, коли він знаходиться на нерівній місцевості. Для управління розроблена повна модель руху робота та сенсорна модель інерційного вимірювального блока. Стан робота

оцінюється за допомогою спостерігача, де фільтр Калмана виконує роль компенсатора. Потім розробляється і використовується лінійний квадратичний регулятор для здійснення оптимального управління за допомогою зворотного зв'язку.



Рис. 1. Колісний робот TIGER

Робот складається з корпусу, з'єднаного з колесами через еластичний приводний механізм. Колесо підтримується на кузові за допомогою пружинно-амортизаційної системи послідовно з лінійним редукторним двигуном постійного струму.

Коли лінійний двигун постійного струму рухається, відносна відстань між тілом робота та колесом змінюється.

Основною функцією тіла робота є перенесення всіх компонентів робота, включаючи батареї, електричні та електронні компоненти, різне корисне навантаження та опорна система підвіски.

Корпус робота повинен бути міцним і легким. Корпус кузова розроблений за принципом ферми для забезпечення жорсткості, невелика вага, проста збірка та виготовлення. Найбільш новими частинами конструкції робота є підвіска з пружним приводним механізмом.

Лінійний двигун постійного струму підключений до демпфера через коромисло, щоб активно управляти висотою підвіски та ізолювати тіло робота від зовнішніх перешкод, які можуть бути спричинені рельєфом та іншими нерівностями.

Нижній важіль підвіски розроблено з різними місцями кріплення амортизатора, для зміни початкової конфігурації підвіски відносно тіла робота.

Динамічна модель пружного приводного механізму представлена системою з двома ступенями свободи, як показано на рисунку 2.

Шина представлена у вигляді маси m_u , що спирається на землю через циліндрову пружину з жорсткістю K_f .

Амортизатор зображено як пружинно-демпферний блок, K_s , C_s , що підтримує тіло робота масою m_s з активною силою F_a , де K_s - жорсткість

пружины, C_s - коефіцієнт опору гідравлічного гасителя коливань. z - лінійне переміщення центрів мас уздовж вертикальної осі.

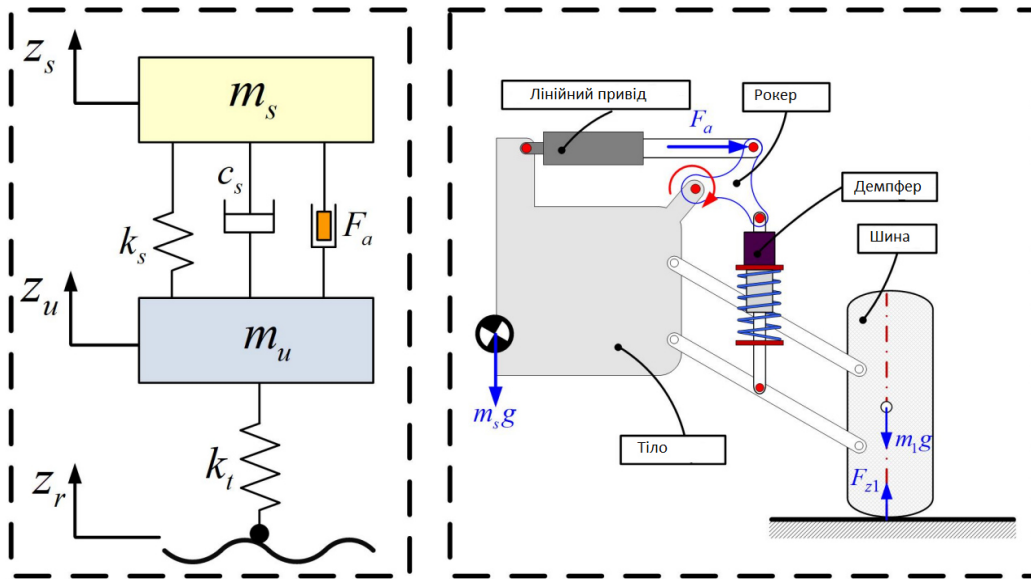


Рис.

2. Динамічна модель підвіски робота TIGER

Рівняння динаміки управління системою мають наступний вигляд:

$$m_s \ddot{z}_s = K_s(z_u - z_s) + C_s(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + F_a;$$

$$m_u \ddot{z}_u = -K_s(z_u - z_s) - C_s(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + K_t(z_r - z_u) - F_a.$$

Для оптимального управління розроблено лінійну динамічну модель робота з сімома ступенями свободи, як показано на рис. 3. Параметри робота наведені в табл. 1.

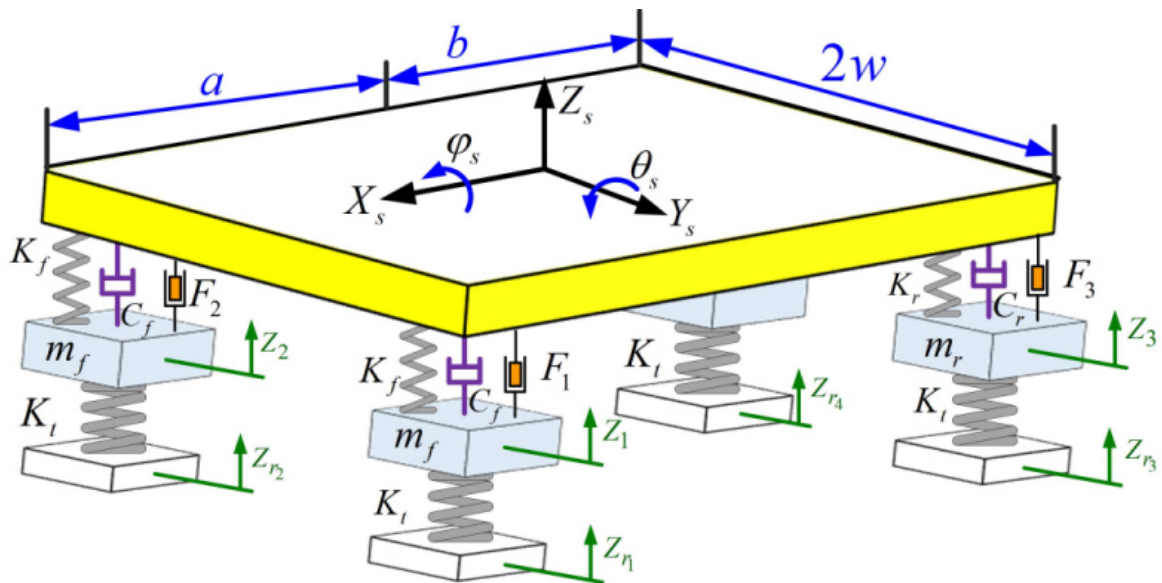


Рис. 3. Повна модель робота TIGER

На основі аналізу літературних джерел можна визначити задачі, які потрібно вирішити для покращення динамічних властивостей колісних роботів:

- створити методику оптимального проектування пасивної підвіски робота;

- виконати розробку комп'ютерних програм оптимального проектування пасивної підвіски робота;
- шляхом варіантного моделювання визначити раціональні значення коефіцієнта опору гасителя коливань шини.

Таблиця 1

Параметри підвіски робота TIGER

Назва параметра	Позначення	Значення
Підресорена маса	m_s	1,21 т
Передня невідресорена маса	$m_{1,2}$	0,05 т
Задня невідресорена маса	$m_{3,4}$	0,05 т
Жорсткість передньої пружини	K_f	20 кН/м
Жорсткість задньої пружини	K_r	20 кН/м
Жорсткість пружин шини	K_t	220 кН/м
Коефіцієнт опору переднього гасителя коливань	C_f	3 кНс/м
Коефіцієнт опору заднього гасителя коливань	C_r	3 кНс/м

Мета роботи

Отже метою даної роботи є розробка комп'ютерних програм оптимального проектування пасивної підвіски колісного робота. В основу алгоритма закла матричний метод динамічного програмування Р. Беллмана для безперервних динамічних систем.

Оптимальне проектування пасивної підвіски колісного робота

Диференціальне рівняння вертикальних коливань механічної системи «робот-дорога», що представлена найпростішою моделлю (рис. 4), записується у вигляді:

$$m\ddot{z} + b\dot{z} + cz = c\eta + b\dot{\eta}, \quad (1)$$

де m - підресорена маса робота; c , b - відповідно жорсткість підвіски і коефіцієнт опору гасителів коливань, встановлених в підвісці робота; z - лінійне переміщення центру мас робота уздовж вертикальної осі; η - амплітуда нерівності дороги. Дорога і шини вважаються абсолютно жорсткими.

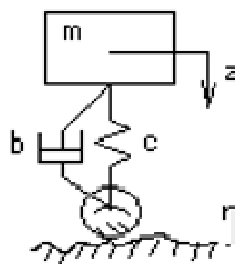


Рис. 4. Модель механічної системи «робот-дорога»

В методі динамічного програмування Р. Беллмана підвіска розглядається як управляюча функція, що регулює переміщення підресореної маси робота запропонованим образом. Вводиться сила, діюча з боку підвіски на масу (рис. 5).

Ставиться задача – визначити розрахункові формули параметрів проектування: жорсткості підвіски і коефіцієнта опору гасителів коливань [14].

Диференціальне рівняння коливального процесу має вигляд

$$m\ddot{z} = -F \quad (2)$$

або

$$\ddot{z} = -u, \quad (3)$$

де $u = F / m$ - невідома синтезуюча функція, тобто це прискорення.

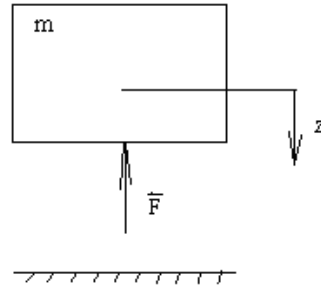


Рис. 5. Розрахункова схема найпростішого колісного робота

Рівняння (3) представимо в нормальній формі Коші, приймаючи $z = x_1, \dot{z} = x_2$.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= -u. \end{aligned} \quad (4)$$

Напишемо систему (4) в матричній формі

$$\dot{X} = AX + BU, \quad (5)$$

$$\text{де } X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix}; \quad U = [u]; \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}.$$

Квадратичний функціонал якості, що характеризує витрату енергії на зменшення шкідливих коливань має вигляд

$$J = \int_0^{\infty} (X'PX + U'GU)dt \quad (6)$$

або

$$J = \int_0^{\infty} (\alpha x_1^2 + \gamma x_2^2 + \mu u^2)dt. \quad (7)$$

Отже, матриці P і G функціоналу мають вигляд: $P = \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \gamma \end{bmatrix}; \quad G = [\mu]$

Формулювання задачі синтезу: знайти фізично здійсненну синтезуючу функцію рівняння (5), яка задовольняє обмеженням і доставляє мінімум функціоналу (7). Крім того, параметри проектування повинні забезпечити коливальний процес в системі з малими амплітудами переміщення і прискорення центру мас робота.

Необхідною умовою оптимальності є вирішення нелінійного алгебраїчного рівняння Ріккати

$$P + A'S + SA - SBG^{-1}B'S = 0 \quad (8)$$

або в розгорненому вигляді

$$\begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12} & S_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12} & S_{22} \end{bmatrix} = 0.$$

Звідки отримаємо систему нелінійних алгебраїчних рівнянь для визначення елементів симетричної матриці помилки оцінки S .

$$\begin{cases} \alpha - S_{12}^2 / \mu = 0; \\ \gamma + 2S_{12} - S_{22}^2 / \mu = 0; \\ S_{11} - S_{12}S_{22} / \mu = 0. \end{cases} \quad (9)$$

З системи (9) визначаємо

$$S_{12} = \pm\sqrt{\alpha\mu}; \quad S_{22} = \pm\sqrt{\mu(\gamma + 2S_{12})}; \quad S_{11} = S_{12}S_{22} / \mu.$$

Оскільки матриця S повинна бути позитивно визначена, то з можливих значень S_{11}, S_{12}, S_{22} обираємо для подальших розрахунків тільки позитивні значення.

Синтезуюча функція визначається матричним виразом:

$$U = -G^{-1}B'SX = -\left[\frac{1}{\mu}\right] \begin{bmatrix} 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\mu} (S_{12}x_1 + S_{22}x_2) = \frac{1}{\mu} (S_{12}z + S_{22}\dot{z}).$$

Після підстановки елементів S_{12} , S_{22} в синтезуючу функцію маємо

$$u = ((\gamma + 2\sqrt{\alpha\mu})/\mu)^{1/2} \dot{z} + (\alpha/\mu)^{1/2} z. \quad (10)$$

В рівняння (2) підставимо $F = mu$ і перенесемо складові рівняння в ліву частину

$$m\ddot{z} + m((\gamma + 2\sqrt{\alpha\mu})/\mu)^{1/2} \dot{z} + m(\alpha/\mu)^{1/2} z = 0. \quad (11)$$

Задаємося структурою проектного об'єкту з класу лінійних систем. Припустимо, що в підвіску робота будуть встановлені циліндрові пружини і гідравлічні гасителі коливань, сила опору яких пропорційна першому ступеню швидкості переміщень. Вільні коливання моделі-аналога описуються диференціальним рівнянням

$$m\ddot{z} + b\dot{z} + cz = 0, \quad (12)$$

де c, b – відповідно жорсткість підвіски і коефіцієнт опору гасителів коливань.

Рівняння (11) і (12) описують одну і ту ж систему, тобто параметри пружно-дисипативних зв'язків можна визначити шляхом порівняння коефіцієнтів при z і \dot{z}

$$c = m(\alpha/\mu)^{1/2}; \quad b = m((\gamma + 2\sqrt{\alpha\mu})/\mu)^{1/2}. \quad (13)$$

Отримали аналітичну залежність для параметрів проектування. Розв'язок отримується швидко і без особливих труднощів, але немає упевненості в тому, що при підстановці довільних значень α, γ, μ отримаємо фізично виконану підвіску, яка забезпечує роботу потрібні динамічні властивості в заданому діапазоні швидкостей руху. Без розв'язку цих проблем задача оптимізації позбавлена практичного сенсу. Отже, кожна отримана сукупність параметрів проектування повинна бути фізично виконана. Це досягається обґрунтованим вибором вагових коефіцієнтів квадратичного функціоналу якості.

Вибір вагових коефіцієнтів квадратичного функціоналу якості

Елементи матриць P і G зазвичай вибирають методом проб і помилок, що суттєво ускладнює синтез систем за даними критеріями. При вирішенні цієї проблеми необхідно виходити з основного призначення проектованої системи. Створюється підвіска робота, одне з призначень якої забезпечити коливальний процес в системі з малими амплітудами переміщення і прискорення центру мас робота, але наявність аперіодичного закону руху небажана. Щоб виключити резонансні явища в системі в період руху, частота коливань маси робота не повинна перевищувати 2 Гц.

Для отримання фізично реалізуємої підвіски досліджуємо залежність основних динамічних показників робота від вагових коефіцієнтів, представлену формулами:

$$v^2 = \sqrt{\alpha/\mu}; \quad \xi^2 = (b/b_{kp})^2 = 0,5 + \frac{\gamma}{4\sqrt{\alpha\mu}}, \quad (14)$$

де $v^2 = c/m$ – квадрат частоти власних коливань маси робота; b/b_{kp} – ступень демпфування коливального процесу; m – маса робота; c – жорсткість підвіски; $b_{kp} = 2\sqrt{mc}$ – критична величина коефіцієнта опору гасителів коливань.

Аналіз формул свідчить про те, що ступінь демпфування знаходиться в прямій залежності від вагового коефіцієнта γ , причому при $\gamma=0$ ступінь демпфування $\xi \approx 0,7$; при $\gamma>0$ – $\xi>0,7$, що відповідає аперіодичному закону

руху маси. При проектуванні підвіски коефіцієнт γ може приймати негативні значення. Частота власних коливань залежить від коефіцієнтів α і μ . Оскільки частота коливань величина позитивна, то і вагові коефіцієнти α і μ повинні бути позитивними. Зона їх допустимих значень визначається реальним діапазоном частот власних коливань системи. Частота коливань маси робота повинна бути в межах 1...2 Гц, отже, значення α і μ повинні відповідати цьому діапазону. Звідси можна вивести залежності між ваговими коефіцієнтами.

$$\alpha \leq \mu v^4 = 12,56^4 \mu. \quad (15)$$

Вимога позитивної визначеності матриці S встановлює додаткову залежність між ваговими коефіцієнтами

$$\gamma > -\sqrt{\alpha\mu}. \quad (16)$$

Алгоритм пошуку проектних рішень

При проектуванні підвіски робота потрібно вибрати таку сукупність параметрів проектування, яка забезпечить коливальний процес в системі з малими амплітудами переміщення і прискорення центру мас робота. Отже, алгоритм пошуку проектних рішень повинен містити блок розрахунку максимальних значень прискорення і коефіцієнта вертикальної динаміки центру мас робота.

Алгоритм пошуку проектних рішень приведено на рис. 6.

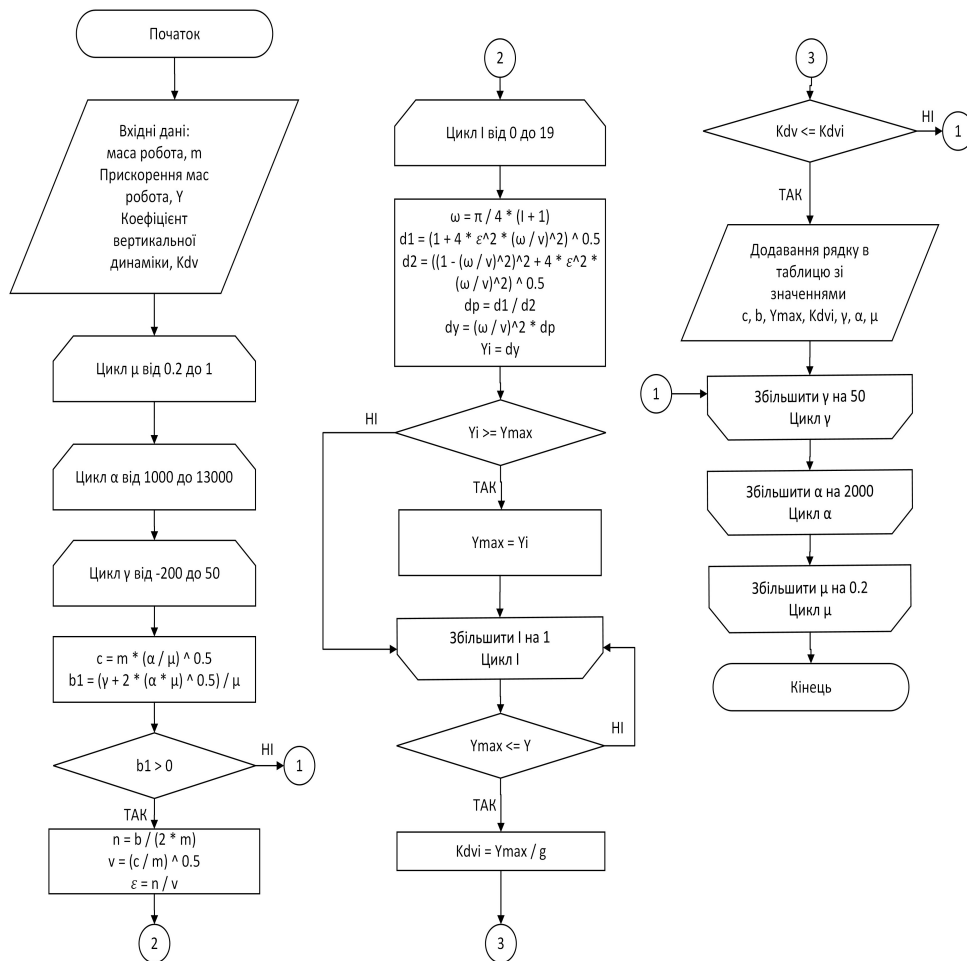


Рис. 6. Алгоритм пошуку проектних рішень

Створена комп'ютерна програма «ROBOT» оптимального проектування пасивної підвіски робота. Результати розрахунку для робота TIGER приведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Оптимальні варіанти параметрів підвіски робота TIGER

ROBOT
— □ ×

Таблиця результатів розрахунків:

с, кН/м	b, кНс/м	Ymax	Kdv	y	σ	μ
130,694937417892	17,7843118661167	2,16175969853217	0,220362864274431	0	7000	0,6
130,694937417892	20,9353787136663	2,18942697459835	0,223183177838772	50	7000	0,6
128,339880785358	17,6233513129758	2,18425302254539	0,222655761727359	0	9000	0,8
101,235863210623	9,92878587591192	2,18019616811567	0,22242218972036	-100	7000	1
114,790679064112	11,4622617024369	2,15867831765412	0,220048758170655	-100	9000	1
126,905870628588	15,2940252033657	2,16483820774823	0,220676677650176	-50	11000	1
126,905870628588	17,5246171690335	2,19819981150193	0,22407745275249	0	11000	1

ROBOT
Комп'ютерна програма для розрахунку та вибору оптимальних параметрів підвіски колісного робота

Тестування комп'ютерної програми виконано шляхом комп'ютерного моделювання в середовищі SimInTech [15], розрахунком за формулами в комп'ютерній програмі DINAM і середовищі Excel.

Для оцінки якості динамічних властивостей робота створена комп'ютерна програма DINAM, результати якої видаються у вигляді таблиці і графіків (рис. 7).

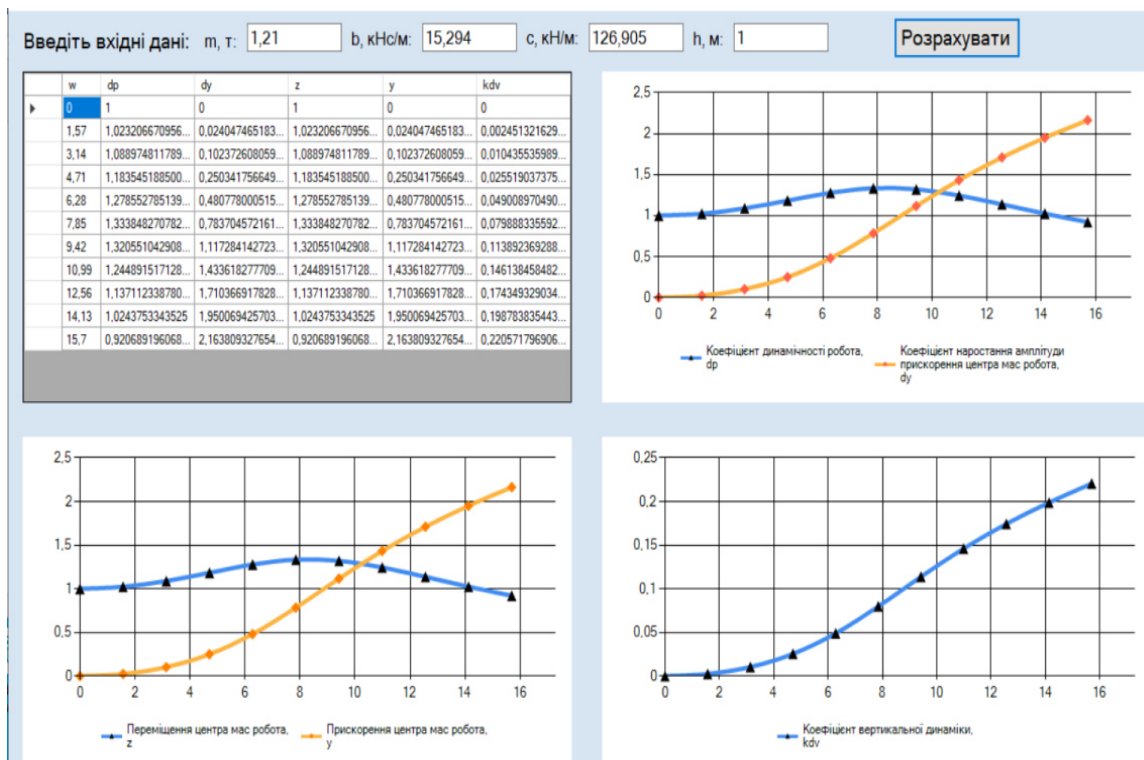


Рис. 7. Результати роботи програми DINAM

Для прийняття рішення була виконана за допомогою програми DINAM оцінка якості динамічних властивостей робота при різних варіантах параметрів підвіски, що наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Оцінка якості динамічних властивостей робота TIGER

Варіанти	b	c	d_p	Y_{\max}	K_{dv}
Модель-аналог	12	80	1,34	2,646	0,269
Варіантне моделювання	6,475	80	1,85	2,003	0,204
Оптимальний варіант 1	9,928	101,235	1,55	2,179	0,222
Оптимальний варіант 2	11,462	114,790	1,48	2,158	0,219
Оптимальний варіант 3	15,294	126,905	1,33	2,163	0,220
Оптимальний варіант 4	17,524	126,905	1,27	2,196	0,223

Існує поняття показник коливальності M - відношення максимального значення коефіцієнта динамічності d_p до його значення при $\omega = 0$ $M = d_{p\max} / d_{p0}$. Показник коливальності характеризує схильність системи до коливань. Чим вище M , тим менш якісна система за інших рівних умов. Вважається допустимим, якщо $1,1 \leq M \leq 1,5$. Робот TIGER має $b = 12$ кНс/м і $M = 1,34$, тобто відповідає допустимій нормі. Але максимальне значення амплітуди прискорення при $\omega = 15,7$ с⁻¹ дорівнює 2,646, що не допустимо. При виконанні оптимізації допустимі значення $Y_{\max} = 2,2$ м/с² і $K_{dv} = 0,22$. Тоді для реалізації можна прийняти параметри оптимальних варіантів 2 і 3.

Висновки

1. У роботі представлена розробка комп'ютерної програми «ROBOT» для оптимального проектування пасивної підвіски колісного робота та комп'ютерна програма «DINAM» для оцінки його динамічних властивостей. Тестування комп'ютерних програм виконано шляхом комп'ютерного моделювання в середовищі SimInTech і розрахунком за формулами в середовищі Excel.

2. На основі комп'ютерного моделювання, варіантного моделювання та оптимізації отримані параметри пасивної підвіски робота, що забезпечують йому найкращі динамічні властивості порівняно з моделлю-аналогом.

3. Комп'ютерне моделювання та оптимізацію потрібно виконати на першому етапі проектування, що дозволить створювати сучасні колісні роботи і скоротити їх термін проектування.

Список літератури

1. Єршова Н. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір наукового характеру «Методология поэтапного проектирования системы подвешивания транспортных экипажей» № 69687 від 13.01.2017.
2. Petersen R., Philippsen L., Philippsen R. Implementation and stability analysis of prioritized whole-body compliant controllers on a wheeled humanoid robot in uneven terrains. *Autonomous Robots*, 2010. Vol. 35(4), P.301–319.
3. Rojas S., Shen H., Griffiths H., Li N., Zhang L. Motion and gesture compliance control for high performance of a wheeled humanoid robot. *ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers, 2017. P. V04AT05A058 – V04AT05A058.

4. Lauwers T.B, Kantor G.A, Hollis R.L. A dynamically stable singlewheeled mobile robot with inverse mouse-ball drive. *Robotics and Automation. Proceedings 2006 IEEE International Conference*. IEEE, 2006. P 2884–2889.
5. Xin S., You Y., Zhou C., Fang C., Tsagarakis N. A torque-controlled humanoid robot riding on a two-wheeled mobile platform. *Intelligent Robots and Systems. IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 2017. P.1435–1442.
6. Henze B., Roa M.A., Ott C. Passivity-based whole-body balancing for torque-controlled humanoid robots in multi-contact scenarios. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 35(12). P.1522–1543, 2016.
7. Kuindersma S., Deits R., Fallon M., Valenzuela A., Dai H., Permenter F., Koolen T., Marion P., Tedrake R. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot. *Autonomous Robots*. 2016. Vol. 40(3). P:429–455.
8. Kudruss M., Naveau M., Stasse O., Mansard N., Kirches C., Soueres P., Mombaur K. Optimal control for whole-body motion generation using center-of-mass dynamics for predefined multi-contact configurations. *Humanoid Robots (Humanoids), IEEE-RAS 15th International Conference*. IEEE, 2015. P. 684–689.
9. Cori'c M., Deur J., Xu L., Tseng H.E., Hrovat D. Optimisation of active suspension control inputs for improved vehicle ride performance. *Vehicle system dynamics*, 2016. Vol. 54(7). P.1004–1030.
10. Sun W., Gao H., Yao B.. Adaptive robust vibration control of fullcar active suspensions with electrohydraulic actuators. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Vol. 21(6). P.2417–2422, 2013.
11. Ershova N., Bondarenko I., Shibko O., Velmagina N.. Development of the procedure for verifying the feasibility of designing an active suspension system for transport carriages. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 3/7 (93). P. 53-63.
12. Єршова Н. М., Калашников К. О. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір наукового характеру «Принцип адаптивного управління движением робота с динамической подвеской», № 97129 від 08.04.2020 р.
13. Attia T. Design and Development of a Novel Reconfigurable Wheeled Robot for Off-Road Applications. Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering. Blacksburg, Virginia, 2018. 142 p.
14. Ершова Н.М. Современные методы теории проектирования и управления сложными динамическими системами: монография. Днепропетровск: ПГАСА, 2016. 272 с.
15. Карташов Б. А., Шабаетв Е. А., Козлов О. С., Щекотуров А. М. Среда динамического моделирования SimInTech: практикум по моделированию технических систем автоматического регулирования. ДМК Пресс, 2017. 424 с.

Н.М. Єршова, Н.В. Ткачук, С.А. Рєнгач

DEVELOPMENT OF COMPUTER PROGRAMS FOR THE OPTIMAL DESIGN OF THE PASSIVE SUSPENSION OF A WHEELED ROBOT

N.M. Yershova, N.V. Tkachuk, S.A. Renhach

Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture
24 a, St. Architect Oleg Petrov, Dnipro, 49005, Ukraine. E-mail:
nersova107@gmail.com, tkachuk.nadya7@gmail.com, docker1280@gmail.com

Currently, mobile robots are widely used. Based on the analysis of a large number of possible suspension options, they came to the conclusion about the feasibility of using wheeled robots with dynamic suspension. For the design of systems under the influence of random disturbances, a method of stochastic dynamic programming has been developed. The method is very effective, as it allows determining the law of optimal control of robot suspension parameters. According to this suspension design method, the work should be performed in stages: a passive suspension is designed based on the method of dynamic programming for continuous deterministic systems and the analysis of the robot's dynamic indicators; the expediency of introducing active control parameters of the Kalman-Busy algorithm into the passive suspension is checked and a final decision is made about the suspension's operating principle; the law of optimal management of robot suspension parameters is determined, if a decision is made to design an active suspension. In this case, less external energy is needed to suppress harmful vibrations. In the existing scientific and technical literature, mathematical models of robots with active suspension are considered, and it is not clear on what basis the suspension parameters of the original system were adopted. This work considers the first stage of designing the suspension of a wheeled robot. There are no computer programs for optimal design of the passive suspension of a wheeled robot. Therefore, the purpose of this work is to develop computer programs for the optimal design of the passive suspension of a wheeled robot. R. Bellman's matrix method of dynamic programming for continuous dynamic systems, which is a scientific novelty of the work, is the basis of the design solution search algorithm. The created computer program "ROBOT" is designed to select optimal suspension parameters, provided that the maximum values of acceleration and the coefficient of vertical dynamics of the center of mass of the robot do not exceed the permissible values. The evaluation of the dynamic properties of the robot is performed using the computer program "DINAM", the results of which are issued in the form of graphs and calculation tables. The parameters of the TIGER wheeled robot are taken as an analog model. On the basis of computer modeling, variant modeling and optimization, the passive suspension parameters of the robot were obtained, which provide it with the best dynamic properties compared to the analog model. This work is an important contribution to the field of computer science and software engineering.

Keywords: optimal design of wheeled robot suspension, computer program, matrix method of dynamic programming