

УДК 629.359, 681.513.1

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ МАЛОГАБАРИТНИХ ВАНТАЖІВ В РЕЖИМІ СТАБІЛІЗАЦІЇ СВОГО ПОЛОЖЕННЯ

Ю. О. РОМАСЕВИЧ, д.т.н., проф.,
О. Ю. ЗАРІВНИЙ, аспірант, e-mail:

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: romasevichyuriy@ukr.net, Alex-zar@ukr.net

Розроблений пристрій для транспортування малогабаритних вантажів є нестійкою динамічною системою і потребує постійного керуючого впливу для збереження рівноваги, тому постає питання синтезу оптимального керування рухом пристрою в режимі стабілізації свого положення.

Для розробленої математичної моделі пристрою [1] в якості керуючого впливу обрано кут відхилення механізму балансування β . Наступне диференціальне рівняння пов'язує керування β з кутом нахилу пристрою α :

$$\begin{aligned} & (I_{lk} + I_{kk}) \cdot \ddot{\alpha} + m_1 \cdot \left(\ddot{x}_{c1} \cdot \left[l + \frac{c}{2} + r \cdot (1 - \cos(\beta)) \right] - \right. \\ & \left. - \left[l + \frac{c}{2} + r \cdot (1 - \cos(\beta)) \right] \cdot \alpha(t) \cdot \left[l + \frac{c}{2} + r \cdot (1 - \cos(\beta)) \right] \right) = \\ & = - \left(m_1 \cdot \left(-\alpha(t) \cdot \left[l + \frac{c}{2} + r \cdot (1 - \cos(\beta)) \right] \right) + m_k \cdot \frac{D}{2} \cdot \alpha(t) \right) \cdot g; \end{aligned} \quad (1)$$

де I_{lk} – момент інерції рами відносно точки контакту з поверхнею; I_{kk} – момент інерції колеса відносно точки контакту з поверхнею; m_l – маса рами; m_k – маса колеса; x_{c1} , \ddot{x}_{c1} – координата центра ваги рами пристрою та її друга похідна по часу; l – відстань від рами до точки контакту колеса з землею; c – висота рами; r – радіус кривошипа; D – висота колеса; α , $\ddot{\alpha}$ – кут нахилу пристрою та його друга похідні по часу; β – кут відхилення механізму балансування.

Метою розробки оптимального керування є збереження стійкості пристрою з оптимальним режимом роботи приводу механізму балансування. В якості показника ефективності режиму роботи, введено квадратичний

інтегральний критерій оптимізації. Він характеризує плавність регулювання, забезпечує мінімальні кутові швидкості і відхилення пристрою та механізму балансування на всьому проміжку регулювання:

$$K_I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left(\delta_1 \cdot \left(\frac{\alpha(t)}{|\alpha_0|} \right)^2 + \delta_2 \cdot \left(\frac{\dot{\alpha}(t)}{|\dot{\alpha}_0|} \right)^2 + \delta_3 \cdot \left(\frac{\beta(t)}{|\alpha_0|} \right)^2 + \delta_4 \cdot \left(\frac{\dot{\beta}(t)}{|\dot{\alpha}_0|} \right)^2 \right) dt}; \quad (2)$$

де T – час регулювання пристрою;

Для зведення критерію (2) до безрозмірної величини, значення $\alpha(t)$, $\dot{\alpha}(t)$, $\beta(t)$, $\dot{\beta}(t)$ поділено на початкові умови. Коефіцієнти δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4 , відображають різну ступінь важливості показників.

Для забезпечення умови збереження рівноваги пристрою, застосовано термінальний критерій наступного вигляду:

$$K_T = \begin{cases} \left(\left| \frac{\alpha(T)}{\alpha_0} \right| + \left| \frac{\dot{\alpha}(T)}{\dot{\alpha}_0} \right| + \left| \frac{\beta(T)}{\alpha_0} \right| + \left| \frac{\dot{\beta}(T)}{\dot{\alpha}_0} \right| \right) \cdot \sigma_T, \text{ якщо:} \\ |\alpha(T)| > \Delta\alpha \cup |\dot{\alpha}(T)| > \Delta\dot{\alpha} \cup |\beta(T)| > \Delta\beta \cup |\dot{\beta}(T)| > \Delta\dot{\beta}; \\ 0, \text{ якщо: } |\alpha(T)| \leq \Delta\alpha \cap |\dot{\alpha}(T)| \leq \Delta\dot{\alpha} \cap |\beta(T)| \leq \Delta\beta \cap |\dot{\beta}(T)| \leq \Delta\dot{\beta}, \end{cases} \quad (3)$$

де $\alpha(T)$, $\dot{\alpha}(T)$ – значення кута нахилу пристрою і його першої похідної по часу, в момент часу T ; $\beta(T)$, $\dot{\beta}(T)$ – значення кута нахилу пристрою і його першої похідної по часу, в момент часу T ; $\Delta\alpha$, $\Delta\dot{\alpha}$, $\Delta\beta$, $\Delta\dot{\beta}$ – допустимі значення кутів ($\Delta\alpha = \Delta\beta = 0,001$ рад; $\Delta\dot{\alpha} = \Delta\dot{\beta} = 0,001$ рад/с) і кутових швидкостей пристрою в момент часу T ($T=0,5$ с); σ_T – ваговий коефіцієнт ($\sigma_T = 10^8$), який вказує на важливість мінімізації термінального критерію, тобто забезпечення крайових умов. Загальний критерій оптимізації, який потребує мінімізації, знаходиться як сума інтегрального і термінального критеріїв:

$$K_{заг} = K_T + K_I \rightarrow \min. \quad (4)$$

де K_T , K_I – термінальний і інтегральний критерій відповідно.

Для забезпечення оптимального керування необхідно задати характер зворотного зв'язку, тобто вибрати тип регулятора. В даному випадку було розглянуто ПД-регулятор (5), та його частинний випадок ПІ-регулятор:

$$\beta = k_1 \cdot \alpha(t) + k_2 \cdot \int \alpha(t) dt + k_3 \cdot \dot{\alpha}(t), \quad (5)$$

де k_1 , k_2 , k_3 – відповідно пропорційний, інтегральний та диференціальний коефіцієнти регулятора.

Для застосування оптимізаційних алгоритмів розроблено цільову MISO-функцію, входами якої є коефіцієнти регуляторів (k_1, k_2, k_3), а виходом – значення критерію оптимізації ($K_{заг}$).

Для оптимізації коефіцієнтів ПІ- (k_1, k_2) та ПІД- (k_1, k_2, k_3) регуляторів застосовано модифікований метод рою часточок VTC-PSO [2]. Проведено мінімізацію цільової функції для 11 конфігурацій вагових коефіцієнтів інтегрального критерію.

Проведено оцінку отриманих результатів за показниками максимального кутового прискорення нахилу пристрою для ПІ-регулятора ($\ddot{\alpha}_{\max} = 1,10 \cdot 10^4 \dots 5,79 \cdot 10^5$ рад/с²), максимального кутового прискорення механізму балансування ($\ddot{\beta}_{\max} = 2,32 \cdot 10^4 \dots 1,22 \cdot 10^6$ рад/с²) та їх середньоквадратичні значення ($\ddot{\alpha}_{RMS} = 2,02 \cdot 10^2 \dots 8,18 \cdot 10^3$ рад/с²; $\ddot{\beta}_{RMS} = 4,27 \cdot 10^2 \dots 1,73 \cdot 10^4$ рад/с²). Також проведено оцінку часу регулювання ($t_{pez} = 0,058 \dots 0,105$ с). Введення диференційної складової (ПІД-регулятор) зменшило показники максимальних ($\ddot{\beta}_{\max}$ 6...1021 у разів; $\ddot{\alpha}_{\max}$ у 6...1026 разів) та середньоквадратичних ($\ddot{\beta}_{RMS}$ у 3...108 разів; $\ddot{\alpha}_{RMS}$ у 3...187 разів) кутових прискорень. Час регулювання при цьому збільшився на 0,001...0,052 с.

Обрано найкращий розв'язок задачі для ПІ- та ПІД-регуляторів, які відповідають мінімальним значенням показників кутових прискорень та тривалості регулювання (0,058 с – для ПІ-регулятора та 0,111 с для ПІД-регулятора). Такі результати досягнуто при коефіцієнтах ПІ-регулятора: $k_1 = -2,133$, $k_2 = -1,744$, та коефіцієнтах ПІД-регулятора: $k_1 = -2,113$, $k_2 = -1,747$, $k_3 = -4,92 \cdot 10^{-6}$. Серед найкращих розв'язків показники кутових прискорень менші при застосуванні ПІД-регулятора. У 20 разів кращі показники максимальних кутових прискорень, у 4,8 рази кращі показники середньоквадратичних кутових прискорень. Час регулювання при цьому незначною мірою збільшився на 0,053 с.

Проведена робота дозволить використати отримані результати для експериментальної перевірки роботи розроблених регуляторів стабілізації пристрою для переміщення малогабаритних вантажів.

Список використаних джерел

1. Loveikin, V., Romasevych, Yu., & Zarivnyi, O. (2024). Development of a mathematical model of stabilisation of device for small-sized cargo transportation. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 20(4), 57-71. doi: 10.31548/dopovidi/3.2024.57.
2. Romasevych Y., Loveikin V., Loveikin Yu. (2022). Development of a PSO Modification with Varying Cognitive Term. 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology, Kharkiv, Ukraine, 2022. doi: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916413.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ ТА АВТОМАТИКИ АПВ НААН
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**



***ЗБІРНИК
ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ***

***XII Міжнародної науково-технічної конференції з нагоди
118-ї річниці від дня народження
доктора технічних наук, професора,
віцепрезидента УАСГН
КРАМАРОВА
Володимира Савовича
(1906-1987)***

«КРАМАРОВСЬКІ ЧИТАННЯ»

***20-21 лютого 2025 року
м. Київ***

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
NATIONAL UNIVERSITY OF LIFE AND ENVIRONMENTAL
SCIENCES OF UKRAINE
INSTITUTE OF MECHANICS AND AUTOMATICS OF
AGROINDUSTRIAL PRODUCTION OF THE NATIONAL
ACADEMY OF AGRARIAN SCIENCES OF UKRAINE
STATE BIOTECHNOLOGICAL UNIVERSITY



PROCEEDINGS

*XII International Scientific and Technical Conference dedicated
to the 118th anniversary of the birth of
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Vice President of the UAAS
KRAMAROV
Volodymyr Savovych
(1906-1987)*

«KRAMAROV'S READINGS»

*February 20-21, 2025
Kyiv*

УДК 631.17+62-52-631.3

Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 118-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, віцепрезидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 20-21 лют. 2025 р., м. Київ / МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2025. 662 с.

Proceeding of the XII International Scientific and Technical Conference dedicated to the 118th anniversary of the birth of Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice President of the UAAS Kramarov Volodymyr Savovych (1906–1987), February 20–21, 2025, Kyiv / MES of Ukraine, National University of Life And Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv: Publishing center of NULES of Ukraine, 2025. 662 p.

В збірнику представлені тези доповідей науково-педагогічних працівників, наукових співробітників, аспірантів та студентів НУБіП України, провідних вітчизняних і закордонних вищих навчальних закладів та наукових установ, в яких розглядаються завершені етапи розробок.

The Proceedings presents abstracts of reports of scientific and pedagogical workers, research staff, graduate students and students of the NULES of Ukraine, leading domestic and foreign higher educational institutions and scientific institutions, in which completed stages of development are considered.

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ:

- Ткачук В. А.** – ректор НУБіП України, голова організаційного комітету;
Тонха О. Л. – проректор з наукової роботи та інноваційної діяльності НУБіП України, заступник голови організаційного комітету;
Ружило З. В. – декан факультету конструювання та дизайну НУБіП України, заступник голови організаційного комітету;
Мельник В. І. – доцент кафедри надійності техніки НУБіП України, секретар організаційного комітету;
- Члени організаційного комітету:**
Автухов А. К. – завідувач кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні імені О. І. Сідашенка ДБУ;
Адамчук В. В. – директор «ІМА АПВ НААН», академік НААН;
Альмейда А. – професор Політехнічного університету Браганси (Португальська Республіка);
Аулін В. В. – професор кафедри експлуатації та ремонту машин ЦНТУ;
Арак М. – директор Тартуського технічного коледжу м. Тарту (Естонська Республіка);
Банний О. О. – заступник декана факультету конструювання та дизайну НУБіП України;
Бєлоєв Х. – радник ректора Університету «Ангел Кънчев» в м. Русе, академік Болгарської АН (Республіка Болгарія);
Борак К. В. – заступник директора ЖАТФК;
Братішко В. В. – декан МТФ НУБіП України;
Будяй О. В. – директор ТОВ «Манн+Хуммель Фільтрейшн Текнолоджі Україна»;
Булгаков В. М. – завідувач кафедри механіки НУБіП України, академік НААН;
Василенко М. О. – завідувач відділу «ІМА АПВ НААН»;
Васильковський О. М. – завідувач кафедри сільсько-господарського машинобудування ЦНТУ;
Войтюк Д. Г. – професор кафедри сільськогосподарських машин та системотехніки ім. акад. П.М. Василенка НУБіП України, член-кореспондент НААН;
Герук С. М. – завідувач кафедри агроінженерії ЖАТФК;
Джеонг Ілля – Голова представництва в Україні «HYUNDAI XITESOLUTION» (Республіка Корея);
Домейка Р. – декан відділення Агроінженірингу, Університету Вітаутаса Великого (Литовська Республіка);
Захарчук О. В. – завідувач відділу ННЦ «ІАЕ», член-кореспондент НААН;
Іванишин В. В. – ректор ЗВО «Подільський ДУ», академік НААН;
Ковалишин С. Й. – декан факультету механіки, енергетики та інформаційних технологій ЛНУП;
Коренко М. – професор Інституту проєктування та інженерних технологій Словацького аграрного університету в м. Нітра (Словацька Республіка);

- Кувачов В. П.** – декан МТФ ТДАТУ імені Дмитра Моторного;
- Кульгавий В. Ф.** – генеральний директор ВГО «Українська асоціація аграрних інженерів»;
- Кюрчев С. В.** – ректор ТДАТУ імені Дмитра Моторного;
- Литовченко О. В.** – директор ВСП «Ніжинський ФК НУБіП України»;
- Ловейкін В. С.** – завідувач кафедри конструювання машин і обладнання НУБіП України;
- Лопатько К. Г.** – завідувач кафедри технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства НУБіП України;
- Лукач В. С.** – директор ВП «Ніжинський агротехнічний інститут» НУБіП України;
- Мельник В. І.** – провідний науковий співробітник відділу науково-технічної інформації НДЧ НУБіП України;
- Мельник В. І.** – професор кафедри оптимізації технологічних систем в рослинництві ДБУ;
- Надикто В. Т.** – професор ТДАТУ імені Дмитра Моторного, член-кореспондент НААН;
- Науменко О. А.** – професор кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні імені О. І. Сідашенка ДБУ;
- Новак Я.** – професор Університету природничих наук у Любліні (Республіка Польща);
- Новицький А. В.** – завідувач кафедри надійності техніки НУБіП України;
- Ольт Ю.** – професор Інженерного інституту Естонського університету наук про життя (Естонська Республіка);
- Паскуці С.** – професор Департаменту агроекологічних і територіальних наук (DISAAT) університету Альдо Моро в м. Барі (Італійська Республіка);
- Пилипака С. Ф.** – завідувач кафедри нарисної геометрії, комп'ютерної графіки та дизайну НУБіП України;
- Полянський П. М.** – завідувач кафедри загальнотехнічних дисциплін МНАУ;
- Пона Лукреція** – науковий дослідник Національного інституту досліджень і розробок машин і установок для сільського господарства та харчової промисловості (Румунія);
- Продеус О. В.** – керівник відділу збуту Манн+Хуммель GmbH;
- Роговський І. Л.** – завідувач кафедри технічного сервісу та інженерного менеджменту імені М. П. Момотенка НУБіП України;
- Ромасевич Ю. О.** – заступник декана факультету конструювання та дизайну НУБіП України;
- Ревенко Ю. І.** – доцент кафедри надійності техніки НУБіП України;
- Русінс А.** – директор Улброкського наукового центру Латвійського університету природничих наук і технологій (Латвійська Республіка);
- Саченко В. І.** – Голова Ради Асоціації «Укрмашибуд»;
- Савченко В. М.** – доцент кафедри агроінженерії та технічного сервісу ПНУ;
- Сайчук О. В.** – директор ХДФПК імені В. І. Вернадського;
- Сиволапов О. В.** – директор ТОВ «Індустрія техногруп»;

Тін Ю Чен - голова китайського офісу філії університету в Лінї (Китайська Народна Республіка);

Фіндура П. – проректор Словацького аграрного університету в м. Нітра (Словацька Республіка).

Шарибура А. О. – завідувач кафедри агроінженерії та технічного сервісу ім. О. Семковича ЛНУП;

Яковенко І. А. – завідувач кафедри будівництва НУБіП України.