

НУБІП України

НУБІП України

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА
01.09. – МР.585 «С». 2022.02.04. 013 ПЗ

ЩЕРБАК ОЛЕКСІЙ ІГОРОВИЧ
2023

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет конструювання та дизайну

ПОГОДЖЕНО:
Декан факультету
конструювання та дизайну

Ружи́ло З.В.

(підпис)

« » 20__ р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ:
Завідувач кафедри конструювання
машин і обладнання

Ловейкін В.С.

(підпис)

« » 20__ р.

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему: **«Синтез оптимального керування рухом
вантажоніємного крана при дії вітрових поривів»**

01.09. – МР.585 «С». 2022.02.04. 013 ІЗ

Спеціальність - 133 «Галузеве машинобудування»

Освітньо-наукова програма – «Машини та обладнання сільськогосподарського
виробництва»

Керівники магістерської роботи:

Д.т.н. проф.

Виконав:

Ромасевич Ю.О.

(підпис)

Щербак О.І.

(підпис)

Київ-2023

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**
Факультет конструювання та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри конструювання
машин і обладнання, д.т.н.

Ловейкін В.С.

(підпис)

« » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

ЩЕРБАКУ ОЛЕКСІЮ ІГОРОВИЧУ

Спеціальність - 133 «Галузеве машинобудування»

Освітньо-наукова програма - «Машини та обладнання
сільськогосподарського виробництва»

Тема магістерської роботи: «синтез оптимального керування рухом
вантажопідйомного крана при дії вітрових поривів», затверджена наказом
ректора від «4» лютого 2022 р. № 204 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____ р.

Вихідні дані до магістерської роботи: технічні характеристики обладнання:

частотного перетворювача, мікроконтролера, цифрового-аналогового
перетворювача, блока живлення енкодерів, енкодерів.

Перелік графічних документів: поданий у н-ій кількості рисунках

Дата видачі завдання: 14.03.2022 р.

Керівник магістерської роботи:

д.т.н. проф.

Ромасевич Ю.О.

(підпис)

Завдання прийняв до виконання:

Щербак О.І.

Київ 2023

Реферат

Вступ

I. Розділ. Оглядова частина

1.1. Вантажопідйомні механізми у промисловості

1.2. Класифікація мостових кранів

1.3. Аналіз наукових джерел

1.3.1. Аналіз патентів в Україні за класом B66C 13/06

1.3.2. Кількісний аналіз патентів за класом

1.3.3. Аналіз по ключовим виразам за допомогою сервісу google академії

II Розділ. Математичне моделювання динамічного руху вантажопідйомного крана

2.1. Опис лабораторної установки для дослідження

2.2. Математичне моделювання руху вантажу

III. Розділ.

3.2. Аналіз отриманих розв'язків

IV. Експериментальні дослідження

4.1. Синтез оптимально руху крана

3.2. Результати досліджень

V Розділ. Охорона праці

Висновки

Список використаних джерел

ДОДАТКИ

Реферат

Актуальність теми. Вантажопідйомні крани є важливими промисловими механізмами, які використовуються для підйому, спуску, переміщення вантажу.

Однак, ці процеси можуть бути ускладненими при дії вітрових поривів, які створюють динамічні рухи вантажу. Відповідно утворюються коливання вантажу.

У сучасному світі конструювання вантажопідйомних механізмів включає використання частотно-керованих приводів, у тому числі механізма переміщення візка або крана. Тому, для підвищення кількісних та якісних показників виробництва необхідно забезпечити високу продуктивність роботи механізмів. Використання частотно-керованих приводів дозволяє зменшити рівень динамічних навантажень у конструкції механізму, а також забезпечує енергоефективність роботи механізмів, що підвищує їхню керованість.

Мета та завдання дослідження. Мета полягає у розробці ефективного алгоритму керування, що забезпечить оптимальний рух крана та вантажу.

Тому для досягнення поставленої мети неможливо обійтись без поставлених задач:

1. Провести огляд вантажопідйомних механізмів та виконати кількісний та якісний аналіз науково-технічних документів (статті, патенти), у яких поставлено питання щодо вдосконалення вантажопідйомних механізмів, а саме оптимізації руху вантажу

2. Виконати опис установки для проведення експериментів, провести вибір вимірально-реєструючого обладнання для зчитування даних при русі лабораторної установки (візок із вантажем на гнучкому підвісі);

3. Виконати ідентифікацію динамічної системи;

4. Виконати постановку задач синтезу оптимального регулятора руху динамічної системи при умові усунення маятникових коливань вантажу та знайти їхні розв'язки.

5. Виконати для представлення охорону праці при виконанні поставлених задач крана.

Об'єкт дослідження – процес керування динамічною системою «кран-вантаж», яка приводиться в рух від частотно-керованого приводу.

Предмет дослідження – наукові методи ідентифікації та синтезу оптимальних систем керування динамічною системою „кран-вантаж”.

Методи дослідження: математичне моделювання, інтегральне та диференціальне числення, аналітичної динаміки, регресійного аналізу, метаевристичний метод оптимізації ME-D-PSO, методи синтезу оптимальних регуляторів та інші.

Загальна характеристика роботи. У роботі комплексно розв’язана науково-прикладна задача синтезу оптимального керування рухом динамічної системи «кран-вантаж». Для того, щоб встановити адекватність розробленого підходу було вибрано відповідне обладнання (механічне, електросилове, електронне, вимірально-реєструюче тощо) для того, щоб забезпечити якісну керованість лабораторної установки. Для того, щоб отримати математичну модель руху системи було проведено запис даних по швидкості і положенню візка і вантажу при керуванні рухом візка від частотно-керованого приводу. Було отримано два набори даних з яких: перший використано для задачі побудови регресійних залежностей (математичної моделі системи), а другий – для перевірки їхньої адекватності. Це дало підстави для постановки задачі синтезу оптимального керування у вигляді зворотного зв’язку. Така задача була розв’язана із використанням модифікованого методу рою часточок. Зазначимо, що розроблений у роботі підхід може бути використаний також для цілей синтезу оптимальних систем керування інших динамічних систем.

За матеріалами магістерської роботи на основі результатів досліджень відбулась публікація:

НУБІП України

статті у фаховому виданні категорії Б. Автори Ю. О. Ромасевич, В. С. Ловейкін, В.В. Макарець; О. І. Щербак «Ідентифікація системи і синтез оптимального регулятора руху системи «кран-вантаж» (дод. Г). Наукові доповіді НУБіП України. № 1 (95), 2022. URL:

<http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi2022.01.018> ;

опубліковано 2 тези (дод. Д, дод. Є):

• Ю. О. Ромасевич, В. С. Ловейкін, В.В. Макарець; О. І. Щербак. Результати розрахунку оптимальних регуляторів руху динамічної системи «кран-вантаж».

Збірник тез доповідей ІХ Міжнародної науково-технічної конференції

«Крамаровські читання» з нагоди 115-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 24-25 лют. 2022 р., м. Київ

/ МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування

України. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2022. 281 – 283 с.

• Ю. О. Ромасевич, В. С. Ловейкін, В.В. Макарець; О. І. Щербак. Результати експериментальних досліджень оптимальних регуляторів руху динамічної системи «кран-вантаж». Збірник тез доповідей ІХ Міжнародної науково-

технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 115-ї річниці від дня

народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 24-25 лют. 2022 р., м. Київ / МОН України, Національний університет

біоресурсів і природокористування України. К.: Видавничий центр НУБіП

України, 2022. 287 – 289 с.

НУБіП України

НУБіП України

Вступ

Вантажопідіймні крани є невід'ємною частиною будівельного та промислового обладнання і дозволяють піднімати та переміщувати великі вантажі в різних умовах.

Вони можуть бути різних типів і конфігурацій в залежності від потреби. Наприклад, крани-баштові можуть бути стаціонарними або пересувними, а їх висота може досягати більше 100 метрів. Крани-мостові, у свою чергу, мають гідропривод або електропривод та переміщуються по рейках, зазвичай над робочою зоною.

Окрім того, існують вантажопідіймні крани з різною вантажопідіймністю, яка може варіюватись від кількох кілограмів до кількох тисяч тон. Вони також можуть мати різні механізми керування, наприклад, механічні, гідравлічні або електричні.

При використанні вантажопідіймних кранів дуже важливо дотримуватись вимог безпеки та правил експлуатації. Такі крани повинні бути збалансовані, ретельно перевірені на витривалість та безпеку, а також мати досвідченого оператора.

Вивчення вантажопідіймних кранів є важливим для будь-якої людини, яка працює в будівництві, промисловості та інших галузях, де необхідно піднімати великі вантажі. Тому розуміння принципів їх роботи та правил експлуатації є важливим для безпеки та успішної роботи в цих галузях.

НУБІП України

НУБІП України

І. Розділ. Оглядова частина

1.1. Вантажопідійомні механізми у промисловості

Вантажопідійомні механізми є важливими елементами промисловості, які використовуються для підйому, спуску та переміщення вантажів. Такі механізми використовуються в різних галузях, таких як будівництво, логістика, виробництво та інші. Різновидами таких є:

- кранові механізми (рис 1.1.(а)) - це механізми, що використовуються для підйому та переміщення вантажів у вертикальному та горизонтальному напрямках. Їх можна розділити на мостові, консольні, козлові, кран-балки, кран-труби та інші види.

- підйомники (рис 1.1.(б)) - це механізми, що використовуються для підйому та переміщення вантажів виключно у вертикальному напрямку. Підйомники можуть бути гідравлічними, механічними, електричними та іншими.

- транспортні засоби (рис 1.1.(в)) - це механізми, що використовуються для транспортування вантажів на невеликі відстані. Транспортні засоби можуть бути автомобільними, залізничними, річковими та іншими.

- лебідки (рис 1.1.(г)) - це механізми, що використовуються для переміщення вантажів вздовж вертикальної та горизонтальної осей за допомогою намотування на барабан канату або ланцюга.



а



б



Рисунок 1.1. Вантажопідйомні механізми у промисловості

Перш за все, варто зазначити, що вантажопідйомні механізми можуть бути механічними, гідравлічними та повітряними. Механічні механізми використовують механічну енергію, щоб підняти вантаж, гідравлічні механізми використовують рідину, а повітряні механізми використовують стиснене повітря. Для кожного типу механізму є свої переваги та недоліки, що варто враховувати при виборі.

Механічні механізми включають в себе блокі, талі, лебідки, кран-балки та інші. Ці механізми часто використовуються в будівництві та виробництві, де необхідно переміщати вантажі невеликої ваги на короткі відстані. Однак, механічні механізми мають обмежену вантажопідйомність та не доцільно використовувати їх для підйому важких вантажів.

Гідравлічні механізми, з іншого боку, можуть піднімати значно більші вантажі, що робить їх ідеальними для використання в важкій промисловості, такі як гірничо-металургійна галузь. Гідравлічні механізми використовують рідину під високим тиском, щоб підняти вантаж, та мають велику точність та контроль, що дозволяє їм робити складні операції. Однак, гідравлічні механізми вимагають регулярного обслуговування та мають високі витрати на енергію.

Повітряні механізми використовують стиснене повітря, щоб підняти вантаж. Вони легкі та мобільні, що робить їх ідеальними для використання на будівельних майданчиках та у складах. Однак, вони мають низьку точність та контроль, що обмежує їх використання для складних операцій та підйому важких вантажів.

Крім типів механізмів, важливо враховувати й інші фактори при виборі вантажопідйомного механізму. Вантажопідйомність, висота підйому, точність та контроль, мобільність, розмір та масштаб, енергоефективність, безпека та інші фактори є важливими для вибору оптимального механізму для певної галузі та завдання.

У будівництві використовуються кран-балки, телескопічні крани, автокрани, які дозволяють піднімати вантажі, які допустимі по вазі та переміщувати їх на близькі та далекі відстані. У складах та логістичних центрах використовуються підйомні візки та стелажі, що дозволяють ефективно переміщувати велику кількість товарів. У виробництві використовуються різні типи конвеєрів та вантажопідйомних механізмів, щоб автоматизувати та оптимізувати виробничі процеси.

Найбільш ефективні вантажопідйомні механізми забезпечують високий рівень продуктивності та ефективності роботи. Вибір конкретного вантажопідйомного механізму залежить від потреб і можливостей певної галузі, завдання та бюджету. Важливо пам'ятати про безпеку роботи з вантажопідйомними механізмами, тому що неправильне використання може призвести до нещасних випадків та пошкоджень майна.

Крім того, зростає попит на автоматизовані вантажопідйомні механізми, що дозволяють ефективно виконувати завдання та знижувати ризики для людей. Розробляються та впроваджуються різні технології, такі як датчики, системи контролю та моніторингу, а також штучний інтелект, щоб забезпечити оптимальну роботу вантажопідйомних механізмів.

1.2. Класифікація мостових кранів

Мостові крани - це вид вантажопідйомного обладнання, що використовується в різних сферах промисловості для підйому та переміщення вантажів. Класифікація мостових кранів зазвичай виконується за декількома параметрами:

1. За призначенням:

- Загального: відносяться гаківі крани із гнучким підвісом вантажу;
- Спеціального: крани мостового типу, у яких вантаж захоплюється спеціальним пристроєм є: магніт, грейфер, траверса, кліщові захоплювачі;

2. За типом конструкції:

- Однобалковий мостовий кран (рис. 1.2.(а)): має одну балку, що пролягає над робочим простором.
- Двохбалковий кран (рис. 1.2.(б)): має два паралельні мости, що пролягають над робочим простором.

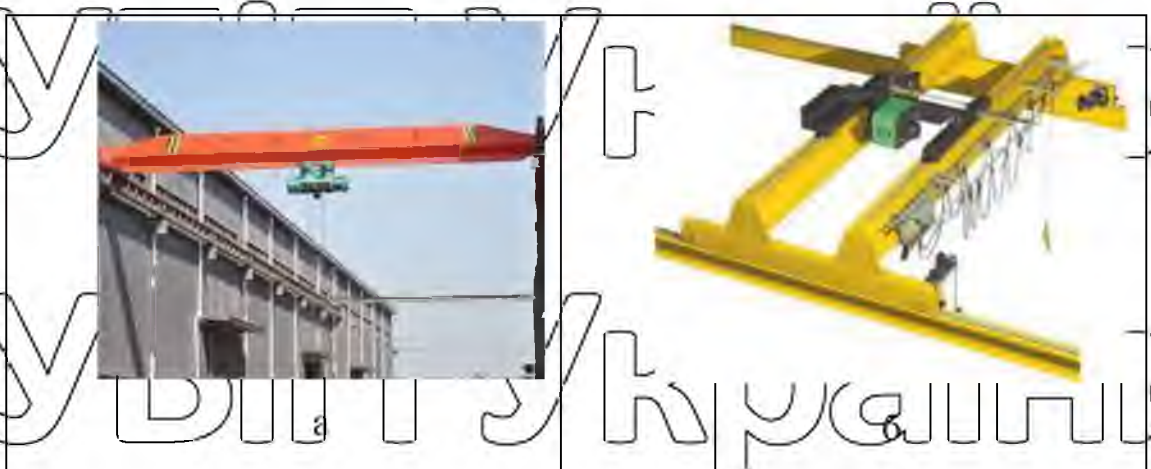


Рисунок 1.2. Типи конструкцій мостових кранів

3. За типом опори:

- Опорного типу (рис. 1.3.(а)): опора на рейковій колії відбувається зверху;
- Підвісного типу (рис. 1.3.(б)): переміщення крана відбувається по нижніх плечах рейок підвісної колії крана.

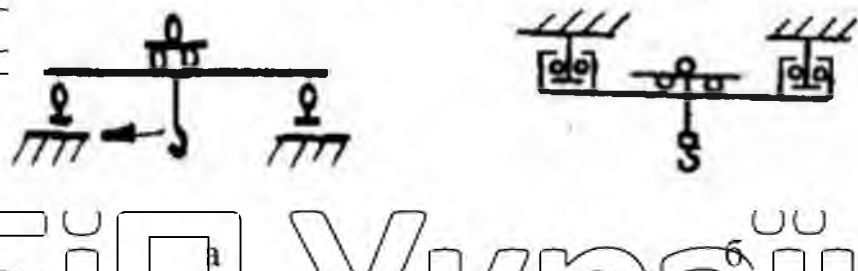


Рисунок 1.3. Типи опор мостових кранів.

4. За типом приводу:

- Електричні крани: приводяться в рух за допомогою електричного двигуна та засобів управління.

- Гідравлічні крани: приводяться в рух за допомогою рідини під високим тиском.

5. За способом управління:

- Ручне керування: керування виконується вручну оператором.

- Автоматичне керування: керування виконується за допомогою комп'ютерної системи управління, яка відповідає за підвищену точність та швидкість роботи крана.

6. За способом руху:

- Кран на гумових колесах: має гумові колеса для переміщення по поверхні.

- Кран на гусеницях: має гусеничну базу для переміщення по нерівній

поверхні.

- Кран з ланцюговим ходом: має ланцюговий хід для переміщення по поверхні.

7. За висотою підйому:

- Кран з низьким підйомом: призначений для підйому та переміщення вантажів на невеликі висоти.

- Кран з високим підйомом: призначений для підйому та переміщення вантажів на великі висоти.

Такі параметри не є взаємовиключними, тому один кран може належати до декількох класифікаційних груп одночасно. Класифікація мостових кранів дозволяє краще розуміти їх характеристики та визначати оптимальний тип крана для конкретних завдань.

1.3. Аналіз наукових джерел

Сучасний стан конструювання вантажопідйомної техніки включає застосування частотно-керованих приводів, у тому числі механізма переміщення крана або/та кранового візка. Науково-прикладні задачі, які виникають у цьому

напрямку, досліджувались багатьма вченими (Р.П. Герасимяк, В.А. Лещев [15], О.В. Григоров, В.В. Стрижак [16], К.С. Логвиненко [19], Kostic, B. Jeftenic [9], R. Javier [10], Ahmad Alhassan, Kumeresan A. Danapalasingam [3], Rohit Dewani [4], Xianghua Ma and Hanqiu Bao [7], Jarosaw Smoczek, Janusz Szpytko [14], [13], Vladimir A. Suvorov, Mohammad Reza Bahrami [12], Luiz Vasco Puglia, Fabrizio Leonardi, Marko Ackermann [6]).

Наприклад, у роботі [15] автори розглядали одну електромеханічну систему «частотно-керований привод – кран – вантаж». Це дало їм змогу отримати закони керування для різних кранових механізмів за яких маятникові коливання вантажу усуваються. У роботі [16] автори досліджували вплив опційних налаштувань частотних перетворювачів на динамічні, енергетичні та кінематичні показники руху кранових механізмів під час їх розгону та гальмування. У цілому такі дослідження дали змогу напрацювати ряд цінних для практики рекомендацій. Застосування частотно-керованого приводу для механізму підйому вантажу досліджено у роботі [19]. Тут було показано, що раціональна форма механічної характеристики приводного двигуна дозволяє значно знизити коливні процеси під час підйому вантажу з підхватом.

У роботі [9] досліджено сумісну роботу декількох частотних перетворювачів для кранових механізмів та наведено раціональні закони керування їхнім рухом. Переваги застосування частотного приводу перед приводом постійного струму наведено у роботі [10].

Автори статті [3] описують дослідження різних схем керування візком та підвіскою вантажу системи бантового крана з метою забезпечення точної позиційної стійкості та зменшення коливань вантажу. У статті розглянуто різні алгоритми керування, включаючи лінійно-квадратичний регулятор (LQR), поліноміальні регулятори і пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (PID). У роботі [4] розглядаються методи компенсації руху гака, такі як адаптивний PID-регулятор, регулятор лінійно-квадратичного типу, метод нечіткої логіки, метод генетичних алгоритмів і метод з використанням нейронних мереж. У роботі [7] пропонується метод контролю анти-коливань із закритим контуром з використанням ПД-регулятора та алгоритму

прогнозування. Даний метод дозволяє керувати рухом гака крана, зменшуючи відхилення від заданої траєкторії та уникнення коливань вантажу.

Алгоритм керування краном, який базується на теорії нечіткої логіки та методах робастності представлено у роботі [14]. Застосування нечіткої логіки дозволяє моделювати нечіткі та невизначені процеси, що часто відбуваються в реальних системах, а методи робастності дозволяють забезпечити стійкість системи до збурень та перешкод.

Стаття [13] описує принципи роботи технології контролю коливань, яка базується на системі вимірювання та аналізу даних з датчиків, що встановлені на крані. Дані про коливання обробляються за допомогою спеціальних алгоритмів та програмного забезпечення, яке забезпечує автоматичне управління рухом крана для підтримки стабільності та запобігання коливанням.

Автори статті [12] розглядають проблему коливань крана та пропонують метод їх контролю. Зокрема, запропоновано використання моделювання та аналізу коливань для покращення контролю рухів крана. Розглянуто принципи контролю та виконання алгоритму руху крана. Для побудови математичної моделі та розробки алгоритму, використовуючи метод лінійного програмування та систему MATLAB представлено у статті [6].

Ці та інші роботи залишають поза увагою декілька важливих факторів: оптимальне керування рухом крана має враховувати поточний стан фазових координат, що вимагає синтезу оптимального регулятора, існує певна обмеженість на швидкість наростання та спадання частоти напруги живлення приводу механізму переміщення крана, синтез оптимального керування повинен виконуватись на основі моделі, яка б враховувала фактичну динаміку його руху.

1.3.1. Аналіз патентів в Україні за класом В66С 13/06

В66С 13/06 є класифікацією патентів, яка відноситься до кранів, підйомних кранів, вантажопідйомних кранів та їх компонентів.

Для проведення аналізу розробок та патентів вантажопідйомних кранів було створено таблицю 1.3. Використовуючи дані із цієї таблиці можна визначити

основні напрямки патентних винаходів, а також вдосконалення вантажопідійомних механізмів.

Провівши аналіз даних табл. 1.3, встановлено, що основний напрямок вдосконалень спрямовано для оптимізації керуванням рухом вантажу на підвісі, а саме модернізація існуючих елементів конструкції та методів визначення та керування оптимальними параметрами руху вантажу.

Таблиця 1.1. Патенти, отримані за допомогою сервісу Українського інституту інтелектуальної власності

п/п	Назва патенту	Проблема, на вирішення якого спрямований патент	Формула корисної моделі або винаходу	III осила ння
	СПОСІБ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ МЕХАНІЗМУ ЗМІНИ ВІЛЬОТУ ВАНТАЖУ БАШТОВОГО КРАНА ПРИ ДІЇ НА ВАНТАЖ ВІТРОВИХ ПОРИВІВ	Недоліком найближчим аналогом є те, що усування коливань закріпленого гнучкому підвісі вантажу виконується протягом відносно тривалого періоду часу. Це призводить до зниження продуктивності роботи крана.	Задача вирішується тим, що у способі оптимального керування рухом механізму зміни вільоту вантажу на баштового крана при дії на вантаж вітрових поривів, при якому до візка прикладають привідне зусилля, яке не перевищує мінімальне та максимальне значення, що включає вимірювання положення вантажу та його вищих похідних за часом до третього порядку включно, згідно з	[22]

Необхідно прагнути зменшення тривалості перехідних режимів руху вантажного візка із вантажем на гнучкому підвісі, що дозволить підвищити продуктивність роботи баштового крана.

корисною моделлю, до візка прикладають максимальне значення приводного зусилля, якщо зважена сума виміряного положення вантажу та його вищих похідних за часом більша нуля, або вимикають двигун приводу візка, якщо зважена сума виміряного положення вантажу та його вищих похідних за часом менша або рівна нулю.

Недоліком відомого пристрою є те, що значна довжина і пружність каната поліспасти, який є продовженням відтяжного каната значно збільшує час спрацювання пристрою для регулювання натягу відтяжних канатів у момент виникнення коливань вантажу

Задача вирішується тим, що заспокоювач вантажозахватного органа, який складається із відтяжних канатів, лебідки із гальмівним пристроєм, направляючих блоків, пересувного візка, який закріплений на гілці поліспасти, пристрою для регулювання натягу відтяжного каната відрізняється тим, що відтяжні канати закріплені на рухомій гайці гвинтового механізму та

ЗАСПОКОЮВ

АЧ
ВАНТАЖОЗАХВА
ТНОГО ОРГАНА

<p>під час його підйому-спуску, особливо при русі вантажу у бік стріли крана.</p>	<p>огинають ролики механізму регулювання натягу відтяжних канатів, який закріплено на іншій</p>	<p>напрямні механізму натягу відтяжних канатів, який закріплено на іншій</p>
<p>Чутливість пристрою до коливань вантажу значно</p>	<p>рухомій гайці гвинтового механізму, що встановлений на</p>	<p>рухомій гайці гвинтового механізму, що встановлений на пересувному візку. Рухомі</p>
<p>погіршується у випадку зменшення кута нахилу стріли крана, оскільки</p>	<p>гайки гвинтового механізму мають різний напрямок руху вздовж осі гвинта. Пересувний візок</p>	<p>гайки гвинтового механізму мають різний напрямок руху вздовж осі гвинта. Пересувний візок</p>
<p>візок із баластним вантажем рухається по похилій площині</p>	<p>тільки за рахунок сили тяжіння баластного вантажу і візка.</p>	<p>додатково закріплений на канаті механізму зворотного ходу</p>
<p>СПОСІБ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ПУСКУ ТА ГАЛЬМУВАННЯ КРАНА ТРАВЕРСНОЮ ПІДВІСКОЮ ВАНТАЖУ</p>	<p>Недоліком даного способу є те, що при використанні його для кранів, які мають траверсну підвіску, не може бути забезпечене усунення</p>	<p>Поставлена задача вирішується тим, що протягом пуску крана на нього діє приводне зусилля, зміна якого описується поліноміальною залежністю від аргументу часу:</p>

<p>НУБІГ</p>	<p>КОЛИВАНЬ вантажу. Причиною є вплив траверсної підвіски на</p>	<p>України</p>
<p>НУБІГ</p>	<p>динаміку руху вантажу та крана і, як наслідок, їх положення і</p>	<p>України</p>
<p>НУБІГ</p>	<p>швидкості у кінці розгону не співпадають, а коливання</p>	<p>України</p>
<p>НУБІГ</p>	<p>вантажу після пуску або гальмування крана залишаються</p>	<p>України</p>
<p>СПОСІБ ЗМЕНШЕННЯ</p>	<p>Недоліком прототипу є те, що керування рухом здійснюється при</p>	<p>Поставлена винаходом задача вирішується тим, що у спосіб зменшення коливань вантажу</p>
<p>КОЛИВАНЬ ВАНТАЖУ, ЗАКРІПЛЕНОГО НА ГНУЧКОМУ ПІДВІСІ</p>	<p>максимально можливих приводних (гальмуючих) зусиллях. Причому зусилля миттєво змінюють свою</p>	<p>закріпленого на гнучкому підвісі, що включає керування рухом візка для усунення коливань вантажу протягом</p>
<p>НУБІГ</p>	<p>Прі згідно з винаходом, протягом розгону задають</p>	<p>України</p>

<p>НУБІГ</p>	<p>прискорення візка та в деяких випадках може призвести до зміни напрямку руху візка протягом розгону/гальмування); 2) складній конструкції, що негативно позначається на надійності пристрою;</p>	<p>сполучена з датчиком довжини гнучкого підвісу, другим з лупльтом керування оператора крана, аналоговим входом з датчиком маси вантажу, крім того вихідний канал мікроконтролерної системи поєднаний з цифровим входом силового перетворювача, який живить електропривод механізму переміщення візка.</p>
<p>НУБІГ</p>	<p>аналоговому заданні швидкості візка, що не виключає впливу перешкод та, як наслідок, неякісному керуванні рухом візка.</p>	<p>3) переміщення візка.</p>
<p>НУБІГ</p>	<p>аналоговому заданні швидкості візка, що не виключає впливу перешкод та, як наслідок, неякісному керуванні рухом візка.</p>	<p>3) переміщення візка.</p>
<p>НУБІГ</p>	<p>аналоговому заданні швидкості візка, що не виключає впливу перешкод та, як наслідок, неякісному керуванні рухом візка.</p>	<p>3) переміщення візка.</p>
<p>НУБІГ</p>	<p>аналоговому заданні швидкості візка, що не виключає впливу перешкод та, як наслідок, неякісному керуванні рухом візка.</p>	<p>3) переміщення візка.</p>
<p>НУБІГ</p>	<p>аналоговому заданні швидкості візка, що не виключає впливу перешкод та, як наслідок, неякісному керуванні рухом візка.</p>	<p>3) переміщення візка.</p>
<p>НУБІГ</p>	<p>аналоговому заданні швидкості візка, що не виключає впливу перешкод та, як наслідок, неякісному керуванні рухом візка.</p>	<p>3) переміщення візка.</p>
<p>НУБІГ</p>	<p>аналоговому заданні швидкості візка, що не виключає впливу перешкод та, як наслідок, неякісному керуванні рухом візка.</p>	<p>3) переміщення візка.</p>
<p>НУБІГ</p>	<p>аналоговому заданні швидкості візка, що не виключає впливу перешкод та, як наслідок, неякісному керуванні рухом візка.</p>	<p>3) переміщення візка.</p>
<p>НУБІГ</p>	<p>аналоговому заданні швидкості візка, що не виключає впливу перешкод та, як наслідок, неякісному керуванні рухом візка.</p>	<p>3) переміщення візка.</p>
<p>НУБІГ</p>	<p>аналоговому заданні швидкості візка, що не виключає впливу перешкод та, як наслідок, неякісному керуванні рухом візка.</p>	<p>3) переміщення візка.</p>
<p>НУБІГ</p>	<p>аналоговому заданні швидкості візка, що не виключає впливу перешкод та, як наслідок, неякісному керуванні рухом візка.</p>	<p>3) переміщення візка.</p>

СПОСІБ
УСУНЕННЯ
КОЛИВАНЬ
ВАНТАЖУ,
ЗАКРИПЛЕНОГО
НА ГНУЧКОМУ
ПІДВІСІ, ПРИ
РОБОТІ

Недоліком
прототипу є те,
що він не може
бути
використаний у
тих випадках,
коли на кран
діють невизначені

Поставлена
винаходом
задача
вирішується тим,
що
крановий візок протягом [20]
гальмування рухається
під дією зусилля, яке є
функцією трьох змінних:
першої, другої та третьої

<p>КРАНОВОГО ВІЗКА НЕПЕРЕДБАЧУВА НИМИ ЗОВНІШНІМИ ВПЛИВАМИ</p>	<p>зовнішні впливи. 3 Прикладами таких впливів можуть бути: пориви вітру при виконанні перевантажуваль них робіт у портах; нерівності шляху по якому рухається візок, що впливає на виникнення коливачь вантажу тощо. Програмне керування рухом візка не враховує фактичне фазове положення вантажy відносно кранового візка і, як наслідок, коливання вантажy залишаються.</p>	<p>похідних за часом положення центру мас вантажy. В результаті чого усуваються коливання вантажy.</p>
<p>СПОСІБ ЗМЕНШЕННЯ КОЛИВАНЬ ВАНТАЖУ, ЗАКРІПЛЕНОГО</p>	<p>Недоліком прототипу є складність реалізації закону, за яким відбувається</p>	<p>Поставлена задача вирішується тим, що спосіб зменшення коливань вантажу, закріпленого на гнучкому підвісі, який включає</p>

НА ПІДВИСІ
ГНУЧКОМУ

оптимальне управління, адже вказаний закон є

поліномом високого порядку,

а головне, таке керування пов'язане з

використанням

складної

цифрової

автоматизованої

системи

керування рухом

крановими

механізмами,

обладнання якою

навіть обмеженої

кількості кранів,

що

експлуатуються, є

або неможливим,

або належить до

дуже віддаленої

перспективи. Це

обумовлено як

складністю та

великою вартістю

вказаної системи,

так і її низькою

надійністю.

керування рухом крана (візка) протягом гальмівного режиму руху.

Новим є те, що момент гальмування приводу

пересування крана (візка) змінюють поетапно (двигуном і механічним

гальмом) за певним

законом. Таким чином,

згідно з пропонованим

способом, кран (візок)

протягом гальмування

рухається під дією

гальмівного моменту

(двигуна і механічного

гальма), який змінюється

поетапно в залежності від

величини швидкості

крана.

НУБІП України

1.3.2. Кількісний аналіз патентів за класом

Для проведення аналізу було використано дані німецького патентного відомства за минулі 10 років та записані у табл. 1.2, відповідно до країн світу. По цим даним було виявлено, що найбільше, офіційно встановлено, патентів мають такі країни: Китай, Європейський патентний офіс та США. Також до цих країн приєднуються: Корея, Японія та Всесвітня організація по захисту інтелектуальної власності.

Відповідно до даним (додаток А) було побудовано графік залежності світових патентів до року їх опублікування (рис 1.4).



Рис 1.4. Графік залежності світових патентів до року їх опублікування

В залежності від цих даних встановлено, що тенденція розвитку вдосконалення вантажопідйомних механізмів з кожним роком росте. Це залежить від швидкого розвитку технологій, збільшенням потреб споживачів, підвищення ефективності праці.

Таблиця 1.2 - Кількість патентів за 10 років

№	Країна	Кількість патентів за 10 років
1	Китай	9217
2	США	3663
3	Корея	250
4	Європейський патентний офіс	393
5	Всесвітня організація по захисту інтелектуальної власності	170
6	Канада	47
7	Бразилія	43
8	Австралія	21
9	Німеччина	71
10	Тайвань	36
11	Японія	212
13	Україна	6
14	Франція	14
15	Мексика	11
16	Чилі	1
17	Австрія	12
18	Польща	2
19	Великобританія	27
20	Іспанія	9
21	Аргентина	2
22	Уругвай	0
23	Перу	0

24	Данія	19
25	Словаччина	2
26	Індія	1
27	Гонконг	2
28	ЮАР	2
29	Туреччина	2
30	Чехія	3

Продовження таблиці 1.2.

31	Сінгапур	16
32	Нова Зеландія	2
33	Норвегія	21
34	Колумбія	1
35	Швейцарія	0
36	Сербія	0
37	Філіппіни	0
38	Фінляндія	14
39	Ірландія	0
40	Марокко	1
41	Угорщина	0

1.3.3. Аналіз по ключовим виразам за допомогою сервісу google академії

Після проведення аналізу по ключовим словам «closed-loop crane control and load oscillations» (рис.1.5) встановлено, що дана тема є досить популярною у наукових дослідженнях з області вантажопідіймних механізмів та їхнім керуванням

Основними темами у статтях, які містять ці ключові слова, включають:

- Аналіз структури та властивостей кранових систем із замкненим контуром керування;

• Дослідження впливу різних параметрів керування на коливання вантажу та розробка методів для їх підтримки у межах прийнятних рішень.

• Розробка та застосування алгоритмів керування для зменшення коливань вантажу під час руху крана;

• Використання математичних моделей для аналізу динаміки кранових систем та розробки ефективних методів керування.



Рисунок 1.5. Графік кількісного аналізу по ключовому виразу «closed-loop crane control and load oscillations»

Провівши аналіз статей по ключовим словам «linear crane movement controller», (рис 1.6) було знайдено багато статей та доповідей, це свідчить за те, що дана тема є досить популярною.

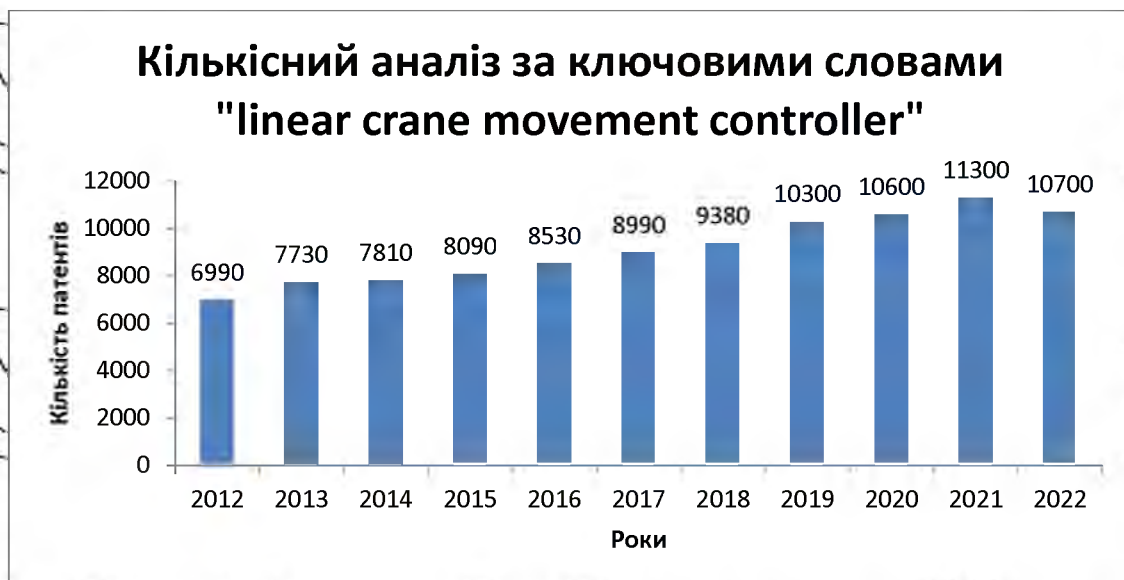


Рисунок 1.6. Графік кількісного аналізу по ключовому виразу «linear crane movement controller»

Основна тематика доповідей пов'язана із створенням та оптимізацією алгоритмів керування рухом лінійного крана, що дає змогу зменшити кількість аварій, підвищити продуктивність та забезпечити безпеку роботи персоналу. Також досліджувалися питання щодо визначення оптимальної траєкторії руху крана, зменшення вібрації при переміщенні вантажів, забезпечення точності позиціонування, тощо.

II Розділ Математичне моделювання динамічного руху вантажопідйомного крана

НУБІП України

2.1 Опис лабораторної установки для дослідження

У процесі роботи вантажопідйомного крана при різких динамічних навантаженнях виникають коливання підвішеного вантажу на гнучкому підвісі. Такий процес виникає переважно у моменті пуску та зупинки.

Для характеристики таких коливань використано лабораторну установку, яка включає електроталь, яка рухається по металевій балці двотаврового перерізу, довжина якої складає 5,57 м. Привод візка включає двигун змінного струму потужністю у 80 Вт. Радіус колеса візка – 0,042 м, номінальна швидкість руху візка рівна 0,33 м/с. Дана установка представлена на рис. 2.1.



Рисунок 2.1. Лабораторна установка для проведення експериментальних досліджень

Керування приводом візка відбувалося за допомогою частотного перетворювача Mitsubishi Electric FR-E740-060 (рис. 2.2) по аналоговому каналу

2-го входу перетворювача. Технічні характеристики якого представлені у табл..



Рисунок 2.2. Частотний перетворювач Mitsubishi Electric FR-E740-060

Таблиця 2.1. Технічні характеристики частотного перетворювача Mitsubishi Electric FR-E740-060

Параметр	Значення
Діапазон напруг живлення, В	380-480
Частота напруги живлення, Гц	50/60
Діапазон вихідних частот, Гц	0,2-400
Вихідна потужність, кВА	4,6
Номинальна потужність двигуна, кВт	2,2
Номинальний вихідний струм перетворювача, А	6
Характеристика розгону/гальмування	S-подібна, лінійна

Даний частотний перетворювач живиться від електромережі у 380В. У свою чергу, привід візка підключений до частотного перетворювача. Привод живиться

від електромережі у 380 В та керується з пульта керування, який розміщено у шафі частотного перетворювача (рис.2.2, зверху).

Маса вантажу регулюється додаванням на так тарованих вантажів.

Керування частотним перетворювачем, зчитування даних з енкодерів та передача їх на персональний комп'ютер здійснювалася за допомогою програмованого контролера Arduino Uno R3 [1] (рис.2.3).



Рисунок 2.3. Зовнішній вигляд програмованого контролера Arduino Uno R3

Даний контролер має 14 цифрових входів/виходів, 6 аналогових входів, кварцевий генератор на 16 МГц. Основні характеристики якого представлені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Технічні характеристики контролера Arduino Uno R3

Параметр	Значення
Мікроконтролер	ATmega328
Робоча напруга, В	5
Вхідна напруга, В	7-12
Постійний струм через на входах/виходах, мА	40
Постійний струм виходу при 3,3 В, мА	50
Об'єм флеш-пам'яті, КБ	32
Тактова частота, МГц	16

Оскільки контролер Arduino Uno не має вбудованого цифро-аналогового перетворювача для керування частотним перетворювачем, то було вирішено, що для керування буде використано зовнішній модуль ЦАП Microchip MCP4725 [8] (рис. 2.4), основні технічні характеристики якого представлено в табл. 2.3.



Рисунок 2.4. Зовнішній модуль ЦАП Microchip MCP4725

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики модуля ЦАП Microchip MCP4725

Параметр	Значення
Вхідний напруга, В	2,7-5
Вихідний напруга, В	5,5
Вхідний струм, мкА	0,06-400
Диференціальна нелінійність, LSB	0,2
Розрядність	12
Інтерфейс	I2C

Для програмування контролера задіяне програмне забезпечення Arduino IDE v1.8.15 (рис. 2.5). При програмуванні було встановлено швидкість роботи портів для обміну даних контролера та енкодерами у 9600 бод та крок дискретизації часу при зчитуванні даних з енкодерів 40 мілісекунд.



Рисунок 2.5. Інтерфейс програмного забезпечення *Arduino IDE v1.8.15*

Розроблений код, який використано для проведення експериментальних досліджень, наведено у дод. Б.

Для вимірювання відстані переміщення візка використано оптичний інкрементальний енкодер із мірним колесом та комплементарним виходом Autonic's ENC-1-1-t-24 [9] (рис. 2.6).



Рисунок 2.6. Енкодер з мірним колесом Autonic's ENC-1-1-t-24, закріплений на корпусі візка (колесо датчика прижато до полиці двотаврової балки)

Енкодер закріплено на корпусі візка, а мірні колеса прижималися за допомогою пружини до підкранового шляху. Основні технічні характеристики енкодера наведені у табл. 2.4.

Таблиця 2.4. Технічні характеристики енкодера Autonics ENC-1-1-T-24

Параметр	Значення
Напруга живлення, В	24
Споживана сила струму, А	0,06
Максимальна кількість обертів, об/хв	5000
Рівень захисту	IP50
Вихідні фази	A, B
Кількість вихідних імпульсів при переміщенні на 1 мм	1

Для вимірювання коливань вантажу був використаний оптичний інкрементальний енкодер Autonics E40S6-5000-3-T-24 [2] (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 Інкрементальний енкадер Autonic E40S6-5000-3-T-24 для вимірювань коливань вантажу (вал енкадера з'єднаний із гілками підвісного каната)

Енкадер закріплюється на електроталі, а для передачі коливань вантажу використовується штанга, яка однією стороною через муфту приєднана до валу енкадера, а іншою стороною кріпиться до вантажного канату. Основні характеристики енкадера Autonic E40S6-5000-3-T-24 наведені у табл. 2.5.

Таблиця 2.5. Технічні характеристики енкадера Autonic E40S6-5000-3-T-24

Параметр	Значення
Напруга живлення, В	24
Споживана сила струму, А	0,02
Точність датчика, імпл/об	5000
Рівень захисту	IP50

Для живлення енкадерів використано блок живлення постійного струму SPD-12051 [11] (рис. 2.8)



Рисунок 2.8 Блок живлення SPD-12051

НУБІП України

Технічні характеристики блока живлення наведені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6. Технічні характеристики блока живлення SPD-12051

Параметр	Значення
Напруга живлення, В	100-240
Споживана сила струму, А	0,2
Напруга на виході, В	12
Вихідна потужність, Вт	5
Рівень захисту	IP20

Передача даних із мікроконтролера на персональний комп'ютер здійснювалась за допомогою зовнішнього SPP-C Bluetooth модуля з адаптером SPPC HC-05 HC-06 Arduino (рис. 2.9). Його основні технічні характеристики наведені в табл. 2.7.

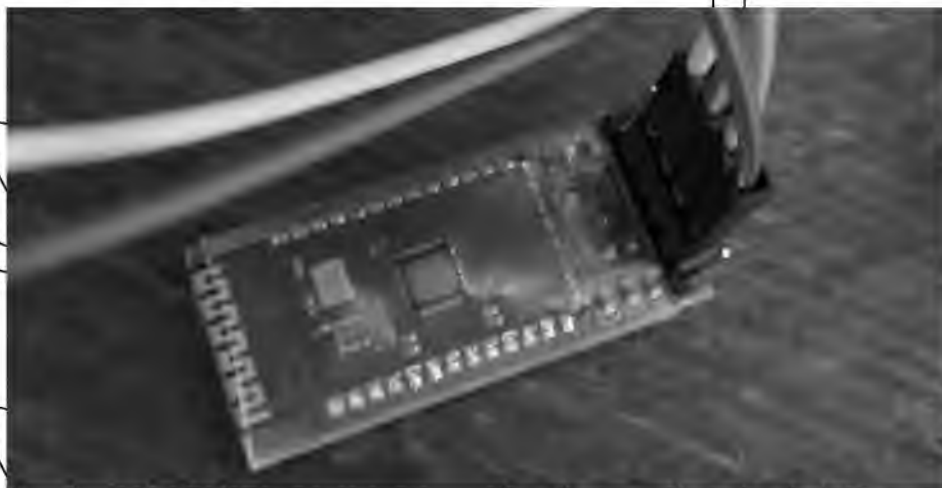


Рисунок 2.9 Зовнішній SPP-C Bluetooth модуль з адаптером SPPC HC-05 HC-06 Arduino

Таблиця 2.7. Технічні характеристики SPP-C Bluetooth модуля з адаптером SPPC HC-05 HC-06 Arduino

Параметр	Значення
----------	----------

Контролер	BEKEN BK3231
Зв'язок з Arduino	RS232
Рівень потужності	Bluetooth Class2 (+4 dBm)
Робоча частота, Гц	2,4
Можливі швидкості передачі даних, бод	1200 - 115200
Напруга живлення, В	3,6-6
Струм живлення, мА	30-40
Апаратна підтримка	Bluetooth 2.0+EDR

Програмна реалізація запису даних на персональний комп'ютер виконана із використанням програмного забезпечення Tera Term (рис. 2.10)

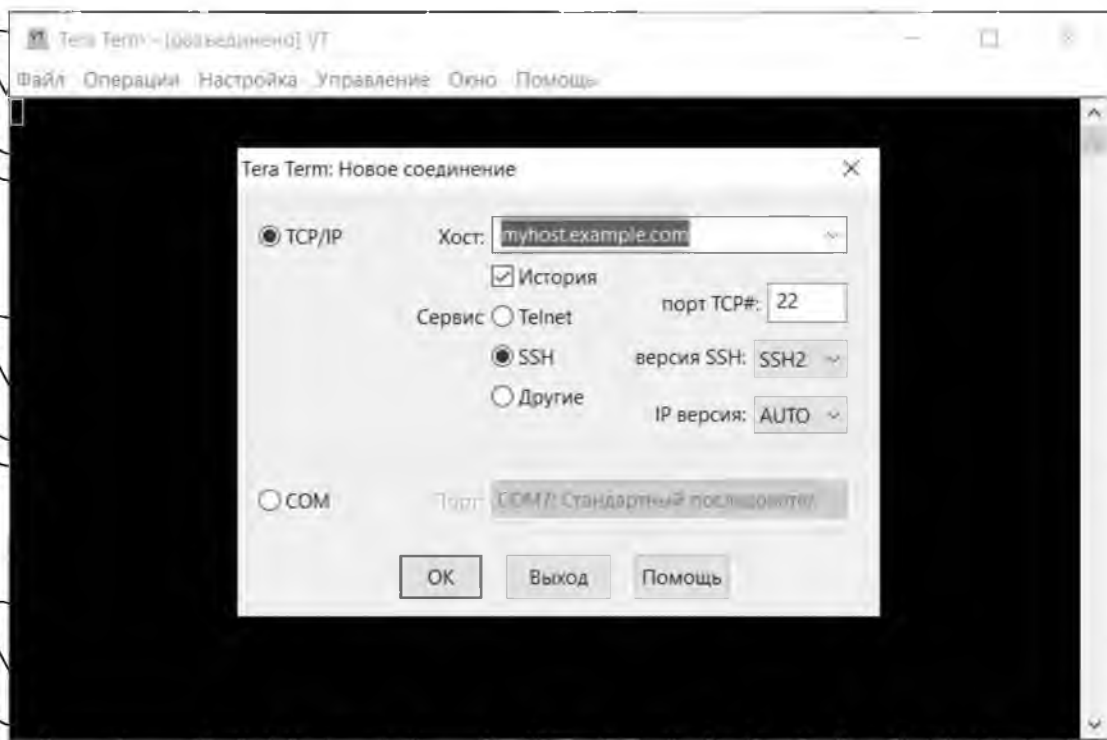


Рисунок 2.10 – Інтерфейс програми Tera Term

2.2. Математичне моделювання руху вантажу

Для ідентифікації моделі динамічної системи було використано регресійний аналіз [17]. Для цього з експериментальних даних було сформовано два масиви даних наступного формату

$$\begin{cases} (A_1 \dot{\alpha}_i + A_2 \alpha_i + A_3 \dot{x}_i + A_4 f_i = \dot{\alpha}_{i+1} \\ B_1 x_i + B_2 \dot{x}_i + B_3 f_i = \dot{x}_{i+1} \end{cases} \quad (2.1)$$

де i – порядковий номер i -того вікна даних, $i \in (1, I_{train})$ (довжина даних для розрахунку коефіцієнтів регресійної залежності $I_{train}=186$); \dot{x} – швидкість (м/с) візка; α та $\dot{\alpha}$ – кут (град) відхилення канату з вантажем від вертикалі та швидкість зміни цього кута (град/с); f – частота напруги живлення приводу візка, Гц; A_1, \dots, A_4 та B_1, \dots, B_3 – коефіцієнти регресійних залежностей, які визначаються за методом найменших квадратів по всім даним I_{train} .

У результаті проведення розрахунків отримано наступні дані: $A_1=0,981$, $A_2=0,467$, $A_3=-14,790$, $A_4=0,102$, $B_1=0,00021$, $B_2=0,342$, $B_3=0,00448$. Для отриманих даних коефіцієнт детермінації складає не менше 0,95, що вказує на достатньо якісну оцінку коефіцієнтів для всіх проведених експериментів (табл. 2.8)

Отримавши регресійні вирази (2.1) можна виконати розрахунок лінійного положення візка та кутового положення відхилення канату від вертикалі. Для цього використані наступні вирази:

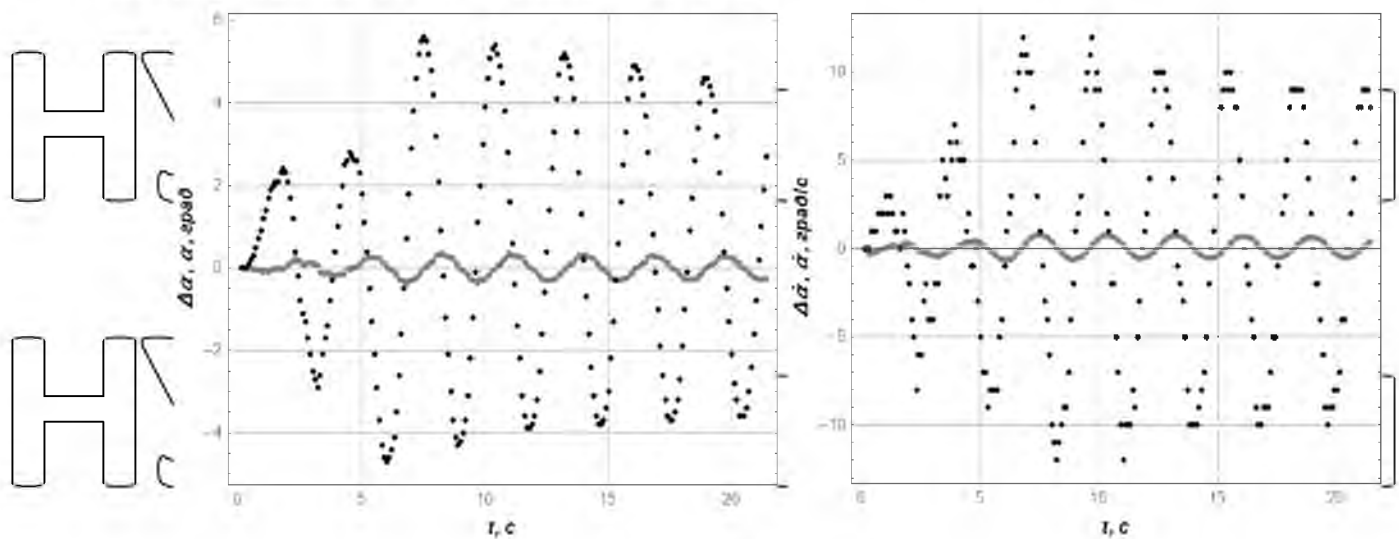
$$(2.2) \quad \begin{cases} \alpha_{i+1} = \alpha_i + \dot{\alpha}_i \Delta t; \\ x_{i+1} = x_i + \dot{x}_i \Delta t, \end{cases}$$

де Δt – часовий інтервал між окремими вимірюваннями ($\Delta t=0,1$ с).

Таким чином, вирази (2.1) та (2.2) дають змогу прогнозувати динаміку руху візка із вантажем на гнучкому підвісі без залучення у розгляд диференціальних рівнянь. Це є перевагою такого підходу. Однак, для того, щоб довести його адекватність необхідно виконати валідацію виразів (2.1) та (2.2) на іншій (тестовій) вибірці даних. Така вибірка була отримана при зміні напрямку руху візка.

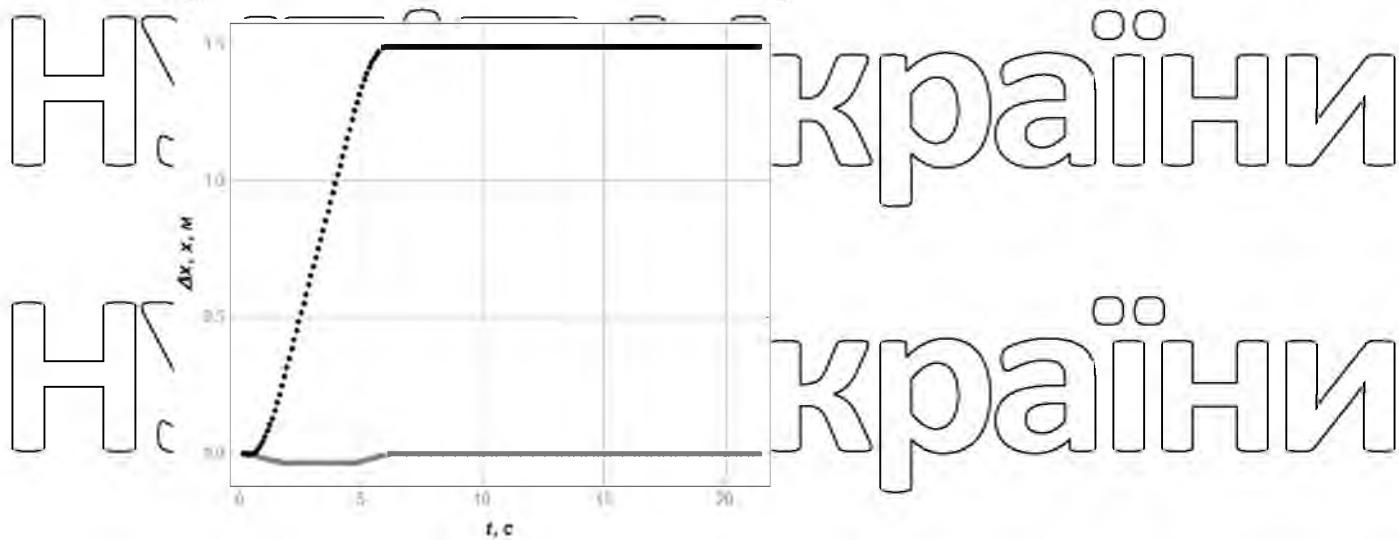
Щоб підтвердити високу якість ідентифікації динамічної системи використаємо графічні залежності (рис. 2.11) та числові оцінки збіжності

прогнозованих за допомогою виразів (2.1) та (2.2) даних і даних, які включені у тестову вибірку. Чорні точки представляють дані тестування, а сірі відображають абсолютну похибку прогнозу (відхилення передбачуваного значення від тестового позначається як Δ).



а)

б)



в)

г)

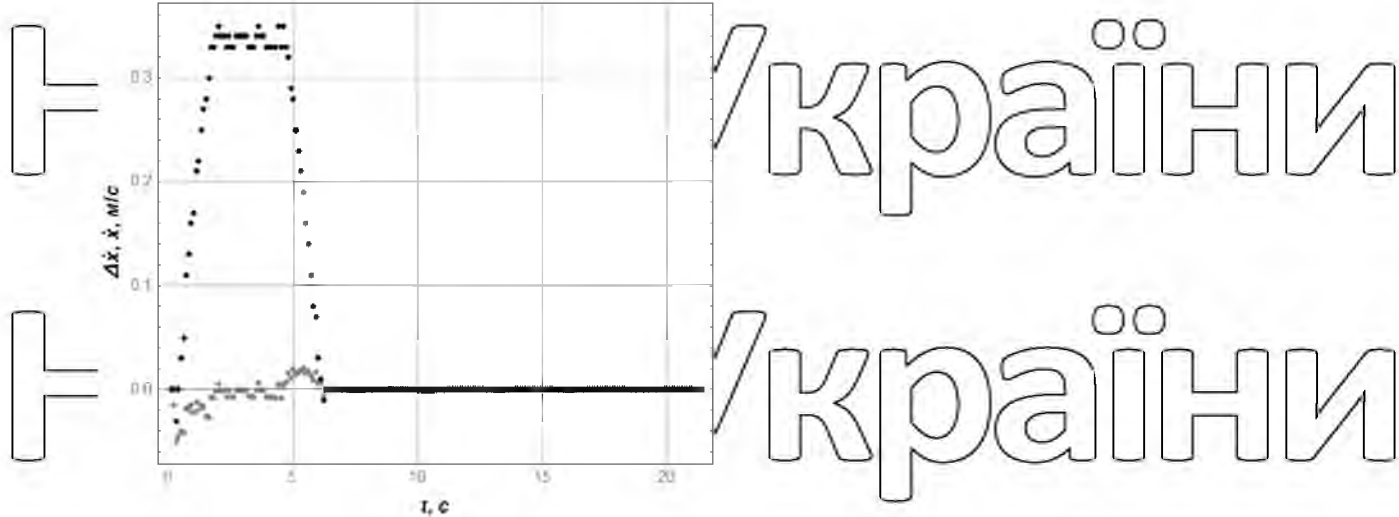


Рисунок 2.11 – Графіки тестових даних та похибки прогнозу, яке виконує навчена штучна нейронна мережа: а) α ; б) $\dot{\alpha}$; в) x ; г) \dot{x}

Числовими значеннями, які допомагають оцінити якість прогнозу, є відповідні коефіцієнти варіації. Вони обчислюються за формулами:

$$(2.3) \quad E_{\alpha} = \sqrt{I_{test}^{-1} \sum_i^{I_{test}} (\alpha_i^{test} - \alpha_i^{pred})^2 I_{test} \left(\sum_i^{I_{test}} \alpha_i^{test} \right)^{-1}} 100;$$

$$(2.4) \quad E_{\dot{\alpha}} = \sqrt{I_{test}^{-1} \sum_i^{I_{test}} (\dot{\alpha}_i^{test} - \dot{\alpha}_i^{pred})^2 I_{test} \left(\sum_i^{I_{test}} \dot{\alpha}_i^{test} \right)^{-1}} 100;$$

$$(2.5) \quad E_x = \sqrt{I_{test}^{-1} \sum_i^{I_{test}} (x_{1,i}^{test} - x_{1,i}^{pred})^2 I_{test} \left(\sum_i^{I_{test}} x_{1,i}^{test} \right)^{-1}} 100;$$

$$(2.6) \quad E_{\dot{x}} = \sqrt{I_{test}^{-1} \sum_i^{I_{test}} (\dot{x}_{1,i}^{test} - \dot{x}_{1,i}^{pred})^2 I_{test} \left(\sum_i^{I_{test}} \dot{x}_{1,i}^{test} \right)^{-1}} 100.$$

Верхній індекс *pred* означає, що ці дані отримані за допомогою штучної нейронної мережі. Розрахунки дають наступні величини: $E_{\alpha} = 7,05\%$, $E_{\dot{\alpha}} = 8,81\%$, $E_x = 3,65\%$, $E_{\dot{x}} = 6,66\%$.

Величини показників (2.3)-(2.6), а також графічні залежності (рис. 2.11) показують, що регресійні залежності (2.1) та (2.2), що отримані у даному розділі, можуть у подальшому використовуватись як математична модель руху динамічної системи «кран-вантаж» з приводом від частотно-керованого двигуна.

III. Синтез оптимального керування рухом моделі крана

Для того, щоб усунути коливання вантажу на гнучкому підвісі при русі крана необхідно задати форму регулятора, який формує сигнал за яким, у свою чергу, буде змінюватись частота і напруга живлення двигуна візка. Така форма регулятора повинна включати всі фазові координати руху системи. Тому її представимо у наступному вигляді:

$$(3.1) \quad f_{i+1} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } K_1\alpha_i + K_2\dot{\alpha}_i + K_3(x_T - x_i) + K_4\dot{x}_i \leq 0; \\ K_1\alpha_i + K_2\dot{\alpha}_i + K_3(x_T - x_i) + K_4\dot{x}_i, & \text{якщо } 0 \leq K_1\alpha_i + K_2\dot{\alpha}_i + K_3(x_T - x_i) + K_4\dot{x}_i \leq 50; \\ 50, & \text{якщо } K_1\alpha_i + K_2\dot{\alpha}_i + K_3(x_T - x_i) + K_4\dot{x}_i \geq 50 \end{cases}$$

де K_1, K_2, K_3, K_4 – невідомі коефіцієнти, які необхідно визначити; x_T – відстань, на яку переміщується візок у кінці руху. Пошук коефіцієнтів регулятора виконано за умови, що вони забезпечують мінімум наступного критерію:

$$(3.2) \quad Cr = S_f + 10^8 \cdot \left(\frac{\frac{\alpha_T}{\Delta t}}{\max(\alpha_i)} + \frac{\frac{\dot{\alpha}_T}{\Delta t}}{\max(\dot{\alpha}_i)} + \frac{\frac{x_T - x_T}{\Delta t}}{\max(x_T - x_T)} + \frac{\frac{\dot{x}_T}{\Delta t}}{\max(\dot{x}_i)} \right), \text{ якщо } \frac{\alpha_T}{\Delta t} \geq 0,01 \text{ АБО}$$

$$\frac{\frac{\dot{\alpha}_T}{\Delta t}}{\max(\dot{\alpha}_i)} \geq 0,01 \text{ АБО } \frac{\frac{x_T - x_T}{\Delta t}}{\max(x_T - x_T)} \geq 0,01 \text{ АБО } \frac{\frac{\dot{x}_T}{\Delta t}}{\max(\dot{x}_i)} \geq 0,01;$$

$$0, \text{ якщо } \frac{\alpha_T}{\Delta t} < 0,01 \text{ І } \frac{\dot{\alpha}_T}{\Delta t} < 0,01 \text{ І } \frac{x_T - x_T}{\Delta t} > 0,01 \text{ І } \frac{\dot{x}_T}{\Delta t} > 0,01$$

де T – тривалість регулювання; S_f – кількість перевищень вихідною частотою перетворювача частоти швидкості зміни частоти 2 Гц/с (цей показник введений для того, щоб забезпечити плавність наростання та спадання частоти).
Всі доданки у виразі (3.2) є безрозмірними величинами, а сама величина (3.2)

залежить виключно від коефіцієнтів K_1, K_2, K_3, K_4 , які формують стратегію керування рухом динамічної системи, та від тривалості регулювання T .

Перший доданок у (3.2) визначає „вартість” перевищення швидкості наростання чи спадання частоти напруги живлення. Дійсно, бажано, щоб вона змінювалась таким чином, щоб виключити швидкі зміни, що можуть викликати перенапруги у силових колах частотного перетворювача, пікові струми у двигуні. Ці фактори мають негативний вплив на довговічність електричного обладнання і тому їх необхідно уникати.

Другий доданок критерію (3.2) забезпечує досягнення динамічною системою кінцевого (бажаного) положення у сенсі рівності нулю всіх (крім положення візка) фазових координат. Для положення візка необхідно, щоб воно було рівним кінцевому (наперед заданому) положенню x_7 .

Для пошуку таких значень коефіцієнтів K_1, K_2, K_3, K_4 , які б забезпечили мінімум величині C_r задамо області допустимих значень для кожного з коефіцієнтів K_1, K_2, K_3, K_4 від -200 до 200, а для тривалості регулювання T область допустимих значень складає від 3 с до 10 с – для першого випадку і від 3 с до 7 с – для другого.

Пошук величин K_1, K_2, K_3, K_4 та T проведений на основі моделювання руху візка із вантажем, який проведено із використанням регресійних моделей (2.1) та (2.2). Для пошуку мінімуму критерію C_r використано модифікований метод рою часточок [27]. У результаті отримано: $K_1=-35,5863, K_2=-4,8747, K_3=123,6963, K_4=108,5396, T=9,86$ – для першого випадку; $K_1=23,4245, K_2=1,8643, K_3=192,9940, K_4=-151,7931, T=7$ – для другого випадку. Графіки збіжності критеріїв (рис. 3.1) показують те, що забезпечується досягнення кінцевих умов (термінальна частина критерія C_r рівна нулю).

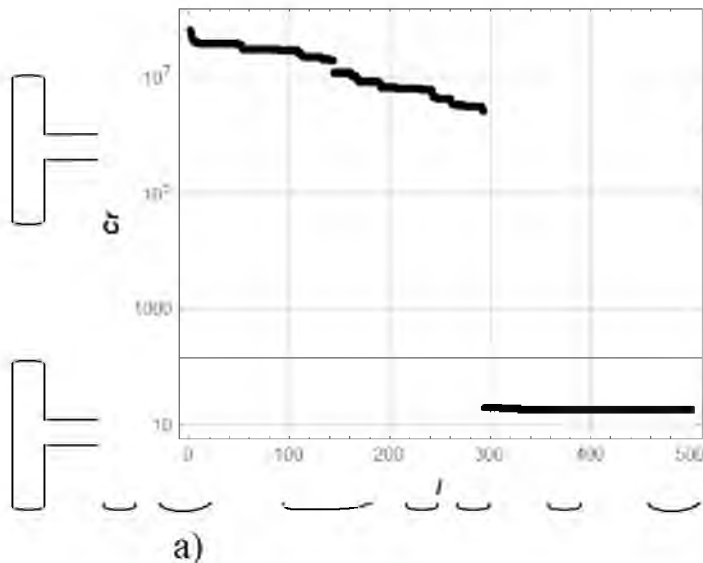
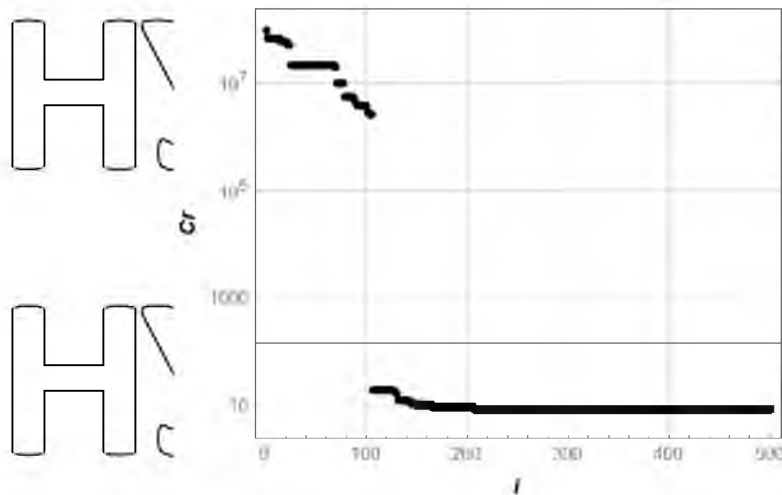
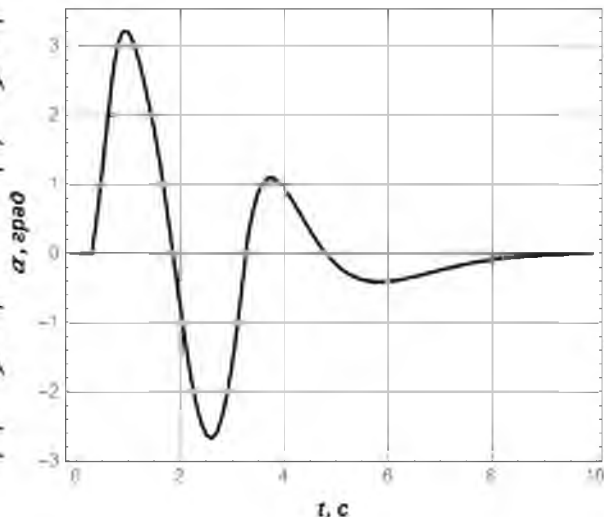
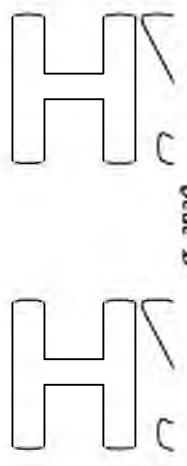


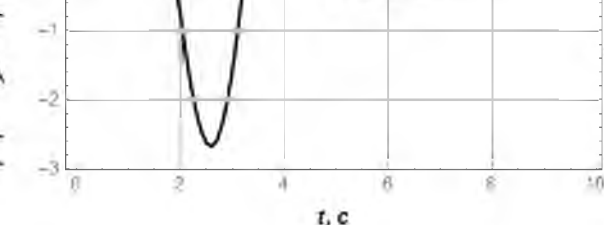
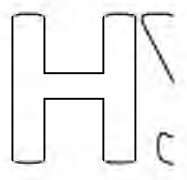
Рисунок 3.1. Графіки збіжності критеріїв до мінімуму при використанні модифікованого методу роу часточок: а) для першого випадку; б) для другого випадку

3.2. Аналіз отриманих розв'язків

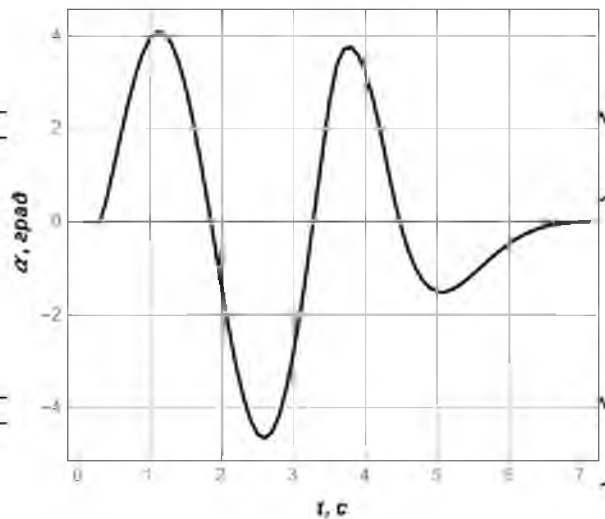
У результаті проведених розрахунків отримано наступні графічні залежності, які ілюструють рух системи при керуванні від регулятора (3.1) з вказаними вище коефіцієнтами (рис. 3.2.). На рис. 3.2 графіки, що розміщені зліва відповідають першому випадку, а ті що справа – другому.



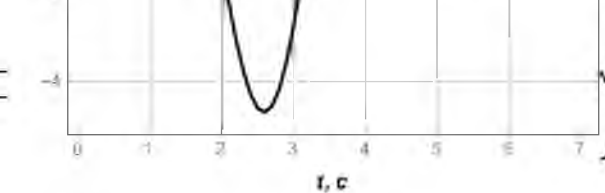
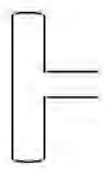
кращі країни



кращі країни

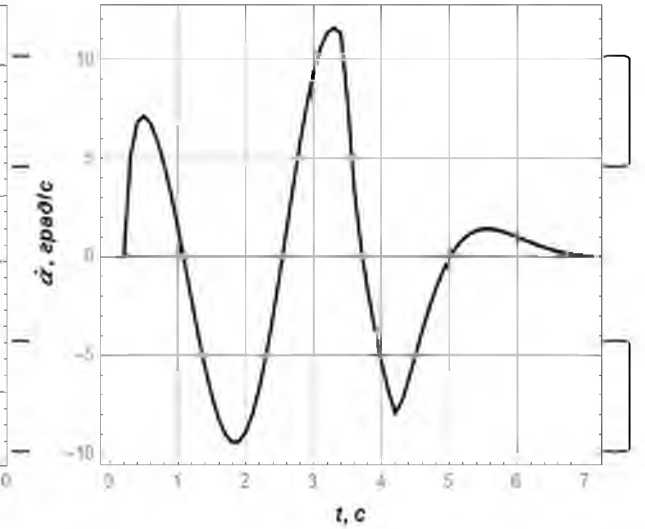
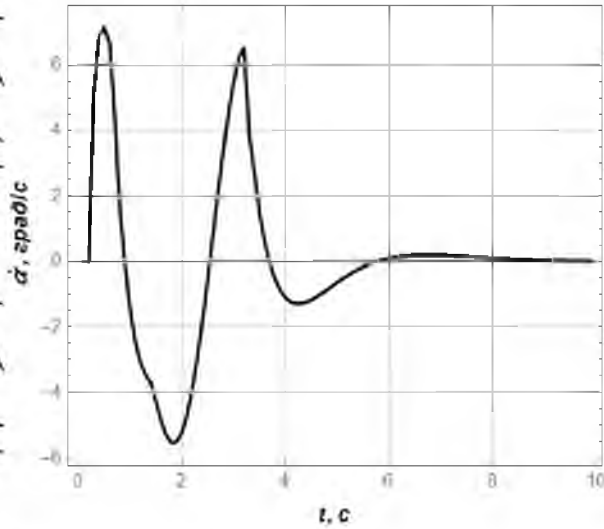


у країни

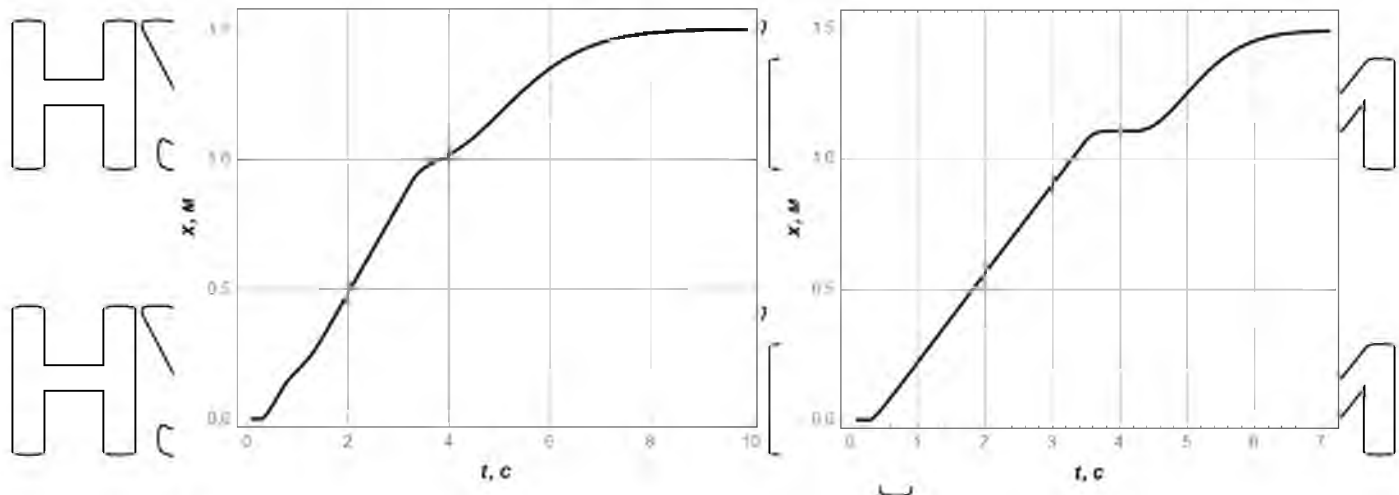


у країни

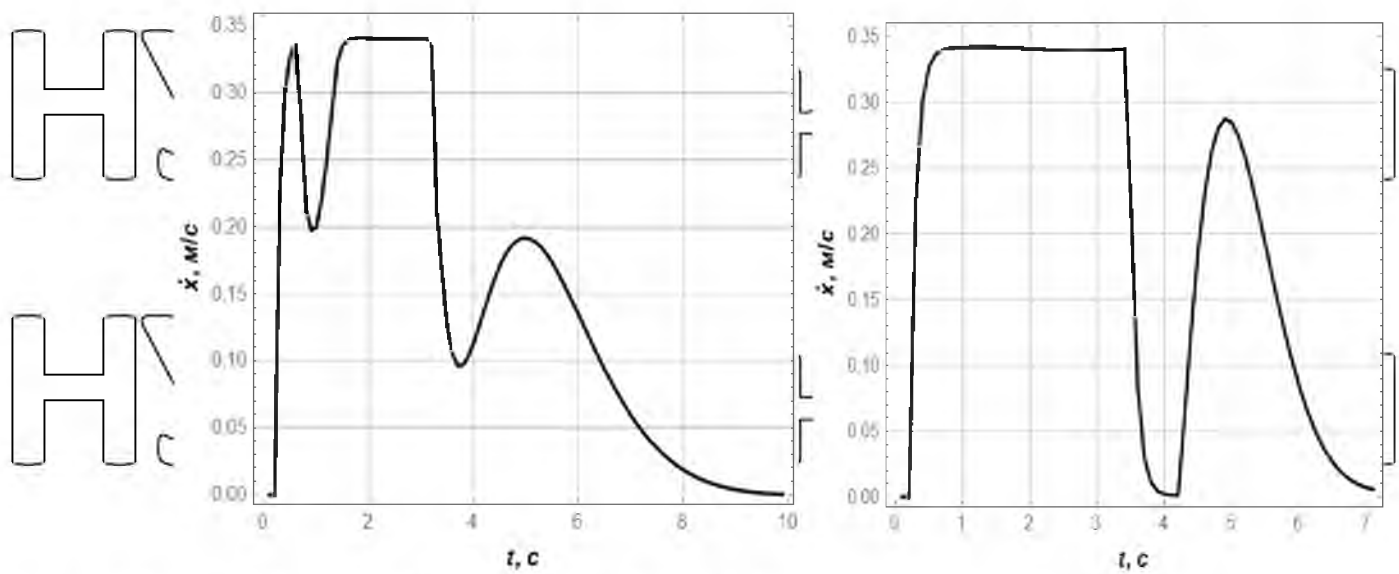
a)



НУБІП України



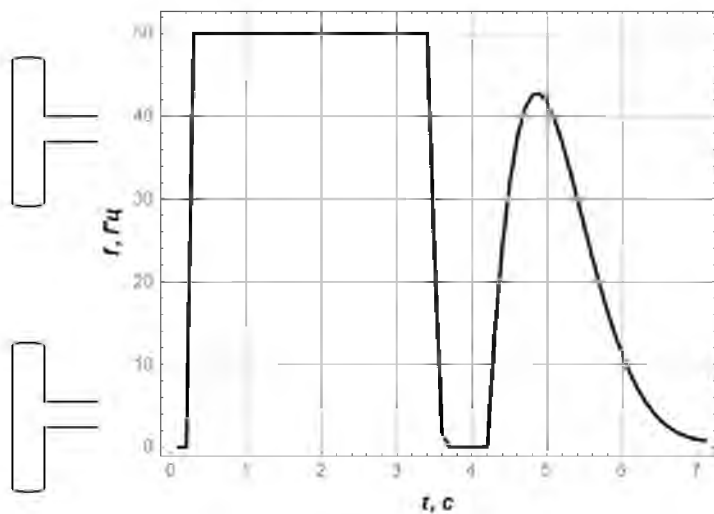
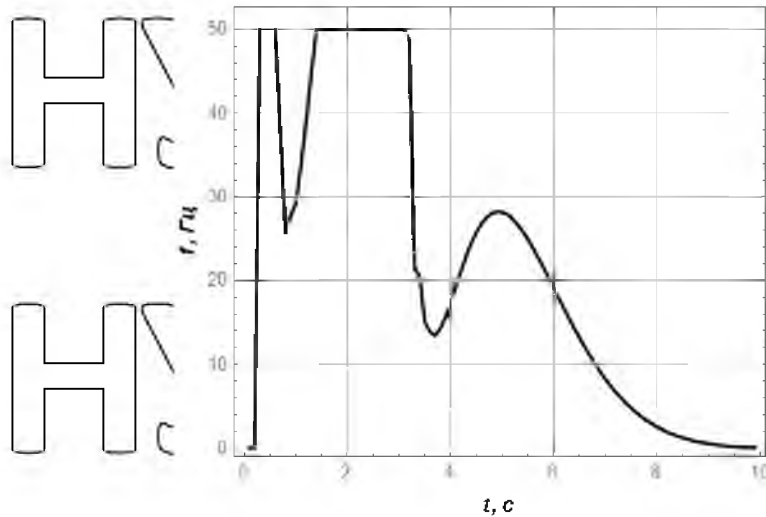
B)



НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України



д)

Рисунок 3.2 – Графіки фазових координат руху системи та частоти напруги живлення приводу візка: а) ω ; б) $\dot{\alpha}$; в) x ; г) \dot{x} ; д) f

Аналіз графічних залежностей (рис. 3.2) для всіх випадків показує усунення маятникових коливань вантажу у кінці руху візка. Крім того, плавність руху також висока. Різниця між першим і другим випадком проявляється у тому, що для другого керування рухом систем проходить у більш інтенсивному режимі. Відповідно максимальні значення фазових координат також більші, і більше значення критерію (3.2), про що свідчить рис. 3.1, б. Для оцінки такого збільшення наведемо певні чисельні дані (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Максимальні значення деяких фазових координат для першого та другого випадків

Величина	Випадок	
----------	---------	--

	перший	другий	Відносне збільшення показника
Максимальний кут відхилення каната з вантажем від вертикалі	3,2 град	4,4 град	37,5 %
Максимальна швидкість кута відхилення каната з вантажем від вертикалі	7,3 град/с	11,8 град/с	61,6 %
Кількість перевищень швидкості напруження живлення 2 Гц/с	9	19	111,1 %
Тривалість руху системи	9,86 с	7,00 с	-29,0%

Аналіз даних, які наведено у табл. 3.1 дозволяє стверджувати, що неможливо досягнути покращення всіх (принаймні тих, що наведені у табл. 3.1) показників одночасно: за збільшення одних показників необхідно „розплачуватись” зменшенням інших. Таким чином, можна сподіватись, що отриманий результат є оптимальним за Парето [14].

IV. Експериментальні дослідження

4.1. Синтез оптимально руху крана

Дані для побудови та оцінки якості регресійних залежностей отримані за допомогою експериментальних досліджень, використані у якості математичної моделі руху крана із вантажем на гнучкому підвісі за умови що рух крана відбувається частотно-керованим двигуном.

Відповідно до цього проведено декілька експериментів при різних значеннях довжини підвісу та маси вантажу залежно до отриманих коефіцієнтів K_i першого та другого випадку (табл.4.1.)

Таблиця 4.1. План проведення експериментів

Незалежні фактори	Значення рівнів незалежних факторів							
Ряд коефіцієнтів	1 випадок ($K_1=-35,5863$, $K_2=-4,8747$, $K_3=123,6963$, $K_4=108,5396$, $T=9,86$)				2 випадок ($K_1=23,4245$, $K_2=1,8643$, $K_3=192,9940$, $K_4=-151,7931$, $T=7$)			
№ експерименту	1	2	3	4	5	6	7	8
Довжина підвісу вантажу, м	2	1,3	2	1,3	2	1,3	2	1,3
Маса вантажу, кг	13	13	27	27	13	27	13	27

Для проведення експерименту встановлено відстань переміщення візка довжиною у 1,5 м.

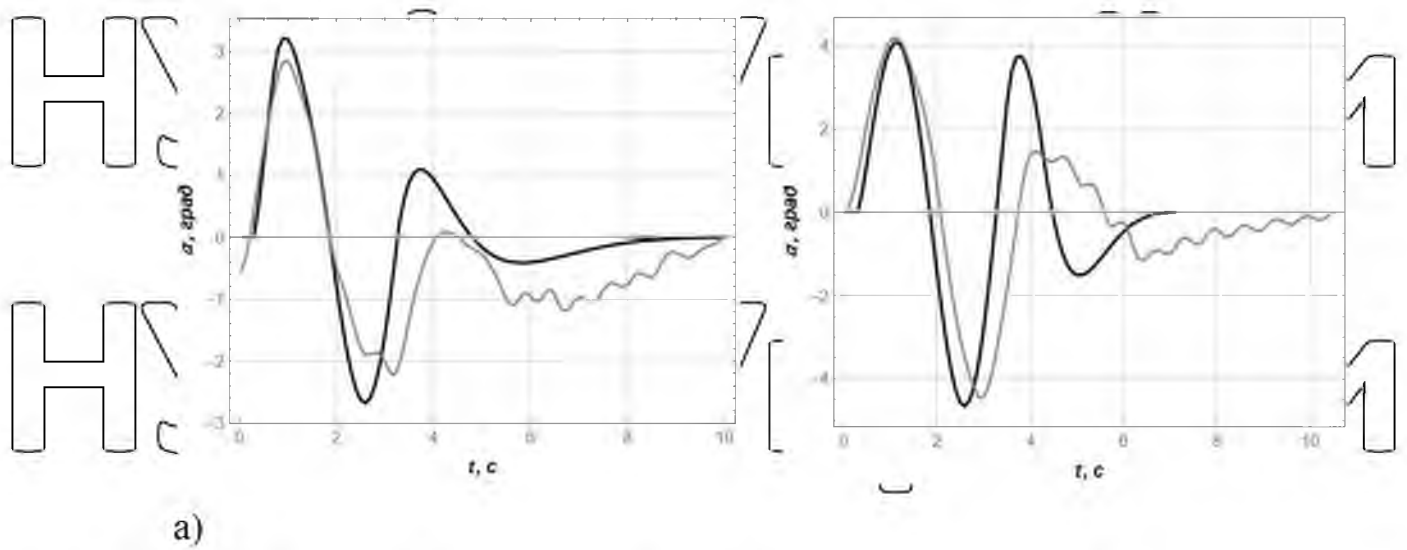
Тривалість наростання та спадання частоти напруги живлення складало 1 секунду. При цьому візок встигав розігнатись до номінальної швидкості. Тривалість руху на усталеній швидкості рівна 3 секунди.

Всі дані пройшли попередню фільтрацію за допомогою цифрового фільтра біжучого середнього [12].

НУБІП України

3.2. Результати досліджень

У результаті проведених розрахунків отримано наступні графічні залежності (дод. В), які ілюструють рух системи при керуванні від регулятора з вказаними коефіцієнтами (рис. 3,1). На рис. 3,1 графіки, що розміщені зліва відповідають першому випадку, а ті що справа – другому. Сірим та чорним кольором зображено відповідно експериментальні та розрахункові дані.

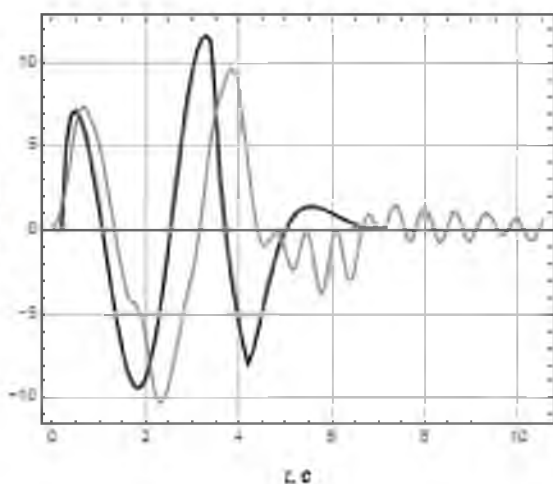


НУБІП України

НУБІП України

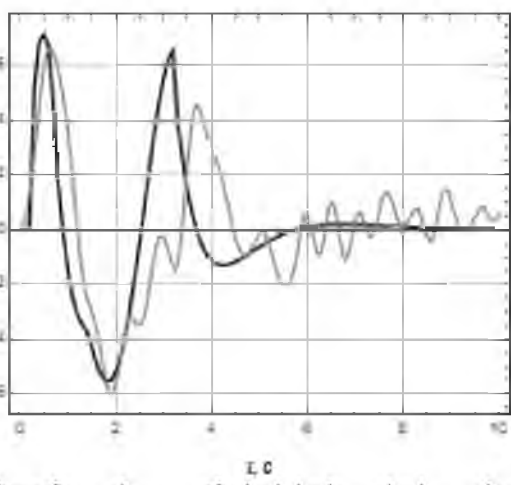
НУБІП України

Н
Н



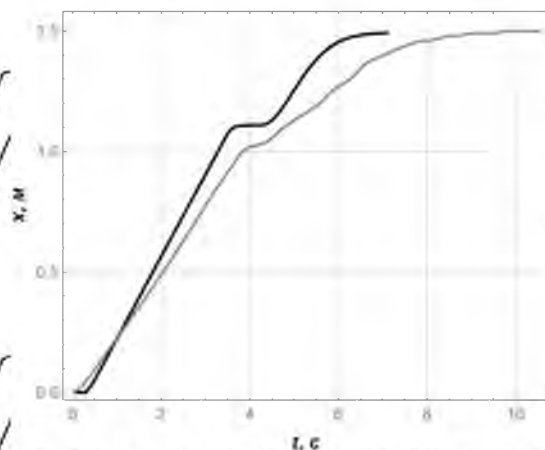
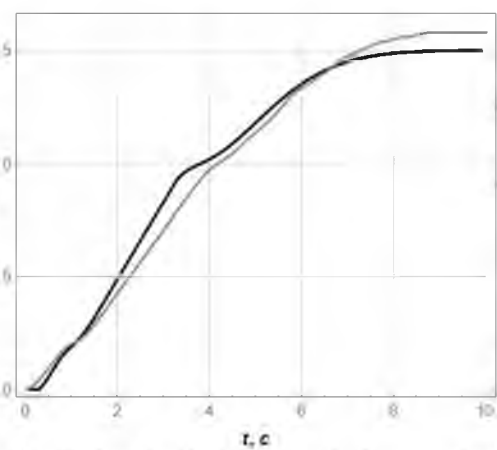
країни
країни

Г
Г



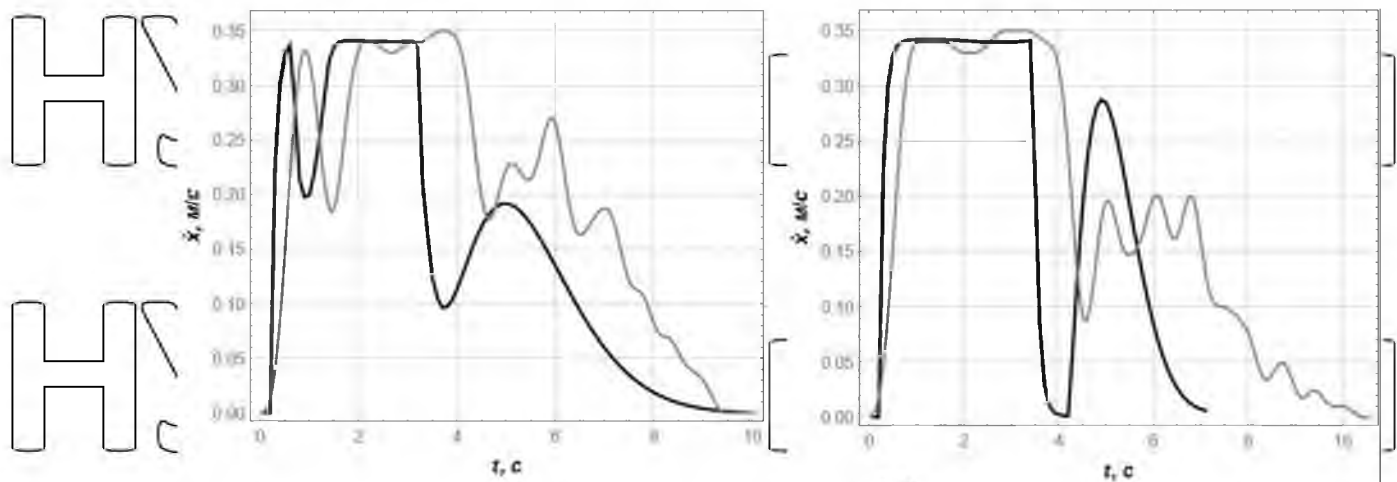
України
України

Н
Н



и
и

НУБІП України



г)

Рисунок 3.1 – Графіки теоретичних фазових координат руху системи та частоти напруги живлення приводу візка: а) а; б) б; в) в; г) г; д) д

Для оцінки такого збільшення наведемо певні чисельні дані (табл. 4.1)

Таблиця 4.1 – Максимальні значення деяких фазових координат для першого та другого випадків

Відповідно до цих графіків розроблено таблицю

Величина	Випадок		Відносне збільшення показника
	перший	другий	
Максимальний кут відхилення каната з вантажем від вертикалі	2,8 град	4,1 град	37,5 %
Максимальна швидкість кута відхилення каната з вантажем від вертикалі	9,8 град/с	6,5 град/с	61,6 %
Кількість перевищень швидкості наростання частоти напруги живлення 2 Гц/с	9	19	111,1 %
Тривалість руху системи, с	9,86 с	10,00 с	29,0 %

У практичному плані використання обох наборів коефіцієнтів можливо для різних цілей використання кранів. Наприклад, для випадку, коли бажано

Отримати максимальну швидкість більш придатним буде другий варіант. Для випадку мінімізації амплітуди відхилення канату з вантажем від вертикалі, а відповідно і рівня динамічних зусиль, які ним викликані, доцільно використовувати перший варіант.

Обидва варіанти дозволяють усунути коливання вантажу навіть у випадку коли на візок і вантаж здійснюють впливи вітрових поривів. Така форма керування заслуговує на увагу у вказаних умовах оскільки навіть непередбачуване у моделі відхилення канату з вантажем від вертикалі буде зафіксовано датчиком і у подальшому враховано при розрахунку величини частоти напруги живлення двигуна механізму переміщення крана. У цьому перевага такого керування над програмними способами керування приводом кранів.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

V Розділ. Охорона праці

Охорона праці є надзвичайно важливим аспектом при експлуатації вантажопідйомного крана, особливо при дії вітрових поривів. Для забезпечення безпеки робітників необхідно дотримуватись певних правил поведінки та застосовувати заходи безпеки.

Перш за все, перед роботою з краном необхідно перевірити його технічний стан, наявність необхідних засобів захисту, та виконати тестовий запуск, щоб переконатись у правильності роботи крана. При експлуатації крана необхідно дотримуватись встановленого режиму роботи, а також враховувати вітрові умови, та забезпечувати стапу і рівну площину для переміщення вантажу.

При дії вітрових поривів, необхідно зменшувати швидкість руху крана та вантажу, забезпечувати рівномірне розподілення вантажу на крюках, а також ретельно контролювати стан кріплення вантажу. Для запобігання падіння вантажу в разі пориву вітру, необхідно використовувати спеціальні засоби захисту, такі як сталеві троси, ремені, та інші засоби кріплення.

До інших правил охорони праці при експлуатації вантажопідйомного крана можна віднести дотримання режиму роботи, наявність необхідних засобів захисту від падіння вантажу та від електричного струму, регулярний технічний огляд, розробку та виконання плану екстрених заходів та забезпечення належного навчання робітників з питань безпеки роботи з краном.

Зараз на підприємствах де використовуються вантажопідйомні крани, надзвичайно важливо дотримуватись правил охорони праці, оскільки незнання або нехтування правилами може призвести до небезпеки життя та здоров'я людей.

Важливим аспектом охорони праці при роботі з вантажопідйомними кранами є виконання регулярних технічних оглядів та планових обстежень кранів з метою виявлення можливих несправностей та запобігання аваріям.

Також слід дотримуватись правил експлуатації кранів, зокрема, не перевантажувати їх, не пересувати вантажі під високо піднятим краном, не допускати перебування людей на вантажі тощо.

Окрім того, не менш важливим аспектом охорони праці є попередження ризику перевантаження крана та його компонентів. Крім того, працівникам необхідно бути підготовленими до непередбачуваних ситуацій, таких як аварії, витoki рідин, пожежі тощо. Для цього вони повинні знати процедури безпеки та евакуації, а також мати доступ до необхідного захисного обладнання, такого як шоломи, захисні окуляри, респіратори тощо.

На сьогоднішній день дедалі більше уваги приділяється автоматизації та роботизації процесів управління кранами. Це дозволяє знизити ризик людських помилок та покращити точність та ефективність роботи кранів. Однак, при цьому необхідно забезпечити безпеку працівників, що працюють з автоматизованими системами, а також уникнути можливості аварій через помилки в програмному забезпеченні або неправильному функціонуванні обладнання.

Отже, важливість охорони праці при поводженні з вантажопідйомними кранами та вантажами залишається незмінною на сьогоднішній день. Високий рівень безпеки для працівників та оточуючого середовища повинен бути головним пріоритетом у кожному етапі роботи з кранами та вантажами.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

Висновки

НУБІП України

На основі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1) Відповідно до заданої теми роботи було проведено аналіз конструкцій вантажопідіймних механізмів, у яких процесах вони використовуються, як використовуються, тобто використання механізмів за призначенням, які є типи підвісу. Такий аналіз дає змогу зрозуміти наскільки тема є актуальною на даний час у світі. Було досліджено, що дана тема є досить популярною для дослідження науковцями.

2) Проведено опис лабораторної установки для експериментальних досліджень. Вказано технічні характеристики вимірювально-реєструючого обладнання, а саме оптичних інкрементальних енкодерів. проведено розробку системи керування рухом лабораторної моделі динамічної системи «кран-вантаж». Для цього обрано електротельфер із керуванням від частотного перетворювача, датчики лінійного положення візка та кутового положення канату з вантажем, мікроконтролер, ЦАП, блоки живлення тощо

3) Проведено ідентифікацію руху динамічної системи «кран-вантаж» та доведено, що отримані регресійні залежності адекватні (похибка прогнозу для всіх фазових координат знаходиться у діапазоні 3,65...8,81%);

4) Виконано постановку задачі синтезу лінійного регулятора руху динамічної системи «кран-вантаж». Діапазон зміни тривалості руху заданий рівним 7 та 10 с при переміщенні візка на 1,5 м. У результаті розв'язку задач отримано два набори коефіцієнтів лінійного регулятора (для обох варіантів тривалості руху). Проведено аналіз результатів моделювання роботи обох регуляторів та доведено, що більша тривалість руху (10 с) дозволяє на 37,5% зменшити максимальний кут відхилення каната з вантажем від вертикалі, на 61,6% максимальну швидкість кута відхилення каната з вантажем від вертикалі та на 111,1% кількість перевищень швидкості наростання частоти напруги живлення (у рамках даного дослідження прийнято граничне значення 2 Гц/с).

Список використаних джерел

- 1) Arduino Uno URL: <https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Uno>
- 2) Autonics E40S6-5000-3-T-24 URL:
<https://www.tme.eu/Document/4d6febbef3be9142993070004b9cceb0/E40-series-INS.pdf>
- 3) Closed-loop Schemes for Position and Sway Control of a Gantry Crane System, URL: <https://ijssst.info/Vol-17/No-32/page%28.pdf>
- 4) EOT Crane Anti-Sway Control URL:
<https://www.anandcontrol.in/blog/eot-crane-anti-sway-control.html>
- 5) <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%B7%D1%8F%D1%89%D0%B0%D1%8F%D1%83%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%BD%D1%8F%D1%8F>
- 6) LINEAR PROGRAMMING FOR THE OPTIMAL CONTROL OF A ONE-DEGREE-OF-FREEDOM OVERHEAD CRANE SYSTEM, URL:
https://abcm.org.br/symposium-series/SSM_Vol5/Section_II_Control_Systems/07901.pdf
- 7) Ma, X.; Bao, H. An Anti-Swing Closed-Loop Control Strategy for Overhead Cranes. *Appl. Sci.* 2018, 8, 1463. <https://doi.org/10.3390/app8091463>
- 8) Microchip MCP4725. URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/MCP4725>
- 9) Nebojsa M., Petronijevic M., Kostic V., Jeffemic B. Electrical drives for crane application // Mechanical Engineering: URL:
<http://www.intechopen.com/books/mechanical-engineering/electrical-drives-for-crane-application>
- 10) R. Javier AC versus DC in crane modernization projects URL:
https://www.tmeic.com/Repository/Brochures/PT30-42_3-Final_1150740460.pdf
- 11) SPD-12051., URL:
<https://www.svaltera.ua/upload/manuals/carle%20gavazzi/spd05051.pdf>
- 12) Suvorov, V.A., Bahrami, M.R., Akchurin, E.E. *et al.* Anti sway tuned control of gantry cranes. *SN Appl. Sci.* 3, 729 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04719-w>

13) Sway Control Technology and Its Application for Overhead Traveling Cranes, URL: <https://www.columbusnickiron.com/globalassets/case-studies/sway-control-technology/swaycontrolwhitepaper.pdf>

14) THE FUZZY ROBUST ANTI-SWAY CRANE CONTROL SYSTEM, URL: <https://sciendo.com/pdf/10.2478/v10040-008-0126-3>

15) Герасимяк Р.П., Лещев В.А. Анализ и синтез крановых электромеханических систем, 2008 г.: СМІЛ. – 192 с.

16) Григоров О.В. Аналіз пуско-гальмівних процесів кранових механізмів з частотно-регульованим приводом / О.В. Григоров, В.В. Стрижак // Вестник ХНАДУ. – 2012. – №57. – С. 249-256.

17) Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии. М.: Финансы и статистика, 1981. – 303 с.

18) ІДЕНТИФІКАЦІЯ СИСТЕМИ І СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА РУХУ СИСТЕМИ “КРАН-ВАНТАЖ”

DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi2022.01.018>

19) Ловвиненко К.С. Підвищення якості перехідних процесів складних електромеханічних систем кранових механізмів: автореф. дис. на здоб. ступ. канд техн. наук: спец. 05.09.03 „Електротехнічні комплекси та системи” / К.С. Ловвиненко. – О., 2001. – 24 с.

20) Пат. 102280 Україна, МКП В66С 13/06, В66С 13/20 СПОСІБ УСУНЕННЯ КОЛИВАНЬ ВАНТАЖУ, ЗАКРІПЛЕНОГО НА ГНУЧКОМУ ПІДВІСІ, ПРИ РОБОТІ КРАНОВОГО ВІЗКА З НЕПЕРЕДБАЧУВАНИМИ ЗОВНІШНІМИ ВПЛИВАМИ / Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., власник НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041. Номер заявки а201108257, заявлено 01.07.2011, опубліковано 25.06.2013, бюл. №12.

21) Пат. П6294 Україна, МКП В66С 13/06 СПОСІБ ЗМЕНШЕННЯ КОЛИВАНЬ ВАНТАЖУ, ЗАКРІПЛЕНОГО НА ГНУЧКОМУ ПІДВІСІ / Неженцев О.Б., Збітнев П.В., власник НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ІМЕНІ ГОРЯСКОРСЬКОГО, пр.-кт Перемоги, 37, м. Київ, 03056. Номер заявки
u201612878, заявлено 19.12.2016, опубліковано 10.05.2017, бюл. №9.

22) Пат.145395 Україна, МКП В66С 13/06, В66С 13/20. Спосіб

оптимального керування рухом механізму зміни вильоту вантажу баштового

крана при дії на вантаж вітрових поривів / Ромасевич Ю.О., Ловейкін В.С.,

Стехно О.В., власник НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І

ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ,

03041. Номер заявки u202003669, заявлено 18.06.2020, опубліковано 10.12.2020,

бюл. №23.

23) Пат.68241 Україна, МКП В66С 13/06. СПОСІБ КЕРУВАННЯ

РЕЖИМАМИ ПУСКУ ТА ГАЛЬМУВАННЯ КРАНА З ТРАВЕРСОЮ

ПІДВІСІ ВАНТАЖУ / Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., власник

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І

ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ,

03041. Номер заявки u201108246, заявлено 01.07.2011, опубліковано 26.03.2012,

бюл. №6.

24) Пат.94511 Україна, МКП В66С 13/06, В66D 3/00. ЗАСПОКОЮВАЧ

ВАНТАЖОЗАХВАТНОГО ОРГАНА / Ловейкін В.С., Рибалко В.М.,

Мельниченко В.В., Попський Б.М., власник НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ, вул. Героїв Оборони,

15, м. Київ, 03041. Номер заявки u201105302, заявлено 26.04.2011, опубліковано

10.11.2011, бюл. №21.

25) Пат.94511 Україна, МКП В66С 13/06, В66С 13/22. СПОСІБ

ЗМЕНШЕННЯ КОЛИВАНЬ ВАНТАЖУ, ЗАКРІПЛЕНОГО НА ГНУЧКОМУ

ПІДВІСІ / Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., власник НАЦІОНАЛЬНИЙ

УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ, вул.

Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041. Номер заявки a200910721, заявлено

23.10.2009, опубліковано 10.05.2011, бюл. №9.

26) Пат.94512 Україна, МКП В66С 13/06, В66С 13/22. ПРИСТРІЙ ДЛЯ

УСУНЕННЯ КОЛИВАНЬ ВАНТАЖУ, ЗАКРІПЛЕНОГО НА ГНУЧКОМУ

ПІДВІСІ ДО КРАНОВОГО ВІЗКА / Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., власник

бюл. №9.

27) Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения
многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. – 256 с.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП ^{ДОДАТКИ} України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

США	US	11	17	17	33	30	26	31	47	61	45	45	-
Фінляндія	FI	1	2	-	3	1	1	1	2	-	2	2	-
Франція	FR	-	1	1	-	3	3	3	2	1	-	-	-
Данія	DK	-	-	2	2	1	3	1	4	2	2	2	-
Німеччина	DE	5	6	5	6	5	11	7	6	11	6	3	-
Японія	JP	10	8	11	13	11	21	25	24	30	21	32	6
ЮАР	ZA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
Іспанія	ES	1	2	1	2	1	-	-	-	2	-	-	-
Словаччина	SK	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-
Сінгапур	SG	1	1	-	4	-	1	3	3	0	1	-	-
Корея	KR	20	25	19	24	19	21	41	29	25	20	7	-
Всесвітня організація по захисту інтелектуальної власності	WO	8	8	15	10	8	12	14	23	24	24	13	11
Європейський патентний офіс	EP	30	27	27	36	30	22	33	53	42	38	46	9
Всього:	-	160	197	213	319	340	457	805	829	1502	2651	2704	813

* станом на 06.05.2023 р.

НУБІП України

НУБІП України

Додаток Б

Розроблений код, який використано у для проведення експериментальних досліджень

```
#include <TimerOne.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <MovingAverage.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MCP4725.h>
```

```
Adafruit_MCP4725 dac;
MovingAverage<float>test(3, 1);
MovingAverage<float>test1(20, 2);
```

```
MovingAverage<float>test2(20, 2);
```

```
long EncB = 0;
long interruptPinA = 3;
long interruptPinB = 2;
long EncA = 0;
float prev_rotA = 0;
float prev_rotB = 0;
volatile long tm;
float spdEncA = 0;
float spdEncB = 0;
```

```
float f1 = 0;
float fx = 81.6;
float f = 0;
float f0 = 0;
float xsp = 2.5;
float a = 0;
float da = 0;
float x = 0;
float dx = 0;
float m = 0;
float n = 0;
float k = 0;
```

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
```

```
das.begin(0x60);
Timer1.initialize(100000);
Timer1.attachInterrupt(callback);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(interruptPinA), detectA, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(interruptPinB), detectB, RISING);
pinMode(5, INPUT);
pinMode(6, INPUT);
```

```
void detectA()
{
  if (digitalRead(5)==HIGH)
```

```
  EncA++;
```

```
  if (digitalRead(5)==LOW)
```

```
    EncA--;
```

```
void detectB()
```

```
if (digitalRead(6)==HIGH)
```

```
  EncB++;
```

```
if (digitalRead(6)==LOW)
```

```
  EncB--;
```

```
void callback()
```

```
{
  spdEncA = EncA-prev_rotA;
```

```
  prev_rotA = EncA;
```

```
  spdEncB = EncB-prev_rotB;
```

```
  prev_rotB = EncB;
```

```
}
```

```
void loop()
```

```
{
  test.push(EncB);
```

```
  test1.push(spdEncA);
```

```
  test2.push(spdEncB);
```

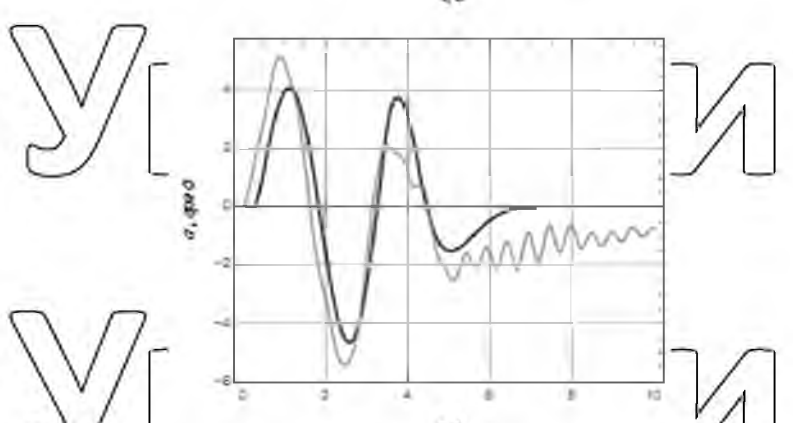
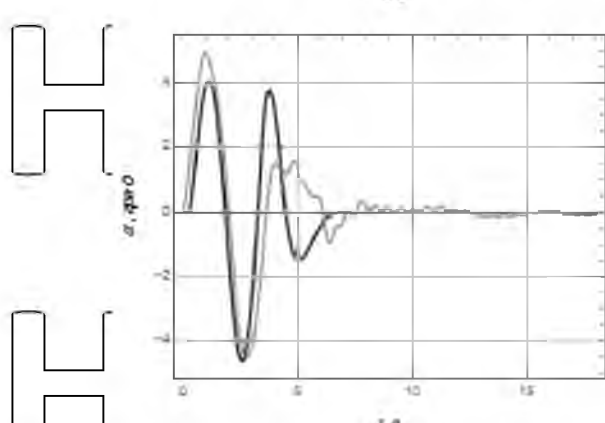
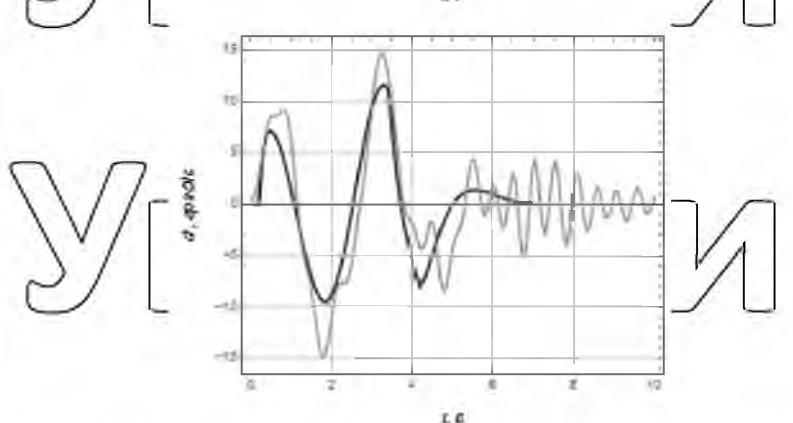
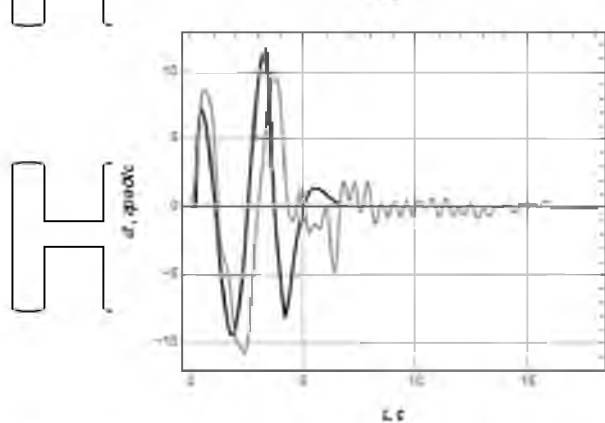
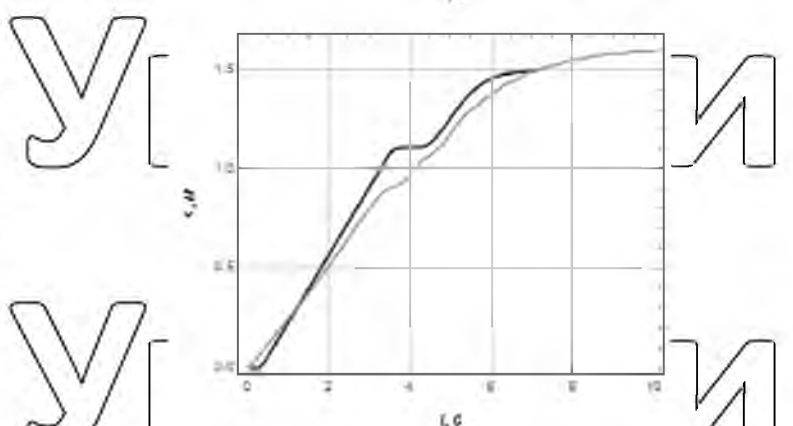
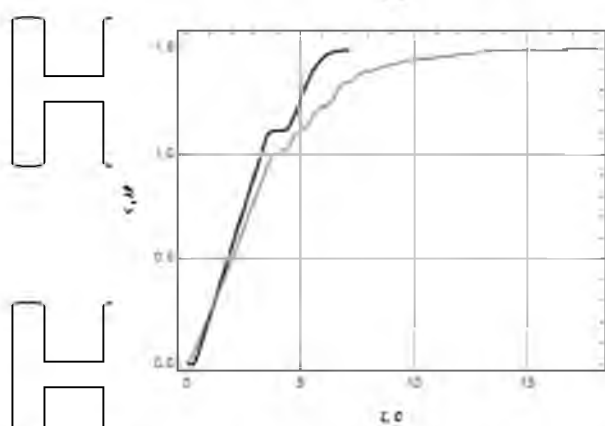
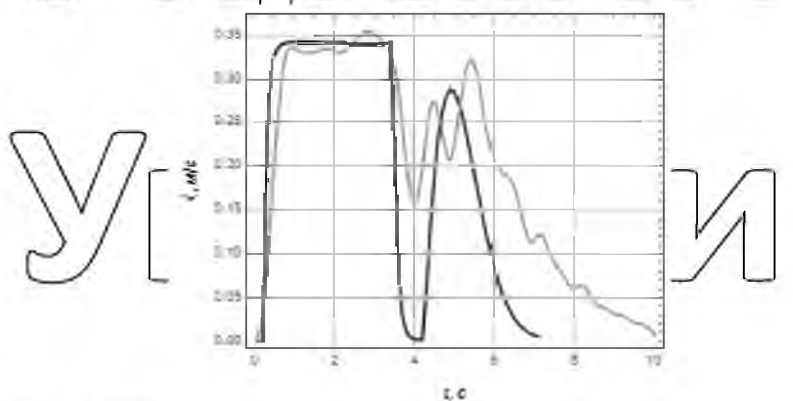
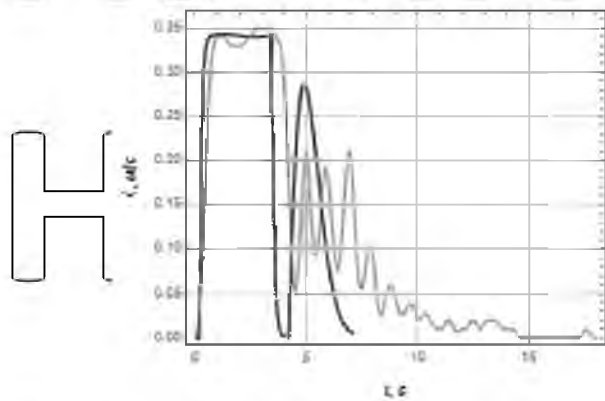


```
Serial.print("{}");
Serial.print(x);
Serial.print(",");
for (uint8_t k = 0; k < test1.size(); k++){
  Serial.print(dx);
  Serial.print(",");
  for (uint8_t i = 0; i < test.size(); i++){
    Serial.print(a);
    Serial.print(",");
    for (uint8_t u = 0; u < test2.size(); u++){
      Serial.print(da);
      Serial.print(",");
      Serial.print(" ");
      m = test1.get();
      n = test.get();
      k = test2.get();
      x = EncA * 0.001 ;
      dx = m * 0.01 ;
      a = n/13.9;
      da = (k/13.9)*0.1;
      f0 = -9.9 * a + 2.5 * da + 199.6 * (xsp - x) + (- 103.6 * dx);
      if ( 0 <= f0 <= 50) {
        f = f0;
      };
      if (0 > f0) {
        f = 0;
      };
      if (f0 > 50) {
        f = 50;
      };
      f1 = f * fx;
      dac.setVoltage(f1, false);
    }
  }
}
```

НУБІП України

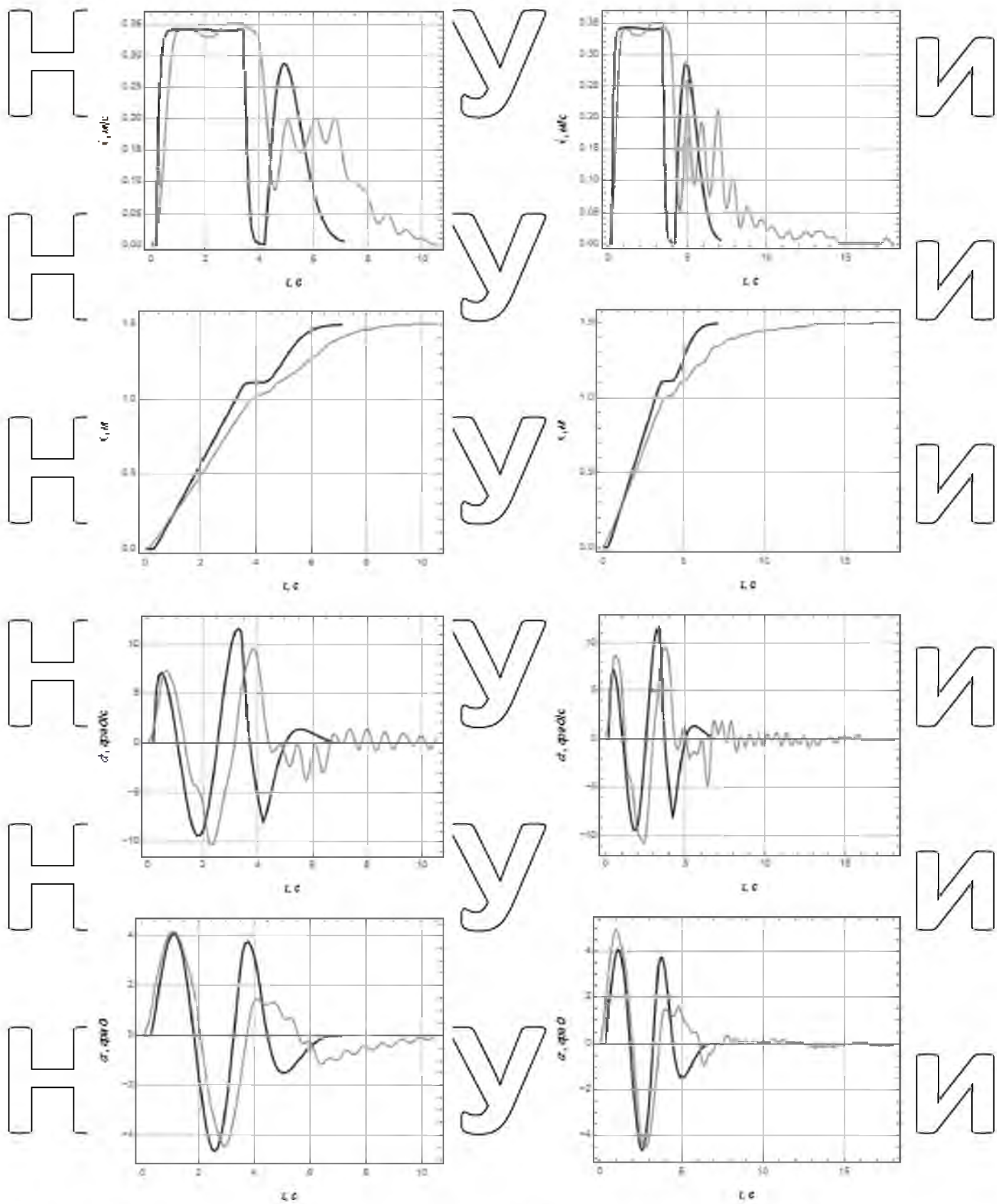
Додаток В

Графіки експериментальних досліджень

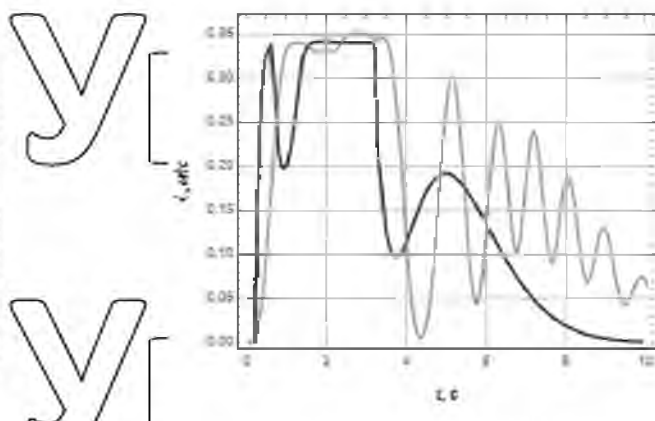
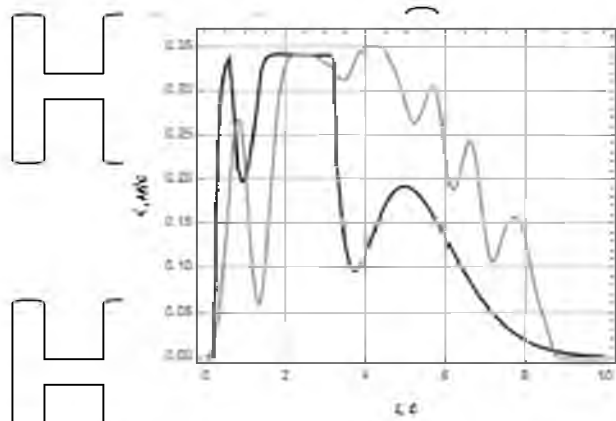


а

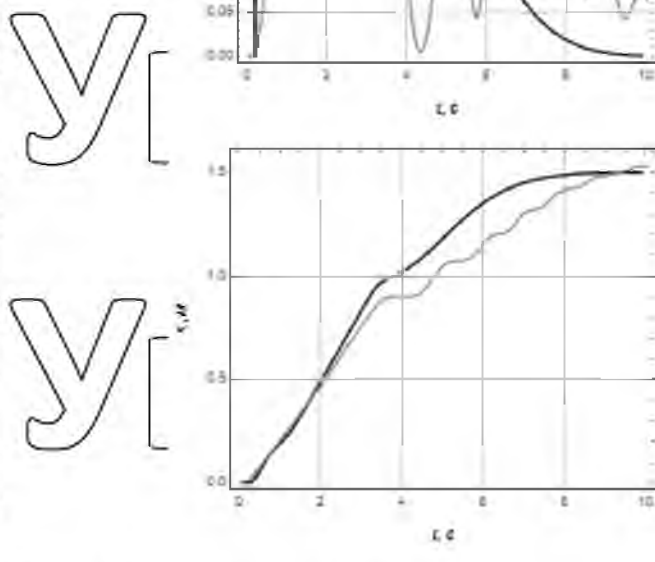
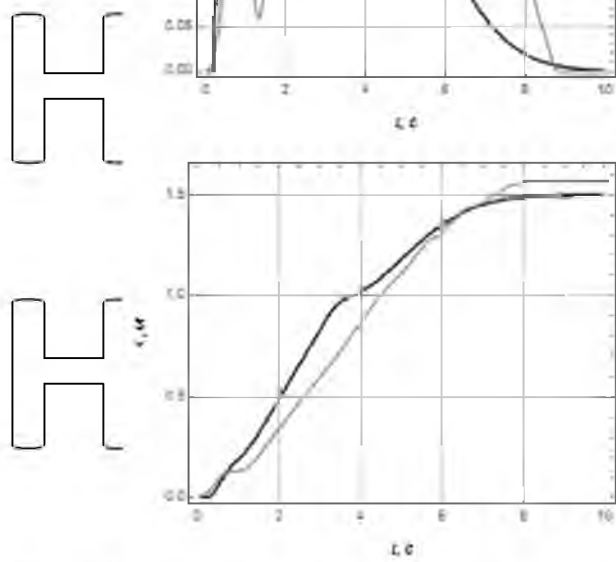
б



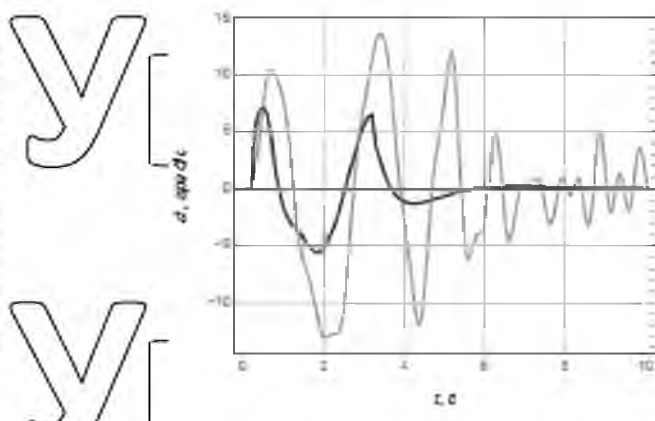
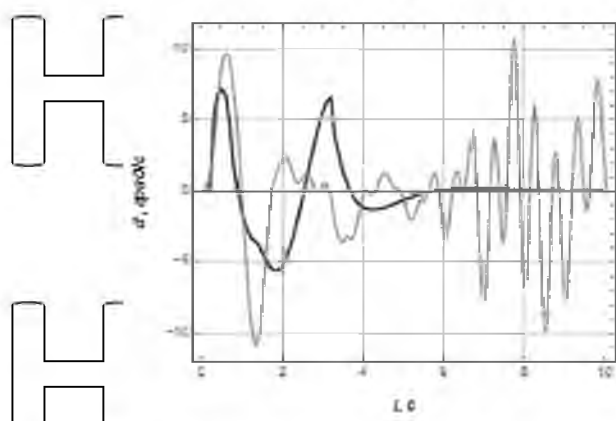
НУБіП України



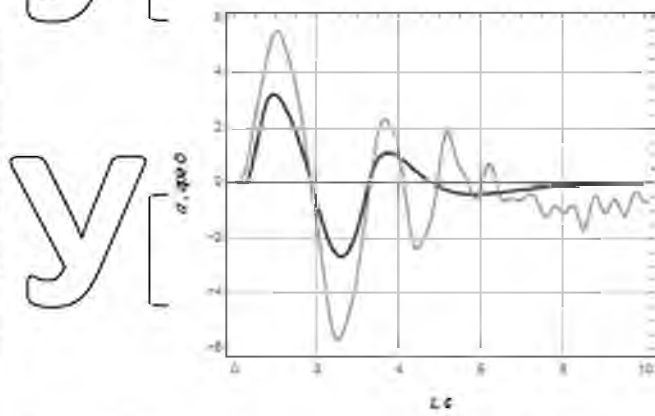
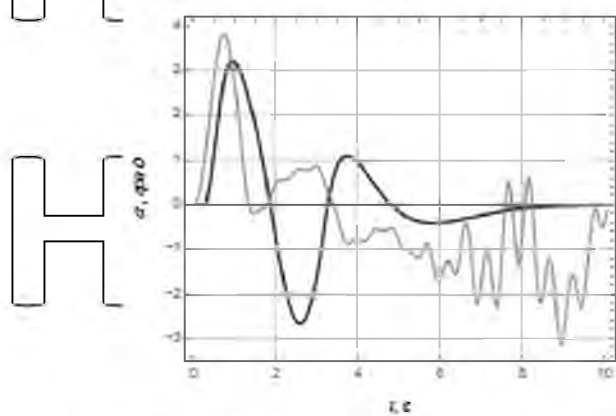
И



И

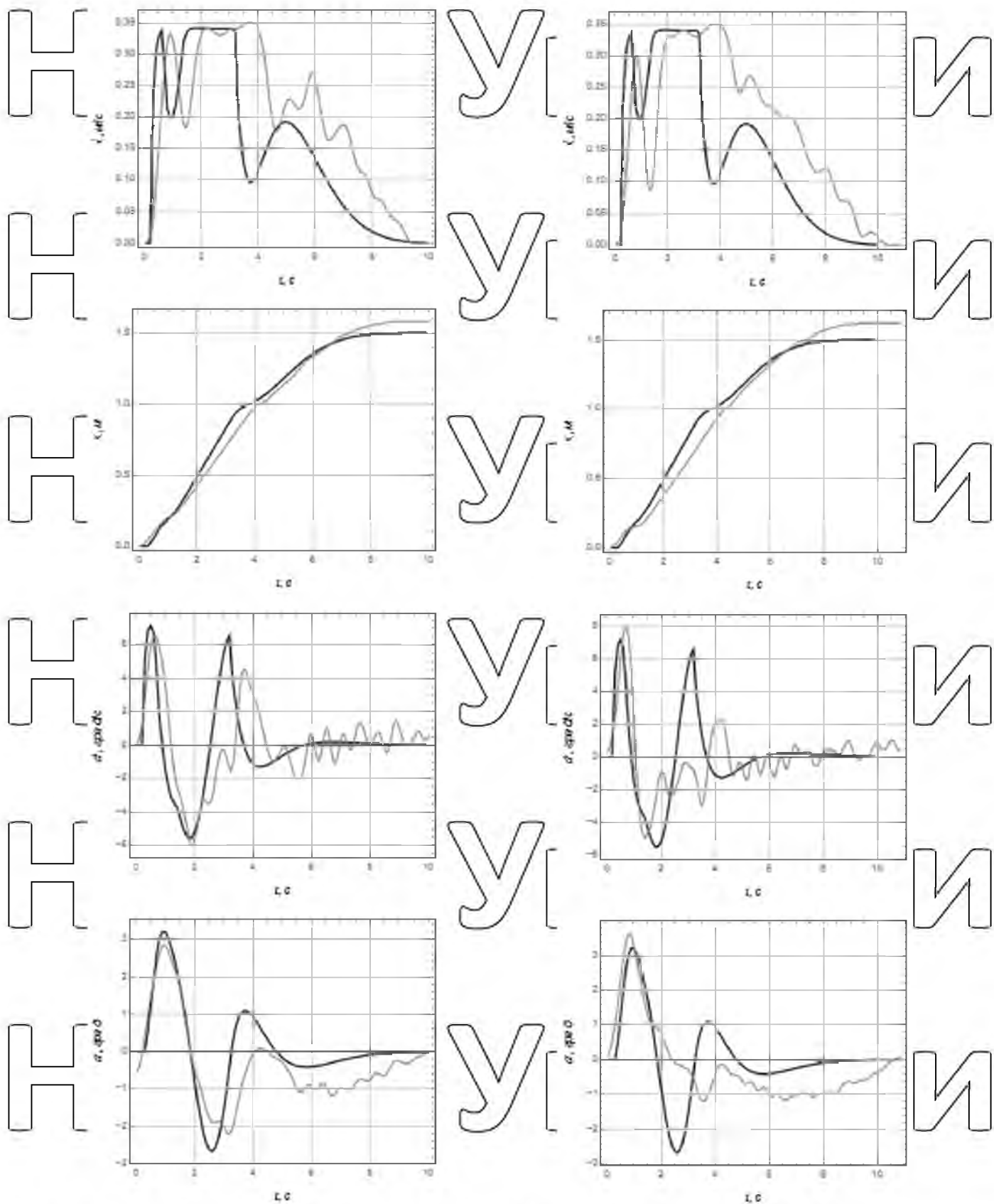


И



И

НУБІП України



НУБІП^ж **У**^з **України**^о
 Рисунок 3. №. Графіки дослідження (I ряд коефіцієнтів: а - 1.3 м., 13 кг; б - 1.3 м., 27кг; в - 2 м., 13 кг; г - 2 м., 27 кг.; II ряд коефіцієнтів: д - 1.3 м., 13 кг; е - 1.3 м., 27кг; ж - 2 м., 13 кг; з - 2 м., 27 кг.).

ІДЕНТИФІКАЦІЯ СИСТЕМИ І СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА РУХУ СИСТЕМИ “КРАН-ВАНТАЖ”

Ю. О. РОМАСЕВИЧ, доктор технічних наук, професор

В. С. ЛОВЕЙКІН, доктор технічних наук, завідувач

В. В. МАКАРЕЦЬ, аспірант

О. І. ЩЕРБАК, студент

E-mail: romasevichyuriy@ukr.net, walera10100@gmail.com

<https://doi.org/10.31548/dopovid2022.01.018>

***Анотація.** У роботі представлено підхід, який дає змогу синтезувати оптимальний регулятор руху динамічної системи. Він полягає в ідентифікації фізичної моделі динамічної системи. Це дає змогу поставити задачу синтезу регулятора. Для реалізації даного підходу не потрібна математична модель у вигляді системи диференціальних рівнянь, що спрощує розрахунки. Але для реалізації переваги цього методу необхідно на етапі ідентифікації системи виконувати оцінку її якості. Ці розрахунки показують обґрунтованість розробленого підходу. Синтез оптимального регулятора було проведено шляхом зведення вихідної задачі до задачі безумовної оптимізаційної функції зі складною топологією. Для цього було використано модифікований метод рою часточок.*

***Ключові слова:** синтез регулятора, керування, ідентифікація, оптимізація, динамічна система*

Актуальність. Роль вантажопідійомних кранів у сучасних виробничих процесах важко переоцінити. Тому для того, щоб підвищити кількісні і якісні показники виробництва необхідно забезпечити високу продуктивність роботи вантажопідійомних машин. Один із сучасних підходів до цієї проблеми полягає у використанні частотно-керованих приводів механізмів крана. Це дозволяє знизити рівень динамічних навантажень у металоконструкції крана та елементах приводів, забезпечити високу

енергоєфективність роботи механізмів та збільшити їхню керованість.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасний стан конструювання вантажопідійомної техніки включає застосування частотно-керованих приводів, у тому числі для механізму переміщення крана або/та кранового візка. Науково-прикладні задачі, які виникають у цьому напрямку, досліджувались багатьма вченими (Р. П. Герасимяк, В. А. Лешев [1], О. В. Григоров, В. В. Стрижак [2], К. С. Логвиненко [3], Kostic, B. Jefstenic [4], R. Javier [5]).

Ромасевич Ю. О., Ловейкін В. С., Мазарець В. В., Щербак О. І.

Наприклад, у роботі [1] автори розглядали єдину електромеханічну систему „частотно-керований привод – кран – вантаж”. Це дало їм змогу отримати закони керування для різних кранових механізмів за яких маятникові коливання вантажу усуваються. У роботі [2] автори досліджували вплив опційних налаштувань частотних перетворювачів на динамічні, енергетичні та кінематичні показники руху кранових механізмів під час їх розгону та гальмування. У цілому такі дослідження дали змогу напрацювати ряд цінних для практики рекомендацій. Застосування частотно-керованого приводу для механізму підйому вантажу досліджено у роботі [3]. Тут було показано, що раціональна форма механічної характеристики приводного двигуна дозволяє значно знизити коливні процеси під час підйому вантажу з підхватом.

У роботі [4] досліджено сумісну роботу декількох частотних перетворювачів для кранових

механізмів та наведено раціональні закони керування їхнім рухом. Переваги застосування частотного приводу перед приводом постійного струму наведено у роботі [5].

Мета. Метою є ідентифікація динамічної системи та синтез оптимальної системи керування динамічної системи „кран-вантаж”, яка приводиться в рух від частотно-керованого приводу.

Методи. Першим етапом дослідження є опис лабораторної установки та основного обладнання для проведення експерименту. Для проведення експериментальних досліджень було використано лабораторну установку, яка включає електроталі, що рухалась по металевій балці двотаврового перерізу. Довжина балки складає 5,57 м. Привод візка (електроталі) включає двигун змінного струму потужністю 80 Вт. Радіус колеса візка 0,042 м. Номінальна швидкість руху візка рівна 0,33 м/с. Зовнішній вигляд установки наведено на рис. 1.



Рис. 1. Лабораторна установка для проведення експериментальних досліджень

Керування приводом візка здійснювалось за допомогою перетворювача частоти Mitsubishi Electric FR-E740-060 по аналоговому каналу. Для цього використано вхід 2 перетворювача. Технічні характеристики перетворювача частоти наведені в табл. 1.

1. Технічні характеристики перетворювача частоти Mitsubishi Electric FR-E740-060 [6]

Параметр	Значення
Діапазон напруг живлення, В	380-480
Частота напруги живлення, Гц	50/60
Діапазон вихідних частот, Гц	0,2-400
Вихідна потужність, кВА	4,6
Номинальна потужність двигуна, кВт	2,2
Номинальний вихідний струм перетворювача, А	6
Характеристика розгону/тормування	S-подібна, лінійна

Частотний перетворювач живиться від мережі 380 В. У свою чергу, привід візка підключений до частотного перетворювача. Привід механізму підйому вантажу живиться від мережі 380 В та керується з пульта розміщеного в шафі частотного перетворювача. Маса вантажу регулюється додаванням на гак тарованих вантажів (13 та 14 кг).

Для ідентифікації моделі динамічної системи було використано регресійний аналіз. Для цього з експериментальних даних було сформовано два масива даних наступного формату:

$$\begin{cases} A_1 \dot{\alpha}_i + A_2 \alpha_i + A_3 \dot{x}_i + A_4 f_i = \dot{\alpha}_{i+1}, \\ B_1 \alpha_i + B_2 \dot{x}_i + B_3 f_i = \dot{x}_{i+1}. \end{cases} \quad (1)$$

Ромасевич Ю. О., Ловейкін В. С., Макарчук В. В., Щербак О. І.

де i – порядковий номер i -того фрейма даних, $i \in (1, I_{train})$ (довжина даних для розрахунку коефіцієнтів регресійної залежності $I_{train}=186$); \dot{x} – швидкість (м/с) візка; α та $\dot{\alpha}$ – кут (град) відхилення канату з вантажем від вертикалі та швидкість зміни цього кута (град/с); f – частота напруги живлення приводу візка, Гц; A_1, \dots, A_4 та

B_1, \dots, B_3 – коефіцієнти регресійних залежностей, які визначаються за методом найменших квадратів по всім даним I_{train} .

Отримавши регресійні вирази (1) можна виконати розрахунок лінійного положення візка та кутового положення відхилення канату від вертикалі. Для цього використані наступні вирази:

$$\begin{cases} \alpha_{i+\Delta t} = \alpha_i + \dot{\alpha}_i \Delta t; \\ x_{i+\Delta t} = x_i + \dot{x}_i \Delta t, \end{cases} \quad (2)$$

де Δt – часовий інтервал між окремими вимірюваннями ($\Delta t=0,1$ с).

Таким чином, вирази (1) та (2) дають змогу прогнозувати динаміку руху візка із вантажем на гнучкому підвісі без залучення у розгляд диференціальних рівнянь. Це є перевагою такого підходу. Однак, для того, щоб довести його адекватність необхідно виконати валідацію виразів (1) та (2) на іншій (тестовій) вибірці даних. Така вибірка була отримана при зміні напрямку руху візка.

Щоб підтвердити високу якість ідентифікації динамічної системи використаємо графічні залежності (рис. 1) та числові оцінки збіжності прогнозованих за допомогою виразів (1) та (2) даних і даних, що включені у тестові вибірку. Чорні точки представляють дані тестування, а сірі – відображають абсолютну похибку прогнозу (відхилення передбачуваного значення від тестового позначається як Δ).

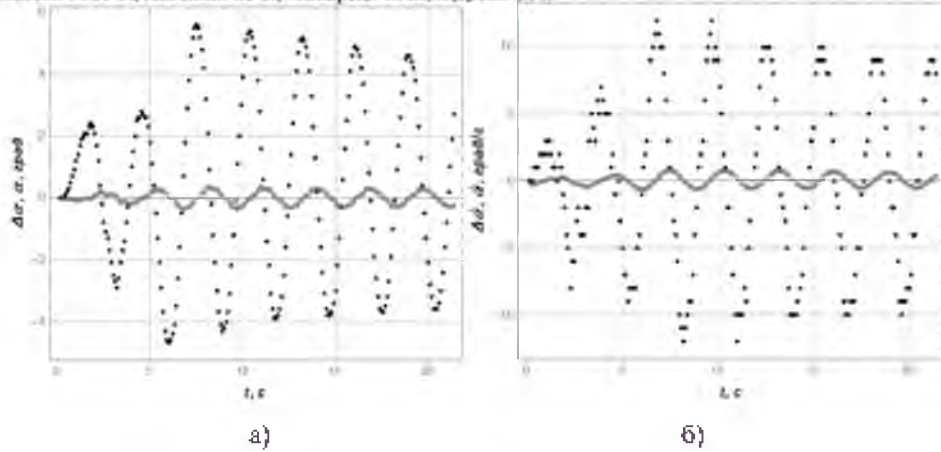


Рис. 2 Графіки тестових даних та похибки прогнозу, що отримані за допомогою виразів (1), (2): а) α ; б) $\dot{\alpha}$;

Числовими значеннями, які допомагають оцінити якість прогнозу,

є відповідні коефіцієнти варіації. Вони обчислюються за формулами:

$$E_{\alpha} = \sqrt{I_{\text{test}}^{-1} \sum_i^I (\alpha_i^{\text{test}} - \alpha_i^{\text{pred}})^2} I_{\text{test}} \left(\sum_i^I \alpha_i^{\text{test}} \right)^{-1} 100; \quad (3)$$

$$E_{\dot{\alpha}} = \sqrt{I_{\text{test}}^{-1} \sum_i^I (\dot{\alpha}_i^{\text{test}} - \dot{\alpha}_i^{\text{pred}})^2} I_{\text{test}} \left(\sum_i^I \dot{\alpha}_i^{\text{test}} \right)^{-1} 100; \quad (4)$$

$$E_x = \sqrt{I_{\text{test}}^{-1} \sum_i^I (x_{1,i}^{\text{test}} - x_{1,i}^{\text{pred}})^2} I_{\text{test}} \left(\sum_i^I x_{1,i}^{\text{test}} \right)^{-1} 100; \quad (5)$$

$$E_{\dot{x}} = \sqrt{I_{\text{test}}^{-1} \sum_i^I (\dot{x}_{1,i}^{\text{test}} - \dot{x}_{1,i}^{\text{pred}})^2} I_{\text{test}} \left(\sum_i^I \dot{x}_{1,i}^{\text{test}} \right)^{-1} 100. \quad (6)$$

Верхній індекс *pred* означає, що ці дані отримані за допомогою виразів (1) та (2). Розрахунки дають наступні величини: $E_{\alpha}=7,05\%$, $E_{\dot{\alpha}}=8,81\%$, $E_x=3,65\%$, $E_{\dot{x}}=6,66\%$.

Для того, щоб усунути коливання вантажу на гнучкому підвісі при русі

крана необхідно задати форму регулятора, який формує сигнал за яким, у свою чергу, буде змінюватись частота і напруга живлення двигуна візка. Така форма регулятора повинна включати всі фазові координати руху

Ромасевич Ю. О., Ловейкін В. С., Макарець В. В., Шербак О. І.
системи. Тому її представимо у
наступному вигляді:

$$f_{\text{min}} = \begin{cases} 0, \text{ якщо } K_1\alpha_1 + K_2\dot{\alpha}_1 + K_3(x_T - x_1) + K_4\dot{x}_1 \leq 0; \\ K_1\alpha_1 + K_2\dot{\alpha}_1 + K_3(x_T - x_1) + K_4\dot{x}_1, \\ \text{якщо } 0 \leq K_1\alpha_1 + K_2\dot{\alpha}_1 + K_3(x_T - x_1) + K_4\dot{x}_1 \leq 50; \\ 50, \text{ якщо } K_1\alpha_1 + K_2\dot{\alpha}_1 + K_3(x_T - x_1) + K_4\dot{x}_1 \geq 50, \end{cases} \quad (7)$$

де K_1, K_2, K_3, K_4 – невідомі коефіцієнти, які необхідно визначити, x_T – відстань, на яку переміщується візок у кінці руху. Пошук коефіцієнтів регулятора

виконано за умови, що вони забезпечують мінімум наступного критерію:

$$Cr = S_T + 10^l \cdot \begin{cases} \frac{|\frac{\alpha_T}{n}|}{\max(\alpha_1)} + \frac{|\frac{\dot{\alpha}_T}{n}|}{\max(\dot{\alpha}_1)} + \frac{|x_T - x_1|}{\max(x_T - x_1)} + \frac{|\dot{x}_T|}{\max(\dot{x}_1)}, \text{ якщо } \frac{|\frac{\alpha_T}{n}|}{\max(\alpha_1)} \geq 0,01 \text{ АБО} \\ \frac{|\frac{\dot{\alpha}_T}{n}|}{\max(\dot{\alpha}_1)} \geq 0,01 \text{ АБО } \frac{|x_T - x_1|}{\max(x_T - x_1)} \geq 0,01 \text{ АБО } \frac{|\dot{x}_T|}{\max(\dot{x}_1)} \geq 0,01; \\ 0, \text{ якщо } \frac{|\frac{\alpha_T}{n}|}{\max(\alpha_1)} < 0,01 \text{ І } \frac{|\frac{\dot{\alpha}_T}{n}|}{\max(\dot{\alpha}_1)} < 0,01 \text{ І } \frac{|x_T - x_1|}{\max(x_T - x_1)} \geq 0,01 \text{ І } \frac{|\dot{x}_T|}{\max(\dot{x}_1)} \geq 0,01, \end{cases} \quad (8)$$

де T – тривалість регулювання; S_T – кількість перевищень вихідною частотою перетворювача частоти швидкості зміни частоти 2 Гц/с (цей показник введений для того, щоб забезпечити плавність наростання та спадання частоти). Всі доданки у виразі (8) є безрозмірними величинами, а сама величина (8) залежить виключно від коефіцієнтів K_1, K_2, K_3, K_4 , які формують стратегію керування рухом динамічної системи, та від тривалості регулювання T .

Пошук величин K_1, K_2, K_3, K_4 та T проведений на основі моделювання руху візка із вантажем, який проведено із використанням регресійних моделей (1) та (2). Для пошуку мінімуму критерію Cr використано модифікований метод рою часточок. У результаті отримано: $K_1 = -35,5863$, $K_2 = -4,8747$, $K_3 = 123,6963$, $K_4 = 108,5396$, $T = 9,86$ – для першого випадку; $K_1 = 23,4245$, $K_2 = 1,8643$, $K_3 = 192,9940$, $K_4 = -151,7931$, $T = 7$ – для другого випадку. Графіки збіжності критеріїв

Ромасевич Ю. О., Ловейкін В. С., Машарєв В. В., Щербак О. І.

(рис. 3) показують те, що умов (термінальна частина критерія C_r рівна нулю).

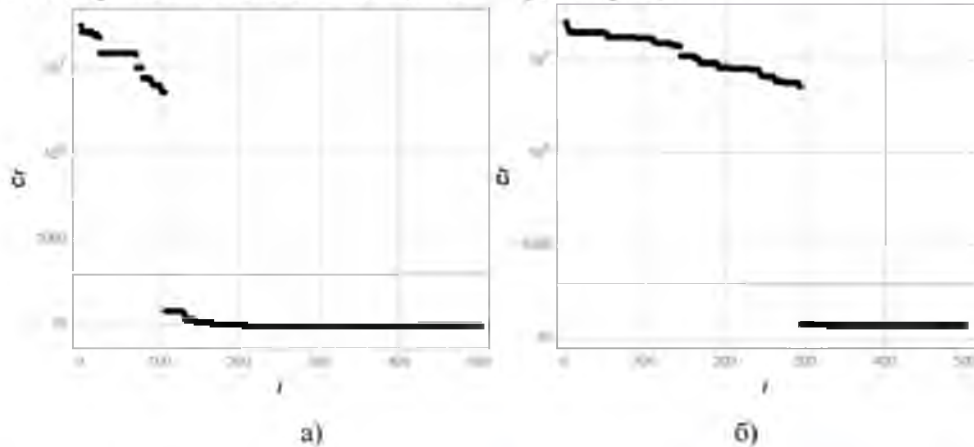
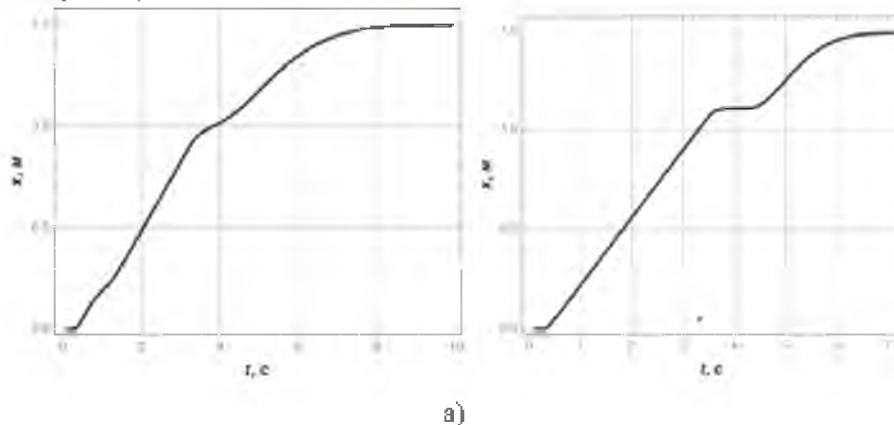


Рис. 3 Графіки збіжності критеріїв до мінімуму при використанні модифікованого методу рою часточок: а) для першого випадку; б) для другого випадку

У результаті проведених розрахунків отримано наступні графічні залежності, які ілюструють рух системи при керуванні від регулятора (7) з вказаними вище коефіцієнтами (рис. 4). На рис. 4 графіки, що розміщені зліва відповідають першому випадку, а ті що справа – другому.



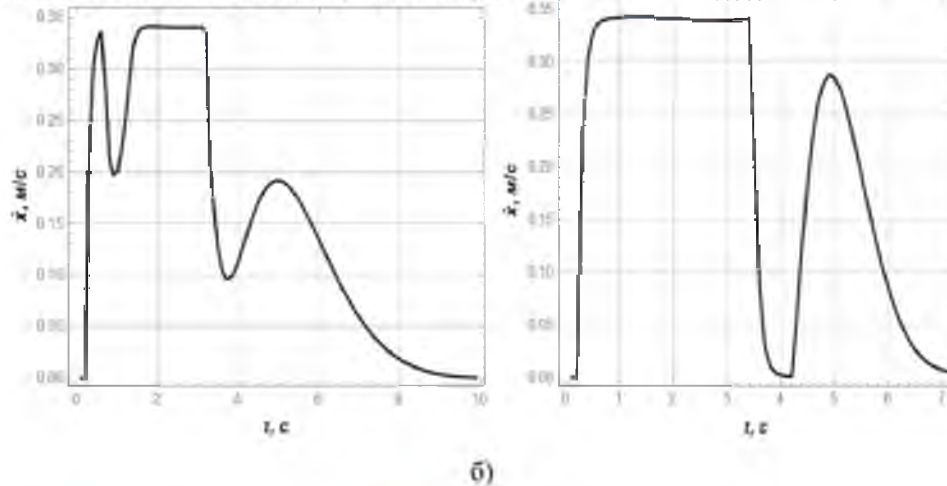


Рис. 4 Графіки фазових координат руху системи: а) x ; б) \dot{x}

Аналіз графічних залежностей (рис. 4) для всіх випадків показує плавність руху візка. При цьому маятникові коливання вантажу усуваються у кінці руху системи. Різниця між першим і другим випадком проявляється у тому, що для другого керування рухом систем

проходить у більш інтенсивному режимі. Відповідно максимальні значення фазових координат також більші, і більше значення критерію (8), про що свідчить рис. 4, б. Для оцінки такого збільшення наведемо певні чисельні дані (табл. 2).

2. Максимальні значення деяких фазових координат для першого та другого випадків

Величина	Випадок		Відносне збільшення показника
	перший	другий	
Максимальний кут відхилення каната з вантажем від вертикалі	3,2 град	4,4 град	37,5 %
Максимальна швидкість кута відхилення каната з вантажем від вертикалі	7,3 град/с	11,8 град/с	61,6 %
Кількість перевищень швидкості наростання частоти напруги живлення 2 Гц/с	9	19	111,1 %
Тривалість руху системи	9,86 с	7,00 с	-29,0%

Аналіз даних, які наведено у табл. 2 дозволяє стверджувати, що неможливо досягнути покращення всіх

(принаймні тих, що наведені у табл. 2) показників одночасно: за збільшення одних показників необхідно

Ромасевич Ю. О., Ловейкін В. С., Макаренко В. В., Шербак О. І.

„розплануватись” зменшенням інших. Таким чином, можна сподіватись, що отриманий результат є оптимальним за Парето [7].

Висновки і перспективи подальших досліджень:

1) проведено розробку системи керування рухом лабораторної моделі динамічної системи „кран-вантаж”. Для цього обрано електротельфер із керуванням від частотного перетворювача, датчики лінійного положення візка та кутового положення канату з вантажем, мікроконтролер, ЦАП, блоки живлення тощо;

2) проведено розробку програмного забезпечення для керування рухом візка із вантажем на гнучкому підвісі за допомогою

Список використаних джерел:

1. Герасимьяк Р.П., Лещёв В.А. Анализ и синтез крановых электромеханических систем, 2008. 192 с.
2. Григоров О.В., Стрижак В.В. Анализ пуско-гальмівних процесів кранових механізмів з частотно-регульованим приводом. Вестник ХНАДУ. 2012. №57. 249-256 с.
3. Логвиненко К.С. Підвищення якості перехідних процесів складних електромеханічних систем кранових механізмів: автореф. дис. на здоб. ступ. канд техн. наук: спец. 05.09.03, 2003. 24 с.
4. Nebojsa M., Petronijevic M., Kostic V., Jelefenic B. Electrical drives for crane application. Mechanical Engineering: URL: <http://www.intechopen.com/books/mechanical-engineering/electrical-drives-for-crane-application> (дата звернення 10.01.2022).

частотного перетворювача та збору експериментальних даних;

3) проведено ідентифікацію руху динамічної системи „кран-вантаж” та доведено, що отримані регресійні залежності адекватні (похибка прогнозу для всіх фазових координат знаходиться у діапазоні 3,65... 8,81%);

4) виконано постановку задачі синтезу лінійного регулятора руху динамічної системи „кран-вантаж”. Діапазон зміни тривалості руху заданий рівним 7 та 10 с при переміщенні візка на 1,5 м. У результаті розв’язку задач отримано два набори коефіцієнтів лінійного регулятора (для обох варіантів тривалості руху).

S. R. Javier. AC versus DC in crane modernization projects. URL: https://www.tmeic.com/Repository/Brochures/P_T30-42_3-Final_1150740460.pdf (дата звернення 10.01.2022)

6. FR-E700. Преобразователь частоты. Инструкция по эксплуатации. URL: http://www.esspb.ru/Documents/FR-E700_SC_manual.pdf (дата звернення 10.01.2022)

7. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. 256 с.

References:

1. Gerasimiyak R.P., Leshchev V.A. (2008). Analysis and synthesis of crane electromechanical systems, 192 p.
2. Grigorov O.V., Strizhak V.V. (2012). Analysis of starting and braking processes of crane mechanisms with frequency-adjustable

Ромасевич Ю. О., Лувейкін В. С., Макарець В. В., Шчербак О. І.

drive. Bulletin of the KhNADU. №57. 249-256 p.

3. Logvinenko K.S.(2003) Improving the quality of transients of complex electromechanical systems of crane mechanisms. – 24 p.

4. Nebojsa M., Petronijevic M., Kostic V., Jelefic B. Electrical drives for crane application. Mechanical Engineering: URL: <http://www.intechopen.com/books/mechanical-engineering/electrical-drives-for-crane-application> (accessed 10.01.2022).

5. R. Javier. AC versus DC in crane modernization projects. URL: https://www.tmeic.com/Repository/Brochures/P-T30-42_3-Final_1150740460.pdf (accessed 10.01.2022)

6. FR-E700. Frequency converter. Operating instructions. URL: http://www.esspb.com/Documents/FR-E700_SC_manual.pdf (accessed 10.01.2022)

7. Podinovsky VV, Nogin VD (1982). Pareto-optimal solutions of multicriteria problems. M.: Nauka. 256 s.

SYSTEM IDENTIFICATION AND SYNTHESIS OF THE OPTIMAL MOTION CONTROLLER OF THE CRANE-LOAD SYSTEM

Yu. A. Romasevich, V. S. Luvetkin, V. V. Makarets, O. I. Shcherbak

Abstract. The paper presents an approach that makes it possible to synthesize an optimal motion controller for a dynamic system. It is based on the identification of a physical model of a dynamic system. This made it possible to state the problem of controller synthesis. To implement this approach, a mathematical model in a form of a system of differential equations, is not required. It simplifies calculations. However, to realize the advantages of this method, it is necessary to estimate its quality at the stage of system identification. These calculations show the validity of the developed approach. The synthesis of the optimal controller was carried out by reducing the input problem to an unconstrained optimization of a complex topology objective function. For this, a modified particle swarm method was used.

Key words: controller synthesis, control, identification, optimization, dynamic system

Науковий журнал «Технічна і економічна АІІК»

НУБіП України

Додаток Д

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



**ЗБІРНИК
ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ**

*IX Міжнародної науково-технічної конференції з нагоди
115-ї річниці від дня народження
доктора технічних наук, професора,
члена-кореспондента ВАСГНІЛ,
віцепрезидента УАСГН
КРАМАРОВА
Володимира Савовича
(1906-1987)*

«КРАМАРОВСЬКІ ЧИТАННЯ»

*24-25 лютого 2022 року
м. Київ*

УДК: 621.87

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ОПТИМАЛЬНИХ РЕГУЛЯТОРІВ РУХУ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ „КРАН-ВАНТАЖ”

Ю. О. РОМАСЕВИЧ, доктор технічних наук, професор;

В. С. ЛОВЕЙКІН, доктор технічних наук, професор;

В. В. МАКАРЕЦЬ, аспірант;

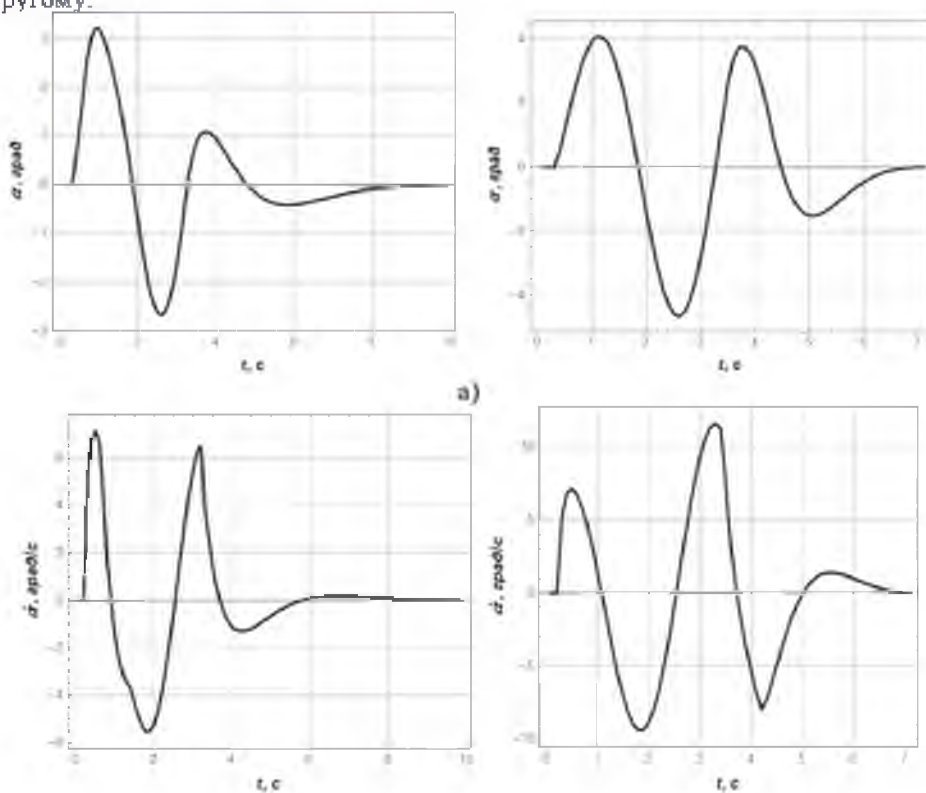
О. І. ЩЕРБАК, студент;

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: waleria10100@gmail.com

Для того, щоб усунути коливання вантажу на гнучкому підвісі при русі крана необхідно задати форму регулятора, який формує сигнал за яким, у свою чергу, буде змінюватись частота і напруга живлення двигуна візка. Така форма регулятора повинна включати всі фазові координати руху системи.

У результаті проведених розрахунків отримано наступні графічні залежності, які ілюструють рух системи при керуванні від регулятора. На рис. 1 графіки, що розміщені зліва відповідають першому випадку, а ті що справа – другому.



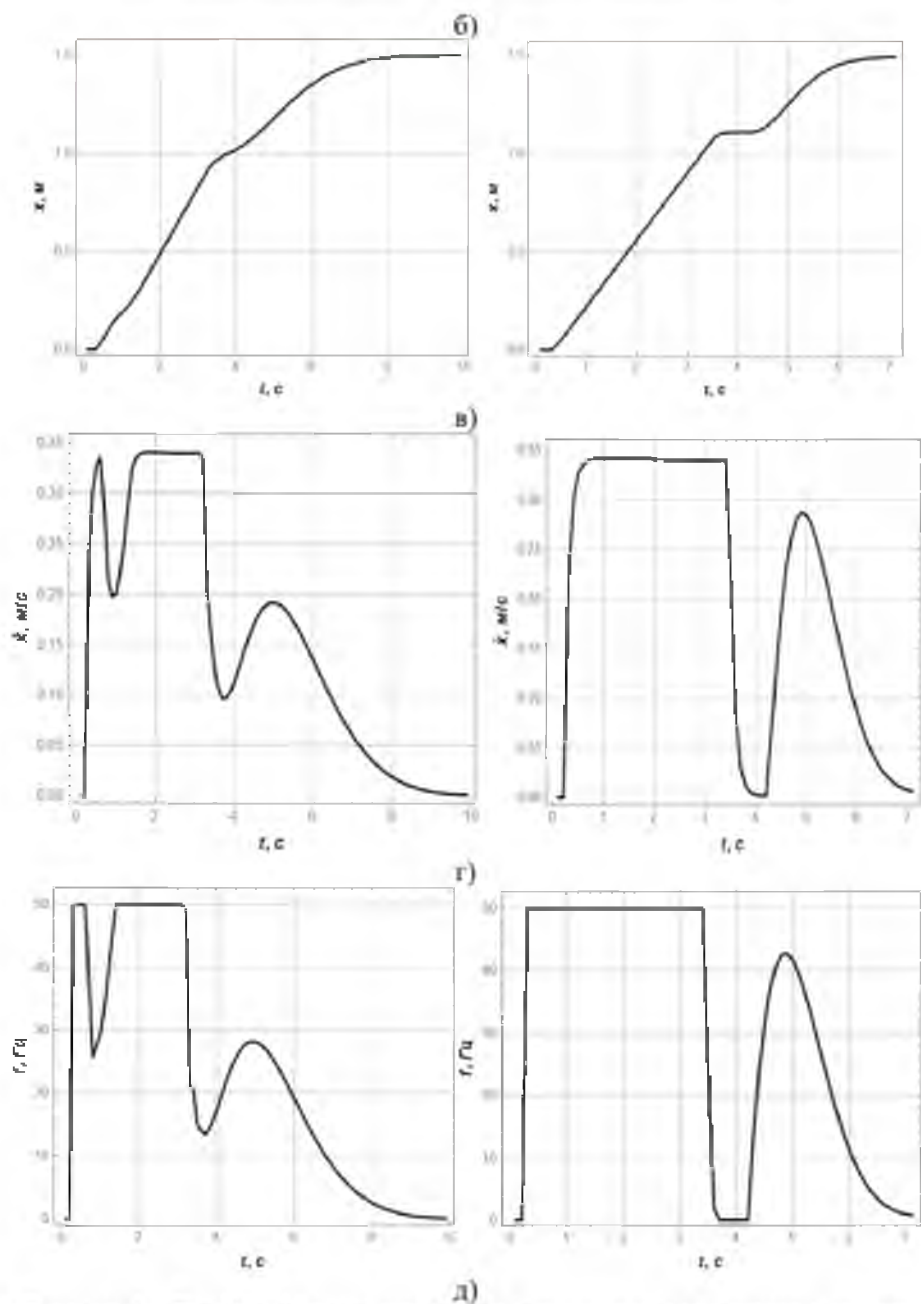


Рисунок 1 – Графіки фазових координат руху системи та частоти напруги живлення приводу візка: а) x ; б) \dot{x} ; в) x ; г) \dot{x} ; д) f

Аналіз графічних залежностей (рис. 1) для всіх випадків показує усунення маятникових коливань вантажу у кінці руху візка. Крім того, плавність руху також висока. Різниця між першим і другим випадком проявляється у тому, що для другого керування рухом систем проходить у більш інтенсивному режимі. Відповідно максимальні значення фазових координат також більші, і більше значення критерію. Для оцінки такого збільшення наведемо певні чисельні дані (табл. 1).

Таблиця 1 – Максимальні значення деяких фазових координат для першого та другого випадків

Величина	Випадок		Відносне збільшення показника
	перший	другий	
Максимальний кут відхилення каната з вантажем від вертикалі	3,2 град	4,4 град	37,5 %
Максимальна швидкість кута відхилення каната з вантажем від вертикалі	7,3 град/с	11,8 град/с	61,6 %
Кількість перевищень швидкості наростання частоти напруги живлення 2 Гц/с	9	19	111,1 %
Тривалість руху системи	9,86 с	7,00 с	-29,0%

Аналіз даних, які наведено у табл. 1 дозволяє стверджувати, що неможливо досягнути покращення всіх (принаймні тих, що наведені у табл. 1) показників одночасно: за збільшення одних показників необхідно „розплачуватись” зменшення інших. Таким чином, можна сподіватись, що отриманий результат є оптимальним за Парето.

У практичному плані використання обох наборів коефіцієнтів можливо для різних цілей використання кранів. Наприклад, для випадку бажано максимальної швидкодії більш придатним буде другий варіант. Для випадку мінімізації амплітуди відхилення канату з вантажем від вертикалі, а відповідно і рівня динамічних зусиль, які ним викликані, необхідно рекомендувати перший варіант.

Програма та методика виконання експериментальних досліджень руху стрічкового конвеєра <i>В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, Р. А. Кульпін</i>	276
Нестійкі засоби індивідуального переміщення: гіроборд і гіроскутер <i>О. Г. Олексійко, Ю. О. Ромасевич</i>	278
Результати розрахунку оптимальних регуляторів руху динамічної системи „Кран-Вантаж” <i>Ю. О. Ромасевич, В. С. Ловейкін, В. В. Макарець, О. І. Щербак</i>	280
Дискретна модель удару при динамічному аналізі процесів гальмування стрічкових конвеєрів <i>І. О. Кадицало</i>	283
Пристрій для транспортування малогабаритних вантажів <i>Ю. О. Ромасевич, В. С. Ловейкін, О. Ю. Зарівний</i>	283
Результати експериментальних досліджень оптимальних регуляторів руху динамічної системи „Кран-Вантаж” <i>Ю. О. Ромасевич, В. С. Ловейкін, В. В. Макарець, О. І. Щербак</i>	286
Динамічний аналіз тягової лебідки <i>В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, А. П. Ляшко, Р. О. Сторож</i>	288
Динамічний аналіз гвинтового конвеєра <i>В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, А. П. Ляшко, В. Г. Коваль</i>	290
Оптимізація режиму руху електротрактора <i>В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, А. П. Ляшко, О. В. Бундалевський</i>	292
Оптимізація режиму пуску механізму підйому вантажу мостового крана <i>В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, А. П. Ляшко, Н. О. Потеряйко</i>	294
Оптимізація режиму пуску скребкового конвеєра <i>В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, А. П. Ляшко, А. С. Кривонос</i>	296
Обґрунтування профілю розпушувальної лапи у двомірному просторовому вимірі <i>М. С. Храмов</i>	298
Перспективні напрямки розвитку конструкцій ґрунтообробних машин <i>В. В. Мошко</i>	302
Математическое моделирование и автоматизированное конструирование ременных передач <i>В. И. Кравченко</i>	304
Секція 6 «Новітні матеріали і технології в сільськогосподарському машинобудуванні»	
Виробництво біметалевих виливків <i>Є. Г. Афтандіянц</i>	308
Відновлення окалини на виливках термічною обробкою <i>Є. Г. Афтандіянц</i>	310

Додаток Є

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



**ЗБІРНИК
ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ**

*IX Міжнародної науково-технічної конференції з нагоди
115-ї річниці від дня народження
доктора технічних наук, професора,
члена-кореспондента ВАСГНІЛ,
віцепрезидента УАСГН
КРАМАРОВА
Володимира Савовича
(1906-1987)*

«КРАМАРОВСЬКІ ЧИТАННЯ»

*24-25 лютого 2022 року
м. Київ*

В американській базі патентів є схожий по принципу роботи пристрій (рис. 3) [3]. Пристрій, який описаний у патенті, являє собою двоколісний мотоцикл з механізмом стабілізації в статичі, шляхом зміщення осі повороту коліс. На його базі можна розробити бажаний варіант пристрою. Однією з переваг такого варіанту буде більша швидкість пересування та краща поперервна стійкість.

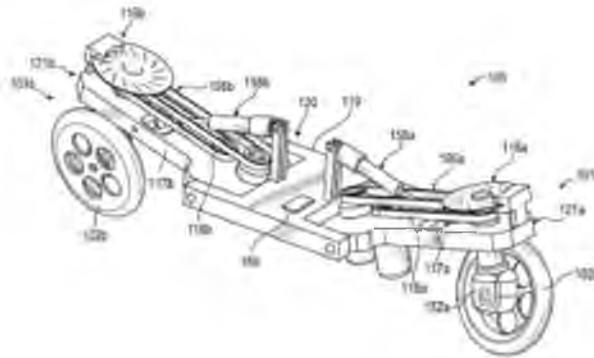


Рис.3. Робот-мотоцикл з автоматичним балансуванням

Список використаних джерел

1. Автоматичний візок фірми LOCUS. URL: <https://locusrobotics.com/> [доступ 17.02.2022]
2. Персональний робот-кур'єр Gita/ URL: <https://mygita.com/> [доступ 17.02.2022]
3. Робот-мотоцикл з механізмом автоматичного балансування. URL: <https://www.freepatentsonline.com/10486755.html> [доступ 17.02.2022]

УДК: 621.87

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОПТИМАЛЬНИХ РЕГУЛЯТОРІВ РУХУ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ „КРАН-ВАНТАЖ”

Ю. О. РОМАСЕВИЧ, доктор технічних наук, професор;

В. С. ЛОВЕЙКІН, доктор технічних наук, професор;

В. В. МАКАРЕЦЬ, аспірант;

О. І. ЩЕРБАК, студент;

E-mail: loxa.shcherback@ukr.net

Усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі при експлуатації кранів прольотного типу дозволяє підвищити їхню продуктивність роботи. Тому були

проведені теоретичні розрахунки, які дали змогу отримати налаштування (коефіцієнти) регуляторів руху динамічної системи „кран-вантаж”. Для доведення адекватності цих розрахунків були проведені відповідні експериментальні дослідження. Їхні результати наведено на рис. 1.

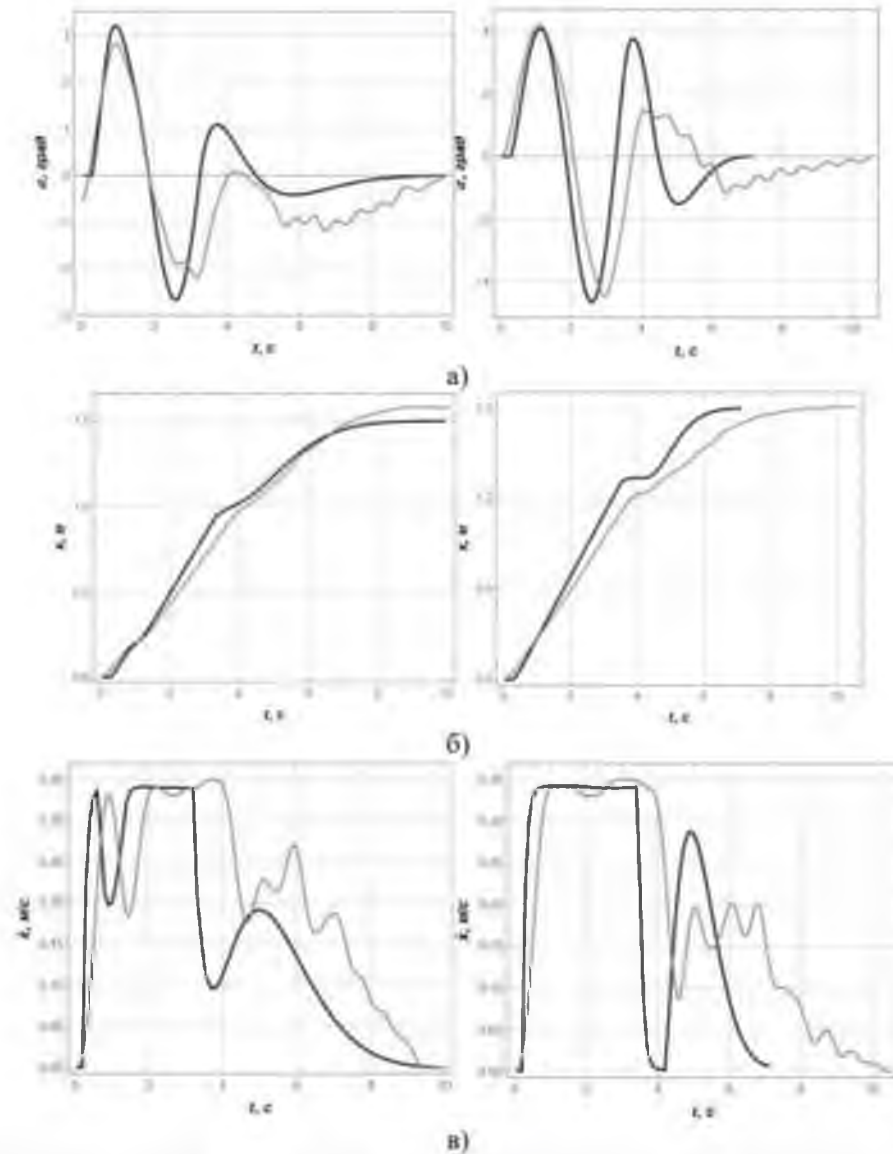


Рисунок 1 – Графіки теоретичних та експериментальних даних щодо фазових координат руху системи „кран-вантаж”: а) кут відхилення канату з вантажем від вертикалі; б) положення візка; г) швидкість візка

На рис. 1 сірим кольором зображено експериментальні дані, а чорним – теоретичні. Ліві графічні залежності відповідають першому набору коефіцієнтів регулятора, а праві – другому. Вони обидва – оптимальні. Відмінність цих наборів полягає у тому, що перший відповідає більш „м'якому” керуванню.

З рис. 1. видно певне відхилення даних експериментів від теоретичних розрахунків. Причини цих відхилень будуть встановлені у ході подальших досліджень.

УДК 621.87

ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЯГОВОЇ ЛЕБІДКИ

В. С. ЛОВЕЙКІН, д.т.н., проф.,

Ю. О. РОМАСЕВИЧ, д.т.н., проф.,

А. П. ЛЯШКО, к.т.н.,

Р. О. СТОРОЖ, студ.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: lovvs@ukr.net

Механізм переміщення тягової лебідки при роботі на ділянках перехідних процесів (пуск, гальмування) характеризуються наявністю динамічних навантажень, що виникають в елементах приводного механізму і в канаті. В канаті виникає нерівномірний рух, який пов'язаний із завантаженням та розвантаженням довгомірних деревних матеріалів, а також через властивості елементів механізму. Вони негативно впливають на елементи конструкції, і призводять до руйнування механізму, підвищення енергозатрат, погіршення роботи крана. При переході від реальної конструкції механізму переміщення тягової лебідки до його динамічної моделі нехтуємо масами канатів, валів, але враховуємо їхню жорсткість. При побудові динамічної моделі механізму переміщення тягової лебідки враховуємо зосереджені маси, залежності рушійних та гальмівних сил від частоти обертання ротора електродвигуна, а також зміну приведених мас U кожному конкретному випадку одні фактори є головними, а інші – другорядними. Модель не повинна бути громіздкою, повинна відображати основні елементи механізму переміщення тягової лебідки і їхні властивості, бути нескладною для полегшення розрахунків. Динамічна модель тягової лебідки представлена на рис. 1. Параметрами динамічної моделі

є: m_{n1} , m_{n2} – приведені маси першої (до пружного елемента) та другої (після пружного елемента) частин лебідки; F_{n1} , F_{n2} – приведені сили відповідно першої та другої частин лебідки; c_n – приведена до канату, що набігає на приводний барабан, жорсткість тягового органу системи; x_1 , x_2 – узагальнені координати першої та другої зведених мас динамічної моделі.

Програма та методика виконання експериментальних досліджень руху стрічкового конвеєра <i>В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, Р. А. Кульпін</i>	276
Нестійкі засоби індивідуального переміщення: гіроборд і гіроскутер <i>О. Г. Олексійко, Ю. О. Ромасевич</i>	278
Результати розрахунку оптимальних регуляторів руху динамічної системи „Кран-Вантаж” <i>Ю. О. Ромасевич, В. С. Ловейкін, В. В. Макарець, О. І. Щербак</i>	280
Дискретна модель удару при динамічному аналізі процесів гальмування стрічкових конвеєрів <i>І. О. Кадицало</i>	283
Пристрій для транспортування малогабаритних вантажів <i>Ю. О. Ромасевич, В. С. Ловейкін, О. Ю. Зарівний</i>	283
Результати експериментальних досліджень оптимальних регуляторів руху динамічної системи „Кран-Вантаж” <i>Ю. О. Ромасевич, В. С. Ловейкін, В. В. Макарець, О. І. Щербак</i>	286
Динамічний аналіз тягової лебідки <i>В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, А. П. Ляшко, Р. О. Сторож</i>	288
Динамічний аналіз гвинтового конвеєра <i>В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, А. П. Ляшко, В. Г. Коваль</i>	290
Оптимізація режиму руху електротрактора <i>В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, А. П. Ляшко, О. В. Бундалевський</i>	292
Оптимізація режиму пуску механізму підйому вантажу мостового крана <i>В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, А. П. Ляшко, Н. О. Потеряйко</i>	294
Оптимізація режиму пуску скребкового конвеєра <i>В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, А. П. Ляшко, А. С. Кривонос</i>	296
Обґрунтування профілю розпушувальної лапи у двомірному просторовому вимірі <i>М. С. Храмов</i>	298
Перспективні напрямки розвитку конструкцій ґрунтообробних машин <i>В. В. Мошко</i>	302
Математическое моделирование и автоматизированное конструирование ременных передач <i>В. И. Кравченко</i>	304
Секція 6 «Новітні матеріали і технології в сільськогосподарському машинобудуванні»	
Виробництво біметалевих виливків <i>Є. Г. Афтандіянц</i>	308
Відновлення окалини на виливках термічною обробкою <i>Є. Г. Афтандіянц</i>	310