

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра машинобудування, транспорту і зварювання

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра на тему


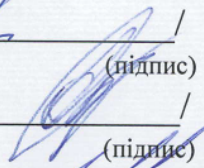
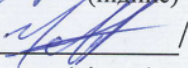
Професійна підготовка фахівців машинобудівного підприємства з вдосконалення інерційно-пружних параметрів мостових кранів вантажопідйомністю

10 т прольотами 10,5 - 34,5 м

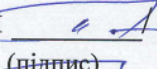
(тема кваліфікаційної роботи)

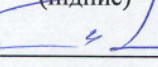
Виконав: студент 2 курсу, групи ДІТ- ПОТр-23мг
спеціальності: 015 Професійна освіта (Транспорт)

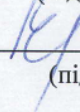
(код і найменування спеціальності)

 / Володимир ПОКОТИЛОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)
Керівник  / Олег ХОРОШИЛОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)
Рецензент  / Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  / Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль  / Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК  / Валентина СКОРКІНА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»

Кафедра машинобудування, транспорту і зварювання

Спеціальність 015 Професійна освіта (Транспорт)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МТіЗ

Подоляк О.С.

“12” 10 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

магістранту Володимиру ПОКОТИЛОВУ

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **Професійна підготовка фахівців машинобудівного підприємства з вдосконалення інерційно-пружних параметрів мостових кранів вантажопідйомністю 10 т прольотами 10,5 - 34,5м**

затверджена наказом по академії № 4801-5/3345 від “12” 10. 2024р.

2. Термін здачі магістрантом закінченої роботи “10” грудня 2024р.

Кран мостовий вантажопідйомністю 10 т., висота підйому 10 м., проліт крану 10.5 – 34.5 м, початкова швидкість 25 м/хв, група режиму роботи А4.

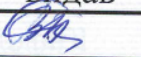
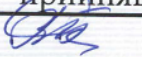
4. Зміст роботи/проекту (перелік питань, що їх належить розробити):

Вступ. 1. Аналіз стану питання. 2. Розрахункова схема і рівняння руху. 3. Розрахунок і дослідження динамічних навантажень. 4. Методичний розділ. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Презентація основних результатів виконаних досліджень. Роздатковий матеріал

6. Консультанти по роботі, із зазначенням відповідних її частин:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	
Методичний	Вероніка БАКАТАНОВА			

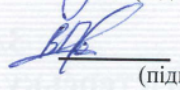
7. Дата видачі завдання “10” вересня 2024 р.

Керівник МКР


(підпис)

Олег ХОРОШИЛОВ
(ініціали, прізвище)

Завдання прийняв до виконання


(підпис)

Володимир ПОКОТИЛОВ
(ініціали, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК виконання МКР

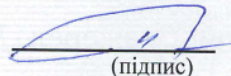
№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1.	Аналіз стану питання.	01.10.2024	
2.	Побудова розрахункової схеми і рівняння руху.	10.10.2024	
3.	Розрахунок і дослідження динамічних навантажень.	10.11.2024	
4.	Методичний розділ.	30.11.2024	
5.	Оформлення і захист дипломного проекту	05.12.2024	

Студент


(підпис)

Володимир ПОКОТИЛОВ

Нормоконтроль


(підпис)

Олег ПОДОЛЯК

Додаток 2 до Порядку проведення перевірки наукових праць, навчально-методичних видань та дипломних робіт (проектів) працівників та здобувачів вищої освіти на наявність запозичень з інших документів (нова редакція)

Введено в дію:

наказ ректора № 0204 -1/088 від 27.02.2020 р.

Протокол контролю оригінальності дипломної роботи (проекту)

Професійна підготовка фахівців машинобудівного підприємства з вдосконалення інерційно-пружних параметрів мостових кранів вантажопідйомністю 10 т прольотами 10,5 - 34,5 м
(назва роботи)

студента

ПОКОТИЛОВ Володимир Олегович
(прізвище, ім'я та по батькові)

науковий керівник

Хорошилов Олег Миколайович
(прізвище, ім'я та по батькові)

В результаті перевірки роботи в антиплагіатній інтернет-системі Strikeplagiarism.com встановлено наступні значення Коефіцієнтів Подібності

Коефіцієнт Подібності 1: 13,05,

Коефіцієнт Подібності 2: 6,53,

Сигнал „Тривога!": – немає; – є, кількість разів у тексті _____.

Вченою радою факультету (навчально-наукового інституту) затверджено наступні показники оригінальності (за значенням коефіцієнту K1):

не більше 20% – оригінальна робота,

від 21% до 50% – задовільно оригінальна робота,

від 51% до 90% – умовно оригінальна робота,

більше 90% – неоригінальна робота.

Відповідно до цього, робота може бути класифікована як:

оригінальна,

задовільно оригінальна,

умовно оригінальна,

неоригінальна.

Висновок:

робота може бути допущена до захисту,

необхідно провести розгляд Повного Звіту Подібності із залученням фахівців із тематики дипломної роботи (проекту).

Примітки Системного Оператора про виявлені запозичення:

Системний Оператор


(підпис)

Скоркін А.О.

(прізвище та ініціали)

28.11.2024

(дата)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 86 с., 19 рис., 6 таблиць., 4 додатка, 21 літературних джерел.

Об'єктом дослідження є процес професійної підготовки фахівців машинобудівного підприємства.

Предмет дослідження – професійна підготовка фахівців машинобудівного підприємства з вдосконалення інерційно-пружних параметрів мостових кранів вантажопідйомністю 10 т прольотами 10,5 - 34,5 м.

Метою дослідження є визначити, описати, теоретично обґрунтувати та проаналізувати процес професійної підготовки фахівців машинобудівного підприємства, розробити дидактичний проєкт факультативного заняття з теми «Динамічна модель і рівняння руху при підйомі вантажу з жорсткої основи мостовими кранами».

Наукова новизна полягає в тому, що удосконалено професійну підготовку фахівців машинобудівного підприємства з вдосконалення інерційно-пружних параметрів мостових кранів вантажопідйомністю 10 т прольотами 10,5 - 34,5 м.

Виконані багатофакторні дослідження динаміки підйому вантажу з жорсткої основи мостовими кранами вантажопідйомністю 10 т прольотами 10,5 - 34,5 м. Отримані рівняння регресії, що описують динамічні навантаження, що діють на металоконструкції кранів, при підйомі вантажу з початковими швидкостями $V_H = 25$ м/хв і $V_H = 0$ м/хв (робота двигуна на штучній механічній характеристиці при $P_{д(y=0)}/Q = 1.92$ і $P_{д(y=0)}/Q = 1.19$). Побудовані лінії рівних відгуків рівнянь регресії і проаналізовано взаємовплив різних чинників на динаміку підйому вантажу розглянутої групи кранів.

МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЯ, ДИНАМІЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ, ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ КРАНУ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КРАНУ, МЕХАНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ПРИВЕДЕНА МАСА, ЖОРСТКІСТЬ, ЧИННИКИ, ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ, ПОЛІНОМИ, РІВНЯННЯ РЕГРЕСІЇ.

ABSTRACT

Master's thesis: 86 pp., 19 figures, 6 tables, 4 appendices, 21 literary sources.

The object of the study is the process of professional training of machine-building enterprise specialists.

The subject of the research is professional training of machine-building enterprise specialists. on improving the inertial-elastic parameters of bridge cranes with a load capacity of 10 tons and spans of 10.5 - 34.5 m.

The purpose of the study is to define, describe, theoretically substantiate and analyze the process of professional training of machine-building enterprise specialists, to develop a didactic project of an optional lesson on the topic "Dynamic model and equation of motion when lifting a load from a rigid base with overhead cranes."

Multifactor studies of the dynamics of cargo lifting from a rigid base by bridge cranes with a load capacity of 10 tons with spans of 10.5 - 34.5 m were performed. The obtained regression equations describing the dynamic loads acting on the metal structure of the cranes when lifting the load at initial speeds $V_H = 25$ m/min and $V_H = 0$ m/min (engine operation on an artificial mechanical characteristic at $P_{Д(\dot{y}=0)}/Q = 1.92$ i $P_{Д(\dot{y}=0)}/Q = 1.19$).

Lines of equal responses of the regression equations were constructed and the interaction of various factors on the dynamics of cargo lifting of the considered group of cranes was analyzed.

METAL STRUCTURE, DYNAMIC LOADING, DYNAMIC MODEL OF A CRANE, MATHEMATICAL MODEL OF A CRANE, MECHANICAL CHARACTERISTICS, REDUCED MASS, STIFFNESS, FACTORS, EXPERIMENT PLANNING, POLYNOMIES, REGRESSION EQUATIONS.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ МАШИНО- БУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВ	9
2. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ	18
2.1 Вибір каната	24
2.2 Вибір двигуна	25
2.3 Вибір редуктора	25
2.4 Вибір гальма	26
3. РОЗРАХУНКОВА СХЕМА І РІВНЯННЯ РУХУ ПРИ ПІДЙОМІ ВАНТА- ЖУ З ЖОРСТКОЇ ОСНОВИ МОСТОВИМИ КРАНАМИ	27
3.1 Загальні положення	27
3.2 Динамічна і математична моделі крану	29
3.3 Розрахунок коефіцієнтів диференціальних рівнянь руху	31
3.4 Введення в математичну модель приведеної сили приводу	33
3.5 Приведення рівнянь руху до виду, зручного для чисельної інтеграції	35
3.6 Аналіз процесу підйому вантажу з жорсткої основи	36
4. РОЗРАХУНОК І ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ МО- СТОВИХ КРАНІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕОРІЇ ПЛАНУВАННЯ ЕКС- ПЕРИМЕНТУ	47
4.1 Загальні відомості і основні етапи дослідження	47
4.2 Розрахунок динамічних навантажень	48
4.3 Вибір плану і проведення експерименту	50
4.4 Розрахунок коефіцієнтів регресії	50
4.5 Перевірка адекватності моделі	57
4.6 Побудова ліній рівних відгуків і їх аналіз	56
4.7 Аналіз моделей другого порядку	68
5. РОЗРОБКА ДИДАКТИЧНОГО ПРОЄКТУ ФАКУЛЬТАТИВНОГО ЗА- НЯТТЯ З ТЕМИ «ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ І РІВНЯННЯ РУХУ ПРИ ПІД- ЙОМІ ВАНТАЖУ З ЖОРСТКОЇ ОСНОВИ МОСТОВИМИ КРАНАМИ»» ДЛЯ ФАХІВЦІВ МАШИНОБУДІВНОГО ПІДПРИЄМСТВА	71
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	83
ДОДАТКИ:	86

ВСТУП

Машинобудування відрізняється великою різноманітністю технологічних процесів та відповідного обладнання для їх реалізації. Загалом обладнання машинобудування як галузі можна поділити на три великі групи: енергетичне, технологічне та підйомно-транспортне.

Енергетичне обладнання має на меті створення джерела енергії, необхідної для руху машини. До нього відносяться електродвигуни, двигуни внутрішнього згоряння та дизелі, паросилові установки, гідромашини, компресори.

Технологічне обладнання призначене для безпосереднього впливу на матеріали та напівфабрикати з метою їх формоутворення та формозміни, а також складання отриманих деталей в окремі вузли та агрегати. До нього відносяться ливарне обладнання, металорізальні верстати, зварювальне обладнання, ковальсько-пресове обладнання, обладнання для окремих складальних операцій, вимірвальна техніка та прилади контролю.

Підйомно-транспортне обладнання використовується для підйому та переміщення вантажів та обслуговуючого персоналу за своїм призначенням та конструктивним виконанням дуже різноманітно. Це і механізми ручним приводом (талі, візки, лебідки, домкрати), та більш складне обладнання (крани, конвеєри, підйомники, навантажувачі та ін.).

Наше дослідження присвячено класифікації кранів, їх загальні та кінематичні схеми, опис пристрою окремих механізмів, зазначені їхні переваги та недоліки, дано розрахунок діючих навантажень.

Об'єктом дослідження є процес професійної підготовки фахівців машинобудівного підприємства.

Предмет дослідження – професійна підготовка фахівців машинобудівного підприємства. з вдосконалення інерційно-пружних параметрів мостових кранів вантажопідйомністю 10 т прольотами 10,5 - 34,5 м..

Метою дослідження є визначити, описати, теоретично обґрунтувати та проаналізувати процес професійної підготовки фахівців машинобудівного підприємства, розробити дидактичний проєкт факультативного заняття з теми «Динамічна модель і рівняння руху при підйомі вантажу з жорсткої основи мостовими кранами».

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати актуальність професійної фахівців машинобудівного підприємства.

2. Теоретично обґрунтувати, розробити дидактичний проєкт факультативного заняття з теми «Математичне моделювання процесу рекуперативного гальмування транспортного засобу».

Методи дослідження: теоретичні: аналіз педагогічної, психологічної, наукової, методичної, технічної літератури з проблеми професійної підготовки фахівців машинобудівного підприємства; для визначення понятійно-категоріального апарату і напрямків магістерського дослідження; структурний аналіз і методи моделювання для проєктування факультативного заняття.

Наукова новизна полягає в тому, що удосконалено професійну підготовку фахівців машинобудівного підприємства з вдосконалення інерційно-пружних параметрів мостових кранів вантажопідйомністю 10 т прольотами 10,5 - 34,5 м.

Практична цінність роботи полягає в тому, що було розроблено дидактичний проєкт факультативного заняття з теми «Динамічна модель і рівняння руху при підйомі вантажу з жорсткої основи мостовими кранами».

Структура та загальний обсяг роботи. Робота складається з української та англійської анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 1

АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВ

1.1. Проблеми підготовки фахівців машинобудівних підприємств

Роль інженерів у світі велика. Вона визначається дедалі більше ускладнюється взаємозв'язком технічних, соціальних та економічних завдань. Суспільство, що глобалізується очікує від інженерів вирішення поглиблених протиріч між підвищенням якості життя, стійким розвитком та питаннями безпеки, здоров'я, збереження довкілля. Щоб відповісти на виклики глобалізації та високої конкуренції на міжнародному ринку товарів та послуг, інженери покликані не тільки вирішувати традиційні технічні завдання, але й мають бути здатні до інновацій, розуміти бізнес-контекст інженерної діяльності, мати міждисциплінарними навичками, комунікативними компетенціями, лідерськими якостями, а також адаптуватися до умов, що змінюються, і виявляти готовність до безперервного навчання.

Система освіти у 80-ті роки була орієнтована забезпечення високої якості фундаментальної інженерної підготовки, у період були чітко відпрацьовані механізми прогнозування потреби виробництва у кваліфікованих кадрах та розподілу випускників. З переходом до ринкової економіки ці механізми мали перебудуватися на основі саморегулюючої взаємодії попиту та пропозиції. Однак ринок праці та освіти виявилися не в змозі узгоджувати можливості професійної освіти та потреби виробництва, тим більше галузі інноваційних, проривних технологій. Це виявилось в невідповідність обсягів, структури та змісту підготовки фахівців перспективам розвитку високотехнологічних виробництв.

Подолання цих протиріч, як свідчить практика, виявилось можливим на основі інтеграційних механізмів у вигляді цільової підготовки кадрів для підприємств, розвитку форм соціального партнерства, впровадження дуальної

форми навчання, формування системи суспільно-професійної оцінки якості освіти та ін.

Установи початкової, середньої та вищої профосвіти об'єднані в єдину систему. Студенти філії одночасно з навчанням в ЗВО працюють на різних робочих місцях та посадах на самому підприємстві, яке виплачує студентам додаткову стипендію та укладає з ними договір про працевлаштування після закінчення навчання в ЗВО.

Машинобудівний клас кластер «Новокраматорський машинобудівний завод» та Донбаська державна машинобудівна академія – спільний освітній проект.

За п'ять років реалізації цього проекту відбулися два випуски бакалаврів. Фахівці першого випуску на підприємстві працювали вже рік. Все це підштовхує до аналізу пройденого шляху та визначення перспектив розвитку кластера.

Ціль проекту: професійна цільова підготовка кадрів для підрозділів та організацій НКМЗ з урахуванням вимог підприємства до їхньої компетентності, на основі послідовно суміщеного отримання початкової професійної підготовки, вищого професійного освіти, проблемно-орієнтованого навчання з використанням сучасних методів та технологій навчання. Напрямок, яким ведеться підготовка, – «Конструкторсько-технологічне забезпечення автоматизованих машинобудівних виробництв».

Інтеграція рівнів професійної освіти досягається за рахунок послідовно суміщеного отримання під час навчання у вузі робітничих професій, а згодом бакалавра техніки та технології. Учасники проекту визнали, що у сучасній системі вищого технічного освіти практично відсутня навичкова підготовка студентів, і визначили як одного з варіантів вирішення даної проблеми паралельну підготовку студентів інженерних напрямів за робітничими професіями. Подібне «дворівневе» навчання дозволяє майбутнім інженерам придбати потрібні прикладні навички та зрозуміти професію інженера зсередини, на рівні володіння.

У первісному варіанті моделі машинобудівного освітнього кластера передбачалося, що студенти отримають тільки одну робочу спеціальність – токаря чи фрезерувальника, проте згодом, виходячи з логіки, що, не знаючи конвеєра, не можна зрозуміти суть автомобільного виробництва, було додано ще одну професію – слюсар механозбірних робіт.

Інноваційна спрямованість моделі кластера визначилася інтеграцією освітньої логіки (забезпечення отримання компетенцій, необхідних практичної діяльності) та економічної (оптимізація управління людськими ресурсами) логіки. Ідея інтеграції освіти та виробництва реалізується шляхом поєднання навчання з роботою на підприємстві, реалізації технологій проблемно- та практикоорієнтованого навчання, участі студентів та викладачів у процесах покращень на підприємстві (у науково-дослідних та дослідно-конструкторських роботах, раціоналізаторській та винахідницькій діяльності, організаційних та інвестиційних проектах).

В результаті реалізації цього проекту підприємство передбачає отримати такі переваги:

- підготувати кваліфікований персонал, зацікавлений та залучений до досягнення стратегічних цілей компанії, який здобув освіту з враховуючи сучасні вимоги виробництва;
- зорієнтувати весь процес навчання на вирішення виробничих проблем та завдань;
- підготувати випускників до самостійної роботи, адаптувати їх до підприємства, прищепити їм нову виробничу культуру та культуру навчання, а також навички роботи у міжфункціональних командах та проектній діяльності.

На відміну від звичайної схеми здобуття освіти, студенти, які навчаються за цією системою, отримують такі переваги:

- дві кваліфікації за період навчання (робочий, бакалавр);
- широкий додатковий набір компетенцій;
- можливість отримання іменної стипендії підприємства;

- можливість заробляти під час навчання в ЗВО;
- готовність до самостійної роботи вже на старших курсах, що сприяє швидкому кар'єрному просуванню;
- можливість зробити кар'єру через інтегровану в бізнес гнучку систему поетапного освіти: від широкоуніверсальних робітників до поліпрофесійних інженерів та менеджерів;
- НКМЗ стаж для участі в соціальних програмах.

Виходячи з припущення, що інвестиції в особисту освіту ефективні, коли сумарні очікувані доходи, пов'язані з наявністю освіти, суттєво перевищують сумарні витрати на його здобуття, ми зробили спробу розрахувати термін окупності вкладених особистих інвестицій студентів на здобуття вищої освіти з напрямку «Конструкторсько-технологічне забезпечення автоматизованих машинобудівних виробництв» в рамках машинобудівного освітнього кластера.

Сумарні доходи ми ухвалили на рівні середньої нарахованої заробітної плати працівників, які мають вищу освіту. Сумарні витрати у разі навчання на бюджетній основі складаються лише із втраченої заробітної плати, що з'являється у зв'язку з тим, що у процесі вкладення людський капітал працівникові не вдається працювати взагалі чи доводиться працювати у режимі неповного робочого дня. За час навчання у машинобудівному освітньому кластері «Новокраматорський машинобудівний завод» та Донбаська державна машинобудівна академія» студенти знижують сумарні витрати на навчання за рахунок стипендії НКМЗ, безкоштовного отримання робітників професій, можливості працевлаштування, участі у проектах, безкоштовних тренінгах, майстеркласах та ін.

Таким чином, термін окупності, розрахований за доходами, дисконтованими на момент розрахунків, склав 5 років проти терміну окупності у 8 років у разі навчання на бюджетній основі з цього ж напрямку, але поза проектом кластера. Надалі очікується подвоєння прибутковості на вкладення освіти.

1.2. Зміст навчання фахівців машинобудівного підприємства

Концепція підготовки потенційного інженерного персоналу НКМЗ заснована на поліпрофесійному підході, припускає, що сучасний інженер повинен не тільки володіти знаннями та вміннями в власне технічній сфері, а й володіти методами організації виробництва та праці, управління якістю, проектами, економікою. Бізнесу потрібні молоді фахівці з якісно новим рівнем компетентності, адаптації до виробництва та мотивації.

У них мають бути сформовані системні уявлення про передрияті та професії (як з точки зору функціональної визначеності, так і з точки зору застосовності та взаємозв'язку вивчених дисциплін у практичній діяльності).

На думку багатьох роботодавців, рівень власне інженерної підготовки необхідно значно підвищити методи та інструменти розробки продукту та процесів, методів пошуку нових технічних рішень, автоматизації проектування, розвитку технічної творчості та ін. Випускники повинні добре представляти реальне виробництво і бути його частиною – знати та розуміти технологічні та трудові процеси, володіти робітниками професіями з профілю підготовки.

Вимоги підприємства до якості випускників були акумульовані у модель компетенцій випускника ЗВО, яка, поряд із вимогами державних освітніх стандартів вищої професійної освіти, стала відправною точкою для розробки основної освітньої програми за напрямом підготовки.

Відповідно до цих компетенцій у навчальний план напряму підготовки були включені такі дисципліни: «Основи автомобілебудування», «Управління проектами», «Управління якістю», «Обережне виробництво», «Розробка нового продукту», «Керівництво людьми» та ін. Дисципліни професійного циклу містять окремі модулі, введені за рекомендацією споживача.

Основна увага на 1-му курсі на додаток до програми вищої школи приділяється профорієнтаційним програмам та програмам організаційної адаптації (знайомство з підприємством). В рамках інноваційної програми дисципліни «Вступ у технологію машинобудування» студенти у процесі відвідування

заводів та роботи з їх головними технологами набувають першого досвід виявлення та формулювання реальних виробничих завдань підприємства.

На 2-му та 3-му курсах студенти освоюють робітничі професії, підключаються до участі у проектних групах удосконалення виробничої системи відкритого акціонерного товариства «НКМЗ» поєднують навчання з роботою з робітничої професії. Робота у тимчасових (проекти, робочі групи) та постійних (робочі бригади) трудових колективах сприяє їх соціальній та професійній адаптації.

Під час практик 30% студентів 2–3 курсів регулярно подають кайдзен-пропозиції. Здатність працювати над проектами у студентів формується також у ході їх виконання на замовлення структурних підрозділів підприємства у межах окремих дисциплін.

На 3-му курсі участь у робітників групах та проектах передбачає велику самостійність: самостійне формування команд, підбір учасників і реалізацію проектів. На цьому курсі студент робить важливий крок – вибирає кар'єрну лінію технічного спеціаліста чи лінійного керівника. Підсумки асесменту, проведеного НКМЗ, демонструють високий рівень професійного самовизначення студентів: 80% майбутніх випускників визначились з вибором конкретного підрозділу як місця свого майбутнього працевлаштування, як технолога збираються працювати 43%, архітектора – 6%, робітника – 6%, міняти профіль хочуть 12%, не визначились з вибором, оскільки ще не працювали технологами, – 33%.

На 4-му курсі навчання поєднується з роботою як технічний спеціаліст в інженерних службах або лінійного керівника безпосередньо у виробничих підрозділах.

Найбільш успішні студенти беруть участь у проектах науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, наймасштабнішими з яких стали проекти «Перспективні екологічні колісні транспортні засоби з високими споживчими властивостями та низьким рівнем експлуатаційних витрат» та «Оптимізація собівартості автобусних шасі НКСЗ».

Значна частина управлінських впливів від початку роботи кластера була спрямована на проектування організаційної структури та системи організаційно-методичного забезпечення.

Організаційний механізм кластера є цілісною системою дій щодо реалізації інноваційної кластерної концепції підготовки кадрів.

Машинобудівний освітній кластер реалізує свою діяльність на основі договору про співробітництво в галузі цільової підготовки кадрів, положень про машинобудівний освітній кластер, стимулювання праці викладачів кластера, конкурс «Кращий студент кластера», корпоративну програму «Професійний старт», про іменні стипендії НКМЗ та ін.

Навчання робітничим професіям токаря та фрезерувальника здійснюється у Краматорському ВПУ, слюсаря механозбірних робіт – на НКМЗ. Навчання проводиться за рахунок коштів майбутнього роботодавця.

Навчання студентів відповідно до підходів, закладених в основу концепції проекту, вимагало вжиття організаційних заходів щодо системного підвищення кваліфікації викладачів та забезпечення відповідності змісту та технологій навчання сучасних вимог виробництва.

Це завдання вирішується за рахунок залучення викладачів навчального закладу до навчання у корпоративних програмах НКМЗ та організації їх стажувань на підприємстві, однією з умов проходження яких є розробка рішень виробничих проблем НКМЗ. Донбаська державна машинобудівна академія розробила свою систему підвищення кваліфікації викладачів відповідно до завдань кластера, що містить модулі «Впровадження проектного навчання в інженерну освіту», «Розробка нового продукту», «Основи бережливого виробництва», «Ефективна презентація», «Інтенсивні технології навчання».

Висококомпетентні керівники та спеціалісти НКМЗ залучаються для проведення інтенсивних занять у формі майстер-класів.

Вони показали наступне: професію токаря опанували 112 осіб, фрезерувальника – 96, слюсаря механозбірних робіт (введено з 2010 року) – 72 особи.

У рамках корпоративної програми «Професійний старт» було проведено

26 майстеркласів, 17 екскурсій, 7 презентацій та ділових ігор.

Корпоративною дистанційною системою навчання «РОСТА» ВАТ «НКМЗ» скористалися 227 осіб, брав участь у тренінгах – 121.

Анкетне опитування студентів машинобудівного освітнього кластера «Новокраматорський машинобудівний завод» та Донбаська державна машинобудівна академія», проведений соціологічною лабораторією ВАТ «КАМАЗ», показав такі результати: половина студентів вважають, що їхній рівень підготовки вищий, ніж в інших вишах, 47% - він не поступається іншим ЗВО, 72% студентів орієнтовані на роботу на ВАТ «НКМЗ», 3% студентів хочуть працювати на іншому підприємстві, 25% бажають виїхати з міста (для продовження освіти).

До гідностей такої системи навчання студенти відносять: наявність можливості здобути практичні вміння (100%), ознайомитись з майбутнім місцем роботи (97%), гарантоване працевлаштування (95%); орієнтація навчання на вимоги виробництва (86%).

Першими випускниками машинобудівного освітнього кластера стали 49 осіб, з них працевлаштувалися на НКМЗ 23 особи, 21 випускник продовжив учнівський договір з підприємством у зв'язку з продовженням навчання у магістратурі.

Якісну характеристику випускникам кластера дають результати нової системи оцінки персоналу «Оцінка сили колективу», яка застосовується на підприємстві замість атестації персоналу. У ході щорічної колегіальної оцінки результатів роботи та робочої поведінки за минулий період оцінюється сила колективу загалом і сила кожного працівника індивідуально, розглядаються готовність та здатність до виконання завдань майбутнього періоду, проводиться диференціація керівників та спеціалістів, формується кадровий резерв. З випускників машинобудівного освітнього кластера, які проходили оцінку, 16,65% потрапили до категорію класу «А», представники якого задають стандарт найвищої ефективності, постійно забезпечуючи високі результати, надихаючи та мотивуючи інших, а 66,7% опинилися у категорії «В», що показує

стійкі добрі середні результати, що відповідають очікуванням роботодавця. До категорії «С»

були віднесені співробітники, які ледве дотягують до прийнятних результатів, їх виявилось 16,65%. Загалом диференціація колишніх учасників кластера Вже перший рік роботи відповідає диференціації працівників по компанії.

Висновки до розділу 1

В межах першого розділу нами було виконано визначення актуальності професійної підготовки педагогів професійного навчання машинобудівного напрямку. Таким чином, вже відправні результати реалізації проекту машинобудівного освітнього кластера, по-перше, доводять можливість подолання нормативних, людських, фінансових, організаційних обмежень двох різних систем – освітньої та виробничої, по-друге, дозволяють зробити висновок про ефективність освітнього кластера як моделі цільової підготовки інженерних кадрів, по-третє, допускають можливість тиражування цієї моделі в інших варіантах співробітництва вузів та підприємств у підготовці кадрів.

Ініціатори машинобудівного освітнього кластера бачать перспективи його розвитку як моделі надалі акцентування змісту освіти в кластері на підготовці інженерів-інноваторів та здійсненні другого комплексу організаційних заходів – розроблення системи оцінки якості підготовки випускників.

2. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

Дослідженням динаміки підйому вантажу вантажопідйомними машинами присвячено велике число робіт вітчизняних і зарубіжних авторів. З них, передусім, слід зазначити дослідження окремих авторів, головним чином, з питання визначення динамічних коефіцієнтів для металоконструкцій кранів і вантажних канатів [1, 2], у яких обґрунтовуються чисельні значення динамічних коефіцієнтів для розрахунків металоконструкцій мостових кранів.

Конструкції кранів є сукупністю мас, сполучених між собою пружними ланками. Ці конструкції мають велике число ступенів свободи, і точне рішення рівнянь руху для них зв'язане зі значними труднощами. Тому при дослідженні динаміки металоконструкцій кранів або механізмів переходять до розгляду спрощених динамічних схем за рахунок приведення мас в окремі точки, сполучені між собою пружними ланками приведеної жорсткості.

Дослідження динамічних явищ, що виникають при відриві вантажу від основи, дано в роботі [3] як без урахування, так і з урахуванням впливу мас металоконструкції, що несе, на величину максимальних динамічних навантажень.

Аналіз показує, що збільшення маси несучої металевої конструкції приводить до збільшення цього зусилля. Крім того, автор рекомендує конструювати мостові крани можливо жорсткішими для того, щоб зменшити величину динамічних навантажень. Проте, як показують наші розрахунки, збільшення жорсткості металоконструкції не завжди призводить до зменшення динамічних дій на елементи крану, а обґрунтовані рекомендації для виборів оптимальних параметрів крану можуть бути отримані тільки на підставі вивчення спільного впливу визначальних чинників на величину динамічних навантажень.

Динамічні явища в металоконструкціях знайшли своє освітлення в працях М.М. Гохберга [4, 5], у яких розглядається не лише динаміка металоконструкцій кранів, але і їх розрахунок з урахуванням втоми металу. Прийнята автором

при розгляді динаміки підйому розрахункова схема виключає з розгляду вплив мас механізму, що обертаються, і силову дію приводу і не дозволяє оцінити розвантажуючої дії зворотного зв'язку, внаслідок чого результати розрахунків за формулами М.М. Гохберга дають для швидкохідних кранів дещо завищені значення динамічних навантажень.

Питанням динаміки підйому вантажу присвячена робота С. Озимського, що містить короткий аналіз різних методик розрахунку. Грунтуючись на тому, що швидкість підйомних канатів трохи змінюється при відриві вантажу від основи і, приймаючи її постійною, автор переходить до розгляду двохмасової розрахункової схеми. Аналізуючи другий етап руху, автор вказує, що канат в цьому випадку працює як елемент з нескінченно великою жорсткістю.

Ця обставина дозволяє перейти до розгляду одномасової системи яка коливається, що дозволяє отримати вираження для коефіцієнта динамічності у вигляді:

$$\psi = 1 + 0,9 \frac{C_m \cdot C_e}{C_m + C_e} \cdot \frac{V}{\sqrt{g C_m}} \cdot \frac{\sqrt{Q_s + Q_u}}{Q_u} \quad (1.1)$$

де C_m - жорсткість металоконструкцій;

C_e - жорсткість канатної підвіски вантажу;

V - номінальна швидкість підйому;

Q_s - приведена вага моста і вага візка;

Q_u - вага вантажу.

Формула(1.1) більше відповідає фізичній суті процесу підйому вантажу, чим прийняті стандартом коефіцієнти динамічності, залежні від нормативного режиму роботи. Проте допущення про постійність жорсткості канатної підвіски вантажу вносить відому неточність, тим більшу, чим менше напруги в канаті.

А. Люттерот дає порівняльну оцінку погрішності при визначенні інерційної сили при підйомі вантажу від основи в двохмасовій системі і в одномасовій спрощеній системі, вказуючи на істотну відмінність в інерційних навантаженнях для цих схем.

Автор рекомендує формулу для визначення динамічного навантаження, прийняту нормами (ГДР) TGL 13470:

$$P_{IH} = Q \cdot 0,053 \frac{\xi \cdot V}{\sqrt{f}} \quad (1.2)$$

де: V - швидкість підйому, м/мін;

f - переміщення вантажу внаслідок прогину конструкції від власної ваги і вантажу, що піднімається, подовження канатів, см;

ξ - коефіцієнт, який залежить від типу двигуна, системи управління і частоти підйому вантажів, близьких до номінального.

Слід зазначити, що прагнення отримати зручне для визначення динамічних навантажень вираження, що спонукало автора перейти до спрощеної одномасової системи, не дозволяє врахувати в розрахунках дійсний закон зміни моменту двигуна, дійсний розподіл мас та ін. чинники. В результаті рекомендована формула хоча і краще відбиває природу перехідного процесу, але все ж далека від реального відображення протікаючих явищ. Як вказує Г. Дресиг, в роботі А. Люттерота неправильно застосований для знаходження початкових умов закон кількості рухів і це призводить до неправильного трактування впливу приведеної маси моста на величину коефіцієнта динамічності. Згідно з дослідженнями Дресига, збільшення приведеної маси моста призводить до збільшення динамічної дії на металоконструкцію.

У обох джерелах вплив приведеної маси моста на величину коефіцієнта динамічності отримує одностороннє пояснення. Повна відповідь може бути отримана при обліку спільного впливу різних чинників на величину динамічної дії. Приведені нижче дослідження показують, що вплив маси моста залежить від абсолютних значень інших визначальних чинників і збільшення її може призводити як до помітного збільшення коефіцієнта динамічності, так і його деякому зменшенню.

Характер динамічних процесів ілюструється розрахунком, виконаним К. Кербером. Автор вважає, що не можна говорити про динамічний коефіцієнт загалом, оскільки відношення динамічного навантаження до статистичного для

металоконструкції крану і механізму підйому істотно різні як за величиною, так і в часі. Найбільш несприятливе навантаження механізму підйому виникає у тому випадку, коли візок стоїть у кінцевої балки і пружність металоконструкції не бере участь в сприйнятті динамічного навантаження, тоді як найбільш несприятливий випадок навантаження металоконструкцій крану виникає при розміщенні візка в середині моста.

Автором розглядається два етапи руху: до і після відриву вантажу від основи. Система диференціальних рівнянь для другого етапу зводиться до лінійного диференціального рівняння четвертого порядку відносно прогину моста. Після рішення цього рівняння можуть бути знайдені кут повороту барабана і подовження канату. На конкретному прикладі показується, що на зміні приведеної швидкості каната на барабані коливальні процеси практично не відбиваються, що пояснюється істотною величиною приведенного моменту інерції частин приводу, що обертаються. Автор вказує на наявну розбіжність в значеннях коефіцієнтів динамічності, знайдених за уточненим розрахунком і за стандартом ГДР TGL 13470.

Для усіх названих робіт характерне те, що при визначенні динамічних навантажень в розрахунок не вводиться дійсний закон зміни моменту двигуна і не враховується зворотний зв'язок приводу.

У роботі Г. Дресига як модель крану, що коливається, прийнята трьохмасова система, що дозволяє краще врахувати конструктивні параметри крану. Зміна приведеної сили двигуна в період пуску прийнята за законом похилої прямої. У роботі відзначається можливість приведення усіх типів крану до єдиної розрахункової моделі і аналізується вплив окремих чинників системи кран-вантаж на величину коефіцієнта динамічності. Спільний вплив декількох чинників в роботі Г. Дресига не досліджений і це не дозволяє пояснити вплив окремих величин на динамічні навантаження при підйомі вантажу з підхопленням.

Вичерпна методика визначення динамічних навантажень при роботі механізму підйому з вантажем, що висить на канаті, викладена в роботі С.А.

Козака [6]. До основного розрахункового випадку відноситься підйом вантажу з основи, коли динамічні навантаження мають максимальні значення. Знаходження навантажень для такого режиму є найбільш складним і менш визначеним, оскільки на їх формування роблять вплив багато чинників, головними з яких є :

- спосіб управління двигуном(послідовність операцій управління);
- тип контролера механізму підйому;
- вид основи, з якої піднімається вантаж;
- форма і вид вантажу;
- якість строповки вантажу;
- зміна рушійного зусилля двигуна при зміні натягнення канатів;
- зміна жорсткості підвісу вантажу в процесі натягнення канатів.

Деякі з цих чинників можна врахувати в аналітичному рішенні, інші ж чинники необхідно так враховувати, щоб при певному їх значенні отримати умови виникнення максимуму динамічних навантажень.

Крім того, в кранах зміна одного параметра майже завжди призводить до зміни інших, пов'язаних з ним параметрів. Наприклад, при зміні жорсткості моста c_0 змінюється маса m_0 , при зміні швидкості підйому вантажу - маса m_1 . Тому, щоб з'ясувати залежність і зусилля в металоконструкції P_K^{max} і натягнення в канатах P_M^{max} від параметрів крану, потрібно порівняти їх значення для однотипних кранів, що розрізняються тільки декількома параметрами.

Рівень максимальних динамічних навантажень, що діють на металоконструкції кранів досить великий, особливо з великим прольотом і малою висотою підйому. Тому для таких кранів необхідно вживати конструктивні заходи, спрямовані на зниження динаміки, що веде до зменшення металоємності кранів і збільшення їх терміну служби.

Наявна в літературі пропозиція про зниження рівня динамічних навантажень за рахунок зменшення приведених мас частин механізму, що обертаються, важко реалізується і, головне, не підтверджується розрахунками. При зменшенні цих мас дещо знижується кутова швидкість двигуна до моменту

відриву вантажу від основи, але при роботі двигуна на жорсткій природній характеристиці це зниження невелике.

Для істотного зниження рівня динамічних навантажень пропонуються наступні заходи:

- введення в систему підвіски вантажу додаткового пружної ланки (найраціональніше це можна зробити шляхом підпружинювання зрівняльного блоку при парній кратності поліспасти механізму підйому або одного з верхніх блоків канатного поліспасти при його непарній кратності);

- застосування автоматичного блокування, що виключає підйом вантажу "з підхопленням" при роботі двигуна на усіх механічних характеристиках окрім найм'якшої;

- використання магнітних (замість силових) контролерів для механізму підйому, за наявності яких знижується вірогідність підйому вантажу "з підхопленням";

- при експлуатації кранів монолітні вантажі рекомендується ставити на дерев'яні бруси (при підйомі вантажів з такої податливої основи рівень динамічних навантажень буде мінімум на 10.15% нижче максимально можливого).

Аналіз опублікованих робіт показав, що в області динаміки вантажопідйомних кранів є ще ряд невирішених проблем. Передусім, це відноситься до багатофакторних досліджень динаміки кранів, які дозволяють розкрити механізм взаємовпливу різних чинників на динамічні процеси, тобто глибше вивчити закономірності перехідних процесів.

Ця робота присвячена багатофакторним дослідженням динаміки підйому вантажу мостовими електричними кранами вантажопідйомністю 10 т прольотами 10,5 - 34,5 м при роботі двигунів на штучних механічних характеристиках з $P_{д(\dot{y}=0)}/Q = 1.92$ та $P_{д(\dot{y}=0)}/Q = 1.19$ і початковими швидкостями приводів $V_H = 0,21$ м/с і $V_H = 0$ м/с.

Результати досліджень можуть бути використані заводами-виготівниками кранів для уточненого визначення динамічних навантажень на металоконструкції і вантажні канати для збільшення рівня безпеки при роботі на

досліджуваних машинах і продовження їх терміну служби, а також для вибору оптимальних параметрів системи «привід - металоконструкція - вантаж» при конструюванні нових кранів.

2.1. Вибір каната

Максимальне натягнення в канаті при підйомі вантажу визначимо по формулі:

$$S_{max} = \frac{Q}{z \cdot \eta_n} = \frac{100000}{4 \cdot 0.985} = 25600 \text{ Н} \quad (2.1)$$

де z - кількість гілок, на яких висить вантаж

$$z = u \cdot a = 2 \cdot 2 = 4$$

η_n - к.п.д. поліспасти

$$\eta_n = \frac{1 - \eta_6^u}{(1 - \eta_6)^u} = 0.985 \quad (2.2)$$

Канат вибираємо по розривному зусиллю, згідно з Правилами [8]

$$S_p \geq S_{max} \cdot k_3 = 25600 \cdot 6 = 153600 \text{ Н} \quad (2.3)$$

де k_3 - коефіцієнт запасу міцності каната, що приймається згідно режиму роботи (ПВ=40 %).

Вибираємо канат сталевую типу ЛК-РО 6×36+1 о.с.(ГОСТ 7668-69) діаметром $d=16,5 \text{ мм}$ при розрахунковій межі міцності $\sigma=1800 \text{ Н/мм}^2$, площею перерізу усіх дротів $F_k=105,24 \text{ мм}^2$ і розривним зусиллям $S_p=155000 \text{ Н}$.

Діаметр блоку і барабана по центру намотуваного каната:

$$S_p = d \cdot (e - 1) = 16,5 \cdot (25 - 1) = 396,5 \text{ мм} \quad (2.5)$$

Приймаємо $D_6 = 400 \text{ мм}$

Повна довжина барабана:

$$L_6 = 2 \cdot L_H + 2 \cdot a + b = 2 \cdot 485 + 2 \cdot 90 + 50 = 1200 \text{ мм} \quad (2.5)$$

де L_H - довжина нарізки на одній половині барабана;

a - довжина ділянки з кожного боку барабана, використувана для закріплення каната;

b - відстань між правою і лівою нарізками.

Барaban відлито з чавуну СЧ15-32 з межею міцності на стискування $\sigma = 70000 \text{ Н/см}^2$.

2.2. Вибір двигуна

Потужність двигуна механізму підйому вчислимо при підйомі номінального вантажу по формулі:

$$N = \frac{(Q+G_n) \cdot V_{\text{гр}}}{1000 \cdot \eta_m} = \frac{(100000+1400) \cdot 0,42}{1000 \cdot 0,89} = 47,8 \text{ кВт} \quad (2.6)$$

де η_m - к.п.д. механізму підйому:

$$\eta_m = \eta_{\text{пол}} \cdot \eta_{\text{б}} \cdot \eta_{\text{р}} = 0,985 \cdot 0,96 \cdot 0,97^2 = 0,89 \quad (2.7)$$

Для механізму підйому вибираємо електродвигун змінного струму з фазовим ротором типу МТН 611-10, що має наступні параметри:

Потужність $N = 45 \text{ кВт}$.

Числом оборотів двигуна $n = 570 \text{ про/хв}$.

Максимальний момент $M_{\text{max}} = 2360 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Маса $m = 900 \text{ кг}$

Крутний момент $GD_p^2 = 170 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$.

Момент інерції ротора $J_p = 4,325 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$.

2.3. Вибір редуктора

Щоб визначити передатне відношення редуктора необхідно знати число оборотів барабана

$$n_{\text{б}} = \frac{V_{\text{гр}} \cdot u_n}{\pi \cdot (D_{\text{б}} + d_k)} = \frac{25 \cdot 2}{3,14 \cdot (0,4 + 0,0165)} = 38,23 \text{ хв}^{-1} \quad (2.8)$$

Тоді

$$u_p = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{б}}} = \frac{570}{38,23} = 14,9 \quad (2.9)$$

Редуктор вибираємо виходячи з розрахункової потужності, числа оборотів двигуна, передатного числа і режиму роботи.

По каталогу вибираємо редуктор типу Ц2-500-53, 3-2М з передатним числом $U_p = 16,3$.

2.4. Вибір гальма

Гальмо вибираємо по гальмівному моменту

$$M_m = M_{ct} \cdot k = \frac{(Q+G_n) \cdot (D_6 + d_k)}{2 \cdot u_n \cdot u_p} \cdot \eta_m \cdot k = \frac{(1 \cdot 10^5 + 1,4 \cdot 10^3) \cdot (0,4 + 0,0165)}{2 \cdot 2 \cdot 16,3} \cdot 0,89 \cdot 2 = 1153 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.10)$$

Вибираємо гальмо ТКТГ- 400м з діаметром гальмівного шківа $D_{Ш} = 400$ мм, гальмівним моментом $M_T = 1500 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Вибираємо муфту M_3 з $D_T = 400$ мм, крутним моментом $GD_P^2 = 54 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ і моментом інерції $J_M = 1,375 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$.

Схема механізму підйому, що розраховується, представлена на рисунку 2.1.

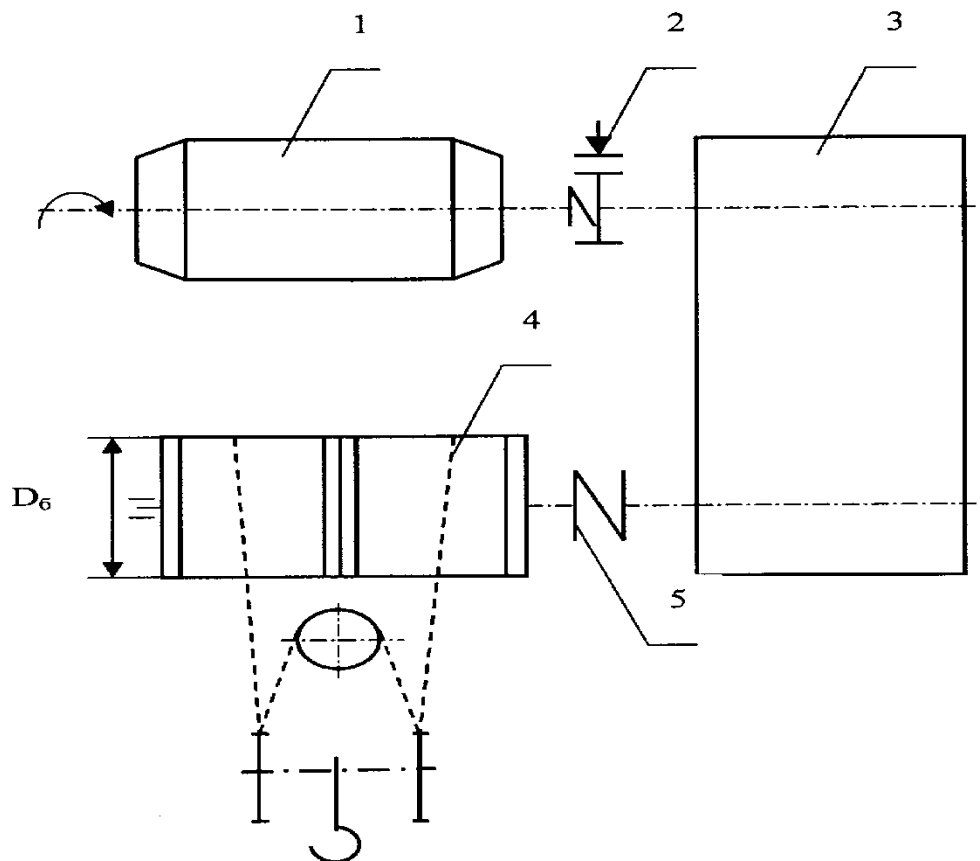


Рис. 2.1- Механізм підйому: 1 - двигун МТН - 611-10,

2 - гальмо ТКТГ-400М

3 – редуктор типу Ц2-500-53, 3,

4 – барабан

5 – МЗ.

3. РОЗРАХУНКОВА СХЕМА І РІВНЯННЯ РУХУ ПРИ ПІДЙОМІ ВАНТАЖУ З ЖОРСТКОЇ ОСНОВИ МОСТОВИМИ КРАНАМИ

3.1. Загальні положення

У розрахунках динаміки будь-якої конструкції можна умовно виділити наступні основні етапи:

- ідеалізація властивостей заданої конструкції і зовнішніх дій(побудова динамічної моделі);
- математичне формулювання поведінки динамічної моделі(побудова математичної моделі);
- вибір методу дослідження математичної моделі і проведення цих досліджень;
- аналіз отриманого математичного результату.

Реальна конструкція, поведінка якої під дією заданих зовнішніх дій досліджується, має нескінченно багато особливостей геометрії, властивостей матеріалу, характеру зовнішнього навантаження і так далі. У практичних розрахунках неможливо, а головне і не треба, враховувати усі особливості початкового об'єкту, що впливають на його поведінку. Об'єкт замінюється деякою моделлю, що має кінцеве число особливостей з числа тих, які властиві початковому об'єкту. Деякі властивості об'єкту при перенесенні на модель можуть піддаватися якимось змінам, які, трохи впливаючи на сторони поведінки цього об'єкту, що цікавлять нас, істотно спрощують його модельне представлення, тобто спрощують і дослідження.

Із сказаного ясно, що динамічна модель має в розпорядженні лише частину властивостей початкового об'єкту, а тому і простіше його. Динамічна модель служить як би перехідною ланкою до математичної моделі об'єкту, під якою розуміється сукупність математичних залежностей і рівнянь, що описує поведінку динамічної моделі об'єкту.

Слід зауважити, що один і той же об'єкт може бути представлений декількома різними динамічними моделями. Кожна з цих моделей ставить своєю метою вивчення лише певних сторін поведінки об'єкту, певну точність розрахунку динаміки.

При математичному описі поведінки вибраної динамічної моделі часто вводяться додаткові спрощуючі припущення про характер її окремих властивостей. Це служить причиною появи для однієї і тієї ж динамічної моделі ряду математичних моделей.

Для кожної математичної моделі може існувати, як правило, декілька методів її дослідження. Вибір методу дослідження математичної моделі може істотно позначитися на стійкості алгоритму - чутливості результату рішення до неминучих погрешностей числових операцій (через обмеженість кількості цифр в мантисі числа, якими оперують обчислювальні машини). Оскільки зміст математичної моделі певною мірою зумовлений змістом динамічної моделі, то справедливе твердження, що для кожної динамічної моделі можна підібрати такий метод дослідження її математичної моделі, який матиме найкращу числову стійкість.

Дослідження математичної моделі дозволяє оцінити вплив окремих її членів на поведінку динамічної моделі. В результаті може знадобитися уточнення змісту динамічної моделі. Такий аналіз особливо корисний, якщо при виборі динамічної моделі не зрозумілий вплив окремих властивостей початкового об'єкту на сторони його поведінки, що цікавлять нас.

Облік в динамічній моделі додаткових властивостей об'єкту підвищує здатність до точнішого опису його поведінки. Проте при цьому зростає і загальна трудомісткість дослідження. Тому питання побудови динамічної моделі, що включає лише необхідні властивості досліджуваного об'єкту, виключно важливі.

3.2. Динамічна і математична моделі крану

Дослідження показали, що при вивченні динамічних навантажень, що сприймаються металоконструкцією крану і вантажними канатами, аналізі спільного впливу різних параметрів крану на характер протікання перехідних процесів, а також при рішенні багатьох інших завдань, мостові крани, з достатньою для інженерних робіт точністю, можуть бути представлені трьохмасовою двозв'язною динамічною моделлю (рисунк 3.1). Розподілена маса пролітної будови крану представлена у вигляді приведеної до середини прольоту зосередженої маси m_m сполученою пружно - в'язким зв'язком, що характеризується коефіцієнтами жорсткості c_m і демпфування k_D металоконструкції, з опорними частинами крану.

Максимальними вертикальними динамічними навантаженнями в мостових кранах супроводжується підйом вантажу з жорсткої основи (підйом з підхопленням), що включає три етапи: перший - етап холостого ходу, коли маса частин приводу m_{Π} , що обертаються, під впливом сили приводу P_{dq} вибирає сумарний проміжок Δ_k в канатах і приводі; другий етап - розвиток навантаження в канатах до зусилля в них, рівного вазі вантажу Q , причому маса m_v упродовж другого етапу знаходиться в стані спокою; третій етап - спільний рух усіх пружно пов'язаних мас системи.

На першому етапі вибирається проміжок Δ_k в канатах і приводі, а динамічні навантаження в металоконструкції і в канатах відсутні.

Другий етап руху описується рівняннями

$$\begin{aligned} m_{\Pi} \cdot \frac{d^2 y_{\Pi}}{dt^2} + P_{K2} - P_{dq} &= 0 \\ m_m \cdot \frac{d^2 y_m}{dt^2} - P_{K2} + k_D \cdot \frac{dy_m}{dt} + c_m \cdot y_m &= 0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

Закінчується другий етап руху при натягненні вантажних канатів

$$P_{K2} = c_K (y_{\Pi} - y_m) + k'_D (y'_{\Pi} - y'_m) = Q.$$

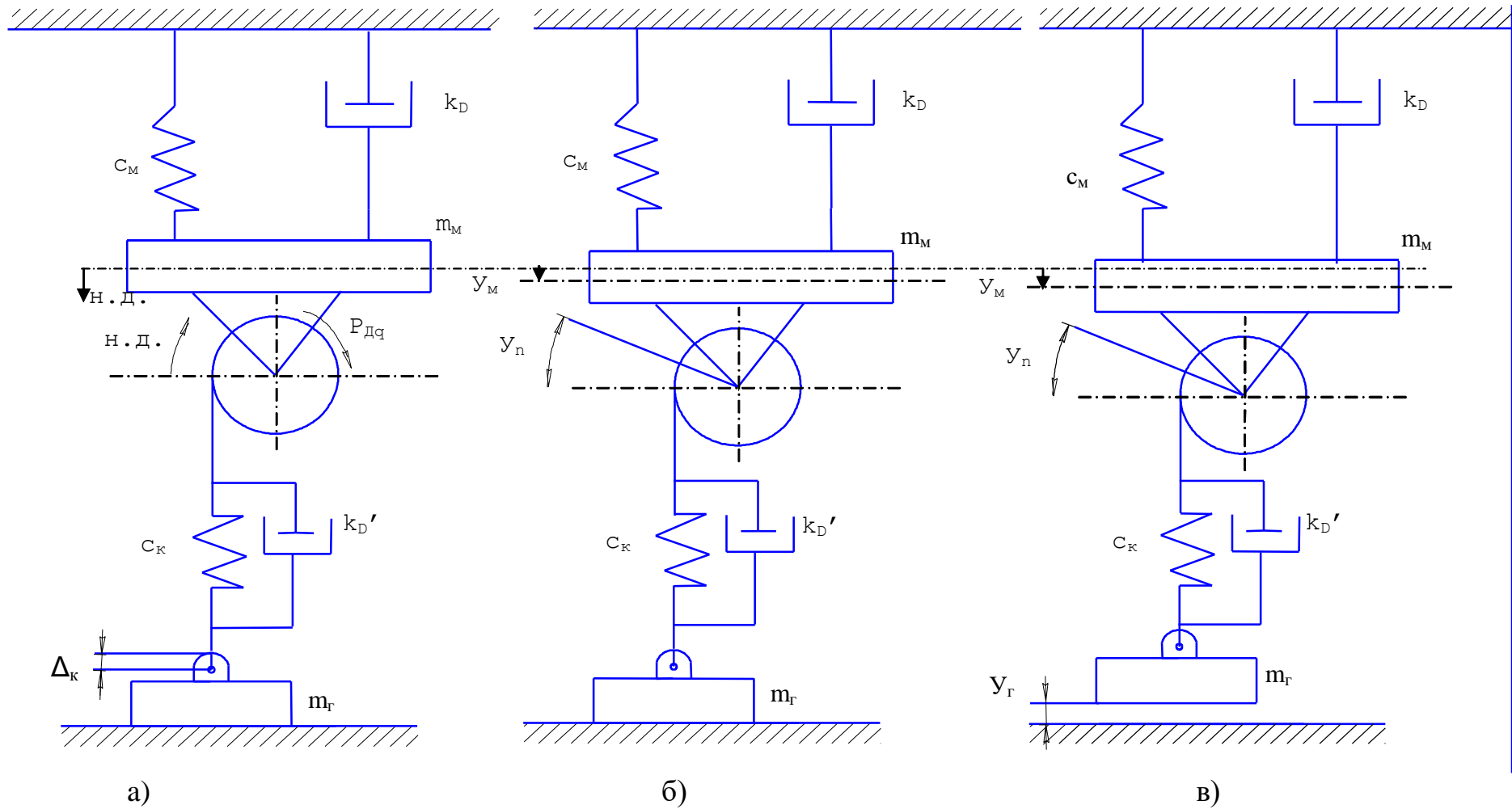


Рис. 3.1 – Трьохмасова двозв'язна динамічна модель мостового крану:
а) перший етап руху; б) другий етап руху;
в) третій етап руху.

Третій етап руху описується рівняннями:

$$\begin{aligned} m_{\Pi} \cdot \frac{d^2 y_{\Pi}}{dt^2} + P_{\text{КЗ}} - P_{\text{dq}} &= 0 \\ m_{\text{М}} \cdot \frac{d^2 y_{\text{М}}}{dt^2} - P_{\text{КЗ}} + k_{\text{D}} \cdot \frac{dy_{\text{М}}}{dt} + c_{\text{М}} \cdot y_{\text{М}} &= 0 \\ m_{\text{В}} \cdot \frac{d^2 y_{\text{В}}}{dt^2} - P_{\text{КЗ}} + m_{\text{В}} \cdot g &= 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

де $P_{\text{КЗ}} = c_{\text{К}}(y_{\Pi} - y_{\text{М}} - y_{\Gamma}) + k'_{\text{D}}(y'_{\Pi} - y'_{\text{М}} - y'_{\Gamma})$ - натягнення в канатах натре-
тньому етапі руху.

Тут:

m_{Π} – приведена до канатів маса частин приводу, що обертаються підйому
вантажів, кг;

$m_{\text{М}}$ – приведена до середини прольоту маса крану, кг;

$m_{\text{В}}$ – маса вантажу, кг;

$c_{\text{М}}$ – коефіцієнт жорсткості металокопструкції крану, Н/м;

$c_{\text{К}}$ – коефіцієнт жорсткості вантажних канатів, Н/м;

k_{D} – коефіцієнт загасання коливань(демпфування) металокопструкції, Н
с/м;

k'_{D} – коефіцієнт загасання коливань(демпфування) канатів Н с/м;

P_{dq} – приведена до канатів сила двигуна при роботі на q-ой механічній ха-
рактеристики, Н;

y_{Π} , $y_{\text{М}}$, y_{Γ} – шляхи, прохідні відповідно масами m_{Π} , $m_{\text{М}}$, m_{Γ} від початку ко-
ординат.

3.3. Розрахунок коефіцієнтів диференціальних рівнянь руху

1. Приведена до канатів маса частин механізму підйому вантажу, що обе-
ртаються:

$$m_n = \frac{(GD_p + GD_M) \cdot \delta}{g} \cdot \left(\frac{u_M}{2 \cdot r_6} \right)^2 \cdot \eta = 1,547 \cdot 10^5 \quad (3.3)$$

де $GD_p = 170 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ - крутний момент ротора двигуна;

$GD_M = 170 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ - крутний момент гальмівної муфти;

$\delta = 1,2$ - коефіцієнт приведення інших мас приводу, що обертаються, до першого валу механізму;

$u_M = 32,6$ – повне передатне число механізму з урахуванням кратності поліспасти;

$r_{\sigma} = 0,2$ – радіус барабана;

$\eta = 0,85$ - ККД механізму.

2. Приведена до середини прольоту маса моста і візка:

$$\begin{aligned} m_{M \min} &= m_m + 0,5 \cdot (0,7 \cdot m_{\text{кр} \min}) = 5,435 \cdot 10^3 \text{ кг} \\ m_{M \max} &= m_m + 0,5 \cdot (0,7 \cdot m_{\text{кр} \max}) = 1,264 \cdot 10^4 \text{ кг} \end{aligned} \quad (3.4)$$

де $m_{\text{кр} \min} = 8100 \text{ кг}$ - маса крану Г/П 10 т прольотом 10,5 м;

$m_{\text{кр} \max} = 28700 \text{ кг}$ - маса крану Г/П 10 т прольотом 34,5 м;

$m_m = 2600 \text{ кг}$ - маса візка.

3. Коефіцієнт жорсткості металокопструкції крану:

$$\begin{aligned} c_{M \min} &= 48 \cdot E \cdot \frac{2 \cdot I_{x \max}}{L_{\max}^3} = 5,194 \cdot 10^3 \text{ Н/мм} \\ c_{M \max} &= 48 \cdot E \cdot \frac{2 \cdot I_{x \min}}{L_{\min}^3} = 1,133 \cdot 10^4 \text{ Н/мм} \end{aligned} \quad (3.5)$$

де $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$ - модуль пружності матеріалу металокопструкції;

$I_{x \min} = 65070 \cdot 10^4 \text{ мм}^4$ - момент інерції перерізу головних балок для крану прольотом $l_{\min} = 10,5 \text{ м}$;

$I_{x \max} = 1058040 \cdot 10^4 \text{ мм}^4$ - момент інерції перерізу головних балок для крану прольотом $l_{\max} = 34,5 \text{ м}$.

4. Коефіцієнт жорсткості каната:

$$\begin{aligned} c_{k \min} &= \frac{E_k \cdot 4 \cdot F_k}{l_{\max}} = 5,893 \cdot 10^3 \text{ Н/мм} \\ c_{k \max} &= \frac{E_k \cdot 4 \cdot F_k}{l_{\min}} = 1,179 \cdot 10^4 \text{ Н/мм} \end{aligned} \quad (3.6)$$

де $E_k = 1,4 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$ - модуль пружності сталевих канатів;

$F_k = 105,24 \text{ мм}^4$ - площа поперечного перерізу каната;

$l_{min} = 5000 \text{ мм}$ - мінімальна висота підвісу вантажу;

$l_{max} = 10000 \text{ мм}$ - максимальна висота підвісу вантажу.

5. Коефіцієнт загасання коливань металокопструкції:

$$k_{D \min} = 2 \cdot m_{\min} \cdot \omega_{\max} \cdot D = 16,913 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$$

$$k_{D \max} = 2 \cdot m_{\max} \cdot \omega_{\min} \cdot D = 16,913 \text{ Н} \cdot \text{с/м} \quad (3.7)$$

де ω_{\max} , ω_{\min} - частота коливань;

$$\omega_{\max} = \frac{\sqrt{\frac{c_{\min}}{m_{\min}}}}{2 \cdot \pi} = 0,156 \text{ с}^{-1}$$

$$\omega_{\min} = \frac{\sqrt{\frac{c_{\max}}{m_{\max}}}}{2 \cdot \pi} = 0,151 \text{ с}^{-1} \quad (3.8)$$

де $D = 0,01$ - постійна демпфування.

6. Коефіцієнт загасання коливань каната:

$$k'_{D \max} = \frac{2 \cdot m_{\Gamma} \cdot \delta}{\tau_1} = 69,337 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$$

$$k'_{D \min} = \frac{2 \cdot m_{\Gamma} \cdot \delta}{\tau_2} = 67,141 \text{ Н} \cdot \text{с/м} \quad (3.9)$$

Тут τ_1 і τ_2 - період коливань:

$$\tau_1 = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_{\max}} = 40,382 \text{ с}$$

$$\tau_2 = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_{\min}} = 41,703 \text{ с} \quad (3.10)$$

3.4. Введення в математичну модель приведеної сили приводу

Велика частина вантажопідійомних кранів оснащується електродвигунами з фазними роторами.

Для побудови природної і штучних механічних характеристик двигуна необхідно знайти ряд параметрів, без яких така побудова неможлива. Усі обчислення і побудова графіку були проведені на ЕОМ.

Знайдемо номінальний момент, що розвивається двигуном:

$$M_H = 9550 \cdot \frac{N}{n_d} = 753,947 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.11)$$

тут $N = 45$ кВт - потужність двигуна;

$n_d = 570 \text{ с}^{-1}$ - асинхронна частота обертання ротора.

Коефіцієнт короткочасного перевантаження визначиться як

$$\lambda = \frac{M_{max}}{M_H} = 3,13 \quad (3.12)$$

де $M_{max} = 2360 \text{ Н} \cdot \text{м}$ - максимальний момент, що розвивається двигуном.

Для побудови характеристик необхідно визначити номінальне і критичне ковзання.

$$S_n = \frac{n_0 - n_d}{n_0} = 0,05 \quad (3.13)$$

$$S_k = S_n \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,305 \quad (3.14)$$

де $n_0 = 600 \text{ с}^{-1}$ - синхронна частота обертання ротора.

$$K_q = \frac{2 \cdot M_{max} \cdot S_k \cdot v_0 \cdot u_m \cdot \eta}{r_6} = 8,218 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м/с} \quad (3.15)$$

$$B_q = s_k^2 \cdot v_0^2 = 0,018 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \quad (3.16)$$

Тут

$$v_0 = \frac{v_{\text{під}} \cdot n_0}{n_d} = 0,442 \text{ м/с}. \quad (3.17)$$

Вище розглянуто визначення коефіцієнтів K_q і B_q для випадку роботи двигуна на природній механічній характеристиці 1 (рисунок 3.2). Для побудови штучних механічних характеристик досить змінити значення s_k а потім по вище приведених формулах визначити K_q і B_q .

Для побудови п'яти штучних характеристик було отримано п'ять значень коефіцієнтів.

$S_k = 0,305$	$K_q = 82175,45$	$B_q = 0,018$
$S_{k1} = 0,531$	$K_{q1} = 143204,79$	$B_{q1} = 0,055$
$S_{k2} = 0,326$	$K_{q2} = 249558,86$	$B_{q2} = 0,167$
$S_{k3} = 1,613$	$K_{q3} = 434899,02$	$B_{q3} = 0,509$

$$\begin{array}{lll}
 S_{k4} = 2,811 & K_{q4} = 757886,00 & B_{q4} = 1,545 \\
 S_{k5} = 4,899 & K_{q5} = 1320746,09 & B_{q5} = 4,691
 \end{array}$$

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ

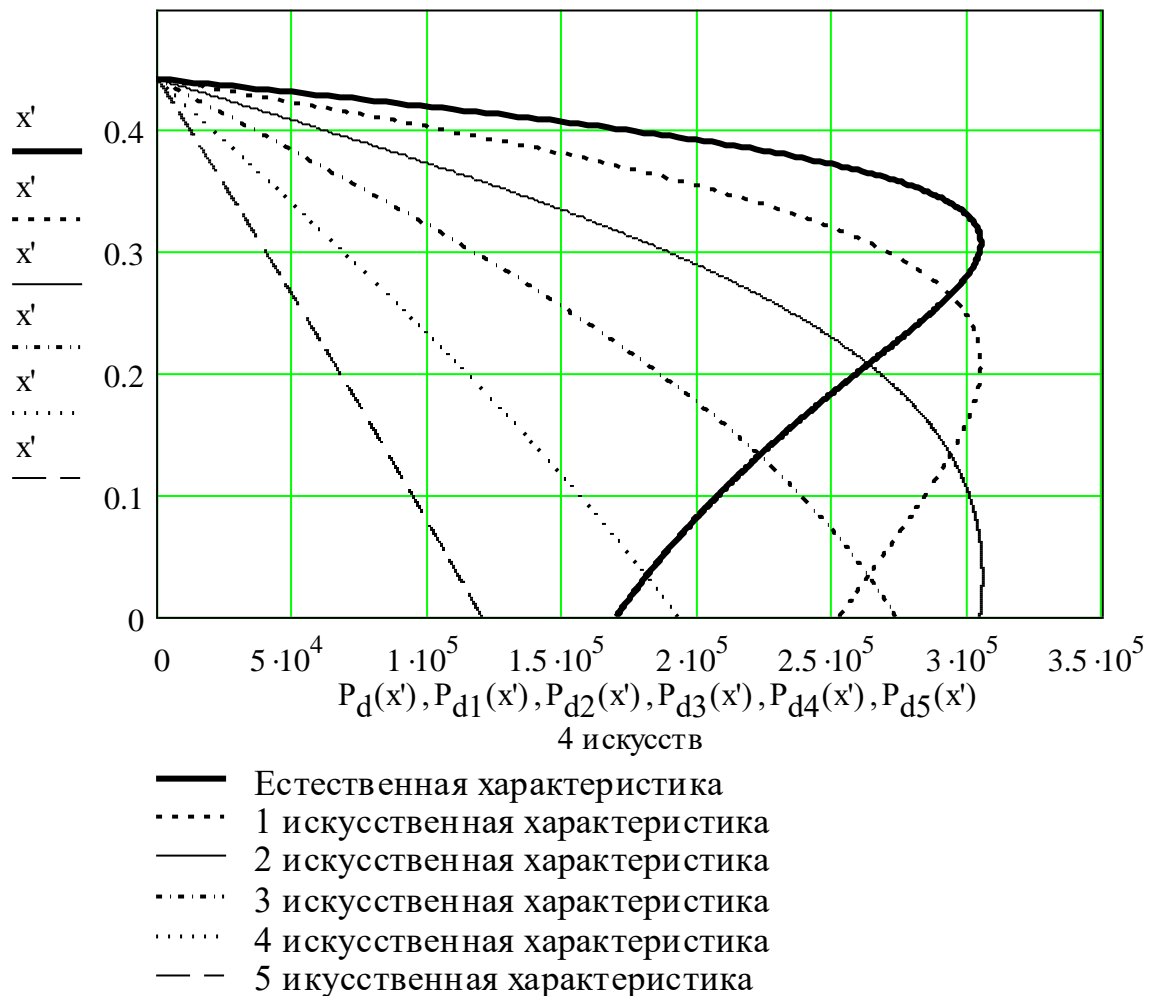


Рис. 3.2 - Статичні механічні характеристики асинхронного двигуна крану МТН - 611- 10.

3.5. Приведення рівнянь руху до виду, зручного для чисельної інтеграції

Для застосування стандартних програм чисельної інтеграції системи диференціальних рівнянь другого порядку (3.1) і(3.2) перетворені в системи диференціальних рівнянь першого порядку. Введені позначення:

$$\begin{array}{ll}
 y_n = Y_1; & \dot{y}_n = Y_2 \\
 y_m = Y_3; & \dot{y}_m = Y_4 \\
 y_b = Y_5; & \dot{y}_b = Y_6
 \end{array} \quad (3.18)$$

Тоді замість системи диференціальних рівнянь руху другого порядку і(3.2) отримуємо системи рівнянь першого порядку:

- другий етап руху:

$$\begin{cases} \dot{y}_n = Y_2 \\ \ddot{y}_n = (P_d - P_{k2})/m_n \\ \dot{y}_M = U_4 \\ \ddot{y}_M = (P_{k2} - S_M)/m_M \end{cases} \quad (3.19)$$

- третій етап руху:

$$\begin{cases} \dot{y}_n = Y_2 \\ \ddot{y}_n = (P_{dq} - P_{k3})/m_n \\ \dot{y}_M = U_4 \\ \ddot{y}_M = (P_{k3} - P_M)/m_M \\ \dot{y}_B = U_6 \\ \ddot{y}_B = (P_{k3} - m_B \cdot g)/m_B \end{cases} \quad (3.20)$$

Тому

$$P_{k2} = c_k \cdot (Y_1 - Y_3) + k'_D \cdot (Y_2 - Y_4) \quad (3.21)$$

$$P_{k3} = c_k \cdot (Y_1 - Y_3 - Y_5) + k'_D \cdot (Y_2 - Y_4 - Y_6) \quad (3.22)$$

$$P_M = c_M \cdot Y_3 + k_D \cdot Y_4 \quad (3.23)$$

$$P_{dq} = K_q \cdot (v_0 - Y_2)/(B_q + (v_0 - Y_2)^2) \quad (3.24)$$

3.6. Аналіз процесу підйому вантажу з жорсткої основи

На рисунках 3.3 - 3.6 представлені графіки зміни параметрів перехідного процесу підйому вантажу з жорсткої основи. Розглянуті випадки роботи двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{д(\dot{y}=0)}/Q = 1.92$ з початковою швидкістю підйому вантажу $V_H = 0,21$ м/с та $V_H = 0$ м/с, причому графіки на рисунках 3.3 - 3.4 отримані без урахування демпфування в металокопструкції і канатах ($k_d = k'_d = 0$), а на рисунках 3.5 - 3.6 відповідають раніше розрахованим коефіцієнтам демпфування.

Аналіз графіків на рисунку 3.4 показує, що у момент включення двигуна приведена сила двигуна P_d склала 192 кН, в результаті етап вантаження вантажних канатів тривав 0,3 с. За цей час швидкість каната досягла величини 0,19

м/с, що складає 90 % від номінальної швидкості двигуна $V_H = 0,21$ м/с. Після відриву вантажу від землі, через 0,1 с, зусилля в канатах досягає максимального значення, що відповідає коефіцієнту загасання коливань каната k_D рівному $1,249H \cdot \text{м/с}$.

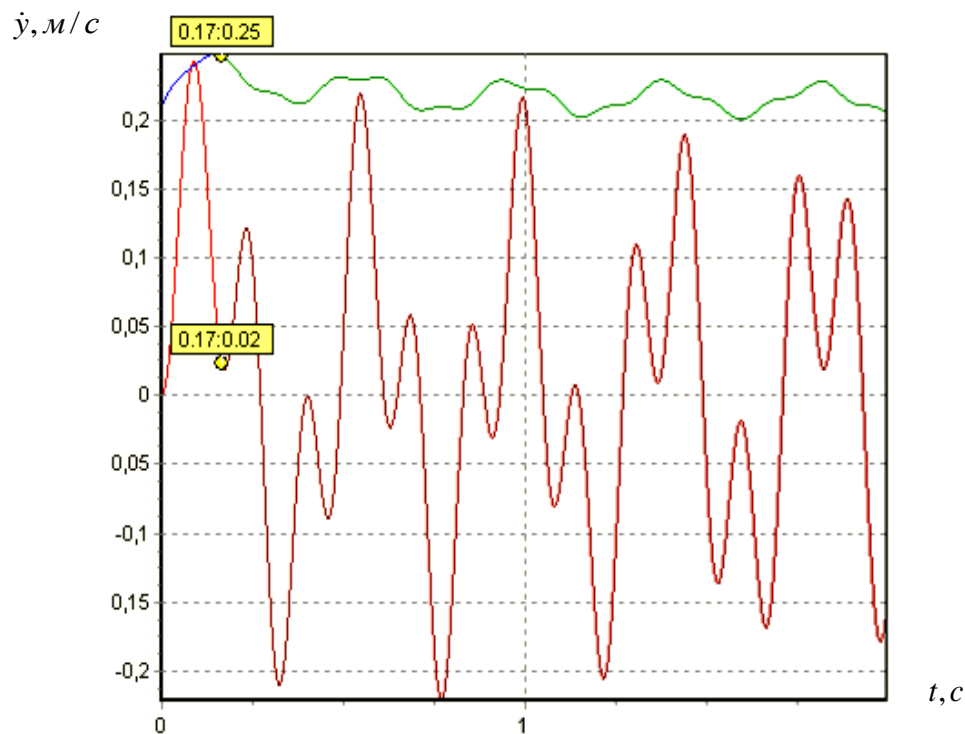
В цей же час сумарне вертикальне навантаження на металоконструкцію склало 140 кН, що відповідає коефіцієнту загасання коливань металоконструкції $k_D = 1,403 H \cdot \text{м/с}$. Повний час, за який зусилля в металоконструкції і канатах досягли максимальних значень склало 0,4 с. В результаті того, що навантаження на канати склало 125 кН, а на металоконструкцію 140 кН, міст і вантажі прийшли в коливальний рух з однаковим періодом і фазою коливань. Період коливань склав 0,4 с. Спостерігається незначне загасання коливань моста і вантажу.

При порівнянні графіків на рисунку 3.3 з вище розглянутими графіками видно, що етап вантаження вантажних канатів тривав значно менше, а саме 0,17 с. При цьому швидкість каната виросла до 0,25 м/с, тобто вище за номінальну швидкість двигуна $V_H = 0,21$ м/с. Час, за який зусилля в металоконструкції досягли максимальних значень склало 0,27 с, а в канатах - 0,66 с. Коефіцієнт загасання коливань в металоконструкції k_D при цьому рівний $1,507 H \cdot \text{м/с}$ канатах же $k_D = 1,468 H \cdot \text{м/с}$.

Порівнюючи рисунки 3.3 - 3.4, можна зробити висновок, що при $V_H = 0,21$ м/с етап завантаження вантажних канатів і металоконструкції триває значно швидше і значення коефіцієнтів загасання коливань вищі, ніж при $V_H = 0$ м/с. При $V_H = 0,21$ м/с спостерігається зміщення фаз коливань моста і вантажу на 0,0625 с.

Графіки на рисунках 3.3 - 3.4 отримані без урахування демпфування в металоконструкції і канатах ($k_D = k'_D = 0$), а на рисунках 3.5 - 3.6 відповідають раніше розрахованим коефіцієнтам демпфування. Як видно, загасання коливань в металоконструкціях і канатах спостерігається і при $k_D = k'_D = 0$, що пояснюється демпфуючою дією електродвигуна, працюючого на штучній механічній характеристиці з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.92$. Облік демпфування дещо

Залежність швидкості від часу



Залежність зусиль від часу

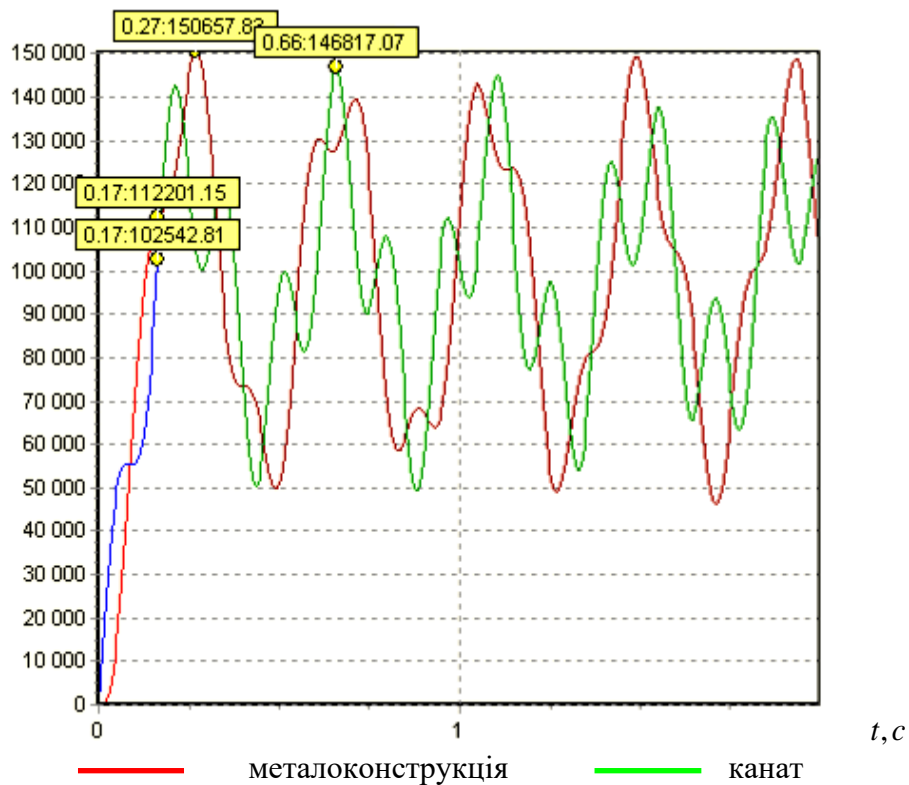
 P, H 

Рис. 3.3 - Графіки зміни основних параметрів перехідного процесу при підйомі вантажу краном г/п 10 т прольотом 25,5 м; $k_D = k'_D = 0$, робота двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.92$ при $V_H = 0,21$ м/с.

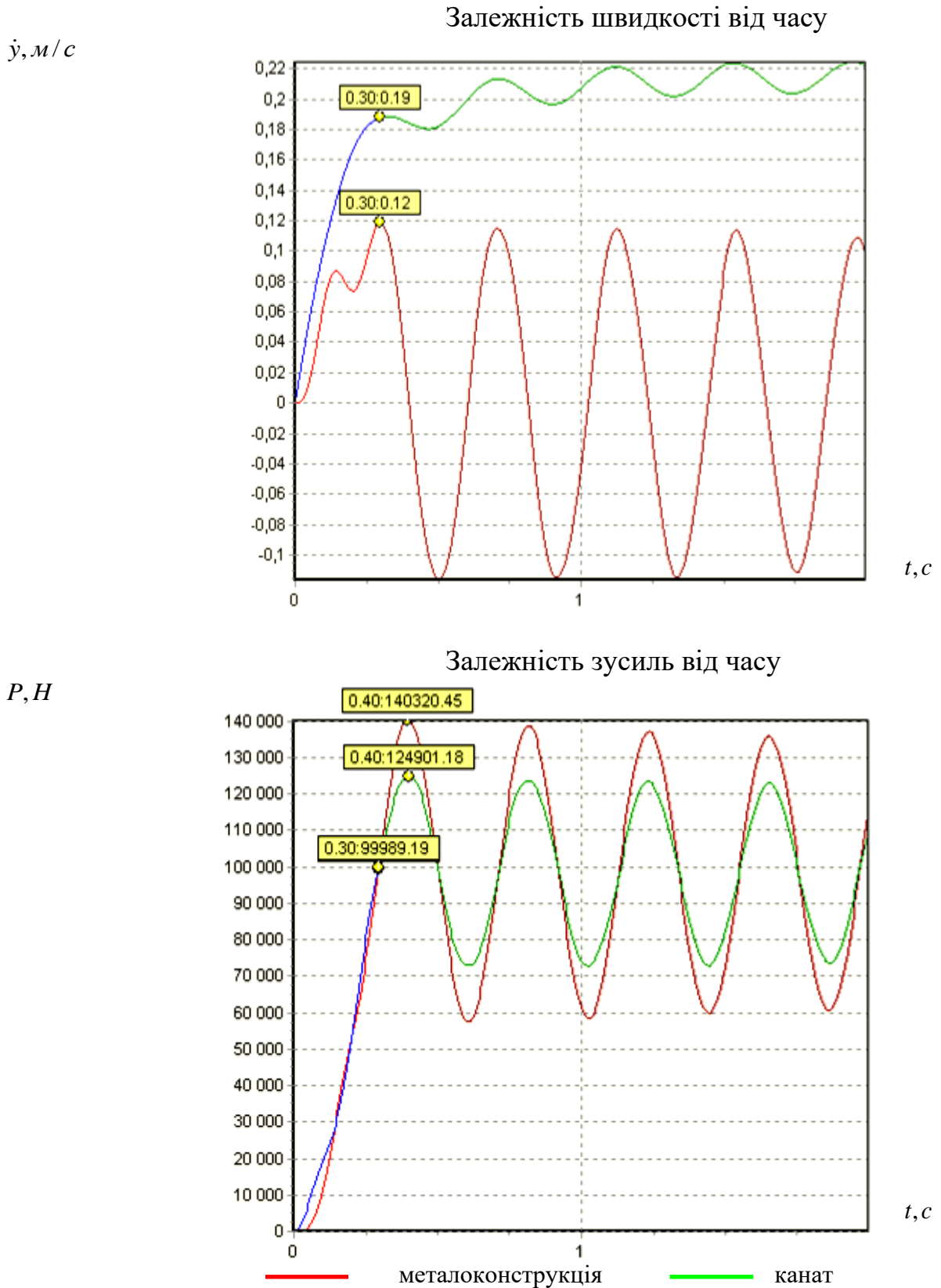


Рис. 3.4 - Графіки зміни основних параметрів перехідного процесу при підйомі вантажу краном г/п 10 т прольотом 25,5 м; $k_D = k'_D = 0$, робота двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.92$ при $V_H = 0$ м/с.

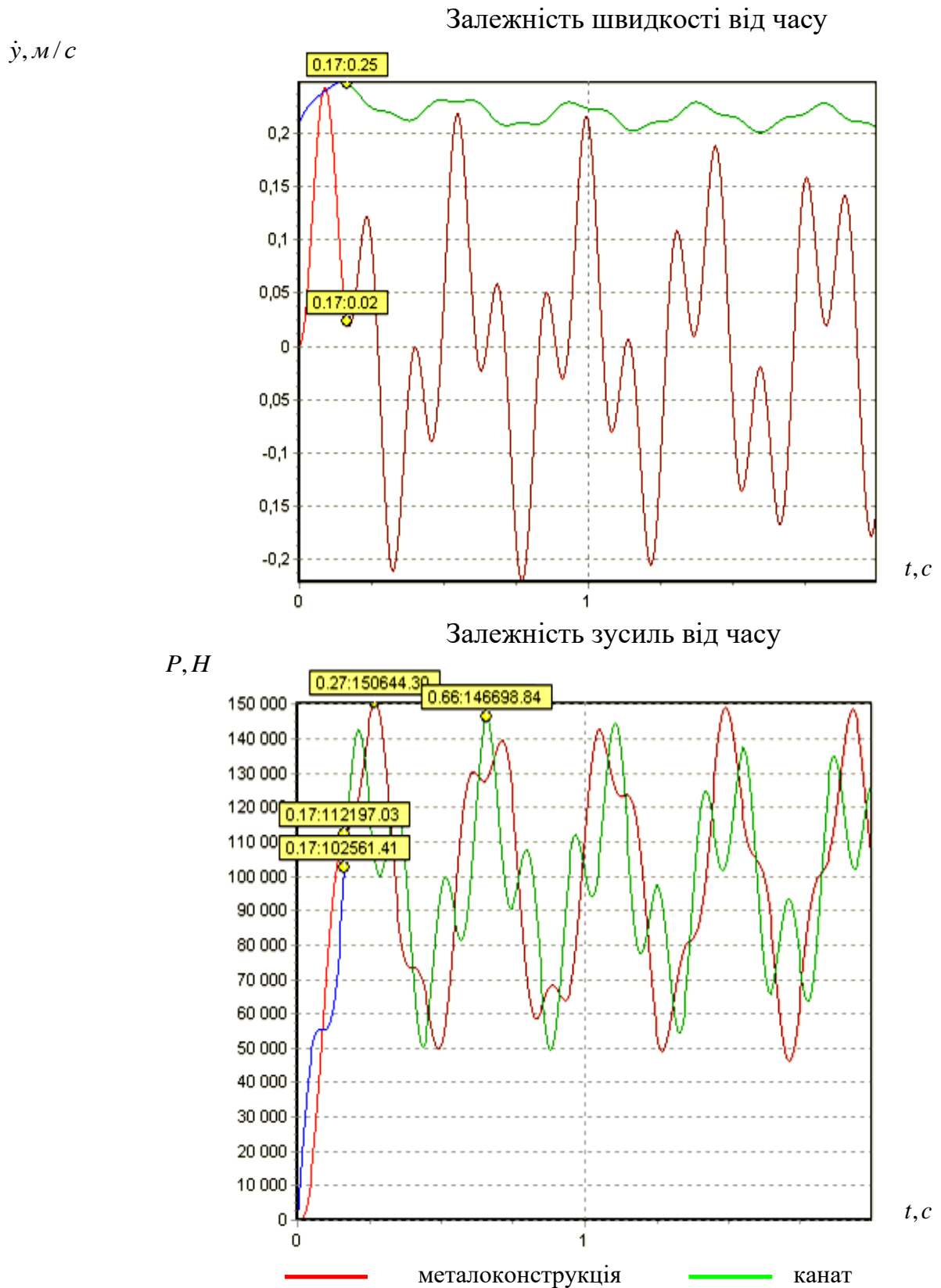
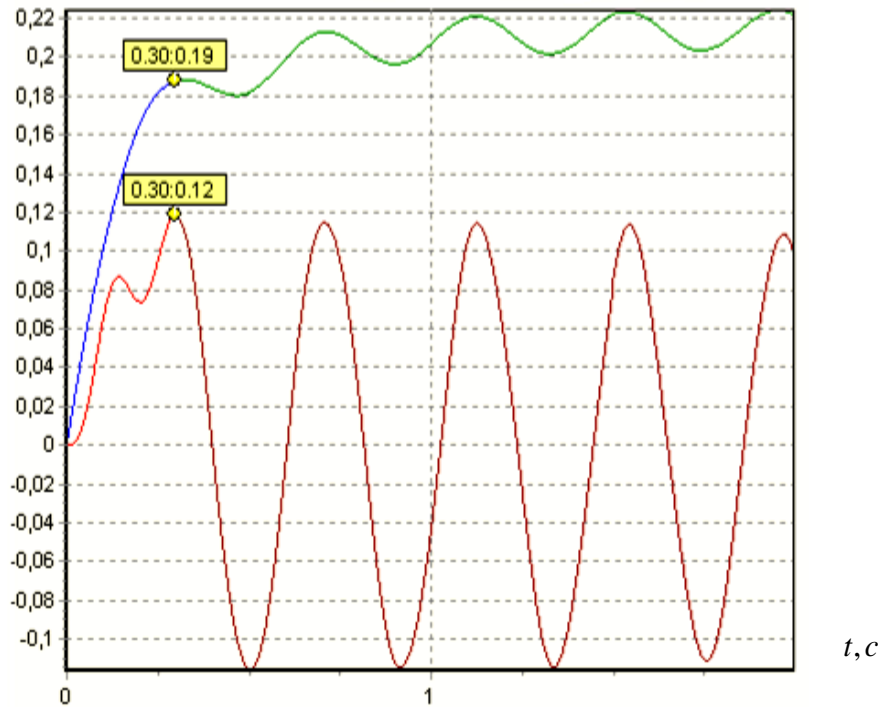


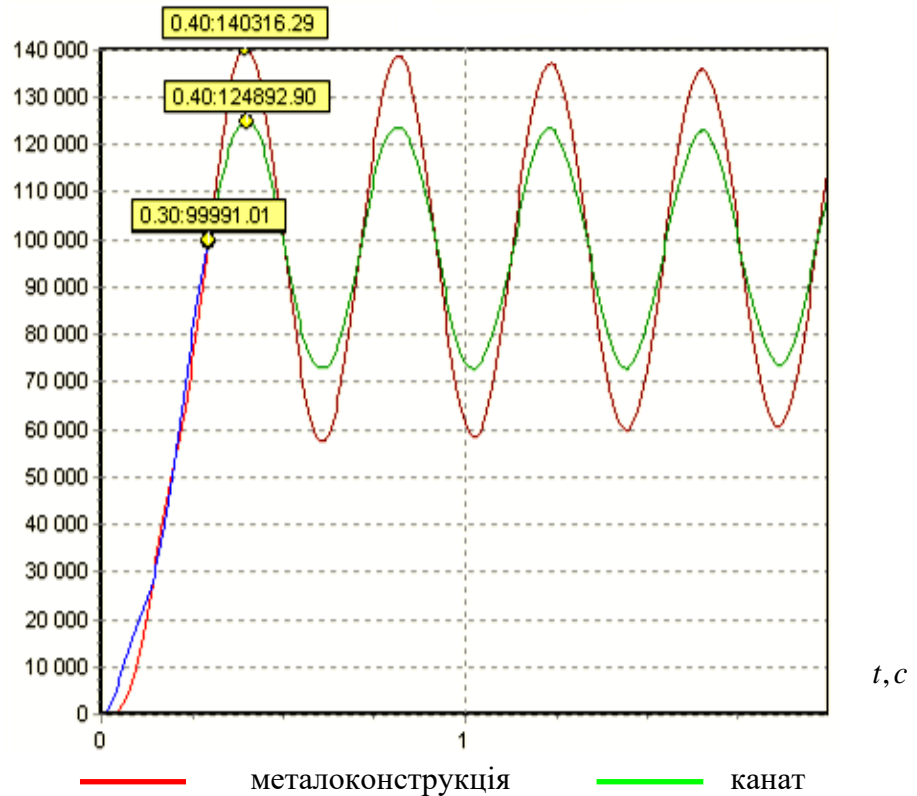
Рис. 3.5 - Графіки зміни основних параметрів перехідного процесу при підйомі вантажу краном г/п 10 т прольотом 25,5 м; $k_D = 27,5 \text{ Н} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $k'_D = 68,2 \text{ Н} \cdot \text{м/с}$; робота двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.92$ при $V_H = 0,21 \text{ м/с}$.

$\dot{y}, \text{ м/с}$

Залежність швидкості від часу

 $P, \text{ Н}$

Залежність зусиль від часу



металоконструкція

канат

Рис. 3.6 - Графіки зміни основних параметрів перехідного процесу при підйомі вантажу краном г/п 10 т прольотом 25,5 м;
 $k_D = 27,5 \text{ Н} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $k'_D = 68,2 \text{ Н} \cdot \text{м/с}$; робота двигуна на штучній механічній
характеристичі з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.92$ при $V_H = 0 \text{ м/с}$.

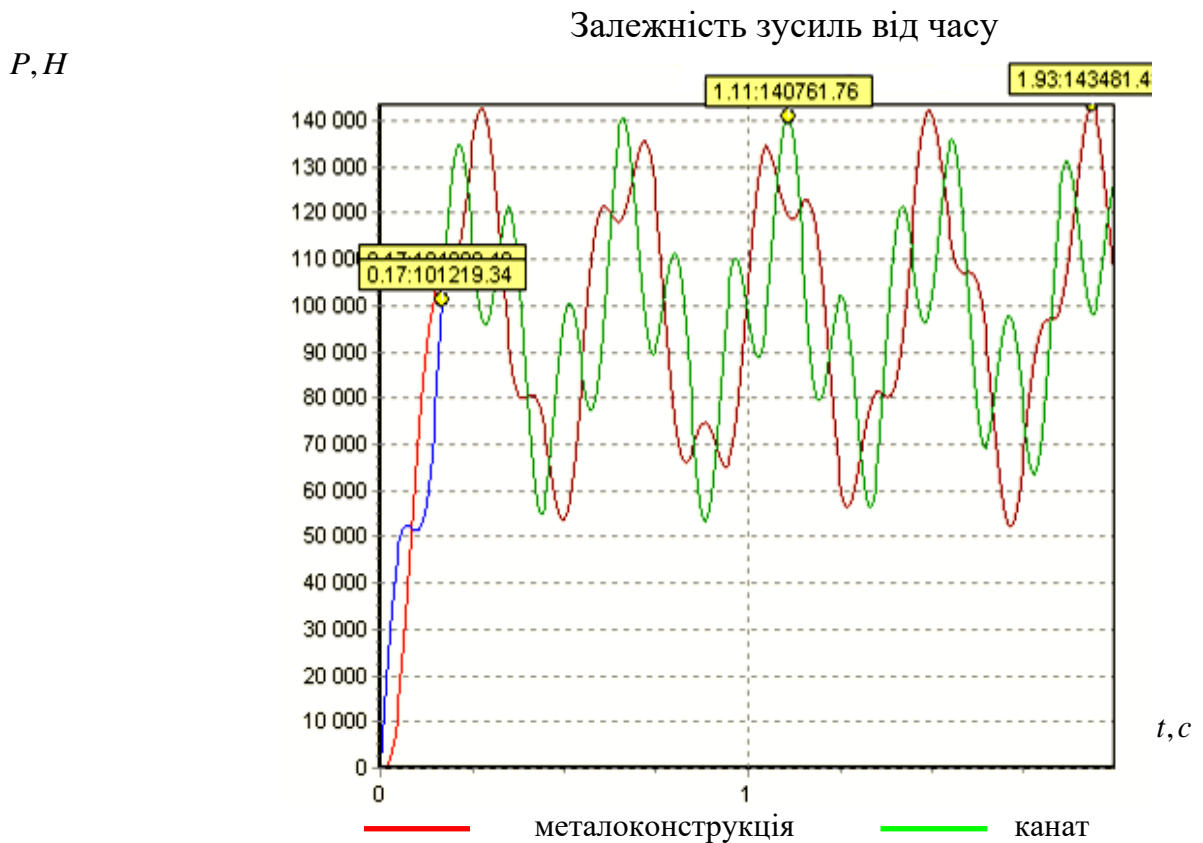
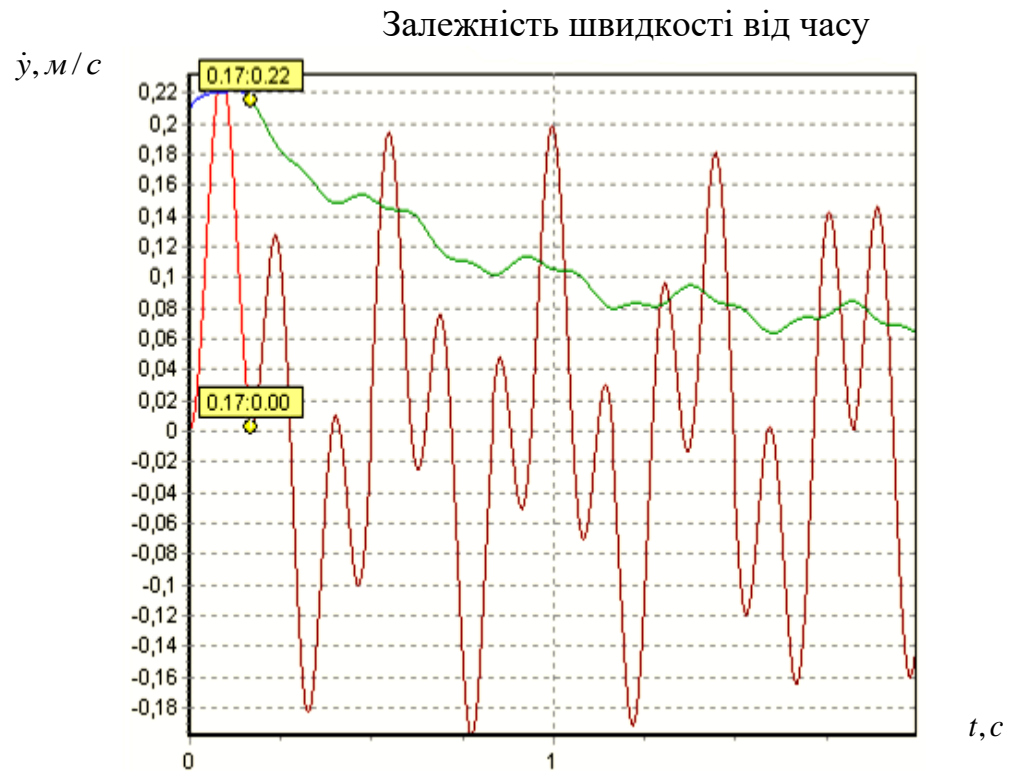


Рис. 3.7 - Графіки зміни основних параметрів перехідного процесу при підйомі вантажу краном г/п 10 тонни прольотом 25,5 м; $k_D = k'_D = 0$, робота двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.19$ при $V_H = 0,21$ м/с.

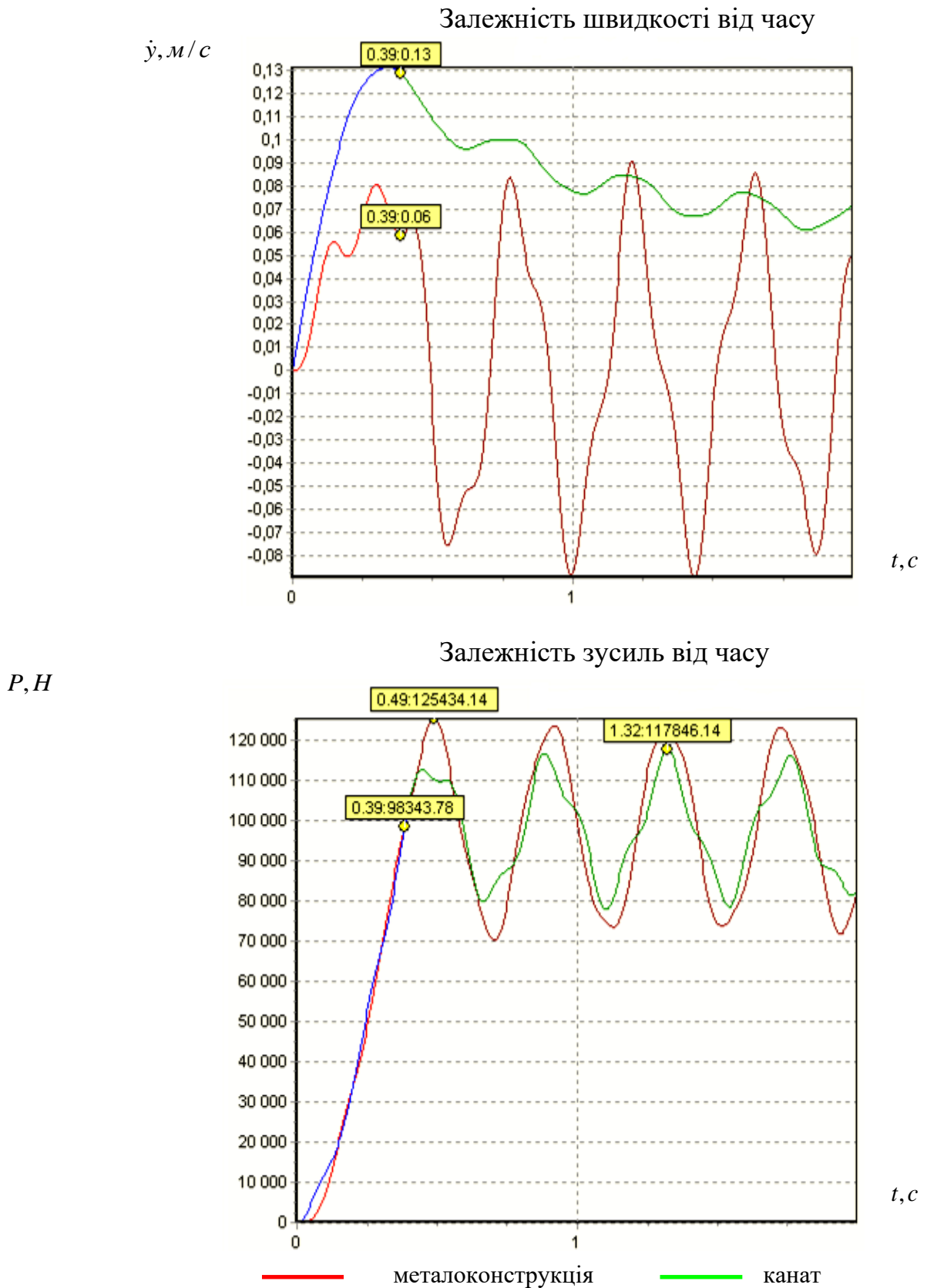


Рис. 3.8 - Графіки зміни основних параметрів перехідного процесу при підйомі вантажу краном г/п 10 тонни прольотом 25,5 м; $k_D = k'_D = 0$, робота двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{D(y=0)}/Q = 1.19$ при $V_H = 0$ м/с.

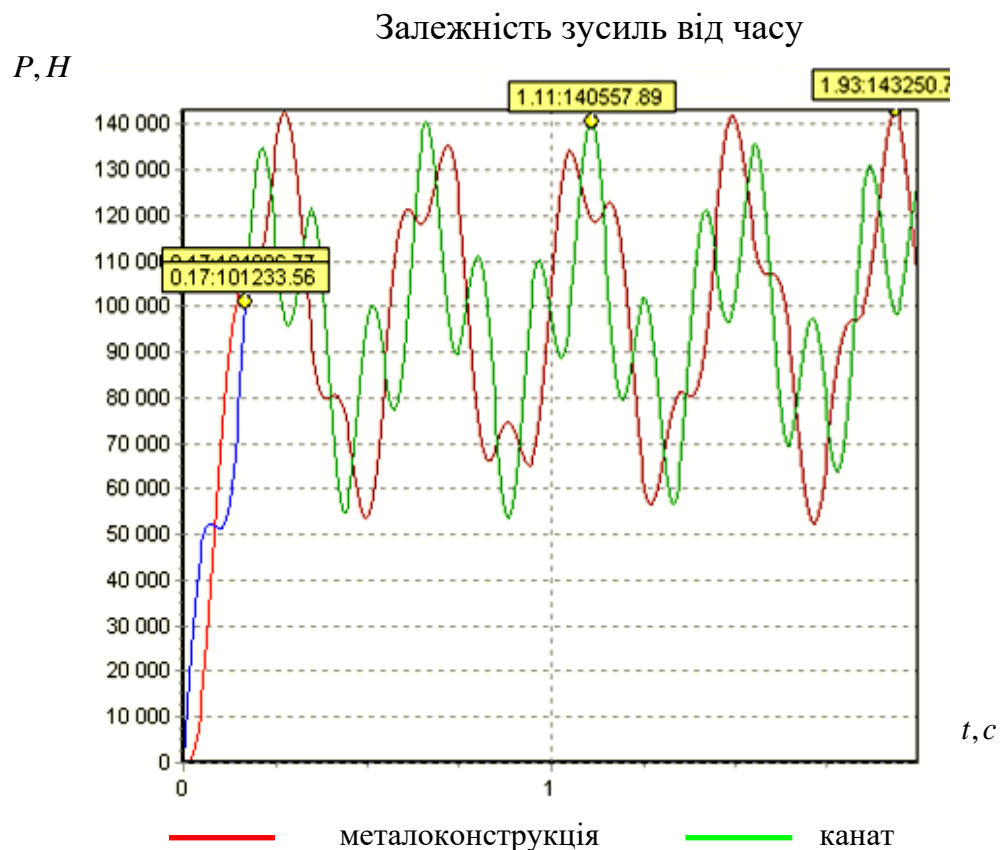
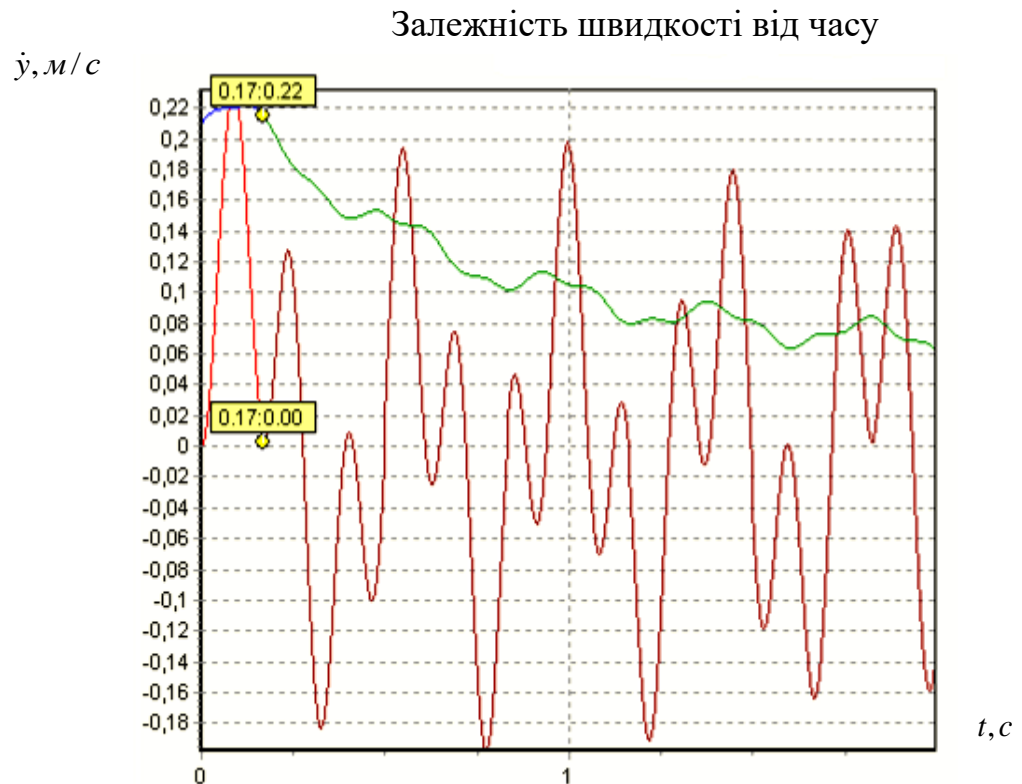


Рис. 3.9 - Графіки зміни основних параметрів перехідного процесу при підйомі вантажу краном г/п 10 тонн прольотом 25,5 м;
 $k_D = 27,5 \text{ Н} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $k'_D = 68,2 \text{ Н} \cdot \text{м/с}$; робота двигуна на штучній механічній
характеристичі з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.19$ при $V_H = 0,21 \text{ м/с}$.

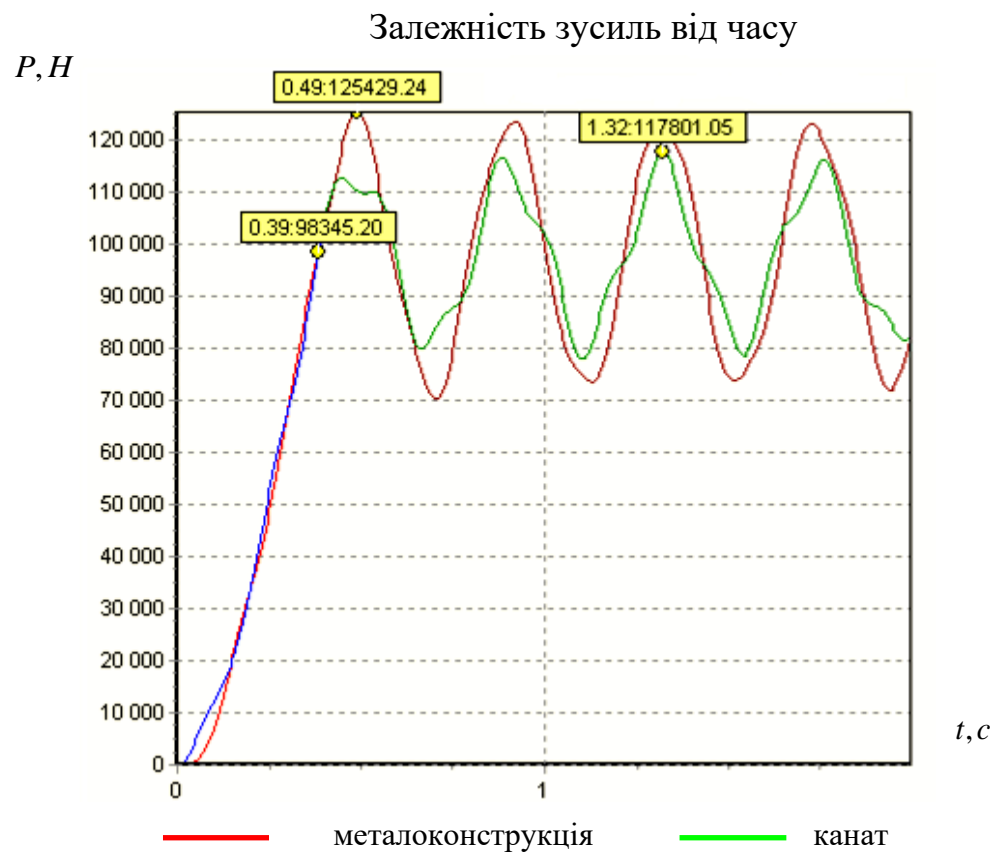
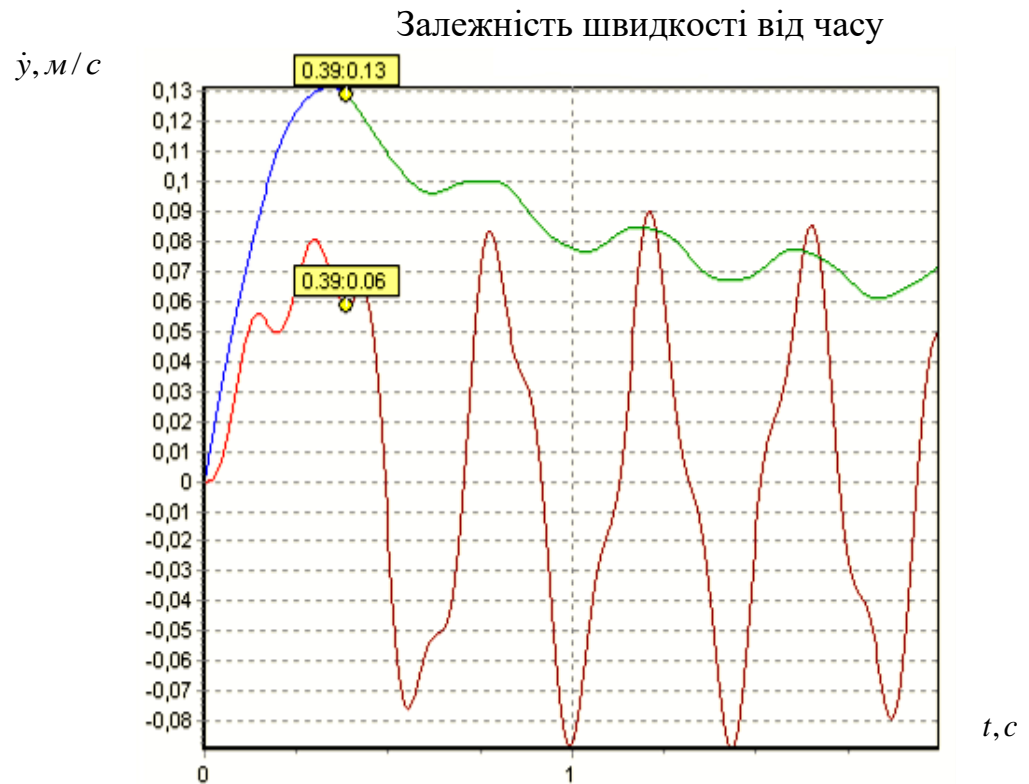


Рис. 3.10 - Графіки зміни основних параметрів перехідного процесу при підйомі вантажу краном г/п 10 тонни прольотом 25,5 м;
 $k_D = 27,5 \text{ Н} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}}$, $k'_D = 68,2 \text{ Н} \cdot \text{м/с}$; робота двигуна на штучній механічній
характеристиці з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.19$ при $V_H = 0 \text{ м/с}$.

знижує максимальні динамічні навантаження металокопструкції і канатів, проте це зниження не велике. Цей незначний вплив пояснюється тим, що максимальні значення в металокопструкції і канатах досягаються впродовж 0,20 - 0,30 з і 0,30 - 0,60 з відповідно після включення електродвигуна.

Таким чином, на основі отриманих результатів можна зробити висновок:

- одно з визначальних впливів на значення коефіцієнтів динамічності металокопструкції робить характер механічної характеристики і швидкість приводу на початку вантаження канатів;

- величина динамічних навантажень металокопструкцій залежить від номінальної швидкості приводу підйому;

- максимальних значень динамічні зусилля в металокопструкції досягаються вже через 0,2 - 0,4 після початку вантаження канатів, тому облік демпфування істотно не позначається на цих зусиллях.

На рисунках 3.7 - 3.10 представлені графіки зміни параметрів перехідного процесу підйому вантажу з жорсткої основи. Розглянуті випадки роботи двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.19$ з початковою швидкістю підйому вантажу $V_H = 0,21$ м/с і $V_H = 0$ м/с, причому графіки на рисунках 3.7 - 3.8 отримані без урахування демпфування в металокопструкції і канатах ($k_D = k'_D = 0$), а на рисунках 3.9 - 3.10 відповідають раніше розрахованим коефіцієнтам демпфування.

4. РОЗРАХУНОК І ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ВАНТАЖОПІДЙОМНИХ КРАНІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕОРІЇ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

4.1. Загальні відомості і основні етапи дослідження

Завдання точного визначення динамічних навантажень вантажопідйомних кранів має велике значення при створенні оптимальних по металоемності машин і зводиться до рішення системи нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку. Отримати рішення такої системи аналітичним методом не представляється можливим, чисельні ж методи не дають універсальних рішень, що дозволяють судити про вплив різних чинників на динаміку кранів.

При розрахунках кранів на міцність і стійкість використовують максимальні значення динамічних навантажень. Ці навантаження зручно апроксимувати функцією, яка дозволяла б просто розраховувати їх залежно від визначальних характеристик кранів. Для цього застосовні методи математичної теорії експерименту, що дозволяє вирішувати широке коло завдань динаміки кранів.

Розрахунок динамічних навантажень за використаною методикою містить наступні етапи:

1. Побудова динамічної і математичної моделей крану.
2. Виділення визначальних чинників.
3. Визначення області зміни чинників; кодування цих чинників.
4. Вибір виду апроксимуючої моделі.
5. Вибір плану експерименту.
6. Проведення експерименту.
7. Визначення коефіцієнтів регресії і перевірка моделі на адекватність.
8. Побудова графіків ліній рівних відгуків отриманих апроксимуючих рівнянь.
9. Аналіз результатів досліджень.

4.2. Розрахунок динамічних навантажень

Відповідно до вище викладеного плану дослідження були проведені в наступній послідовності.

1. В якості динамічної моделі даного крану була прийнята показана на рисунку 3.1 трьохмасова розрахункова схема, рух якої описується диференціальними рівняннями(3.1 - 3.2). Рушійна сила приводу представлена у вигляді рівнянь механічних характеристик, графіки яких представлені на рисунку 3.2.

Одно з вирішальних впливів на величину динамічного коефіцієнта робить швидкість приводу V_H на початку вантаження вантажних канатів. У розрахунках на міцність її рекомендують приймати рівній номінальній швидкості підйому вантажу, тобто $V_H = V_{ном}$, а в розрахунках на витривалість $V_H = (0,5 \dots 0,8)V_{ном}$. Виходячи з цих рекомендацій дослідження, були виконані для випадку підйому з підхопленням з $V_H = 0,21$ м/с, а також для випадку при $V_H = 0$ м/с при роботі двигуна на шостій і п'ятій механічних характеристиках.

2. Для даних бруківок кранів частина технічних характеристик є постійною незалежно від прольотів(механічні характеристики приводу підйому вантажу, приведена маса приводу $m_{п}$, маса вантажу $m_{в}$); інша ж частина залежить від прольоту крану: 10,5 - 34,5 м, висоти підйому вантажу: 5-10 м(коефіцієнти жорсткості вантажних канатів c_k і металоконструкції c_m , приведена маса мостат m_m).

Таким чином, для даних кранів визначальними чинниками будуть c_k , c_m , m_m .

3. Області зміни чинників c_k , c_m , m_m визначені виходячи з реальних параметрів мостових кранів г/п 10 т(ПВ = 40%) прольотами $L=10,5 \dots 34,5$ м.

Згідно з виконаними раніше розрахунками, маємо:

$$\begin{aligned} c_{k \min} &= 5,893 \cdot 10^3 \text{ Н/мм}, & c_{k \max} &= 1,178 \cdot 10^4 \text{ Н/мм} \\ c_{m \min} &= 5,194 \cdot 10^3 \text{ Н/мм}, & c_{m \max} &= 1,133 \cdot 10^4 \text{ Н/мм} \\ m_{m \min} &= 5,435 \cdot 10^3 \text{ кг}, & m_{m \max} &= 1,264 \cdot 10^4 \text{ кг} \end{aligned}$$

Після округлення прийняті наступні межі області визначення чинників :

$$c_{k \min} = 6000 \text{ Н/мм}, \quad c_{k \max} = 12000 \text{ Н/мм}$$

$$c_{m \min} = 6000 \text{ Н/мм}, \quad c_{m \max} = 12000 \text{ Н/мм}$$

$$m_{m \min} = 6000 \text{ кг}, \quad m_{m \max} = 13000 \text{ кг}$$

Основні(нульові) рівні (c_{k0}, c_{m0}, m_{m0}) і інтервали варіювання ($\Delta c_{k0}, \Delta c_{m0}, \Delta m_{m0}$) чинників визначаються по формулам:

$$c_{k0} = \frac{c_{k \max} + c_{k \min}}{2} = \frac{12000 + 6000}{2} = 9000 \text{ Н/мм} \quad (4.1)$$

$$c_{m0} = \frac{c_{m \max} + c_{m \min}}{2} = \frac{12000 + 6000}{2} = 9000 \text{ Н/мм} \quad (4.2)$$

$$m_{m0} = \frac{m_{m \max} + m_{m \min}}{2} = \frac{13000 + 6000}{2} = 9500 \text{ кг} \quad (4.3)$$

$$\Delta c_{k0} = \frac{c_{k \max} - c_{k \min}}{2} = \frac{12000 - 6000}{2} = 3000 \text{ Н/мм} \quad (4.4)$$

$$\Delta c_{m0} = \frac{c_{m \max} - c_{m \min}}{2} = \frac{12000 - 6000}{2} = 3000 \text{ Н/мм} \quad (4.4)$$

$$\Delta m_{m0} = \frac{m_{m \max} - m_{m \min}}{2} = \frac{13000 - 6000}{2} = 3500 \text{ кг} \quad (4.5)$$

Для переходу від розмірних до безрозмірних чинників зроблено їх нормування (кодування):

$$X_1 = \frac{c_k - c_{k0}}{\Delta c_k}; \quad X_2 = \frac{c_m - c_{m0}}{\Delta c_m}; \quad X_3 = \frac{m_m - m_{m0}}{\Delta m_m} \quad (4.6)$$

де X_1, X_2, X_3 - кодовані значення чинників c_k, c_m, m_m .

Таблиця 4.1.

Рівні і інтервали варіювання чинників c_k, c_m, m_m для мостових кранів з/п 10 т прольотами $L=10,5 \dots 34,5$ м.

ЧИННИКИ	$c_k, \text{ Н/мм}$	$c_m, \text{ Н/мм}$	$m_m, \text{ кг}$
Код(X_i)	X_1	X_2	X_3
Основний рівень ($X_i = 0$)	9000	9000	9500
Інтервал варіювання (ΔX_i)	3000	3000	3500
Верхній рівень ($X_i = + 1$)	12000	12000	13000
Нижній рівень ($X_i = - 1$)	6000	6000	6000
Зоряна точка ($X_i = + 0,5$)	10500	10500	11250
Зоряна точка ($X_i = 0,5$)	7500	7500	7750

4. Емпіричну залежність, що описує значення коефіцієнта динамічності для металоконструкції в заданій області визначення чинників c_k , c_m , m_m шукаємо у вигляді квадратики

$$k_{D(\text{розрах})}^M = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{11} \cdot X_1^2 + b_{22} \cdot X_2^2 + b_{33} \cdot X_3^2 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4.7)$$

4.3. Вибір плану і проведення експерименту

Для регресійного аналізу необхідно вибрати план проведення експерименту. Для побудови поліноміальної моделі другого порядку (4.7) вибраний план типу B_k , на базі якого був побудований центральний симетричний композиційний план, число дослідів якого визначається формулою:

$$N = N_B + 2k^* + n_0 \quad (4.8)$$

де $N = N_1 + 2k$ - число дослідів ядра плану;

$N_1 = 2^k$ - число дослідів ядра плану, що є повним факторним експериментом;

$2k$ - число дослідів в зоряних точках, зоряне плече яких $\alpha = 1$;

$2k^*$ - число додаткових зоряних точок із зоряним плечем $\alpha = 0,5$;

n_0 - число дослідів в центрі плану.

У прийнятому плані, на відміну від плану B_3 , чинники варіюються на п'яти рівнях $(-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha)$.

Плани проведення і результати машинного експерименту для випадків підйому з підхопленням з початковими швидкостями $V_H = 0,21$ м/с і $V_H = 0$ м/с представлені в таблицях 4.2 - 4.5.

4.4. Розрахунок коефіцієнтів регресії

Коефіцієнти рівняння регресії(4.7) знайдені шляхом обробки значень коефіцієнтів динамічності $k_{D(\text{екс})}^M$ методом найменших квадратів. Так для представлених в таблиці. 4.2 - 4.5 планів коефіцієнти регресії розраховуються по формулах:

$$b_0 = (-43 \sum_1^8 k_{Дi}^M + 209 \cdot k_{Д9}^M + 125 \sum_{10}^{12} k_{Дi}^M + 188 \sum_{16}^{21} k_{Дi}^M) / 1743; \quad (4.9)$$

$$b_1 = (2 \cdot \sum_1^{21} X_{1i} \cdot k_{Дi}^M) / 21; \quad (4.10)$$

$$b_2 = (2 \cdot \sum_1^{21} X_{2i} \cdot k_{Дi}^M) / 21; \quad (4.11)$$

$$b_3 = (2 \cdot \sum_1^{21} X_{3i} \cdot k_{Дi}^M) / 21; \quad (4.12)$$

$$b_{11} = 2 \cdot (34 \sum_1^8 k_{Дi}^M - 34 \cdot k_{Д9}^M + 210(k_{Д10}^M + k_{Д11}^M) - 122(k_{Д12}^M + k_{Д13}^M + k_{Д14}^M + k_{Д15}^M) + 24(k_{Д16}^M + k_{Д17}^M) - 56(k_{Д18}^M + k_{Д19}^M + k_{Д20}^M + k_{Д21}^M)) / 1411 \quad (4.13)$$

$$b_{22} = 2 \cdot (34 \sum_1^8 k_{Дi}^M - 34 \cdot k_{Д9}^M + 210(k_{Д12}^M + k_{Д13}^M) - 122(k_{Д10}^M + k_{Д11}^M + k_{Д14}^M + k_{Д15}^M) + 24(k_{Д18}^M + k_{Д19}^M) - 56(k_{Д16}^M + k_{Д17}^M + k_{Д20}^M + k_{Д21}^M)) / 1411 \quad (4.14)$$

$$b_{33} = 2 \cdot (34 \sum_1^8 k_{Дi}^M - 34 \cdot k_{Д9}^M + 210(k_{Д14}^M + k_{Д15}^M) - 122(k_{Д10}^M + k_{Д11}^M + k_{Д12}^M + k_{Д13}^M) + 24(k_{Д20}^M + k_{Д21}^M) - 56(k_{Д16}^M + k_{Д17}^M + k_{Д18}^M + k_{Д19}^M)) / 1411 \quad (4.15)$$

$$b_{12} = (k_{Д1}^M + k_{Д2}^M - k_{Д3}^M - k_{Д4}^M - k_{Д5}^M - k_{Д6}^M + k_{Д7}^M + k_{Д8}^M) / 8 \quad (4.16)$$

$$b_{13} = (k_{Д1}^M - k_{Д2}^M + k_{Д3}^M - k_{Д4}^M - k_{Д5}^M + k_{Д6}^M - k_{Д7}^M + k_{Д8}^M) / 8 \quad (4.17)$$

$$b_{23} = (k_{Д1}^M - k_{Д2}^M - k_{Д3}^M + k_{Д4}^M + k_{Д5}^M - k_{Д6}^M - k_{Д7}^M + k_{Д8}^M) / 8 \quad (4.18)$$

Значення коефіцієнтів регресії приведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.2

Значення $k_{Д}^M$ для мостових кранів з/п 10 тпри підйомі вантажу

з підхопленням при $V_H = 0,21$ м/с

(робота двигуна на штучній механічній характеристиці $P_{Д(\dot{y}=0)} / Q = 1.92$)

№ до-слідження	X_1	X_2	X_3	$c_K, \text{Н/мм}$	$c_M, \text{Н/мм}$	$m_M, \text{кг}$	$k_{Д}^M(\text{експер})$	$k_{Д}^M(\text{розрах})$
1	1	1	1	12000	12000	13000	2,035	1,953
2	1	1	-1	12000	12000	6000	1,714	1,746
3	1	-1	1	12000	6000	13000	1,709	1,761
4	1	-1	-1	12000	6000	6000	1,552	1,555

№ до- слідження	X_1	X_2	X_3	$C_K,$ Н/ММ	$C_M,$ Н/ММ	$m_M,$ КГ	$k_{Д}^M$ (експер)	$k_{Д}^M$ (розрах)
5	-1	1	1	6000	12000	13000	1,767	1,856
6	-1	1	-1	6000	12000	6000	1,636	1,650
7	-1	-1	1	6000	6000	13000	1,693	1,664
8	-1	-1	-1	6000	6000	6000	1,543	1,458
9	0	0	0	9000	9000	9500	1,748	1,753
10	1	0	0	12000	9000	9500	1,793	1,793
11	-1	0	0	6000	9000	9500	1,686	1,696
12	0	1	0	9000	12000	9500	1,843	1,799
13	0	-1	0	9000	6000	9500	1,550	1,607
14	0	0	1	9000	9000	13000	1,893	1,866
15	0	0	-1	9000	9000	6000	1,634	1,660
16	0,5	0	0	10500	9000	9500	1,788	1,775
17	-0,5	0	0	7500	9000	9500	1,730	1,726
18	0	0,5	0	9000	10500	9500	1,813	1,788
19	0	-0,5	0	9000	7500	9500	1,696	1,692
20	0	0	0,5	9000	9000	10500	1,808	1,807
21	0	0	-0,5	9000	9000	7500	1,679	1,704

Таблиця 4.3

Значення k_D^M для мостових кранів з/п 10 т при підйомі вантажу
з підхопленням при $V_H = 0$ м/с
(робота двигуна на штучній механічній характеристиці $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.92$)

№ до-слідження	X_1	X_2	X_3	c_K , Н/мм	c_M , Н/мм	m_M , кг	$k_{D(\text{експер})}^M$	$k_{D(\text{розрах})}^M$
1	1	1	1	12000	12000	13000	1,506	1,501
2	1	1	-1	12000	12000	6000	1,428	1,426
3	1	-1	1	12000	6000	13000	1,459	1,474
4	1	-1	-1	12000	6000	6000	1,405	1,400
5	-1	1	1	6000	12000	13000	1,482	1,479
6	-1	1	-1	6000	12000	6000	1,394	1,404
7	-1	-1	1	6000	6000	13000	1,456	1,452
8	-1	-1	-1	6000	6000	6000	1,383	1,377
9	0	0	0	9000	9000	9500	1,462	1,459
10	1	0	0	12000	9000	9500	1,468	1,465
11	-1	0	0	6000	9000	9500	1,439	1,443
12	0	1	0	9000	12000	9500	1,468	1,469
13	0	-1	0	9000	6000	9500	1,442	1,442
14	0	0	1	9000	9000	13000	1,487	1,484
15	0	0	-1	9000	9000	6000	1,410	1,410
16	0,5	0	0	10500	9000	9500	1,465	1,463
17	-0,5	0	0	7500	9000	9500	1,454	1,452
18	0	0,5	0	9000	10500	9500	1,466	1,464
19	0	-0,5	0	9000	7500	9500	1,452	1,451
20	0	0	0,5	9000	9000	10500	1,473	1,474
21	0	0	-0,5	9000	9000	7500	1,427	1,437

Таблиця 4.4

Значення k_D^M для мостових кранів з/п 10 т при підйомі вантажу

з підхопленням при $V_H = 0,21$ м/с

(робота двигуна на штучній механічній характеристиці $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.19$)

№ до-слідження	X_1	X_2	X_3	C_K , Н/мм	C_M , Н/мм	m_M , кг	$k_{D(\text{експер})}^M$	$k_{D(\text{розрах})}^M$
1	1	1	1	12000	12000	13000	1,960	1,874
2	1	1	-1	12000	12000	6000	1,632	1,680
3	1	-1	1	12000	6000	13000	1,606	1,660
4	1	-1	-1	12000	6000	6000	1,467	1,465
5	-1	1	1	6000	12000	13000	1,716	1,781
6	-1	1	-1	6000	12000	6000	1,567	1,587
7	-1	-1	1	6000	6000	13000	1,580	1,567
8	-1	-1	-1	6000	6000	6000	1,468	1,373
9	0	0	0	9000	9000	9500	1,672	1,670
10	1	0	0	12000	9000	9500	1,719	1,711
11	-1	0	0	6000	9000	9500	1,600	1,619
12	0	1	0	9000	12000	9500	1,769	1,726
13	0	-1	0	9000	6000	9500	1,455	1,512
14	0	0	1	9000	9000	13000	1,797	1,777
15	0	0	-1	9000	9000	6000	1,558	1,583
16	0,5	0	0	10500	9000	9500	1,708	1,692
17	-0,5	0	0	7500	9000	9500	1,640	1,646
18	0	0,5	0	9000	10500	9500	1,728	1,711
19	0	-0,5	0	9000	7500	9500	1,611	1,604
20	0	0	0,5	9000	9000	10500	1,718	1,721
21	0	0	-0,5	9000	9000	7500	1,613	1,624

Таблиця 4.5

Значення k_D^M для мостових кранів з/п 10 т при підйомі вантажу
з підхопленням при $V_H = 0$ м/с
(робота двигуна на штучній механічній характеристиці $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.19$)

№ до-слідження	X_1	X_2	X_3	c_K , Н/мм	c_M , Н/мм	m_M , кг	$k_{D(експер)}^M$	$k_{D(розрах)}^M$
1	1	1	1	12000	12000	13000	1,331	1,325
2	1	1	-1	12000	12000	6000	1,269	1,267
3	1	-1	1	12000	6000	13000	1,312	1,315
4	1	-1	-1	12000	6000	6000	1,254	1,257
5	-1	1	1	6000	12000	13000	1,300	1,301
6	-1	1	-1	6000	12000	6000	1,238	1,244
7	-1	-1	1	6000	6000	13000	1,293	1,292
8	-1	-1	-1	6000	6000	6000	1,239	1,234
9	0	0	0	9000	9000	9500	1,288	1,283
10	1	0	0	12000	9000	9500	1,289	1,291
11	-1	0	0	6000	9000	9500	1,270	1,268
12	0	1	0	9000	12000	9500	1,281	1,282
13	0	-1	0	9000	6000	9500	1,273	1,273
14	0	0	1	9000	9000	13000	1,316	1,316
15	0	0	-1	9000	9000	6000	1,259	1,259
16	0,5	0	0	10500	9000	9500	1,288	1,288
17	-0,5	0	0	7500	9000	9500	1,274	1,276
18	0	0,5	0	9000	10500	9500	1,283	1,284
19	0	-0,5	0	9000	7500	9500	1,279	1,279
20	0	0	0,5	9000	9000	10500	1,292	1,298
21	0	0	-0,5	9000	9000	7500	1,274	1,270

Таблиця 4.6

Значення коефіцієнтів регресії для кожного з даних варіантів

Коефіцієнти регресії	Робота двигуна на штучній механічній характеристиці			
	з $P_{Д(\dot{y}=0)}/Q = 1.92$		з $P_{Д(\dot{y}=0)}/Q = 1.19$	
	при $V_H = 0,21$ м/с	при $V_H = 0$ м/с	при $V_H = 0,21$ м/с	при $V_H = 0$ м/с
b_0	1,753	1,459	1,670	1,283
b_1	0,048	0,011	0,046	0,012
b_2	0,096	0,013	0,107	0,005
b_3	0,103	0,037	0,097	0,029
b_{11}	-0,008	-0,005	-0,005	-0,003
b_{22}	-0,050	-0,003	-0,051	-0,005
b_{33}	0,011	-0,012	0,009	0,005
b_{12}	0,040	0,004	0,035	0,004
b_{13}	0,025	-0,004	0,026	0,001
b_{23}	0,018	0,005	0,028	0,002

В результаті отримана емпірична залежність, що описує значення коефіцієнтів динамічності металоконструкції k_D^M при підйомі вантажу з підхопленням (при роботі двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{Д(\dot{y}=0)}/Q = 1.92$) з початковою швидкістю приводу $V_H = 0,21$ м/с і початковою швидкістю приводу $V_H = 0$ м/с.

$$k_{Д(розрах)}^M = 1,753 + 0,048 \cdot X_1 + 0,096 \cdot X_2 + 0,103 \cdot X_3 - 0,008 \cdot X_1^2 - 0,050 \cdot X_2^2 + 0,011 \cdot X_3^2 + 0,040 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,025 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,018 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4.19)$$

$$k_{Д(розрах)}^M = 1,459 + 0,011 \cdot X_1 + 0,013 \cdot X_2 + 0,037 \cdot X_3 - 0,005 \cdot X_1^2 - 0,003 \cdot X_2^2 + 0,012 \cdot X_3^2 + 0,004 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,004 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,005 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4.20)$$

Для випадку підйому вантажу з підхопленням при роботі двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{Д(\dot{y}=0)}/Q = 1.19$ з початковою швидкістю $V_H = 0,21$ м/с і $V_H = 0$ м/с залежності матимуть наступний вигляд:

$$k_{Д(розрах)}^M = 1,670 + 0,046 \cdot X_1 + 0,107 \cdot X_2 + 0,097 \cdot X_3 - 0,005 \cdot X_1^2 - 0,051 \cdot X_2^2 + 0,009 \cdot X_3^2 + 0,035 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,026 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,028 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4.21)$$

$$k_{Д(розрах)}^M = 1,283 + 0,012 \cdot X_1 + 0,005 \cdot X_2 + 0,029 \cdot X_3 - 0,003 \cdot X_1^2 - 0,005 \cdot X_2^2 + 0,005 \cdot X_3^2 + 0,004 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,001 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,002 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4.22)$$

4.5. Перевірка адекватності моделі

В якості оцінки точності апроксимації прийнята варіація:

$$\rho = \frac{1}{k_{Д(ср)}^M} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{21} (k_{Д(експер)}^M - k_{Д(розрах)}^M)^2}{N-j}} \leq 0,05 \quad (4.23)$$

де $k_{Д(ср)}^M = b_0$;

$N = 21$ - число дослідів;

j - число коефіцієнтів квадратичної апроксимації.

При перевірці моделей на адекватність були отримані наступні значення:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 0,032 & \rho_3 &= 0,033 \\ \rho_2 &= 0,005 & \rho_4 &= 0,004 \end{aligned}$$

4.6. Побудова ліній рівних відгуків і їх аналіз

В результаті проведених досліджень отримані апроксимуючі поліноми(4.19) -(4.22), значення коефіцієнтів динамічності металоконструкції, що описують $k_{Д(розрах)}^M$ даних мостових кранів г/п 10 т прольотами від 10,5 до 34,5 м при підйомі вантажу з жорсткої основи з початковими швидкостями приводу $V_H = 0,21$ м/с і $V_H = 0$ м/с при роботі двигуна на різних штучних механічних характеристиках. Характерною особливістю поліномів(4.19) -(4.22) являється те, що вони дозволяють розраховувати значення коефіцієнтів $k_{Д}^M$ для даних бруківок кранів г/п 10 т для усіх прольотів, причому точність розрахунку має

той же порядок, що і при рішенні системи нелінійних рівнянь руху (3.1 - 3.2), про що свідчить перевірка рівнянь (4.19) -(4.22) на адекватність.

Іншою характерною особливістю поліномів(4.19) -(4.22) являється можливість за значенням коефіцієнтів при чинниках оцінювати вплив відповідних чинників і їх поєднань на рівень динамічної навантаженості.

Для наочності отриманих результатів побудовані лінії рівних рівнів(відгуків) рівнянь(4.19) -(4.22) при фіксованих значеннях коефіцієнта жорсткості вантажних канатів c_k , що відповідають довжинам канатів $l = 5$ м і $l = 10$ м.

$$c_k = \frac{E_k \cdot E_k}{l_5} = \frac{1,4 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 105,24}{5000} = 1,178 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}$$

$$c_k = \frac{E_k \cdot E_k}{l_{10}} = \frac{1,4 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 105,24}{10000} = 5,893 \cdot 10^3 \text{ Н/мм} \quad (4.24)$$

що відповідає нормованим значенням параметра $X_1 = 0,927$ і $X_2 = -1,036$.

Після підстановки отриманих значень X_1 в(4.19) -(4.22) отримані наступні залежності для розрахунку k_D^M :

а) підйом вантажу з підхопленням при $V_H = 0,21$ м/с (робота двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1,92$):

- довжина вантажних канатів $l = 5$ м

$$k_{D(\text{розрах})}^M = 1,790 + 0,133X_2 + 0,126X_3 - 0,050X_2^2 + 0,011X_3^2 + 0,018X_2X_3 \quad (4.25)$$

- довжина вантажних канатів $l = 10$ м

$$k_{D(\text{розрах})}^M = 1,695 + 0,063X_2 + 0,077X_3 - 0,050X_2^2 + 0,011X_3^2 + 0,018X_2X_3 \quad (4.26)$$

б) підйом вантажу з підхопленням при $V_H = 0$ м/с (робота двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1,92$):

- довжина вантажних канатів $l = 5$ м

$$k_{D(\text{розрах})}^M = 1,465 + 0,017X_2 + 0,033X_3 - 0,003X_2^2 + 0,012X_3^2 + 0,005X_2X_3 \quad (4.27)$$

- довжина вантажних канатів $l = 10$ м

$$k_{Д(розрах)}^M = 1,443 + 0,009X_2 + 0,041X_3 - 0,003X_2^2 + 0,012X_3^2 + 0,005X_2X_3 \quad (4.28)$$

в) підйом вантажу з підхопленням при $V_H = 0,21$ м/с (робота двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{Д(\dot{y}=0)}/Q = 1.19$)

- довжина вантажних канатів $l = 5$ м

$$k_{Д(розрах)}^M = 1,709 + 0,139X_2 + 0,121X_3 - 0,051X_2^2 + 0,009X_3^2 + 0,028X_2X_3 \quad (4.29)$$

- довжина вантажних канатів $l = 10$ м

$$k_{Д(розрах)}^M = 1,566 + 0,071X_2 + 0,070X_3 - 0,051X_2^2 + 0,009X_3^2 + 0,028X_2X_3 \quad (4.30)$$

г) підйом вантажу з підхопленням при $V_H = 0$ м/с (робота двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{Д(\dot{y}=0)}/Q = 1.19$)

- довжина вантажних канатів $l = 5$ м

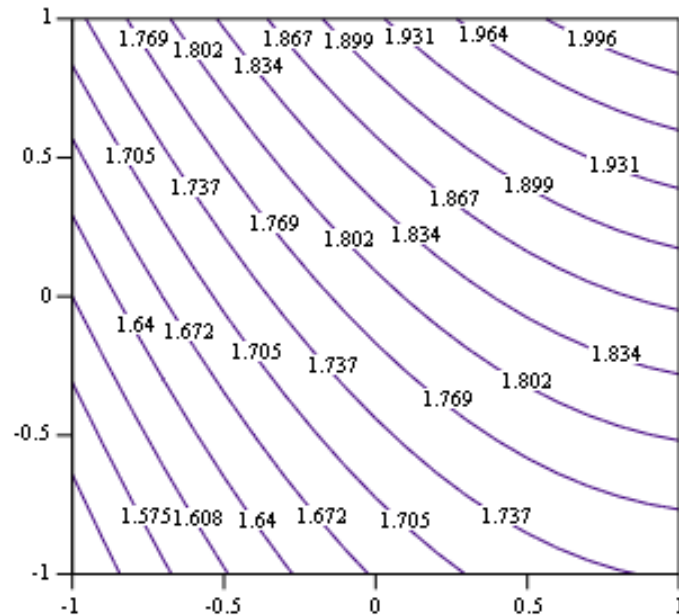
$$k_{Д(розрах)}^M = 1,291 + 0,009X_2 + 0,030X_3 - 0,005X_2^2 + 0,005X_3^2 + 0,002X_2X_3 \quad (4.31)$$

- довжина вантажних канатів $l = 10$ м

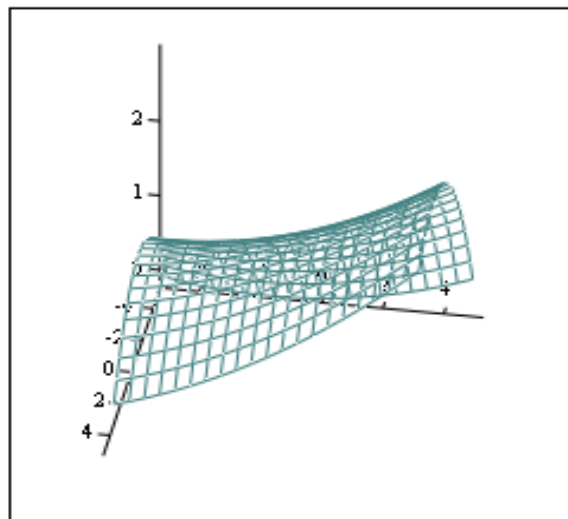
$$k_{Д(розрах)}^M = 1,268 + 0,001X_2 + 0,028X_3 - 0,005X_2^2 + 0,005X_3^2 + 0,002X_2X_3 \quad (4.32)$$

Представлені на рисунках (4.1) -(4.8) лінії рівних рівнів дозволяють легко простежити, як змінюється величина коефіцієнта динамічності металоконструкції k_D^M при зміні того або іншого чинника. Міра впливу цих чинників на величину максимальних динамічних навантажень залежить від рівнів(значень), на яких знаходяться інші чинники.

При дослідженні впливу різних параметрів на динаміку крану не можна брати в якості чинника відношення двох або декількох параметрів. Багатофакторні дослідження динаміки кранів дозволяють уникнути помилки від узагальнення приватних результатів досліджень.

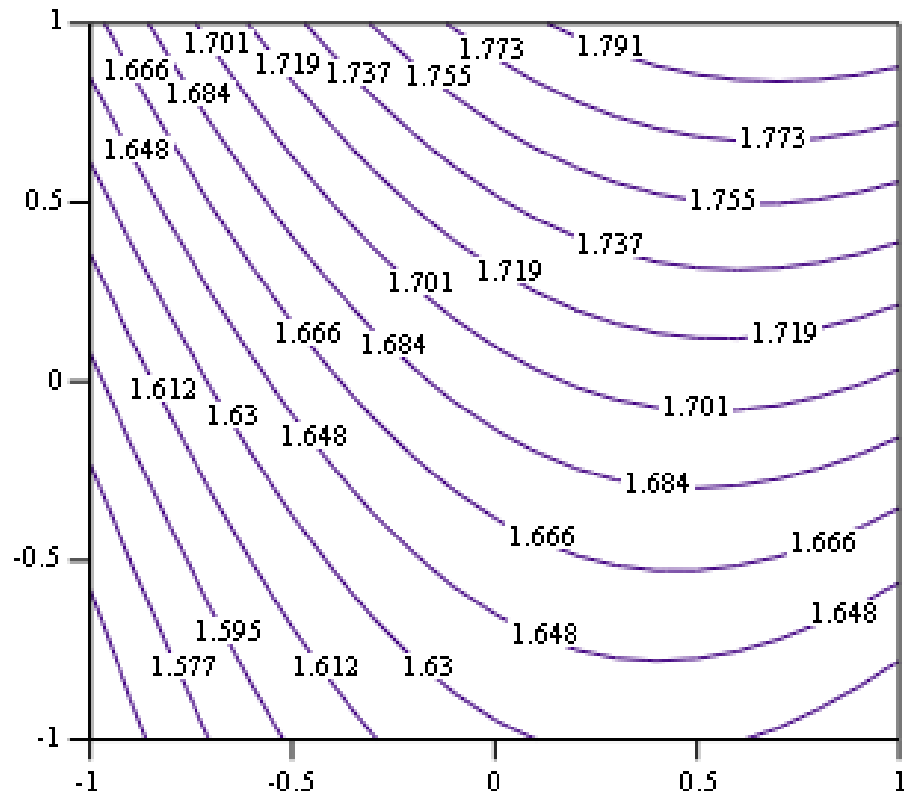


кр

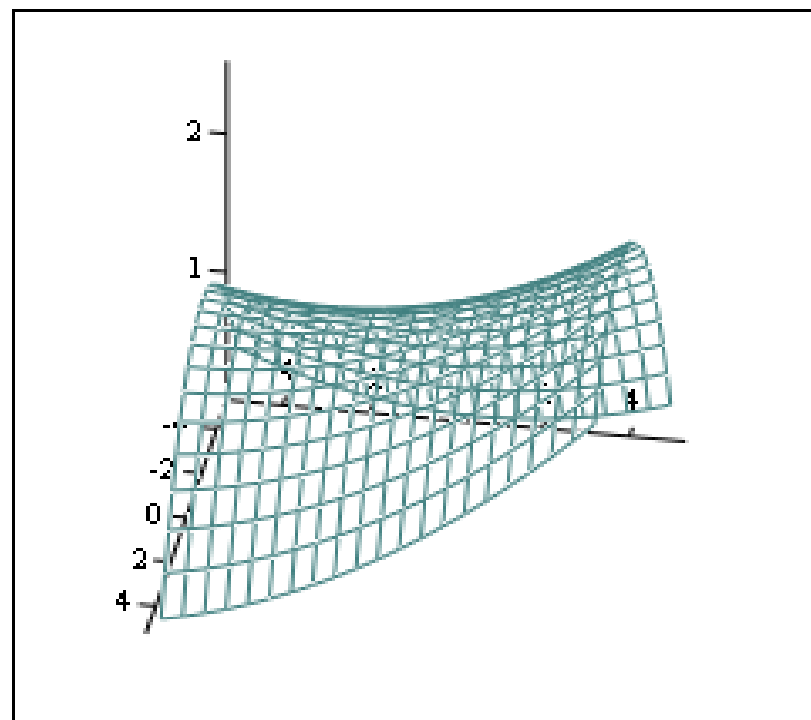


кр

Рис. 4.1 - Значення k_D^M для мостових кранів г/п 10 т при підйомі вантажу з підхопленням при $V_H = 0,21$ м/с (робота двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.92$; довжина вантажних канатів 5 м)

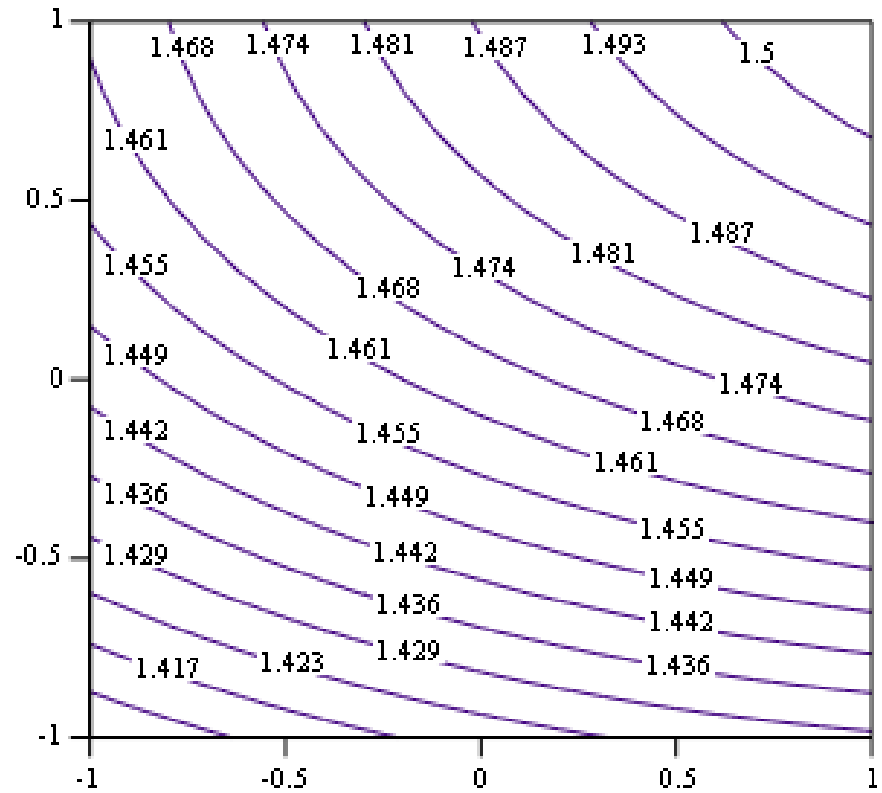


кp

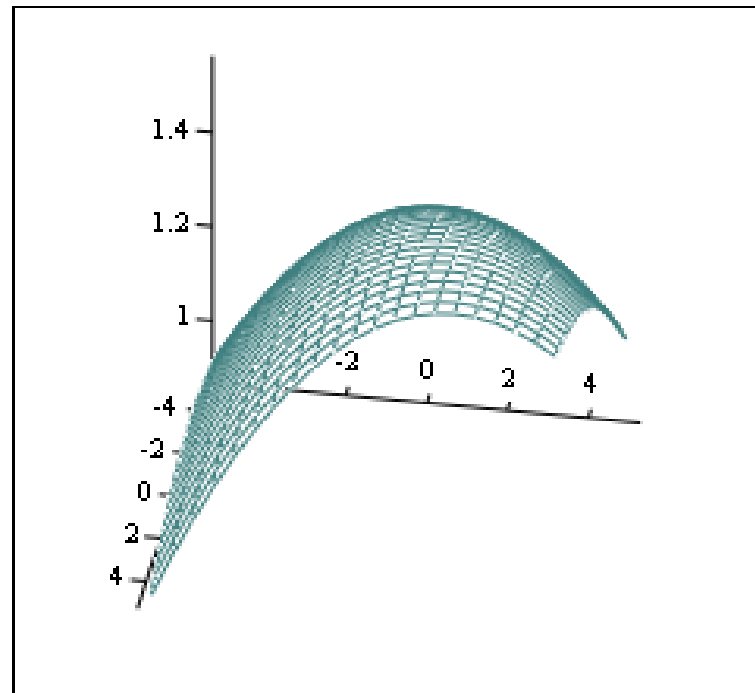


кp

Рис. 4.2 - Значення k_D^M для мостових кранів г/п 10 т при підйомі вантажу з підхопленням при $V_H = 0,21$ м/с (робота двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1,92$; довжина вантажних канатів 10 м)

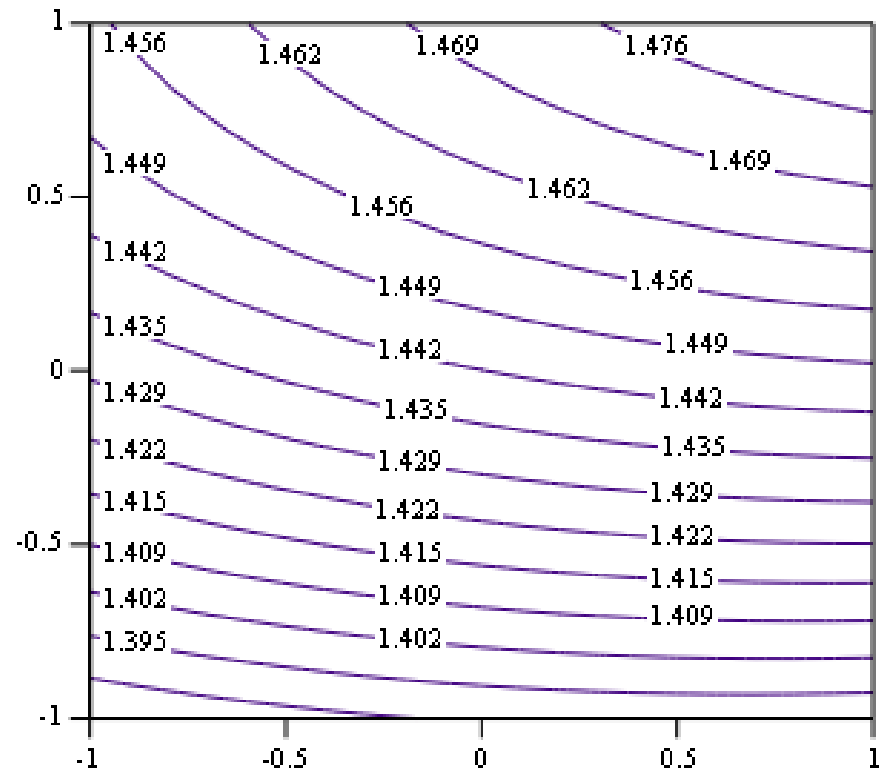


k_p

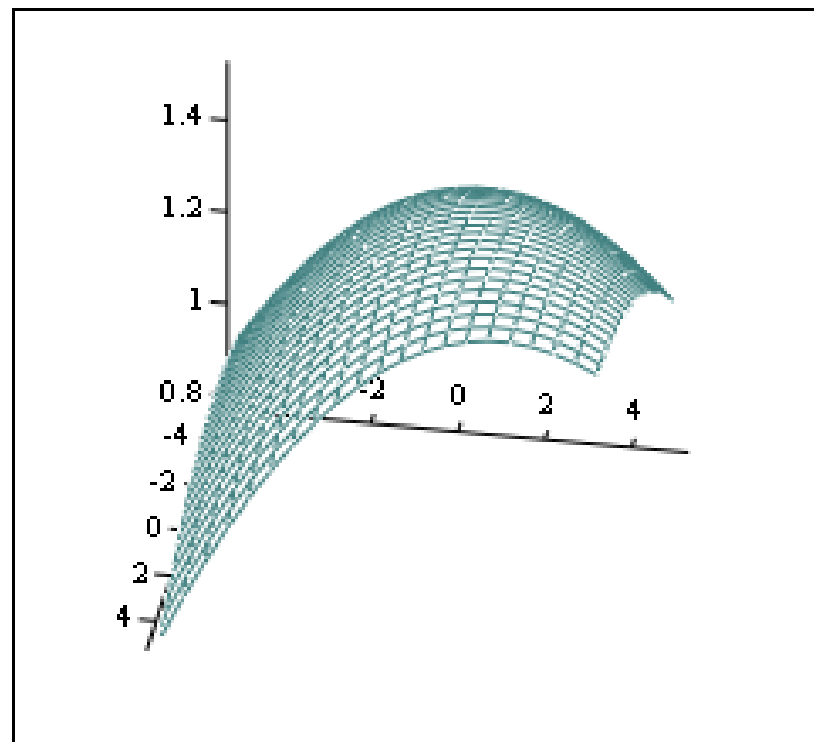


k_p

Рис. 4.3 - Значення k_D^M для мостових кранів г/п 10 т при підйомі вантажу з підхопленням при $V_H = 0$ м/с (робота двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.92$; довжина вантажних канатів 5 м)



кp



кp

Рис. 4.4 - Значення k_D^M для мостових кранів г/п 10 т при підйомі вантажу з підхопленням при $V_H = 0$ м/с (робота двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.92$; довжина вантажних канатів 10 м)

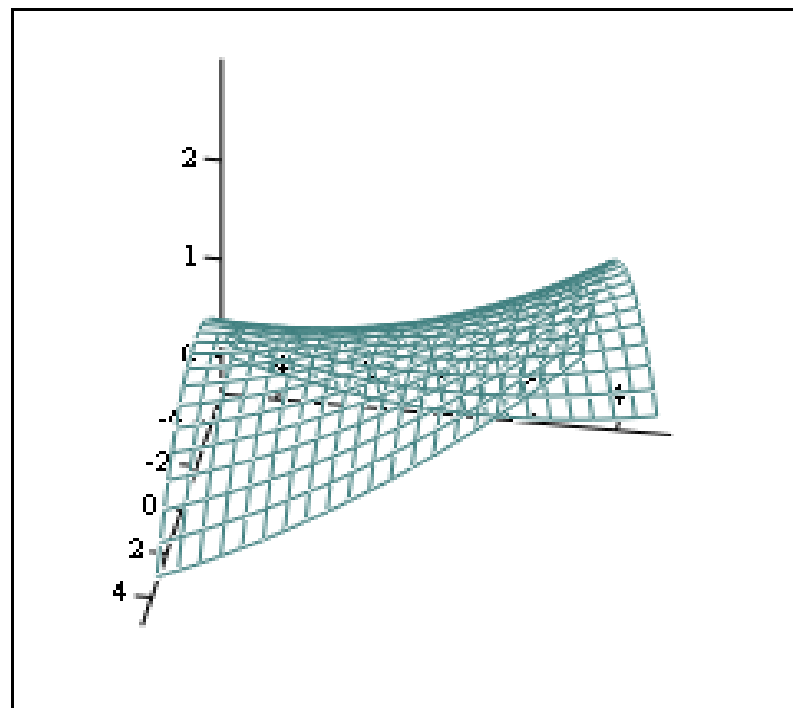
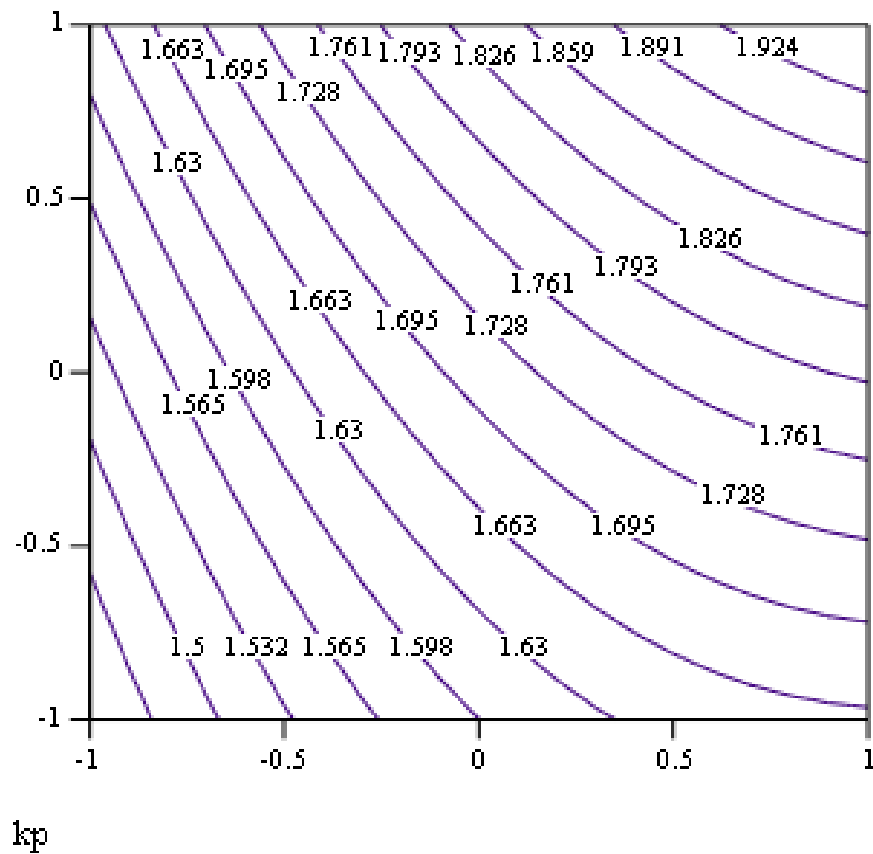
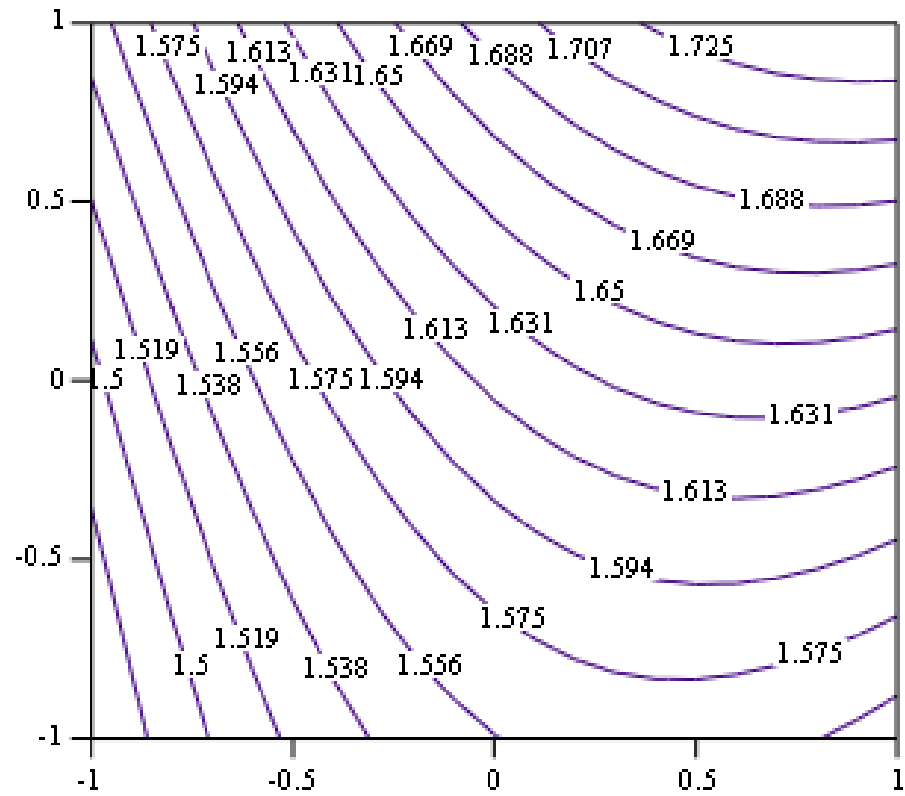
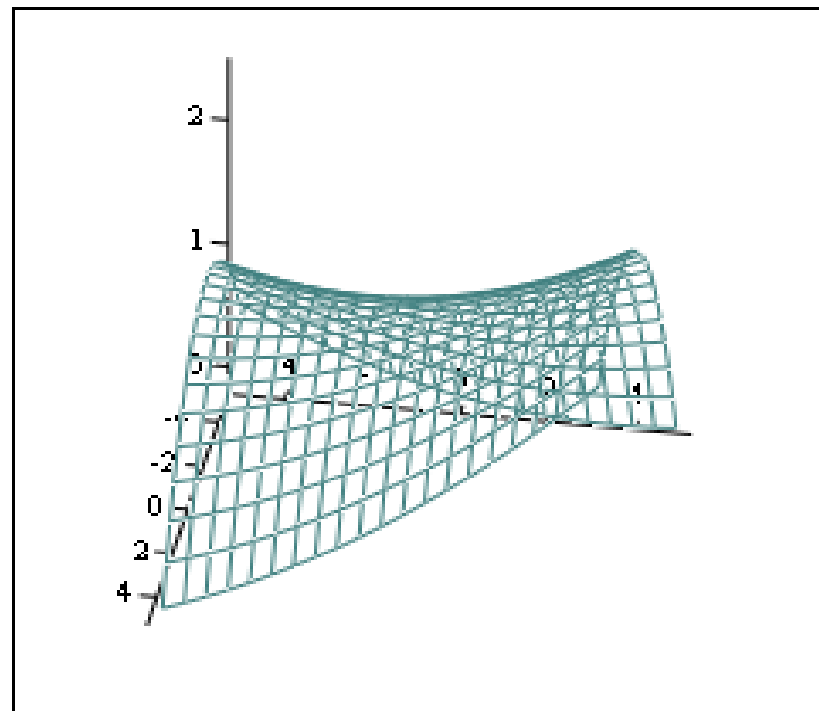


Рис. 4.5 - Значення k_D^M для мостових кранів г/п 10 т при підйомі вантажу з підхопленням при $V_H = 0,21$ м/с (робота двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{D(y=0)}/Q = 1.19$; довжина вантажних канатів 5 м)

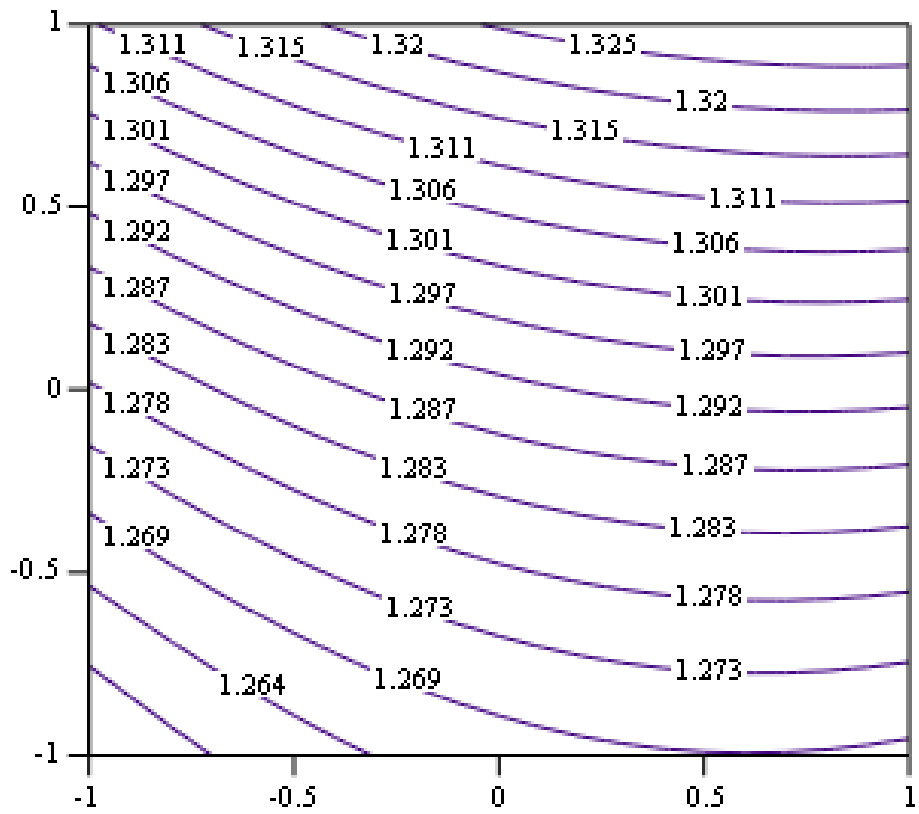


кр

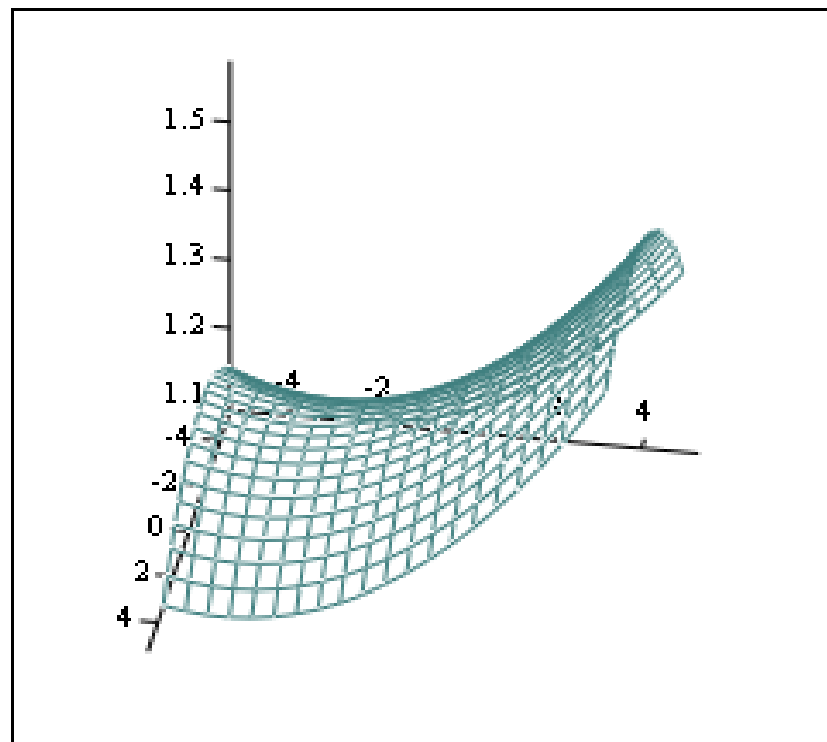


кр

Рис. 4.6 - Значення k_D^M для мостових кранів г/п 10 т при підйомі вантажу з підхопленням при $V_H = 0,21$ м/с (робота двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{D(y=0)}/Q = 1.19$; довжина вантажних канатів 10 м)



кр



кр

Рис. 4.7 - Значення k_D^M для мостових кранів г/п 10 т при підйомі вантажу з підхопленням при $V_H = 0$ м/с (робота двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.19$; довжина вантажних канатів 5 м)

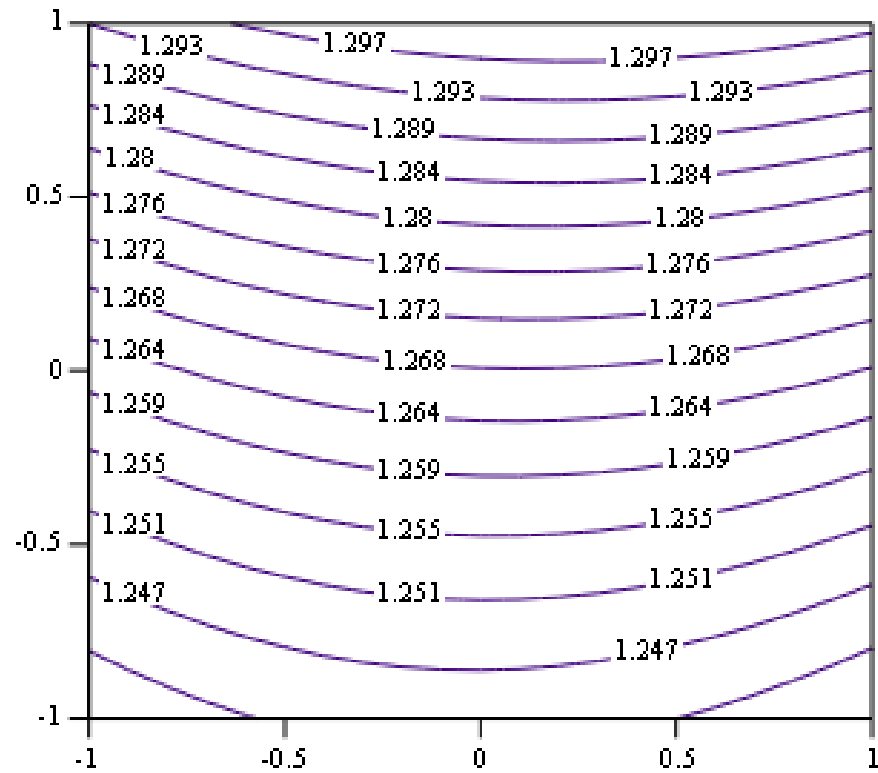
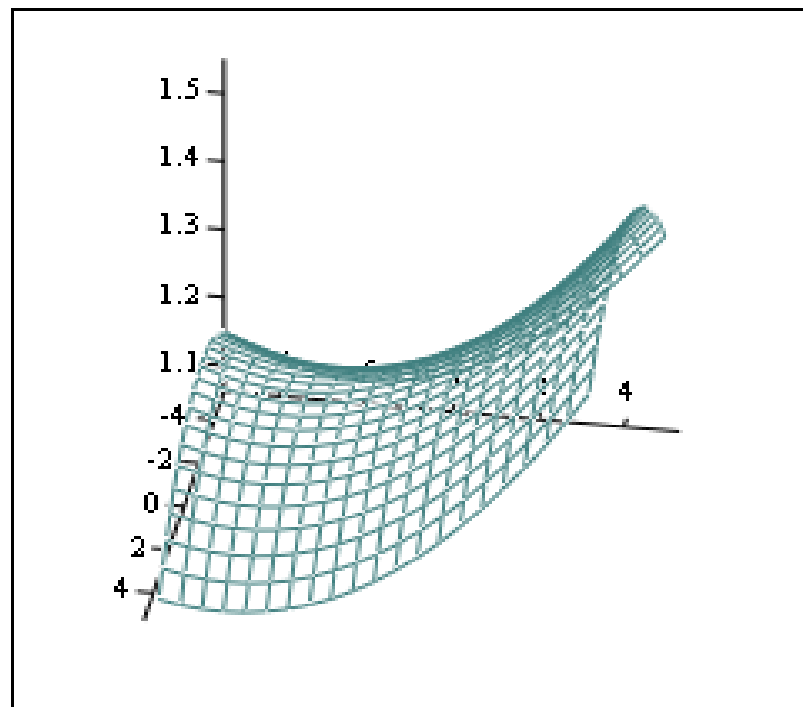
к_рк_р

Рис. 4.8 - Значення k_D^M для мостових кранів г/п 10 т при підйомі вантажу з підхопленням при $V_H = 0$ м/с (робота двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.19$; довжина вантажних канатів 10 м)

4.7. Аналіз моделей другого порядку

Планування 2-го порядку закінчується отриманням адекватного квадратичного рівняння. Але в представленому виді аналізувати рівняння 2-ої міри складно, тому для аналізу рівняння наводиться до канонічного виду.

Канонічне перетворення полягає в знаходженні центру поверхні 2-го порядку (якщо такий є), перенесенню початку координат в новий центр і повороту координатних осей.

Перетворимо до канонічного виду рівняння:

$$k_{D(\text{роз})}^M = 1,617 + 0,071X_2 + 0,070X_3 - 0,051X_2^2 + 0,009X_3^2 + 0,028X_2X_3 \quad (4.33)$$

яке відповідає підйому вантажу з підхопленням при $V_H = 0,21$ м/с і роботі двигуна на штучній механічній характеристиці з $P_{D(\dot{y}=0)}/Q = 1.19$ при довжині вантажних канатів $l = 10$ м.

Процедура канонічного перетворення рівняння (4.33) складається з наступних етапів:

1. Визначимо координати центру поверхні 2-го порядку, для чого вирішимо систему лінійних рівнянь, що виходять після прирівнювання нулю частинних похідних рівняння (4.33) по незалежних змінних:

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial X_2} = 0,071 - 2 \cdot 0,051X_2 + 0,0028X_3 = 0 \\ \frac{\partial y}{\partial X_3} = 0,070 + 2 \cdot 0,009X_3 + 0,0028X_2 = 0 \end{cases} \quad (4.34)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial X_2} = 0,071 - 0,102X_2 + 0,0028X_3 = 0 \\ \frac{\partial y}{\partial X_3} = 0,070 + 0,0028X_2 + 0,018X_3 = 0 \end{cases} \quad (4.35)$$

$$D = \begin{vmatrix} -0,102 & 0,0028 \\ 0,0028 & 0,018 \end{vmatrix} = -0,0018 - 0,0056 = -0,0074$$

$$D = \begin{vmatrix} -0,071 & 0,0028 \\ -0,070 & 0,018 \end{vmatrix} = -0,00013 + 0,0002 = -0,0011 \quad (4.36)$$

$$D = \begin{vmatrix} -0,102 & -0,071 \\ 0,0028 & -0,070 \end{vmatrix} = -0,0071 + 0,0002 = 0,0073$$

$$X_{2S} = \frac{D_2}{D} = 0,1455$$

$$X_{3S} = \frac{D_3}{D} = 0,1455 \quad (4.37)$$

2. Визначимо значення відгуку в новому центрі. Підставляючи значення X_{2S}, X_{3S} у(4.33) отримаємо значення параметра оптимізації в новому центрі поверхні:

$$k_{D(\text{роз})S}^M = 1,617 + 0,071 \cdot 0,1455 + 0,070 \cdot (-0,9869) + 0,0028 \cdot 0,1455 \cdot (-0,9869) - 0,051 \cdot 0,1455^2 + 0,009 \cdot (-0,9869)^2 = 1,566 \quad (4.38)$$

Після перенесення початку координат в новий центр рівняння(4.33) прийме вигляд:

$$k_{D(\text{роз})}^M = 1,566 + 0,0028X_2X_3 = 0,051X_2^2 + 0,009X_3^2 \quad (4.39)$$

3. Визначимо величини канонічних коефіцієнтів. З цією метою вирішимо наступне характеристичне рівняння:

$$f(B) = \begin{vmatrix} (-0,051 - B) & \frac{1}{2} \cdot 0,0028 \\ \frac{1}{2} \cdot 0,0028 & (0,009 - B) \end{vmatrix} = B^2 + 0,042 \cdot B - 0,00046 = 0 \quad (4.40)$$

Вирішуючи отримане квадратне рівняння, отримаємо:

$$\begin{aligned} B_{11} &= 0,0089 \\ B_{22} &= -0,0509 \end{aligned} \quad (4.41)$$

4. Перевіримо правильність обчислення :

$$\begin{aligned} \sum b_{ij} &= -0,051 + 0,009 = -0,042 \\ \sum b_{ji} &= 0,0089 + (-0,0509) = -0,042 \end{aligned} \quad (4.42)$$

5. Запишемо рівняння(4.39) в канонічній формі:

$$k_{D(\text{розрах})}^M = 1,566 + 0,0089Z_2^2 + 0,0509Z_3^2 \quad (4.43)$$

б. Визначимо тип поверхні відгуку.

Згідно вище приведеним обчисленням, коефіцієнти B_{11} і B_{22} мають різні знаки, що вказує на те, що поверхня відгуку є гіперболічним параболоїдом, центр якої називається "сідлом" або "мінімаксом".

Гіперболи витягнуті по тій осі, якій відповідає менше за абсолютною величиною значення коефіцієнта в канонічному рівнянні. Значення відгуку збільшується при русі з центру S по одній осі і зменшується при русі по іншій.

Правильність визначення типу поверхні відгуку можна перевірити, звернувшись до поверхневого графіку, що відповідає рівнянню(4.33), на рисунку

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ДИДАКТИЧНОГО ПРОЄКТУ ФАКУЛЬТАТИВНОГО ЗАНЯТТЯ З ТЕМИ «ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ І РІВНЯННЯ РУХУ ПРИ ПІДЙОМІ ВАНТАЖУ З ЖОРСТКОЇ ОСНОВИ МОСТОВИМИ КРАНАМИ»» ДЛЯ ФАХІВЦІВ МАШИНОБУДІВНОГО ПІДПРИЄМСТВА

5.1. Вихідні дані:

Стратегічні цілі підготовки:

- застосовувати глибокі знання у галузі сучасних технологій машинобудівного виробництва для вирішення міждисциплінарних інженерних завдань;
- ставити та вирішувати інноваційні завдання інженерного аналізу, пов'язані зі створенням та обробкою матеріалів та виробів, з використанням системного аналізу та моделювання об'єктів та процесів машинобудування;
- розробляти технологічні процеси, проектувати та використовувати нове обладнання та інструменти для обробки матеріалів та виробів, конкурентоспроможних на світовому ринку машинобудівного виробництва;
- проводити теоретичні та експериментальні дослідження в галузі сучасних технологій обробки матеріалів, нанотехнологій, створення нових матеріалів у складних та невизначених умовах.

5.2. Постановка цілей факультативного заняття (оперативних цілей).

Опис оперативних цілей з навчальної теми представлено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Оперативні цілі вивчення теми

Професійні компетенції	Цілі-задачі навчального матеріалу	Умови досягнення	Результат у вигляді дій студентів
1	2	3	4
Сформувати знання та уміння щодо динамічної і математичної моделі крану; здійснювати розрахунок коефіцієнтів диференціальних рівнянь руху; описувати введення в математичну модель приведеної сили приводу; записувати рівняння руху до виду, зручного для чисельної інтеграції.	Динамічна і математична моделі крану. Розрахунок коефіцієнтів диференціальних рівнянь руху. Введення в математичну модель приведеної сили приводу. Приведення рівнянь руху до виду, зручного для чисельної інтеграції.	Базові знання: Теорія різання та інструмент, автоматизовані виробничі системи та технологічне оснащення верстатів, деталі машин, обладнання автоматизованого виробництва	Правильно описувати динамічну і математичну моделі крану; здійснювати розрахунок коефіцієнтів диференціальних рівнянь руху; описувати введення в математичну модель приведеної сили приводу; записувати рівняння руху до виду, зручного для чисельної інтеграції.

5.3. Перелік літературних джерел з теми.

1. Теорія термічної обробки. / Новіков І.І. М: Металургія, 1978. - 288 с.
2. Бондаренко С.Г. Основи технології машинобудування. / С.Г. Бондаренко – Чернігів: ЧДТУ, 2005. – 567 с.
3. Косилова А.Г. Довідник технолога - машинобудівника. У 2 - х т./Под ред. А.Г.Косілової і Р.К.Мещерякова.- 4 - вид., Перераб. і доп.- М.: Машинобудування, 2010. мул.
4. Бондаренко С.Г. Основи технології машинобудування : навч. посібник для студ. вищих техн. навч. закладів / С.Г. Бондаренко. – Львів : Магнолія, 2007. – 567 с.

5. Бондаренко С.Г. Розмірні зв'язки конструкцій і технологічних процесів: монографія / С. Г. Бондаренко, О. М. Чередніков; ред.: С. Г. Бондаренко; Черніг. держ. технол. ун-т. – Чернігів, 2013. – 463 с.

6. Анурьев В.І. Довідник конструктора-машинобудівника. - 5-е изд., Перераб. і доп.- М.: Машинобудування, 2008. - Т. 1. - 728с.

7. Руденко П.О. Проектування технологічних процесів у машинобудуванні: навч. посібник. / П.О. Руденко – К.: Вища школа., 1993. – 414 с.

5.4. Конструювання дидактичних матеріалів:

План

1. Динамічна і математична моделі крану.
2. Розрахунок коефіцієнтів диференціальних рівнянь руху.
3. Введення в математичну модель приведеної сили приводу.
4. Приведення рівнянь руху до виду, зручного для чисельної інтеграції.

5.5. Аналіз базових умов навчання. Вибір способів актуалізації базових знань і способів дій представлено в табл.4.2.

Для здійснення наведеного вище процесу діяльності необхідно володіти інформацією стосовно міжтемних зв'язків і способів їхньої реалізації. Поняття «зв'язок у навчанні» дає можливість зібрати воєдино всі елементи навчального процесу.

Таблиця 5.2

Аналіз базового матеріалу і способи актуалізації базових знань

Перелік базових понять, законів, способів дії	Способи (методи, форми, засоби) перевірки рівня сформованості базових знань і способів дій	Способи актуалізації або поповнення базових знань і способів дій
1	2	3
<p>Теорія різання та інструмент</p> <p>Крани машинобудівних підприємств</p>	<p>Методи: комбіноване опитування.</p> <p>Форми: фронтальна.</p> <p>Засоби: тестові завдання, запитання відкритого характеру.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Порядок підготовки крана до роботи. 2. Визначення центру тяжкості вантажу, що піднімається. 3. Джерела живлення пульта управління їх пристрій. 4. Вимога Правил до знімних вантажо-захоплювальних пристроїв. 5. Перша допомога потерпілим від дії електричного струму. 6. Виробничий контроль за вантажопідйомними кранами. 7. Заходи безпеки під час стропування та відчеплення вантажу. 8. Процес заряджання акумуляторних батарей пульта керування, зарядний пристрій. 9. Порядок перевірки та випробування захоплень та траверс. 10. Вимоги безпеки після закінчення робіт. 11. Призначення та влаштування основних частин металоконструкцій кранів. 12. Взаємозв'язок кранівника зі стропальником. 13. Несучі частоти при радіокеруванні, виділений діапазон. 	<p>При відсутності базових знань у здобувачів освіти формуємо методом пояснення-бесіда протягом 10 хвилин.</p>

Продовження таблиці 5.2

1	2	3
	14. Область застосування канатних стропів. 15. Вимоги безпеки під час виконання робіт з експлуатації, технічного обслуговування та ремонту кранів.	

5.6. Просктування мотиваційних технологій навчання з теми факультативу, характеристика і текст мотивації, використання якої доцільно при вивченні навчального матеріалу представлено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Обрання методів мотивації навчальної діяльності

Вид і методи мотивації	Вступна мотивація
1	2
Мотивуючий вступ	Доброго дня! На сьогоднішньому занятті ми будемо розглядати тему «Динамічна модель і рівняння руху при підйомі вантажу з жорсткої основи мостовими кранами». Як ми знаємо, мостовий кран широко широко використовують як основний підйомно-транспортний засіб в механічних, збірних, літейних та інших цехів промислових підприємствах. На відкритих та закритих складах масових вантажівок за допомогою мостового крану виконують вантажно-розвантажувальні роботи. За результатами сьогоднішнього заняття ви будете знати: конструкцію та параметри мостових кранів і краного шляху; пристрій та принцип дії виконавчих механізмів мостових кранів; призначення приладів та пристроїв безпеки на мостових кранах; вимоги до канатів; порядок виробничих робіт мостовими кранами; технічне обслуговування і система планово-попереджувального ремонту мостових кранів. А також вміти: керувати мостовим краном на підйомі, переміщенні та відпусканні вантажа; виконувати огляд кріплень і регулювання механізмів мостового крану, перевіряти справність приладів безпеки.

5.7. Проєктування технології формування орієнтовної основи діяльності на факультативному занятті (табл.4.4).

Таблиця 5.4

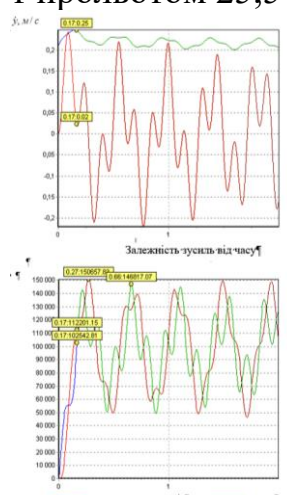
Способи формування ООД на факультативному занятті

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми	Методи	Засоби
1	2	3	4
Сформувати здатності: щодо динамічної і математичної моделі крану; здійснювати розрахунок коефіцієнтів диференціальних рівнянь руху; описувати введення в математичну модель приведеної сили приводу; записувати рівняння руху до виду, зручного для чисельної інтеграції.	Фронтальна	Евристична бесіда з елементами лекції	План для обговорення: 1. Динамічна і математична моделі крану. 2. Розрахунок коефіцієнтів диференціальних рівнянь руху. 3. Введення в математичну модель приведеної сили приводу. 4. Приведення рівнянь руху до виду, зручного для чисельної інтеграції. Технічні засоби навчання: можливість користуватися інтернетом (Wi-Fi). Оснащення уроку: довідник технолога машинобудівника, комплекти технологічної документації, програмне забезпечення САПР Вертикаль. Методичне забезпечення: методична розробка, комплект для здобувача освіти, робочі креслення деталей.

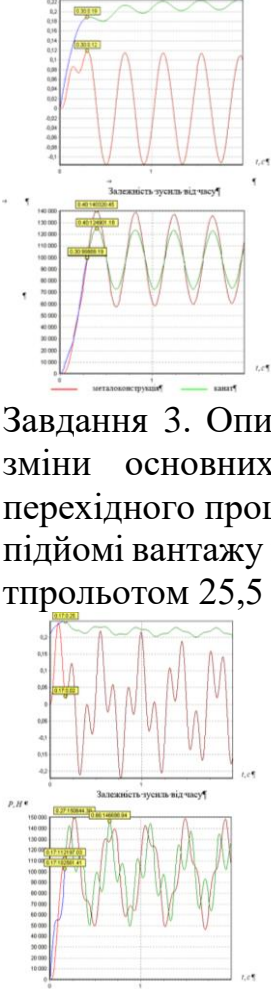
5.8. Проектування технології формування виконавчих дій на факультативному занятті (табл. 5.5).

Таблиця 5.5

Способи формування виконавчих дій з теми

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми	Методи	Засоби
1	2	3	4
Закріпити здатності у здобувачів освіти: щодо динамічної і математичної моделі крану; здійснювати розрахунок коефіцієнтів диференціальних рівнянь руху; описувати введення в математичну модель приведеної сили приводу; записувати рівняння руху до виду, зручного для чисельної інтеграції.	Фронтальна	Рішення задач	<p>Для закріплення нового навчального матеріалу викладач видає завдання. Кожен студент отримує графіки. Викладач приділяє деякий час поясненням з основних моментів.</p> <p>Завдання1. Опишіть графіки зміни основних параметрів перехідного процесу при підйомі вантажу краном г/п 10 т прольотом 25,5 м</p>  <p>Завдання 2. Опишіть графіки зміни основних параметрів перехідного процесу при підйомі вантажу краном г/п 10 т прольотом 25,5 м</p>

Продовження таблиці 5.5

1	2	3	4
			 <p data-bbox="981 683 1468 884">Завдання 3. Опишіть графіки зміни основних параметрів перехідного процесу при підйомі вантажу краном г/п 10 т прольотом 25,5 м.</p> <p data-bbox="981 1276 1468 1478">Завдання 4. Опишіть графіки зміни основних параметрів перехідного процесу при підйомі вантажу краном г/п 10 т прольотом 25,5 м</p>

4.9. Проектування контрольних дій з теми (табл. 5.6).

Таблиця 5.6

Засоби контролю з теми факультативного заняття

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми	Методи	Засоби
1	2	3	4
Проконтролювати здібності у здобувачів освіти: щодо динамічної і математичної моделі крану; здійснювати розрахунок коефіцієнтів диференціальних рівнянь руху; описувати введення в математичну модель приведення сили приводу; записувати рівняння руху до виду, зручного для чисельної інтеграції.	фронтальна	Письмове опитування	Контрольні питання: 1. Назвіть етапи розрахунку динамічних навантажень. 2. Опишіть трьохмасову двозв'язну динамічну модель мостового крану: а) перший етап руху; б) другий етап руху; в) третій етап руху. 3. Опишіть методику розрахунку коефіцієнтів диференціальних рівнянь руху.

5.10. Розробка сценарію факультативного заняття. Сценарій заняття, його структура й зміст структурних елементів представлені у вигляді табл. 4.7.

Сценарій навчання з теми заняття

№ п/п	Структурні елементи заняття	Зміст структурних елементів
1	2	3
1	Організаційний момент	Заняття починається з вступної організаційної частини, перевірки присутніх за журналом, повідомлення теми та цілей заняття.
2	Повідомлення теми і мети заняття	Повідомлення теми заняття: «Динамічна модель і рівняння руху при підйомі вантажу з жорсткої основи мостовими кранами». Мета: сформувати у здобувачів освіти щодо динамічної і математичної моделі крану; здійснювати розрахунок коефіцієнтів диференціальних рівнянь руху; описувати введення в математичну модель приведеної сили приводу; записувати рівняння руху до виду, зручного для чисельної інтеграції.
3	Мотивація мети	<p>Повідомлення важливості вивчення даної теми:</p> <p>На сьогоднішньому занятті ми будемо розглядати тему «Динамічна модель і рівняння руху при підйомі вантажу з жорсткої основи мостовими кранами». Як ми знаємо, мостовий кран широко широко використовують як основний підйомно-транспортний засіб в механічних, збірних, літейних та інших цехах промислових підприємствах. На відкритих та закритих складах масових вантажівок за допомогою мостового крану виконують вантажно-розвантажувальні роботи.</p> <p>За результатами сьогоднішнього заняття ви будете знати: конструкцію та параметри мостових кранів і краного шляху; пристрій та принцип дії виконавчих механізмів мостових кранів; призначення приладів та пристроїв безпеки на мостових кранах; вимоги до канатів; порядок виробничих робіт мостовими кранами; технічне обслуговування і система планово-попереджувального ремонту мостових кранів. А також вміти: керувати мостовим краном на підйомі, переміщенні та відпусканні вантажа; виконувати огляд кріплень і регулювання механізмів мостового крану, перевіряти справність приладів безпеки.</p>

Продовження таблиці 4.7

1	2	3
4	Актуалізація базових знань	<p>Для перевірки базового матеріалу проводить усне опитування за допомогою питань відкритого характеру.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Порядок підготовки крана до роботи. 2. Визначення центру тяжкості вантажу, що піднімається. 3. Джерела живлення пульта управління їх пристрій. 4. Вимога Правил до знімних вантажозахоплювальних пристроїв. 5. Перша допомога потерпілим від дії електричного струму. 6. Виробничий контроль за вантажопідйомними кранами. 7. Заходи безпеки під час стропування та відчеплення вантажу. 8. Процес заряджання акумуляторних батарей пульта керування, зарядний пристрій. 9. Порядок перевірки та випробування захоплень та траверс. 10. Вимоги безпеки після закінчення робіт. 11. Призначення та влаштування основних частин металоконструкцій кранів. 12. Взаємозв'язок кранівника зі стропальником.
5	Формування ООД	<p>Викладач викладає новий навчальний матеріал за планом:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Матеріал деталі та її властивості. 2. Попередній вибір типу виробництва. 3. Метод отримання заготовлі. 4. Технологічний процес механічної обробки деталі. <ol style="list-style-type: none"> 4.1. Обладнання, інструмент та пристрої. 4.2. Розрахунок норм часу та визначення типу виробництва. 4.3. Розрахунок режимів різання на найвідповідальнішу поверхню.
6	Формування ВД	<p>Для закріплення нового навчального матеріалу викладач видає практичне завдання. Кожен студент отримує графіки. Викладач приділяє деякий час поясненням з основних моментів виконання завдання.</p>

Продовження таблиці 4.7

1	2	3
7	Формування КД	<p>Викладач проводить студентам контрольну роботу за допомогою відкритих запитань:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Назвіть етапи розрахунку динамічних навантажень. 2. Опишіть трьохмасову двозв'язну динамічну модель мостового крану: а) перший етап руху; б) другий етап руху; в) третій етап руху. 3. Опишіть методику розрахунку коефіцієнтів диференціальних рівнянь руху.
8	Підбиття підсумків	<p>Викладач підбиває підсумки по пройденій темі та пропонує студентам відповісти на запитання анкети. <i>Приклад анкети для самооцінки студентів.</i></p> <p>Відповісти на запитання, поставивши будь-який знак.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Які завдання викликали труднощі: Аналіз робочого креслення _____ Аналіз типового процесу _____ Вибір обладнання _____ Визначення послідовності обробки _____ Заповнення таблиці _____ 2. Чи вистачило вам часу для виконання роботи _____

Висновки до розділу 5

В цьому розділі ми розробили дидактичний проєкт на тему «Динамічна модель і рівняння руху при підйомі вантажу з жорсткої основи мостовими кранами», а саме: сформулювали дидактичні цілі по темі, виділили перелік базового матеріалу та розробили методи, засоби, форми контролю базового матеріалу, сформулювали план проведення практичної роботи. Відповідно до плану були обрані та обгрунтовані методи та засоби проведення орієнтовної основи діяльності, виконавчих дій студентів та контрольних дій. Результатом проєктування складових факультативного заняття є розробка сценарію проведення факультативного заняття, який представлений у вигляді дій викладача та студентів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Головенкін В. П. Інженерна педагогіка [Електронний ресурс] : підруч. / В. П. Головенкін. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. Режим доступу: http://psy.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/02/Injenerna_pedagogika.pdf
2. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: дидактичне проектування: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УПА, 2019. – 204 с.
3. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: основні технології навчання: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УПА, 2019. – 174 с.
4. Лебедик Л.В., Стрельніков В.Ю., Стрельніков М.В. Сучасні технології навчання і методики викладання дисциплін: Навчально-методичний посібник для слухачів курсів підвищення кваліфікації педагогічних працівників закладів середньої, професійної (професійно-технічної), фахової передвищої та вищої освіти / Л. В. Лебедик, В. Ю. Стрельніков, М. В. Стрельніков. – Полтава : АСМІ, 2020. – 303 с.
5. Методика професійної освіти : навч. посібник для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 015 «Професійна освіта» галузі знань 01 «Освіта / Педагогіка» / Д. О. Чернишев, К. І. Почка, Г. Л. Корчова, Ю. С. Красильник, М. В. Руденко. – Київ : Компринт, 2024. – 224 с.
6. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи для здобувачів освіти другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спеціальністю 015 Професійна освіта (за спеціалізацією) / Укр. інж.-пед. акад.; упоряд.: О. Е. Коваленко, Н. О. Брюханова, Н.В. Божко, Н.В. Корольова – Харків: УПА, 2024. – 82 с.
7. Освітньо-професійна програма «Професійна освіта (Машинобудування)» першого (бакалаврського) рівня. Затверджена вченою радою Української інженерно-педагогічної академії від 28.06.2024 року №13.

8. Освітньо-професійна програма «Професійна освіта (Машинобудування)» другого (магістерського) рівня. Затверджена вченою радою Української інженерно-педагогічної академії від 28.06.2024 року №13.
9. Семенова А.В. Професійна педагогіка: Підручник. / Авт. : О.В. Грабовський, Л.В. Коломієць, О.С. Савельєва, А.В. Семенова, В.Ф. Яні; за заг. ред. А.В. Семенової. – Одеса: Бондаренко М.О., 2020. – 575 с.
10. Сайт дистанційної освіти Університету – Режим доступу: <https://moodle.karazin.ua>
11. EdEra – студія онлайн-освіти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ed-era.com/>
12. Український освітній онлайн-портал для вчителів «На Урок» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://naurok.com.ua/>
13. «Освіторія Медіа» – онлайн медія про освіта та виховання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://osvitoria.media/>
14. Освіта.UA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://osvita.ua>
15. Всеосвіта – освітня платформа для професійного зростання педагогічних працівників та підвищення їх педагогічної майстерності [Електронний ресурс]. . Будіков Л.Я. Дослідження впливу деяких чинників на динамічні навантаження металоконструкцій кранів: Дис.канд. техн. наук.-Ворошиловград, 1971. - 161с.
16. Гайдамака В.Ф. Про можливість резонансу у бруківках електричних кранів. Праці Ворошиловградського гірничо-металургійного інституту, т.1, Луганськ, 1960.
17. Правила пристрою і безпечної експлуатації вантажопідійомних кранів. - Харків: видавництво "Форт", 2002.
18. Будіков Л. Я. Багатопараметричний аналіз динаміки вантажопідійомних кранів мостового типу. - Луганськ: ВУГУ, 1997 - 210 с.
19. Іванченко Ф.К. Розрахунки вантажопідійомних і транспортуючих машин. - Київ, «Вища школа», 1978 - 576 с.

20. Довідник по кранах/ Під ред. М.М. Гохберга - Л.: Машинобудування, 1988. т.1. - 536 с.
21. Важнов А.І. Перехідні процеси в машинах змінного струму. - Л.: Енергія, Ленінгр.від., 1980. - 255 с.– Режим доступу: <https://vseosvita.ua/>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ТЕХНІЧНІ ДАНІ КРАНІВ Г/П 10 Т

Технічна характеристика	Позначення	Числове значення
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Вантажопідйомність, т	Q	10
Маса крану, кг	$m_{кр}$	8100 – 28700
Маса візка, кг	$m_{мел}$	2600
Проліт крану, м	L	10,5 – 34,5
Висота підвісу вантажу, м	H	5 – 10
Режим роботи	$ПВ$	40 %
Механізм підйому вантажу:		
- швидкість підйому вантажу, м/хв	$v_{під}$	25
- кратність поліспасту	U_n	2
- передатне число редуктора	U_p	16,3
- радіус барабана, м	$r_{б}$	0,2
- діаметр каната, мм	d_k	16,5
- потужність електродвигуна механізму підйому, кВт	N_{δ}	45
- частота обертання ротора двигуна, об/хв	n_{δ}	570
- ККД механізму	η	0,85
- приведені маси, кг :		
	m_n	$1,547 \cdot 10^5$
	m_m	$5,435 \cdot 10^3 - 1,264 \cdot 10^4$
	m_z	10 000
- коефіцієнти жорсткості, Н/м		
	c_m	$5,194 \cdot 10^3 - 1,133 \cdot 10^4$
	c_k	$5,893 \cdot 10^3 - 1,197 \cdot 10^4$
- коефіцієнт демпфування металоконструкції, Н·с/м	k_D	16,913 – 38,103
- коефіцієнт демпфування каната, Н·с/м	k'_D	67,141 – 69,337

ДОДАТОК Б

РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТІВ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ РІВНЯНЬ РУХУ

Вихідні дані:

$E := 2.1 \cdot 10^5$	—	модуль пружності металокопструкції, Н/мм ²
$E_k := 1.4 \cdot 10^5$	—	модуль пружності сталевих канатів, Н/мм ²
$L_{min} := 10500$	—	мінімальний проліт крана, мм
$L_{max} := 34500$	—	максимальний проліт крану, мм
$F_k := 105.24$	—	площа поперечного перерізу, мм ²
$I_{xmin} := 65070 \cdot 10^4$	—	момент інерції перерізу головних балок для кранів
$I_{xmax} := 1058040 \cdot 10^4$	—	різних прольотів, мм ²
$m_T := 2600$	—	вага візка, кг
$m_B := 10000$	—	вага паднімаємого вантажу, кг
$m_{крmin} := 8100$	—	мінімальна вага крану, кг
$m_{крmax} := 28700$	—	максимальна вага крану, кг
$M_{max} := 2360$	—	максимальний момент, який розвивається двигуном,
$n_0 := 600$	—	синхронна частота обертання ротора, с ⁻¹
$n_d := 570$	—	асинхронна частота обертання ротора, с ⁻¹
$N := 45$	—	потужність двигуна, кВт
$U_M := 32.6$	—	передаточне число механізму
$r_б := 0.2$	—	радіус барабана, м
$\eta := 0.85$	—	КПД механізму
$GD_p := 170$	—	маховий момент ротора двигуна, Н · м ²
$GD_M := 54$	—	маховий момент муфти, Н · м ²
$V_{під} := 0.42$	—	швидкість підйому вантажу, м/с
$l_{min} := 5000$	—	мінімальна висота підвісу, мм
$l_{max} := 10000$	—	максимальна висота підвісу, мм
$g := 9.81 \text{ м/с}^2$		

1.1. Приведена до канатів вага обертаючих частин механізму підйома вантажу, кг.

$\delta := 1,2$ – коефіцієнт приведення інших крутних мас привода до першого механізму

$$m_{\Pi} := \frac{(GD_P + GD_M) \cdot \delta}{g} \cdot \left(\frac{U_M}{2 \cdot r_6} \right)^2 \cdot \eta \quad m_{\Pi} = 1.547 \times 10^5$$

1.2. Приведена до середини прольоту вага мосту та візка, кг.

$$m_{Mmin} := m_T + 0,5 \cdot (0,7m_{крmin})m_{Mmin} = 5,435 \times 10^3$$

$$m_{Mmax} := m_T + 0,5 \cdot (0,7m_{крmax})m_{Mmax} = 1,264 \times 10^4$$

1.3. Коефіцієнт жорсткості металокопструкцій крана, Н/мм.

$$c_{Mmin} := 48 \cdot E \cdot \frac{2 \cdot I_{xmax}}{L_{max}^3} c_{Mmin} = 5,194 \times 10^3$$

$$c_{Mmax} := 48 \cdot E \cdot \frac{2 \cdot I_{xmin}}{L_{min}^3} c_{Mmax} = 1,133 \times 10^4$$

1.4. Коефіцієнт жорсткості каната, Н/мм.

$$c_{kmin} := \frac{E_k \cdot 4 \cdot F_k}{l_{max}} c_{kmin} = 5,893 \times 10^3$$

$$c_{kmax} := \frac{E_k \cdot 4 \cdot F_k}{l_{min}} c_{kmax} = 1,179 \times 10^4$$

1.5. Коефіцієнт затухання коливань (демпфування) металокопструкцій

$D := 0.01$ – постійна демпфування

$$\omega_{max} := \frac{\sqrt{\frac{c_{Mmin}}{m_{Mmin}}}}{2 \cdot \pi} \omega_{max} = 0.156 \text{ c}^{-1}$$

$$k_{dmin} := 2 \cdot m_{Mmin} \cdot \omega_{max} \cdot D \quad k_{dmin} = 16.913$$

$$\omega_{min} := \frac{\sqrt{\frac{c_{max}}{m_{max}}}}{2 \cdot \pi} \omega_{min} = 0.51 \text{ c}^{-1}$$

$$k_{dmax} := 2 \cdot m_{max} \cdot \omega_{min} \cdot D \quad k_{dmax} = 38.103$$

1.6. Коефіцієнт демпфованогоканата, Н·с/м.

$\delta := 0.14$ – постійна демпфування

$$\tau_1 := \frac{2 \cdot \pi}{\omega_{max}} \tau_1 = 40.382$$

$$k_{dmax} := \frac{2 \cdot m_B \cdot \delta}{\tau_1} k_{dmax} = 69.337$$

$$\tau_2 := \frac{2 \cdot \pi}{\omega_{min}} \tau_2 = 41.703$$

$$k_{dmin} := \frac{2 \cdot m_B \cdot \delta}{\tau_2} k_{dmin} = 67.141$$

ПОБУДОВА ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНА

1. Номінальний момент, який розвиває двигун, Н·м.

$$M_H := 9550 \cdot \frac{N}{n_d} M_H = 753,947$$

2. Коефіцієнт короткочасового перенавантаження:

$$\lambda := \frac{M_{max}}{M_H} \quad \lambda = 3.13$$

3. Номінальне ковзання:

$$S_n := \frac{n_0 - n_d}{n_0} S_n = 0.05$$

4. Критичне ковзання:

$$S_k := S_n \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) S_k = 0.305$$

5. Визначення коефіцієнтів К та В

$$V_0 := \frac{V_{\text{під}} \cdot n_0}{n_d} V_0 = 0.442$$

$$K_q := \frac{2 \cdot M_{max} \cdot S_k \cdot V_0 \cdot U_M \cdot \eta}{r_6} K_q = 8.218 \times 10^4$$

$$B_q := S_k^2 \cdot V_0^2 B_q = 0.018$$

$$x' := 0,0.001 \dots 0.445$$

$$P_d(x') := \frac{K_q \cdot (V_0 - x')}{B_q + (V_0 - x')^2}$$

$$S_{k1} := 0.531$$

$$K_{q1} := \frac{2 \cdot M_{max} \cdot S_{k1} \cdot V_0 \cdot U_M \cdot \eta}{r_6} K_{q1} = 1.432 \times 10^5$$

$$B_{q1} := S_{k1}^2 \cdot V_0^2 B_{q1} = 0.018$$

$$P_{d1}(x') := \frac{K_{q1} \cdot (V_0 - x')}{B_{q1} + (V_0 - x')^2}$$

$$S_{k2} := 0.926$$

$$K_{q2} := \frac{2 \cdot M_{max} \cdot S_{k2} \cdot V_0 \cdot U_M \cdot \eta}{r_6} K_{q2} = 2.497 \times 10^5$$

$$B_{q2} := S_{k2}^2 \cdot V_0^2 B_{q2} = 0.168$$

$$P_{d2}(x') := \frac{K_{q2} \cdot (V_0 - x')}{B_{q2} + (V_0 - x')^2}$$

$$S_{k3} := 1.613$$

$$K_{q3} := \frac{2 \cdot M_{max} \cdot S_{k3} \cdot V_0 \cdot U_M \cdot \eta}{r_6} K_{q3} = 4.349 \times 10^5$$

$$B_{q3} := S_{k3}^2 \cdot V_0^2 B_{q3} = 0.1509$$

$$P_{d3}(x') := \frac{K_{q3} \cdot (V_0 - x')}{B_{q3} + (V_0 - x')^2}$$

$$S_{k4} := 2.811$$

$$K_{q4} := \frac{2 \cdot M_{max} \cdot S_{k4} \cdot V_0 \cdot U_M \cdot \eta}{r_6} K_{q4} = 7.579 \times 10^5$$

$$B_{q4} := S_{k4}^2 \cdot V_0^2 B_{q4} = 1.544$$

$$P_{d4}(x') := \frac{K_{q4} \cdot (V_0 - x')}{B_{q4} + (V_0 - x')^2}$$

$$S_{k5} := 4.899$$

$$K_{q5} := \frac{2 \cdot M_{max} \cdot S_{k5} \cdot V_0 \cdot U_M \cdot \eta}{r_6} K_{q5} = 1.321 \times 10^6$$

$$B_{q5} := S_{k5}^2 \cdot V_0^2 B_{q5} = 4.691$$

$$P_{d5}(x') := \frac{K_{q5} \cdot (V_0 - x')}{B_{q5} + (V_0 - x')^2}$$

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ

x'
x'
x'
x'
x'
x'



$P_d(x'), P_{d1}(x'), P_{d2}(x'), P_{d3}(x'), P_{d4}(x'), P_{d5}(x')$
4 искусств

**РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТІВ РЕГРЕСІЇ ДЛЯ УСІХ ДАНИХ
ВАРІАНТІВ**

$i := 1 \dots 21$

$$k := \begin{pmatrix} 2.035 \\ 1.714 \\ 1.709 \\ 1.552 \\ 1.767 \\ 1.636 \\ 1.693 \\ 1.543 \\ 1.748 \\ 1.793 \\ 1.686 \\ 1.843 \\ 1.550 \\ 1.893 \\ 1.634 \\ 1.788 \\ 1.730 \\ 1.813 \\ 1.696 \\ 1.808 \\ 1.679 \end{pmatrix} \quad X_1 := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.5 \\ -0.5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad X_2 := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.5 \\ -0.5 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad X_3 := \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.5 \\ -0.5 \end{pmatrix}$$

$$b_0 := \frac{(-43 \sum_{i=1}^8 k_i) + 209 \cdot k_g + (125 \sum_{i=10}^{15} k_i) + (188 \sum_{i=16}^{21} k_i)}{1743}; \quad b_0 = 1.753$$

$$b_1 := \frac{(2 \cdot \sum_{i=1}^{21} X1_i \cdot k_i)}{21} \quad b_1 = 0.048$$

$$b_2 := \frac{(2 \cdot \sum_{i=1}^{21} X2_i \cdot k_i)}{21} \quad b_2 = 0.096$$

$$b_3 := \frac{(2 \cdot \sum_{i=1}^{21} X3_i \cdot k_i)}{21} \quad b_3 = 0.103$$

$$b_{11} := \frac{2 \cdot [(34 \sum_{i=1}^8 k_i) = -34 \cdot k_9 + 210 \cdot (k_{10} + k_{11}) - 122 \cdot (k_{12} + k_{13} + k_{14} + k_{15}) + 27 \cdot (k_{16} + k_{17}) - 56(k_{18} + k_{19} + k_{20} + k_{21})]}{1411}$$

$$b_{11} = -8.23 \times 10^{-3}$$

$$b_{22} := \frac{2 \cdot [(34 \sum_{i=1}^8 k_i) = -34 \cdot k_9 + 210 \cdot (k_{12} + k_{13}) - 122 \cdot (k_{10} + k_{11} + k_{14} + k_{15}) + 27 \cdot (k_{18} + k_{19}) - 56(k_{16} + k_{17} + k_{20} + k_{21})]}{1411}$$

$$b_{22} = -0.05$$

$$b_{33} := \frac{2 \cdot [(34 \sum_{i=1}^8 k_i) = -34 \cdot k_9 + 210 \cdot (k_{14} + k_{15}) - 122 \cdot (k_{10} + k_{11} + k_{12} + k_{13}) + 27 \cdot (k_{20} + k_{21}) - 56(k_{16} + k_{17} + k_{18} + k_{19})]}{1411}$$

$$b_{33} = 0.011$$

$$b_{12} := \frac{(k_1 + k_2 - k_3 - k_4 - k_5 - k_6 + k_7 + k_8)}{8} b_{12} = 0.04$$

$$b_{13} := \frac{(k_1 - k_2 + k_3 - k_4 - k_5 + k_6 - k_7 + k_8)}{8} b_{13} = 0.025$$

$$b_{23} := \frac{(k_1 - k_2 - k_3 + k_4 + k_5 - k_6 - k_7 + k_8)}{8} b_{23} = 0.018$$

$$k_p := b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{11} \cdot X_1^2 + b_{22} \cdot X_2^2 + b_{33} \cdot X_3^2 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3$$

	1
1	1.953
2	1.746
3	1.761
4	1.555
5	1.856
6	1.65
7	1.664
8	1.458
9	1.753
$k_p =$	10
	1.793
	11
	1.696
	12
	1.799
	13
	1.607
	14
	1.866
	15
	1.66
	16
	1.775
	17
	1.726
	18
	1.788
	19
	1.692
	20
	1.807
	21
	1.704

Перевірка адекватності моделі:

$$\rho := \frac{1}{b_0} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{21} (k_i - k_{pi})^2}{21 - 10}} \sum_{i=1}^{21} (k_i - k_{pi})^2 = 0.035$$

$$\rho = 0.032$$

$i := 1 \dots 21$

$$\begin{array}{c}
 k := \\
 \left(\begin{array}{c}
 1.506 \\
 1.428 \\
 1.459 \\
 1.405 \\
 1.482 \\
 1.394 \\
 1.456 \\
 1.383 \\
 1.462 \\
 1.468 \\
 1.439 \\
 1.468 \\
 1.442 \\
 1.487 \\
 1.410 \\
 1.465 \\
 1.454 \\
 1.466 \\
 1.452 \\
 1.473 \\
 1.427
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 X_1 := \\
 \left(\begin{array}{c}
 1 \\
 1 \\
 1 \\
 1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 0 \\
 1 \\
 -1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0.5 \\
 -0.5 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 X_2 := \\
 \left(\begin{array}{c}
 1 \\
 1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 1 \\
 1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 1 \\
 -1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0.5 \\
 -0.5 \\
 0 \\
 0
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 X_3 := \\
 \left(\begin{array}{c}
 1 \\
 -1 \\
 1 \\
 -1 \\
 1 \\
 -1 \\
 1 \\
 -1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 1 \\
 -1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0.5 \\
 -0.5
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

$$b_0 := \frac{(-43 \sum_{i=1}^8 k_i) + 209 \cdot k_g + (125 \sum_{i=10}^{15} k_i) + (188 \sum_{i=16}^{21} k_i)}{1743}; \quad b_0 = 1.459$$

$$b_1 := \frac{(2 \cdot \sum_{i=1}^{21} X1_i \cdot k_i)}{21} b_1 = 0.011$$

$$b_2 := \frac{(2 \cdot \sum_{i=1}^{21} X2_i \cdot k_i)}{21} b_2 = 0.013$$

$$b_3 := \frac{(2 \cdot \sum_{i=1}^{21} X3_i \cdot k_i)}{21} b_3 = 0.037$$

$$b_{11} := \frac{2 \cdot [(34 \sum_{i=1}^8 k_i) = -34 \cdot k_9 + 210 \cdot (k_{10} + k_{11}) - 122 \cdot (k_{12} + k_{13} + k_{14} + k_{15}) + 27 \cdot (k_{16} + k_{17}) - 56(k_{18} + k_{19} + k_{20} + k_{21})]}{1411}$$

$$b_{11} = -4.6 \times 10^{-3}$$

$$b_{22} := \frac{2 \cdot [(34 \sum_{i=1}^8 k_i) = -34 \cdot k_9 + 210 \cdot (k_{12} + k_{13}) - 122 \cdot (k_{10} + k_{11} + k_{14} + k_{15}) + 27 \cdot (k_{18} + k_{19}) - 56(k_{16} + k_{17} + k_{20} + k_{21})]}{1411}$$

$$b_{22} = -3.305 \times 10^{-3}$$

$$b_{33} := \frac{2 \cdot [(34 \sum_{i=1}^8 k_i) = -34 \cdot k_9 + 210 \cdot (k_{14} + k_{15}) - 122 \cdot (k_{10} + k_{11} + k_{12} + k_{13}) + 27 \cdot (k_{20} + k_{21}) - 56(k_{16} + k_{17} + k_{18} + k_{19})]}{1411}$$

$$b_{33} = -0.012$$

$$b_{12} := \frac{(k_1 + k_2 - k_3 - k_4 - k_5 - k_6 + k_7 + k_8)}{8} b_{12} = 4.125 \times 10^{-3}$$

$$b_{13} := \frac{(k_1 - k_2 + k_3 - k_4 - k_5 + k_6 - k_7 + k_8)}{8} b_{13} = -3.625 \times 10^{-3}$$

$$b_{23} := \frac{(k_1 - k_2 - k_3 + k_4 + k_5 - k_6 - k_7 + k_8)}{8} b_{23} = 4.875 \times 10^{-3}$$

$$k_p := b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{11} \cdot X_1^2 + b_{22} \cdot X_2^2 + b_{33} \cdot X_3^2 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3$$

	1
1	1.501
2	1.426
3	1.474
4	1.4
5	1.479
6	1.404
7	1.452
8	1.377
9	1.459
$k_p =$	10
	1.465
	11
	1.443
	12
	1.469
	13
	1.442
	14
	1.484
	15
	1.41
	16
	1.463
	17
	1.452
	18
	1.464
	19
	1.451
	20
	1.474
	21
	1.437

Перевірка адекватності моделі:

$$\rho := \frac{1}{b_0} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{21} (k_i - k_{pi})^2}{21 - 10}} \sum_{i=1}^{21} (k_i - k_{pi})^2 = 6.065 \times 10^{-4}$$

$$\rho = 5.091 \times 10^{-3}$$

$i := 1 \dots 21$

$$\begin{array}{c}
 k := \\
 \left(\begin{array}{c}
 1.960 \\
 1.632 \\
 1.606 \\
 1.647 \\
 1.716 \\
 1.567 \\
 1.580 \\
 1.468 \\
 1.672 \\
 1.179 \\
 1.600 \\
 1.769 \\
 1.455 \\
 1.797 \\
 1.558 \\
 1.708 \\
 1.640 \\
 1.728 \\
 1.611 \\
 1.718 \\
 1.613
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 X_1 := \\
 \left(\begin{array}{c}
 1 \\
 1 \\
 1 \\
 1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 0 \\
 1 \\
 -1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0.5 \\
 -0.5 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 X_2 := \\
 \left(\begin{array}{c}
 1 \\
 1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 1 \\
 1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 1 \\
 -1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0.5 \\
 -0.5 \\
 0 \\
 0
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 X_3 := \\
 \left(\begin{array}{c}
 1 \\
 -1 \\
 1 \\
 -1 \\
 1 \\
 -1 \\
 1 \\
 -1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 1 \\
 -1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0.5 \\
 -0.5
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

$$b_0 := \frac{(-43 \sum_{i=1}^8 k_i) + 209 \cdot k_g + (125 \sum_{i=10}^{15} k_i) + (188 \sum_{i=16}^{21} k_i)}{1743}; \quad b_0 = 1.67$$

$$b_1 := \frac{(2 \cdot \sum_{i=1}^{21} X1_i \cdot k_i)}{21} \quad b_1 = 0.046$$

$$b_2 := \frac{(2 \cdot \sum_{i=1}^{21} X2_i \cdot k_i)}{21} \quad b_2 = 0.107$$

$$b_3 := \frac{(2 \cdot \sum_{i=1}^{21} X3_i \cdot k_i)}{21} \quad b_3 = 0.097$$

$$b_{11} := \frac{2 \cdot [(34 \sum_{i=1}^8 k_i) = -34 \cdot k_9 + 210 \cdot (k_{10} + k_{11}) - 122 \cdot (k_{12} + k_{13} + k_{14} + k_{15}) + 27 \cdot (k_{16} + k_{17}) - 56(k_{18} + k_{19} + k_{20} + k_{21})]}{1411}$$

$$b_{11} = -5.324 \times 10^{-3}$$

$$b_{22} := \frac{2 \cdot [(34 \sum_{i=1}^8 k_i) = -34 \cdot k_9 + 210 \cdot (k_{12} + k_{13}) - 122 \cdot (k_{10} + k_{11} + k_{14} + k_{15}) + 27 \cdot (k_{18} + k_{19}) - 56(k_{16} + k_{17} + k_{20} + k_{21})]}{1411}$$

$$b_{22} = -0.051$$

$$b_{33} := \frac{2 \cdot [(34 \sum_{i=1}^8 k_i) = -34 \cdot k_9 + 210 \cdot (k_{14} + k_{15}) - 122 \cdot (k_{10} + k_{11} + k_{12} + k_{13}) + 27 \cdot (k_{20} + k_{21}) - 56(k_{16} + k_{17} + k_{18} + k_{19})]}{1411}$$

$$b_{33} = 9.617 \times 10^{-3}$$

$$b_{12} := \frac{(k_1 + k_2 - k_3 - k_4 - k_5 - k_6 + k_7 + k_8)}{8} b_{12} = 0.035$$

$$b_{13} := \frac{(k_1 - k_2 + k_3 - k_4 - k_5 + k_6 - k_7 + k_8)}{8} b_{13} = 0.026$$

$$b_{23} := \frac{(k_1 - k_2 - k_3 + k_4 + k_5 - k_6 - k_7 + k_8)}{8} b_{23} = 0.028$$

$$k_p := b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{11} \cdot X_1^2 + b_{22} \cdot X_2^2 + b_{33} \cdot X_3^2 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3$$

	1
1	1.874
2	1.68
3	1.66
4	1.465
5	1.781
6	1.587
7	1.567
8	1.373
9	1.67
$k_p =$	10
	11
	12
	13
	14
	15
	16
	17
	18
	19
	20
	21

Перевірка адекватності моделі:

$$\rho := \frac{1}{b_0} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{21} (k_i - k_{pi})^2}{21 - 10}} \sum_{i=1}^{21} (k_i - k_{pi})^2 = 0.034$$

$$\rho = 0.033$$

$i := 1 \dots 21$

$$\begin{array}{c}
 k := \\
 \left(\begin{array}{c}
 1.331 \\
 1.269 \\
 1.312 \\
 1.254 \\
 1.300 \\
 1.238 \\
 1.293 \\
 1.239 \\
 1.288 \\
 1.289 \\
 1.270 \\
 1.281 \\
 1.273 \\
 1.316 \\
 1.259 \\
 1.288 \\
 1.274 \\
 1.283 \\
 1.279 \\
 1.292 \\
 1.274
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 X_1 := \\
 \left(\begin{array}{c}
 1 \\
 1 \\
 1 \\
 1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 0 \\
 1 \\
 -1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0.5 \\
 -0.5 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 X_2 := \\
 \left(\begin{array}{c}
 1 \\
 1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 1 \\
 1 \\
 -1 \\
 -1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 1 \\
 -1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0.5 \\
 -0.5 \\
 0 \\
 0
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 X_3 := \\
 \left(\begin{array}{c}
 1 \\
 -1 \\
 1 \\
 -1 \\
 1 \\
 -1 \\
 1 \\
 -1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 1 \\
 -1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0.5 \\
 -0.5
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

$$b_0 := \frac{(-43 \sum_{i=1}^8 k_i) + 209 \cdot k_g + (125 \sum_{i=10}^{15} k_i) + (188 \sum_{i=16}^{21} k_i)}{1743}; \quad b_0 = 1.283$$

$$b_1 := \frac{(2 \cdot \sum_{i=1}^{21} X1_i \cdot k_i)}{21} \quad b_1 = 0.012$$

$$b_2 := \frac{(2 \cdot \sum_{i=1}^{21} X2_i \cdot k_i)}{21} \quad b_2 = 4.762 \times 10^{-3}$$

$$b_3 := \frac{(2 \cdot \sum_{i=1}^{21} X3_i \cdot k_i)}{21} \quad b_3 = 0.029$$

$$b_{11} := \frac{2 \cdot [(34 \sum_{i=1}^8 k_i) = -34 \cdot k_9 + 210 \cdot (k_{10} + k_{11}) - 122 \cdot (k_{12} + k_{13} + k_{14} + k_{15}) + 27 \cdot (k_{16} + k_{17}) - 56(k_{18} + k_{19} + k_{20} + k_{21})]}{1411}$$

$$b_{11} = -2.991 \times 10^{-3}$$

$$b_{22} := \frac{2 \cdot [(34 \sum_{i=1}^8 k_i) = -34 \cdot k_9 + 210 \cdot (k_{12} + k_{13}) - 122 \cdot (k_{10} + k_{11} + k_{14} + k_{15}) + 27 \cdot (k_{18} + k_{19}) - 56(k_{16} + k_{17} + k_{20} + k_{21})]}{1411}$$

$$b_{22} = -5.344 \times 10^{-3}$$

$$b_{33} := \frac{2 \cdot [(34 \sum_{i=1}^8 k_i) = -34 \cdot k_9 + 210 \cdot (k_{14} + k_{15}) - 122 \cdot (k_{10} + k_{11} + k_{12} + k_{13}) + 27 \cdot (k_{20} + k_{21}) - 56(k_{16} + k_{17} + k_{18} + k_{19})]}{1411}$$

$$b_{33} = 5.009 \times 10^{-3}$$

$$b_{12} := \frac{(k_1 + k_2 - k_3 - k_4 - k_5 - k_6 + k_7 + k_8)}{8} b_{12} = 3.5 \times 10^{-3}$$

$$b_{13} := \frac{(k_1 - k_2 + k_3 - k_4 - k_5 + k_6 - k_7 + k_8)}{8} b_{13} = 5 \times 10^{-4}$$

$$b_{23} := \frac{(k_1 - k_2 - k_3 + k_4 + k_5 - k_6 - k_7 + k_8)}{8} b_{23} = 1.5 \times 10^{-3}$$

$$k_p := b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{11} \cdot X_1^2 + b_{22} \cdot X_2^2 + b_{33} \cdot X_3^2 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3$$

	1
1	1.8325
2	1.267
3	1.315
4	1.257
5	1.301
6	1.244
7	1.291
8	1.234
9	1.283
$k_p =$	10
	11
	12
	13
	14
	15
	16
	17
	18
	19
	20
	21

Перевірка адекватності моделі:

$$\rho := \frac{1}{b_0} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{21} (k_i - k_{pi})^2}{21 - 10}} \sum_{i=1}^{21} (k_i - k_{pi})^2 = 2.298 \times 10^{-4}$$

$$\rho = 3.563 \times 10^{-3}$$