УДК 62-50

Ловейкін В.С., д.т.н.; Ромасевич Ю.О., к.т.н.
Національний університет біоресурсів і природокористування України

ВСТАНОВЛЕННЯ АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РЕЖИМІВ РУХУ КРАНОВИХ МЕХАНІЗМІВ

Анотація. *Наведено результатів експериментальних досліджень режимів підйому вантажу, а також режиму переміщення мостового крана із вантажем на гнучкому підвісі. Проведено розрахунок статистичних показників відхилення теоретичних та експериментальних даних (коефіцієнт варіації та різниця максимальних величин). На основі аналізу розрахованих статистичних показників встановлено адекватність математичних моделей режимів руху кранових механізмів.*

Ключові слова: *адекватність, математична модель, експериментальні дослідження, статистичні показники.*

Аннотация. *Приведены результаты экспериментальных исследований режимов подъема груза, а также режима перемещения мостового крана с грузом на гибком подвесе. Проведен расчет статистических показателей отклонения теоретических и экспериментальных данных (коэффициент вариации и разность максимальных величин). На основе анализа рассчитанных статистических показателей установлена адекватность математических моделей режимов движения крановых механизмов.*

Ключевые слова*: адекватность, математическая модель, экспериментальные исследования, статистические показатели.*

Abstract. *The results of experimental researching of modes of load's lifting and the mode of transportation of the bridge crane with a load on a flexible suspension have been stated. The statistical indexes of deviations of the theoretical and experimental data (coefficient of variation and the difference between the maximum values) have been calculated. Based on the analysis of the calculated statistical indexes the adequate of mathematical model movement modes of crane mechanisms has been set.*

Keywords: *adequacy, mathematical model, experimental researching, statistics indexes.*

Постановка проблеми.

Вантажопідйомні машини відіграють важливу роль у переміщенні вантажів у портах, на будівельних майданчиках та складах, у металургійних та машинобудівних цехах. Для досягнення

ISSN 2311-0368 (Print)
ISSN 2409-1049 (Online)

високої ефективності роботи кранових механізмів необхідно провести динамічний та енергетичний аналіз їх роботи. Такі розрахунки базуються на використанні математичних моделей кранових механізмів. Для того, щоб теоретичні розрахунки режимів руху кранових механізмів були достовірними необхідно щоб прийняті математичні моделі адекватно відображали реальні процеси, які проходять у кранових механізмах. Таким чином, дослідження адекватності математичних моделей роботи кранових механізмів є важливою задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Значна кількість досліджень з динаміки вантажопідйомних машин [1-7] ґрунтується на теоретичних розрахунках в основу яких покладено використання математичних моделей режимів руху кранових механізмів. Крім того, необхідно також звернути увагу на модель зміни зовнішнього збурення, яке діє на крановий механізм зі сторони приводу. Воно приймається постійним [1-3, 5] або змінним у відповідності зі статичною [4, 7] або динамічною [6, 7] механічними характеристиками. Для оцінки достовірності теоретичних даних використовуються статистичні показники [8], які дають змогу оцінити розбіжність теоретичних та експериментальних даних.

Постановка мети та задач дослідження.

Метою приведеного дослідження є встановлення адекватності математичних моделей режимів руху кранових механізмів переміщення крана та підйому вантажу. Для досягнення поставленої методи необхідно виконати такі задачі: 1) навести експериментальні та теоретично розраховані показники руху кранових механізмів; 2) розрахувати показники відхилення експериментальних та теоретичних даних; 3) на основі аналізу розрахованих показників встановити адекватність математичних моделей режимів руху кранових механізмів.

Виклад основного матеріалу.

Проведемо аналіз зміни зусилля у гілці канату в режимі підйому вантажу „з вісу” [1-5]. Для цього побудуємо графіки зусилля у гілці канату (рис. 1) за теоретичними розрахунками та експериментальними даними.

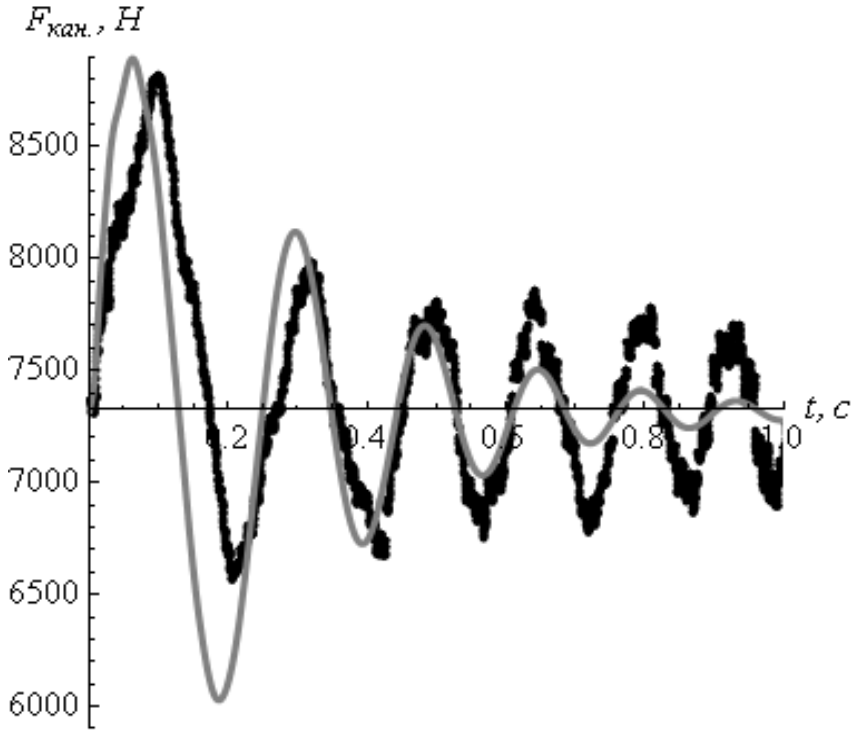

Рис. 1. Графіки зусилля у гілці канату, що отримані за допомогою теоретичних розрахунків (сіра суцільна лінія) та за експериментальними даними (точковий графік)

З рис. 1 видно, що зміна зусилля у гілці канату у обох випадках має коливний характер. Максимум зусилля припадає на першу хвилю коливань. Як видно з рис. 1, функція зусилля в гілці канату для різних методів її визначення (теоретичного та експериментального) має різний ступінь швидкості затухання. Розраховано логарифмічний декремент коливань функції зусилля для експериментальних даних, який для першої хвилі коливань рівний 0,095, а для наступних хвиль знаходиться в межах 0,012-0,013. Зменшення логарифмічного декременту коливань спричинено зменшенням дисипативних властивостей системи. Зазначимо, що для експериментальних та теоретичних даних коливання зусилля у гілці канату до початку гальмування механізму підйому вантажу встигають затухнути.

За показником максимального зусилля у канаті теоретичні та експериментальні дані відрізняються лише на 1,2-12,4%.

У теоретичних розрахунках режимів руху кранових механізмів використовується динамічна механічна характеристика приводних двигунів. Її застосування дозволяє врахувати електромагнітні процеси у двигуні, які мають значний вплив на динамічні та енергетичні процеси у крані.

Для того, щоб встановити адекватність прийнятої у розрахунках моделі приводного моменту (зусилля) необхідно провести порівняння

ISSN 2311-0368 (Print)
ISSN 2409-1049 (Online)

теоретичних та експериментальних даних. Таке порівняння проведено за двома показниками: швидкістю руху канатного барабану та струмом електродвигуна.

На рис. 2 показано графіки кутової швидкості руху канатного барабану під час його розгону з яких видно, що використання динамічної механічної характеристики двигуна є доцільним, оскільки дані, які отримані з її застосуванням, краще збігаються з експериментальними даними.

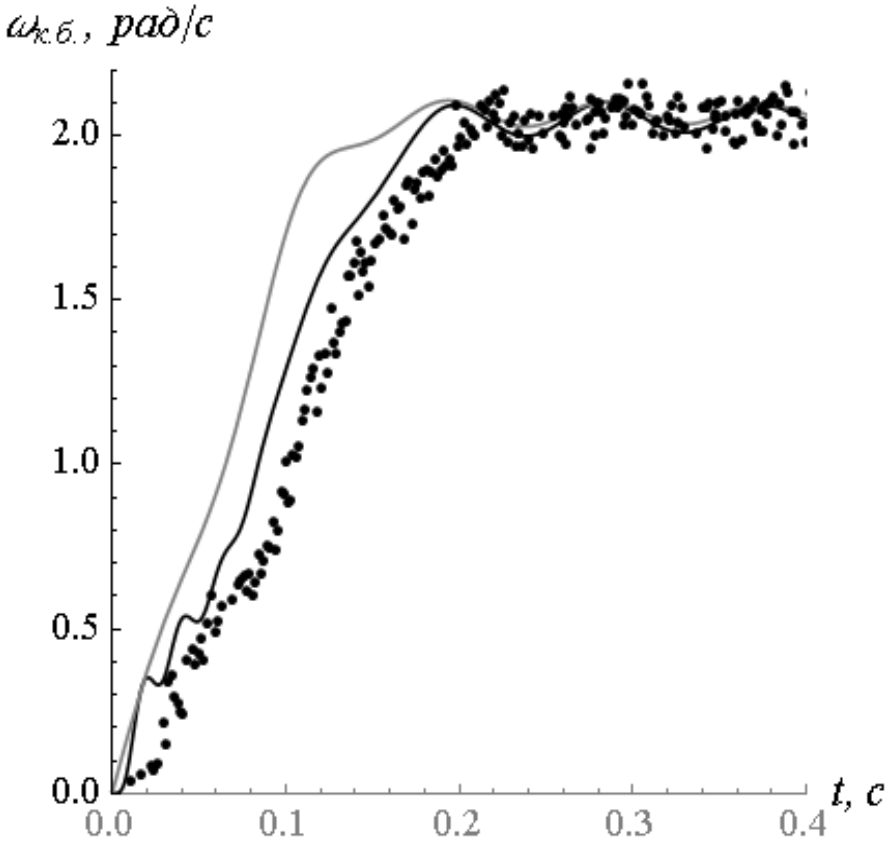

Рис. 2. Графіки кутової швидкості руху канатного барабану, які побудовані із використанням динамічної (суцільна чорна лінія) і статичної (суцільна сіра лінія) механічних характеристик двигуна та за експериментальними даними (точковий графік)

У таблиці 1 наведено основні показники кінематичних функцій руху канатного барабану під час його розгону для режимів підйому (верхні комірки таблиці) та опускання (нижні комірки таблиці) вантажу.

Аналіз даних, які наведені у табл. 1, показує, що за показником максимального значення кутової швидкості статична та динамічна механічні характеристики двигуна досить точно відображають експериментальні дані.

Таблиця 1

Показники кінематичних функції руху канатного барабана

Показник	За якими даними розраховано показник		
	Експериментальні дані	Моделювання із використанням механічної характеристики	
		динамічної	статичної
Максимальне значення кутової швидкості, рад/с	2,13-2,13	2,08	2,09
	2,24-2,28	2,25	2,21
Тривалість розгону до усталеної швидкості, сек	0,22-0,21	0,18	0,15
	0,12	0,12	0,13
Середньоквадратичне відхилення, м	-	0,071-0,083	0,131-0,177
Коефіцієнт варіації, %	-	17,7-20,7	32,7-44,2

Тривалість розгону канатного барабану до усталеної швидкості за динамічною механічною характеристикою двигуна на 16,6-22,2% менша, ніж за експериментальними даними, а за статичною механічною характеристикою двигуна – на 40,0-46,6% менше. Статистичні показники (середньоквадратичне відхилення та коефіцієнт варіації) при використанні динамічної механічної характеристики значно менші, ніж для результатів, що отримані із використанням статичної механічної характеристики двигуна.

Проведемо аналіз адекватності моделі приводного моменту за показником струму двигуна. На рис. 3 представлено графіки струму двигуна механізму підйому вантажу при підйомі вантажу (функція, графік якої представлений лінією сірого кольору представляє діюче значення струму при використанні статичної механічної характеристики двигуна механізму підйому вантажу).

У таблиці 2 наведено основні показники, які відповідають експериментальним даним та теоретичним розрахункам струму електродвигуна механізму підйому вантажу. Верхні значення у табл. 2 відповідають підйому вантажу, а нижні його опусканню.

З табл. 2 видно, що динамічна механічна характеристика збігається з експериментальним даним за всіма показниками.

Статична механічна характеристика має відхилення від експериментальних даних у 40,1-67,1 % за показником середнього діючого значення струму протягом розгону двигуна. Саме цей показник визначає теплові втрати енергії у двигуні.

ISSN 2311-0368 (Print)
ISSN 2409-1049 (Online)

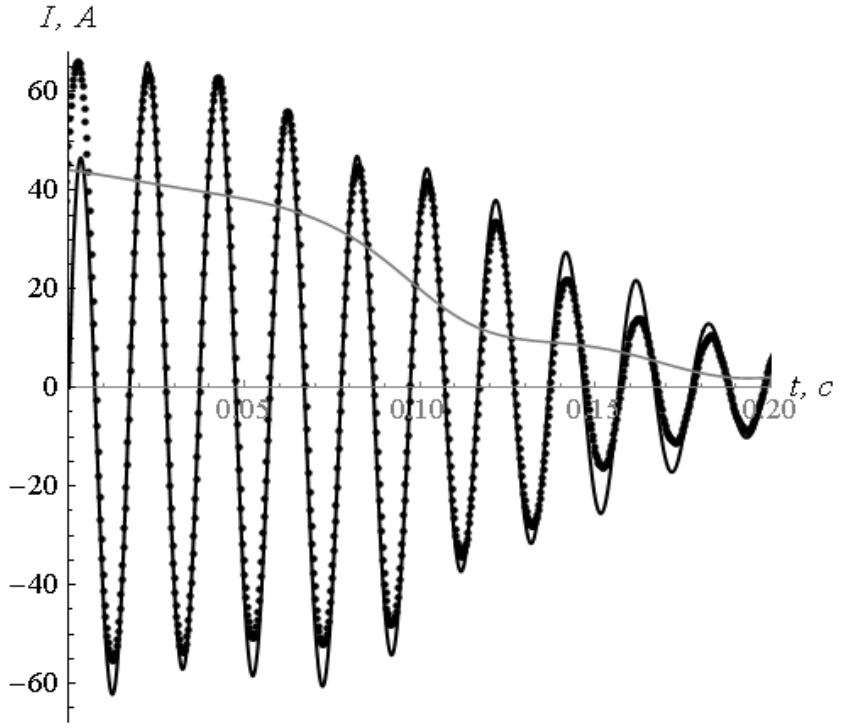

Рис. 3. Графіки струму двигуна механізму підйому вантажу (режим підйому вантажу), які побудовані із використанням динамічної (суцільна чорна лінія) і статичної (суцільна сіра лінія) механічних характеристик двигуна та за експериментальними даними (точковий графік)

Таблиця 2

Показники функції струму двигуна механізму підйому вантажу

Показник	За якими даними розраховано показник		
	Експериментальні дані	Моделювання із використанням механічної характеристики	
		динамічної	статичної
Максимальне значення струму, А	61,3-61,8	61,2	62,2*
	60,5-61,2	61,0	63,1*
Середнє діюче значення струму протягом розгону двигуна, А	31,1-31,8	31,8	22,2
	24,5-24,9	25,0	14,9
Усталене діюче значення струму, А	6,8	6,9	6,1
	6,5	6,6	6,9

*значення рівне добутку максимального діючого значення струму та $\sqrt{2}$.

Для того, щоб з'ясувати причину розходження теоретичних та експериментальних даних необхідно проаналізувати рис. 3 з якого випливає, що зменшення діючого значення струму двигуна, який розраховано з використанням статичної механічної характеристики, проходить швидше, ніж зменшення струму за експериментальними даними. З рис. 3 видно, що максимальне значення струму для теоретичних розрахунків знаходяться у першій хвилі, а для експериментальних даних – у другій. Такий розбіг можна пояснити тим, що вмикання двигуна при проведенні експерименту відбувається при значній величині миттєвого значення напруги.

Для того, щоб встановити адекватність математичної моделі механізму переміщення крана із вантажем на гнучкому підвісі наведемо графіки функції швидкості руху кранового моста (рис. 4).

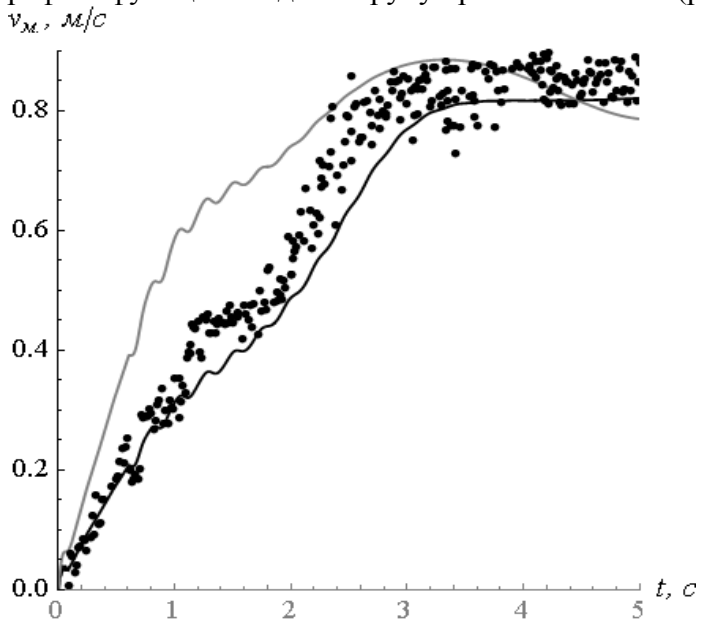

Рис. 4. Графіки швидкості руху кранового моста при його розгоні, які побудовані із використанням динамічної (суцільна чорна лінія) і статичної (суцільна сіра лінія) механічних характеристик двигуна та за експериментальними даними (точковий графік)

З рис. 4 видно, що експериментальні дані краще описує функція швидкості руху кранового моста, яка отримана із використанням динамічної механічної характеристики приводного двигуна. Для того, щоб підтвердити цей висновок необхідно провести аналіз даних для всіх експериментів. Чисельні показники, які отримані при проведенні такого аналізу, наведено у таблиці 3. З табл. 3 видно, що за показником максимального значення швидкості кранового моста використання статичної механічної характеристики приводного двигуна краще відображає експериментальні дані. Однак, значення статистичних показників середньоквадратичного відхилення та коефіцієнта варіації

ISSN 2311-0368 (Print)
ISSN 2409-1049 (Online)

вказують, що при моделюванні режимів руху крана бажано використовувати динамічну механічну характеристику.

Таблиця 3

Показники функції швидкості руху кранового моста

Показник	За якими даними розраховано показник		
	Експери-ментальні дані	Моделювання із використанням механічної характеристики	
		динамічної	статичної
Максимальне значення швидкості, м/с	0,88	0,83	0,87
Тривалість розгону до усталеної швидкості, сек	2,8	3,2	2,4
Середньоквадратичне відхилення, м	-	0,051-0,129	0,156-0,267
Коефіцієнт варіації, %	-	12,7-32,2	39,0-66,7

Для оцінки кута відхилення канату з вантажем від вертикалі наведемо графік (рис. 5).

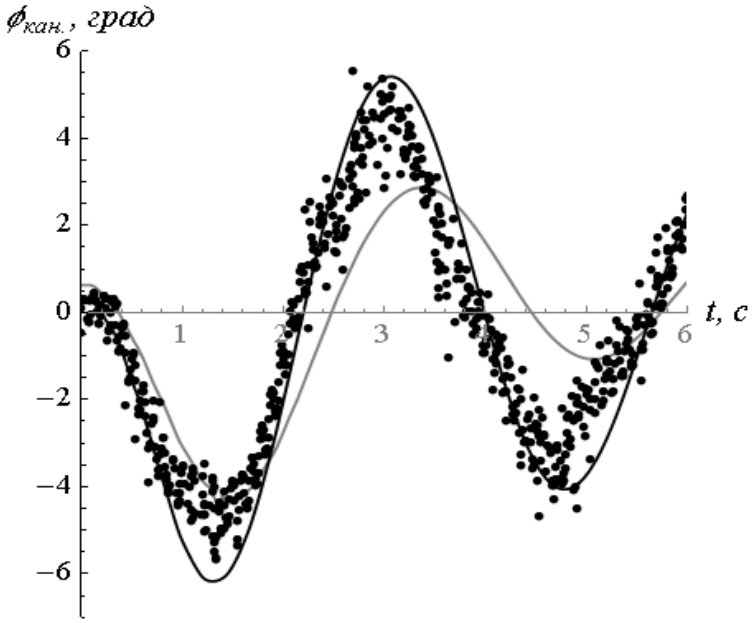

Рис. 5. Графіки кута відхилення канату з вантажем від вертикалі, які побудовані із використанням динамічної (суцільна чорна лінія) і статичної (суцільна сіра лінія) механічних характеристик двигуна та за експериментальними даними (точковий графік)

З рис. 5 видно, що використання динамічної механічної характеристики двигуна дозволяє отримати функцію кута відхилення канату з вантажем від вертикалі, яка досить добре відображає

експериментальні дані. У першій хвилі коливань вантажу їх амплітуда рівна $5{,}2^0$. Надалі під впливом демпфуючої здатності приводу амплітуда коливань канату з вантажем зменшується. Логарифмічний декремент коливань для теоретичних та експериментальних даних практично однакові.

Аналіз оброблених експериментальних даних показує, що відхилення максимальної амплітуди коливань вантажу при використанні динамічної механічної характеристики двигуна механізму переміщення крана знаходиться у межах $0{,}1^0$-$0{,}8^0$. Різниця максимальних амплітуд коливань вантажу за експериментальними даними та при використанні статичної механічної характеристики двигуна складає $0{,}4^0$-$2{,}8^0$.

Висновок

Проведений аналіз показує, прийняті у теоретичних розрахунках математичні моделі режимів руху кранових механізмів, а також динамічна механічна характеристика приводних двигунів дозволяють отримати адекватні реальним даним характеристики руху кранових механізмів. Розбіжність теоретичних розрахунків та експериментальних даних є незначною. Це дозволяє використовувати отримані при теоретичних розрахунках дані як достовірні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Комаров М.С. Динамика грузоподъемных машин / М.С. Комаров – М.: Машиностроение, 1969. – 206 с.
2. Казак С.А. Динамика мостовых кранов / С.А. Казак. – М.: Машиностроение, 1968. – 331 с.
3. Гохберг М.М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин / М.М. Гохберг. – М.: Машиностроение, 1969. – 520 с.
4. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов / Н.А. Лобов. – М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
5. Гайдамака В.Ф. Грузоподъемные машины / В.Ф. Гайдамака. – К.: Выща школа, 1989. – 328 с.
6. Герасимяк Р.П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р.П. Герасимяк, В.А. Лещёв. – О.: СМИЛ, 2008. – 192 с.
7. Будиков Л.Я. Многопараметрический анализ динамики грузоподъемных кранов мостового типа / Л.Я. Будиков. – Луганск: Изд-во ВУГУ, 1997. – 210 с.
8. Крамер Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. – М.: Мир, 1975. – 848 с.