УДК 621.873
DOI: 10.15276/pidtt.1.62.2020.01
Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Стехно О. В.
Національний університет біоресурсів і природокористування України

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ПУСКУ МЕХАНІЗМУ ЗМІНИ ВИЛЬОТУ ВАНТАЖУ БАШТОВОГО КРАНА

Анотація. *У статті наведено метод, який дозволяє мінімізувати втрати електроенергії в асинхронному електроприводі механізму зміни вильоту вантажу баштового крана під час перехідного процесу його пуску. Для цього відому математичну модель асинхронного електродвигуна було доповнено диференційним рівнянням руху приводу механізму зміни вильоту вантажу баштового крана, яке описує етап вибору слабини канату.*

Оскільки значна кількість електроприводів механізмів сучасних баштових кранів обладнано частотними перетворювачами, які мають параметри налаштувань (тривалість наростання частоти напруги живлення, початкова напруга живлення електродвигуна, а також тип характеристики наростання частоти напруги живлення), тому запропоновано визначити такі їх значення, які дозволять зменшити енергетичні втрати у приводі механізму зміни вильоту вантажу баштового крана.

Для дослідження було використано модифікований метод рою часточок (ME-PSO), який дозволяє виконати пошук глобального мінімуму функції втрат енергії приводу механізму зміни вильоту вантажу баштового крана.

У результаті роботи алгоритму встановлено оптимальні значення тривалості наростання частоти напруги живлення, початкової напруги живлення асинхронного електродвигуна, а також тип характеристики наростання частоти напруги живлення для приводів механізму зміни вильоту вантажу, що відповідають чотирьом баштовим кранам: КБ-674, 200 EC-H 10 (Liebherr), MTD 128 (Potain) та 5 LC 5010 5t (LINDEN COMANSA).

Проведено аналіз збіжності модифікованого алгоритму (ME-PSO) та виконано порівняльний аналіз енерговтрат при застосуванні прямого пуску електродвигуна та при різних характеристик наростання частоти напруги живлення.

Ключові слова: *баштовий кран, механізм зміни вильоту вантажу, електропривод, енергетичні втрати, оптимізація, параметри, модифікований PSO алгоритм, MISO-функція.*

Постановка проблеми. Однією із важливих проблем під час експлуатації механізму зміни вильоту вантажу баштового крана є забезпечення його енергоефективності. Дана проблема стає все більш актуальною в зв'язку із постійними збільшеннями тарифів на електричну енергію.

Для оцінки величини небажаних енергетичних навантажень електроприводу механізму зміни вильоту вантажу та їх мінімізації необхідно проводити аналіз його енергетичних втрат, а також визначити оптимальний за енергоефективністю режим руху.

Аналіз публікацій по темі досліджень. Дослідження енергетичних процесів у механізмах вантажопідіймальних кранів наведено у багатьох працях. Зокрема у науковій статті [1] запропоновано використовувати оптимальні алгоритми керування механізмом вантажопідіймального крана, які дозволяють мінімізувати споживану електричну енергію за рахунок відключення кінематичного зв'язку між електродвигуном та вантажним візком (запропоновано встановлення електромеханічної муфти у приводі). Запропоноване оптимальне керування вимагає внесення додаткових зміни у конструкцію крана та вимагає від оператора постійно бути у напруженому стані.

В роботі [2] представлено оптимальну за енергоефективністю траєкторію керування механізмами щоглового крана. Оптимальна траєкторія не суттєво мінімізує енергетичні навантаження. Однак, її реалізація супроводжується значними коливаннями елементів крана.

У статті [3] за допомогою матричного методу виконано розрахунок, який дозволяє здійснювати швидке позиціонування вантажу та мінімізувати енергетичні навантаження у стріловому крані. У дослідженнях коливання закріпленого на гнучкому підвісі вантажу розглядається за допомогою моделі подвійного математичного маятника. Однак при певних параметрах баштових кранів процес усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі триває досить довго.

У роботі [4] пропонується виконувати планування траєкторії руху вантажного візка стрілового крана, при які відбувається мінімізація витрат електроенергії та забезпечується точне позиціонування закріпленого на гнучкому підвісі вантажу. Однак у представленій роботі не наведено способи реалізації отриманих результатів.

У науковій праці [5] розроблено енергетичний підхід до оптимального керування мостовим краном, який дозволяє позиціонувати закріплений на гнучкому підвісі вантаж із мінімальними затратами електроенергії. Однак при такому керуванні процес усунення коливань закріпленого на гнучкому підвісі вантажу триває досить довго.

У статті [6] досліджено втрати електричної енергії у лебідці підйому вантажу стрілового крана. У ході дослідження побудована математична модель, яка дозволяє рекуперувати електроенергію та наведено результати експериментальних досліджень.

У науковій роботі [7] визначено оптимальний режим пуску вантажного візка баштового крана, який дозволяє мінімізувати втрати електроенергії у електродвигуні. У якості критерія виступає інтегральний функціонал, який відображає середньоквадратичне значення швидкості зміни зусилля у тяговому канаті. Встановлено раціональний час розгону вантажного візка та досліджено його розгін при різній довжині гнучкого підвісу вантажу. Однак представлені дослідження не суттєво мінімізують енергетичні втрати у досліджуваному механізмі.

Як видно із аналізу існуючих робіт питанню мінімізації енергетичних навантажень у вантажопідіймальних кранах та їх механізмах приділено багато уваги. Однак, режиму пуску приводу механізму зміни вильоту вантажу баштового крана який обладнано частотно-керованим електроприводом приділено не достатньо уваги.

Мета данного дослідження

Метою роботи є дослідження та мінімізація енергетичних втрат у асинхронному електроприводі механізму зміни вильоту вантажу під час його пуску. Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання: 1) виконати постановку задачі оптимізації; 2) обґрунтувати критерій оптимізації; 3) здійснити мінімізацію енергетичних втрат у електроприводі механізму; 4) проаналізувати отримані результати при прямому та оптимальному режимах пуску.

Виклад основного матеріалу.

Енергетичні втрат механізму зміни вильоту вантажу запропоновано досліджувати на першому етапі його руху. Це пов’язано з тим, що у механізмах зміни вильоту вантажу сучасних баштових кранів найбільші втрати електричної енергії спостерігаються саме під час ввімкнення асинхронного електродвигуна.

Для дослідження енергетичних втрат під час першого етапу руху механізму зміни вильоту вантажу використаємо відому математичну модель, яка дозволяє описати електромагнітні процеси у асинхронному електродвигуні [8]. Це, в свою чергу, дозволить дослідити енергетичні втрати у приводі досліджуваного механізму зміни вильоту вантажу баштового крана [8].

Математичну модель асинхронного електродвигуна доповнимо диференційним рівнянням приводу механізму зміни вильоту вантажу на першому етапі руху. Після проведення відповідних доповнень,

математична модель руху асинхронного електродвигуна та механізму зміни вильоту вантажу виглядає наступним чином:

$$\begin{cases} \dfrac{di_{1\alpha}}{dt} = \dfrac{1}{\delta \cdot L_S} \cdot (u_{1\alpha} - i_{1\alpha} \cdot R_S + k_r \cdot e_{2\alpha}); \\ \dfrac{di_{1\beta}}{dt} = \dfrac{1}{\delta \cdot L_S} \cdot (u_{1\beta} - i_{1\beta} \cdot R_S - k_r \cdot e_{2\beta}); \\ \dfrac{di_{2\alpha}}{dt} = -\dfrac{1}{\delta \cdot L_R} \cdot ((u_{1\alpha} - i_{1\alpha} \cdot R_S) \cdot k_s + e_{2\alpha}); \\ \dfrac{di_{2\beta}}{dt} = -\dfrac{1}{\delta \cdot L_R} \cdot ((u_{1\beta} - i_{1\beta} \cdot R_S) \cdot k_s - e_{2\beta}); \\ \dfrac{3}{2} \cdot p \cdot L_W \cdot (i_{1\beta} \cdot i_{2\alpha} - i_{1\alpha} \cdot i_{2\beta}) \cdot U_{П.} \cdot \eta_{П.} = J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 - M_O, \end{cases} \quad (1)$$

де $i_{1\alpha}$ і $i_{1\beta}$ – проекції узагальненого вектора струму статора на нерухомі ортогональні координатні осі α та β; $u_{1\alpha}$, і $u_{1\beta}$ – проекції узагальненого вектора напруги статора на координатні осі α й β $\left(u_{1\alpha} = U_{MAX} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \int f dt), u_{1\beta} = U_{MAX} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \int f dt)\right)$; $i_{2\alpha}$ та $i_{2\beta}$ – проекції узагальненого вектора струму ротора на ортогональні осі α і β відповідно; $U_{MAX.}$ – амплітуда фазної напруги живлення електродвигуна; f – частота напруги живлення електродвигуна; $e_{2\beta}$, та $e_{2\alpha}$ – ЕРС, котрі індукуються потокозчепленнями ротора по осях α та β відповідно ($e_{2\alpha} = p \cdot \omega_{дв} \cdot (L_R \cdot i_{2\beta} + L_W \cdot i_{1\beta}) + i_{2\alpha} \cdot R_R$; ($e_{2\beta} = p \cdot \omega_{дв} \cdot (L_S \cdot i_{2\alpha} + L_W \cdot i_{1\alpha}) + i_{2\beta} \cdot R_R$); $\omega_{дв}$ – кутова швидкість обертання ротора електродвигуна механізму; p – кількість пар полюсів електричної машини; R_S – активний опір статорної обмотки; R_R – зведений до статора активний опір роторної обмотки електродвигуна; δ – коефіцієнт розсіювання, який, $\delta = 1-(1+X_1(2\pi\ f\ L_W)^{-1})(1+X_2(2\pi f L_W)^{-1})^{-1}$; X_1 – індуктивний опір статорної обмотки; X_2 – зведений до статора індуктивний опір роторної обмотки електродвигуна; L_S та L_R – індуктивності статорної та роторної обмоток відповідно; L_W – взаємоіндуктивність; k_s та k_r – коефіцієнти магнітного зв'язку статора та ротора відповідно $k_s = L_W \cdot L_S^{-1}$ і $k_r = L_W \cdot \cdot L_R^{-1}$[8]; J1 – зведений до канатного барабану момент інерції приводу механізму зміни вильоту вантажу; M_O – зведений до барабана момент сил опору; $U_{П.}$ – передаточне число приводу механізму зміни вильоту вантажу; $\eta_{П.}$ – ККД приводу механізму зміни вильоту вантажу; φ – узагальнена координата канатного барабана.

Початкові умови для інтегрування системи диференційних рівнянь (1) виглядають наступним чином:

$$\begin{cases} i_{1\alpha}(0) = i_{1\beta}(0) = i_{2\alpha}(0) = i_{2\beta}(0) = 0; \\ \varphi_1(0) = -\Delta\varphi; \dot{\varphi}_1(0) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

де $\Delta\varphi$ – величина кута на який обертається барабан при виборі всієї слабини канату.

Значення початкових умов руху (2) є нульовими. Це говорить про те, що досліджувана система знаходиться у стані спокою, а електромагнітні процеси в асинхронному електродвигуні відсутні.

Параметри, які входять у систему диференційних рівнянь (1) та які будуть використані для дослідження втрат електричної енергії у приводі механізму зміни вильоту вантажу, відповідають чотирьом баштовим кранам: КБ-674 [9], 200 EC-H 10 (Liebherr) [10], MTD 128 (Potain) [11] та 5 LC 5010 5t (LINDEN COMANSA) [12]. Значення параметрів асинхронного електроприводу механізму зміни вильоту вантажу баштових кранів занесено у таблицю 1.

Таблиця 1. – Основні параметри асинхронного електроприводу

№ п/п	Найменування параметрів	Марки баштових кранів			
		КБ-674	200 EC-H 10	MTD 128	5 LC 5010 5t
1.	Номінальна потужність електродвигуна, кВт	7,5	5,5	4,8	1,8
2.	Номінальна частота обертання двигуна, об/хв	935	950	930	880
3.	Перевантажувальна здатність електродвигуна	2,5	2,0	1,6	2,8
4.	Номінальний коефіцієнт потужності двигуна	0,70	0,76	0,79	0,72
5.	Кількість пар полюсів, шт.	3			

Більшість сучасних механізмів баштових кранів (у тому числі механізми зміни вильоту вантажу) обладнані частотними перетворювачами за допомогою яких здійснюється керування асинхронним електроприводом. Сучасні частотні перетворювачі мають значну кількість налаштувань. Серед найбільш значимих варто відмітити наступні [13, 14]: тривалість наростання частоти напруги живлення асинхронного електродвигуна, значення початкової напруги живлення електроприводу та тип характеристики наростання частоти. Раціональне встановлення вище вказаних параметрів дозволяє суттєво зменшити енергетичні втрати в асинхронному електродвигуні.

Тривалість наростання частоти напруги живлення асинхронного електродвигуна t_1 для сучасних частотних перетворювачів (наприклад: FR-D700; FR-E700; FR-E700SC тощо, фірми MITSUBISHI ELECTRONIC) знаходиться у діапазон від 0 до 3600 секунд [13].

Що стосується початкової напруги живлення U_0, то її значення можливо встановлювати у межах від 0 до 380 В. Однак тут необхідно враховувати те, що привод досліджуваного механізму зміни вильоту вантажу на початку пуску має подолати сили статичного опору. А для цього необхідно забезпечити потрібну перевантажувальну здатність асинхронного електродвигуна, яка залежить від зміни частоти напруги живлення [8].

Для механізмів вантажопідіймальних машин залежність напруги живлення асинхронного електродвигуна U від частоти напруги живлення f представляється у наступному вигляді:

$$U = U_0 + \left(U_{H.} - U_0\right) \cdot \frac{f}{f_{H.}}, \tag{3}$$

де $U_{H.}$ – номінальна напруга живлення електродвигуна (380 В); $f_{H.}$ – номінальна частота напруги живлення електродвигуна (50 Гц).

Будемо розглядати наступні типи характеристики наростання частоти напруги живлення до номінальної $f_{H.}$: лінійна; S – подібна; подвійна S – подібна; та U – подібна характеристики рисунок 1 [8].

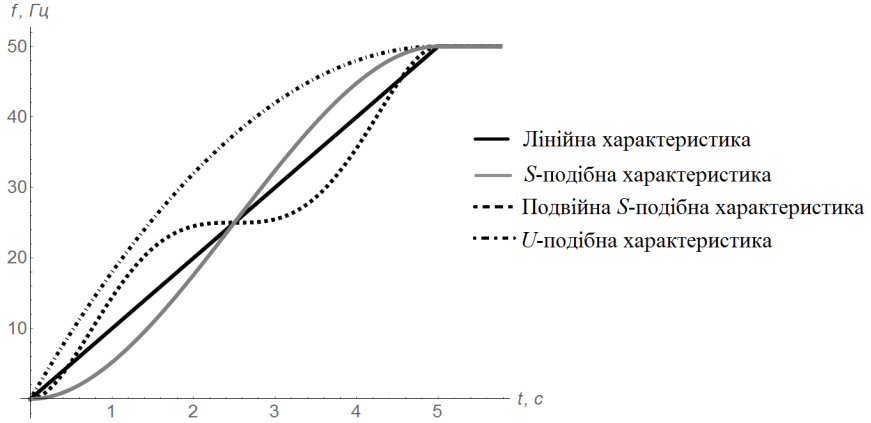


Рисунок 1. Характеристики зміни частоти напруги живлення асинхронного електродвигуна

Зазвичай певна кількість електричної енергії, яку споживає електропривод механізму зміни вильоту вантажу баштового крана, витрачається на нагрівання обмоток у асинхронному електродвигуні, що веде за собою теплове старіння ізоляції. Зношування ізоляції асинхронного електродвигуна призводить до зменшення його довговічності, та як наслідок, виходу його із ладу.

Крім того, зменшення змінних електричних втрат дозволяє підвищити енергоефективність електроприводу механізму зміни вильоту вантажу.

Вираз, що дозволяє визначити електричну енергію, яку втрачає асинхронний електродвигун на першому етапі руху механізму зміни вильоту вантажу має наступний вигляд [8]:

$$\Delta E = \Delta E_S + \Delta E_R = \frac{3}{2} \cdot R_S \int_0^{t_1} \left(i_{1a}^2 + i_{1\beta}^2\right) dt + \frac{3}{2} \cdot R_R \int_0^{t_1} \left(i_{2a}^2 + i_{2\beta}^2\right) dt, \tag{4}$$

де ΔE_S та ΔE_R – втрати електричної енергії у статорних та роторних обмотках електродвигуна механізму зміни вильоту вантажу [8].

Вираз (4) у подальших дослідженнях буде виступати у якості оптимізаційного критерію.

Оскільки величина втрат електричної енергії у приводі механізму зміни вильоту вантажу залежить від значень: t_1, U_0 та типу характеристики наростання частоти напруги живлення електродвигуна, то необхідно знайти такі їх значення, при яких величина ΔE буде мінімальною.

Для розв'язування цієї задачі запропоновано використати модифікований алгоритм оптимізації роєм часточок (ME-PSO) [15]. Запропонований алгоритм ґрунтується на моніторингу зміни глобального оптимуму (*global best*) функції яку знайшов рій.

Основна ідея методу (ME-PSO) полягає у наступному: якщо швидкість зменшення глобального мінімуму (*global best*) є меншою, ніж певна прийнятна швидкість, то всі позиції частинок повинні бути реініціалізовані (запуск нової епохи рою). Краще значення *global best* (в новій епосі) для першої ітерації такий же, як й для останньої ітерації рою у попередній епосі.

Переміщуючись по поверхні функції, частинка може знаходити мінімум, який є кращим, ніж значення попереднього найкращого мінімуму. Варто зазначити, що для певної кількості ітерацій (відразу після реініціалізації рою) частинки можуть рухатися без мінімізації *global best*.

Через певний час частинка може потрапити у локальний мінімум, значення якого є кращим ніж поточне *global best*. У випадку якщо таких частинок багато, то відбувається стагнація рою.

У дослідженні [15] критерієм стагнації рою є вираз запропонований у такому вигляді:

$$R = \frac{GB_i - GB_{i-1}}{GB_i}, \tag{5}$$

де GB_i та GB_{i-1} – глобальні найкращі (*global best*) для i – ї (поточної) та $(i-1)$ – ї (попередньої) ітерацій. Вираз (5) демонструє, на скільки зменшується значення глобального найкращого під час однієї ітерації. Таким чином значення R має обраховуватися у кінці кожної ітерації.

Якщо швидкість зменшення *global best* є меншою за прийнятну швидкість, то рій необхідно реініціалізувати, тобто необхідно щоб виконувалася умова:

$$AR \geq R, \tag{6}$$

де AR – прийнятна швидкість зменшення *global best* (значення AR повинно бути встановлено користувачем методу ME-PSO). У розрахунках, які проведені у рамках даного дослідження, прийнято AR=0,01. Таке значення AR дозволяє забезпечити досить хороший баланс між глобальним та локальним дослідженням поверхні.

Під час ініціалізації та реініціалізації усі компоненти позицій частинок повинні бути встановлені як випадкові числа у області пошуку, а швидкості частинок приймаються рівними нулю.

За допомогою представленого алгоритму можливо мінімізувати енергетичні втрати у приводі механізму зміни вильоту вантажу. Для цього пропонується досліджувану систему розглядати як MISO-функцію, тобто систему яка має декілька входів, (t_1, U_0 та тип характеристики) та лише один вихід (втрати електричної енергії ΔE). Умовне зображення MISO-функції представлено на рисунку 2.

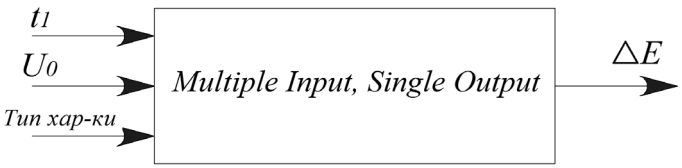


Рисунок 2. – Умовне зображення MISO-функції для проведення оптимізації

Значення параметрів за якими буде проведена оптимізація занесено до таблиці 2.

Таблиця 2. – Значення параметрів для проведення оптимізації

Параметри	Значення
Тривалість наростання частоти напруги живлення t_1, с	Від 0 до 4
Початкова напруга живлення U_0, В	Від 0 до 380
Тип характеристики	Лінійна, S –подібна, подвійна S – подібна, U – подібна
Кількість частинок у рої	40
Кількість ітерацій	100

Для визначення оптимальної характеристики зміни частоти напруги живлення (рисунок 1), кожній із досліджуваних характеристик присвоєно відповідний порядковий номер. Так для лінійної характеристики присвоєно порядковий номер - 1; S – подібної номер - 2; подвійної S – подібної номер - 3; U – подібної номер - 4.

Модифікований метод оптимізації роєм часточок (ME-PSO) дозволяє в результаті розрахунку визначити необхідний порядковий номер (1 – 4), який відповідатиме оптимальній характеристиці закону зміни частоти напруги живлення приводу механізму.

В результаті розрахунку мінімізовано енергетичні втрати у приводі механізму для чотирьох баштових кранів. Результати роботи алгоритму ME-PSO розрахунків представлено на рисунках 3-6.

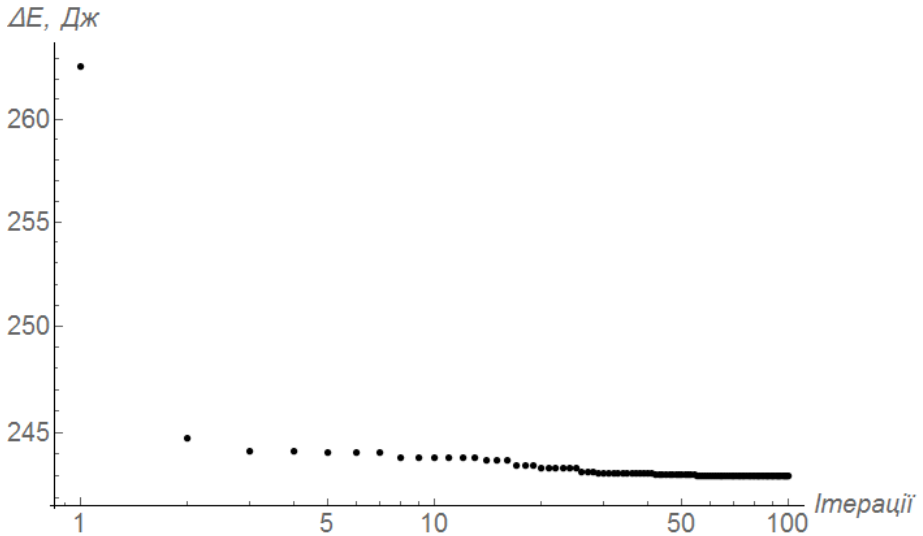


Рисунок 3. – Графік функції зміни енергетичних втрат в приводі досліджуваного механізму крана КБ-674 при проведенні оптимізації

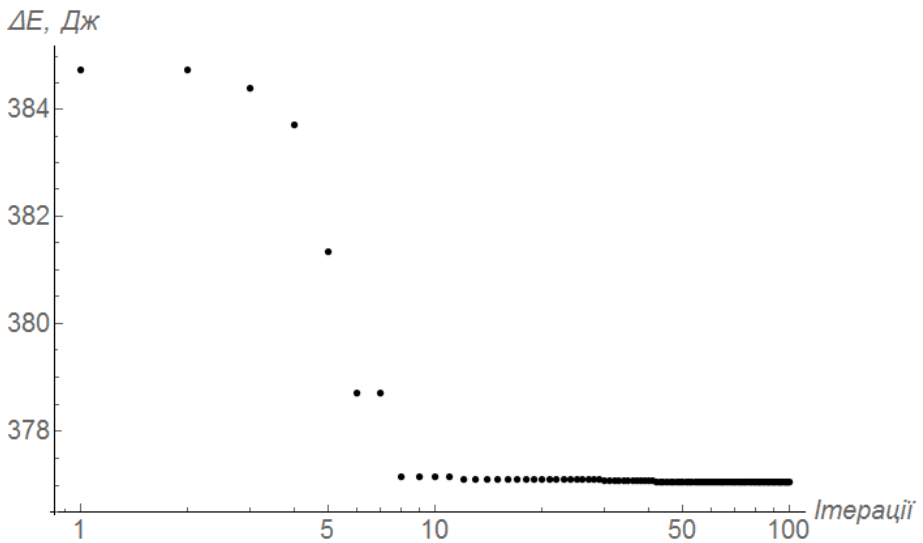


Рисунок 4. – Графік функції зміни енергетичних втрат в приводі досліджуваного механізму крана 200 ЕС-Н 10 при проведенні оптимізації

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

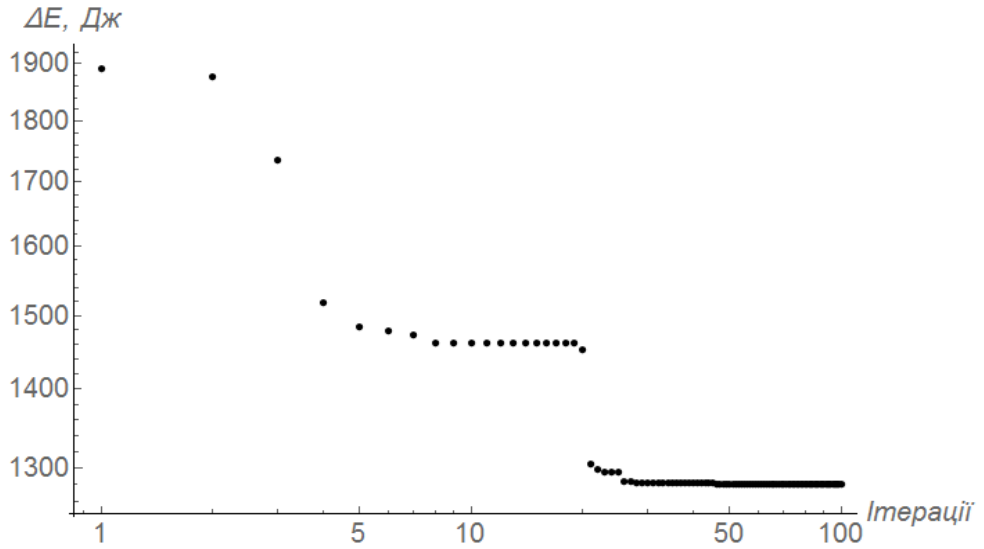


Рисунок 5. – Графік функції зміни енергетичних втрат в приводі досліджуваного механізму крана MTD 128 при проведенні оптимізації

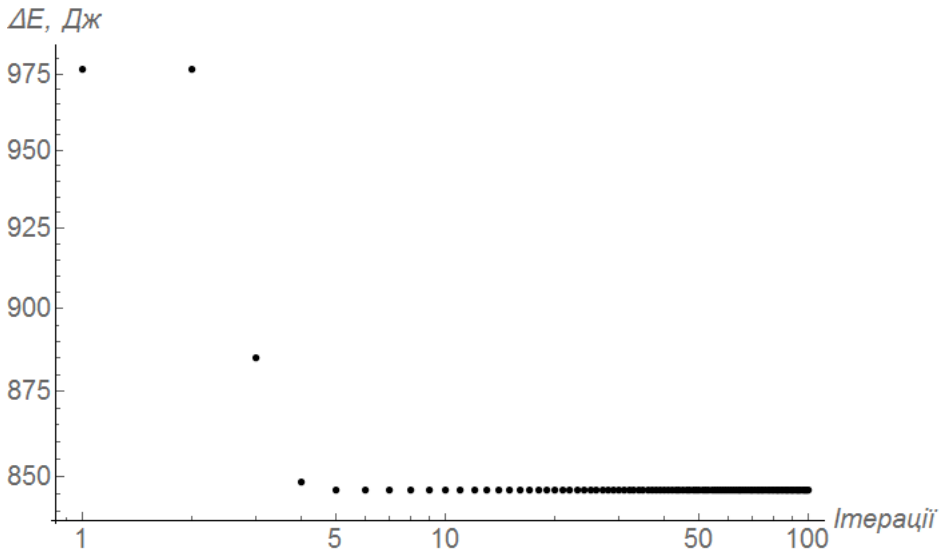


Рисунок 6. – Графік функції зміни енергетичних втрат в приводі досліджуваного механізму крана 5 LC 5010 5t при проведенні оптимізації

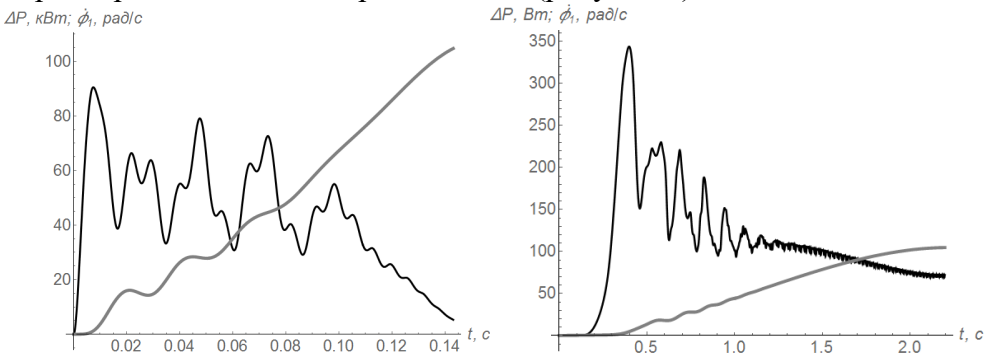
Аналізуючи представлені графічні залежності можна зробити наступні висновки. Для приводу механізму зміни вильоту вантажу баштового крана КБ-674, 200 EC-H 10 та MTD модифікований алгоритм (ME-PSO) знаходить глобальний мінімум на п’ятдесятій ітерації. Для баштового крана 5 LC 5010 5t глобальний мінімум знаходиться після п’ятої ітерації.

У процесі знаходження глобального мінімуму встановлено оптимальні параметри t_1, U_0 та характеристики наростання частоти напруги живлення приводу. Їх значення занесено до таблиці 3.

Таблиця 3. – Оптимальні значення параметрів частотно-керованого електроприводу

Параметри	Марки баштових кранів			
	КБ-674	200 EC-H 10	MTD 128	5 LC 5010 5t
Тривалість наростання частоти напруги живлення t_1, с	2,21	2,49	3,50	3,00
Початкова напруга живлення U_0, В	1,38	9,36	76,2	58,6
Тип характеристики	*S* – подібна		Лінійна	

За результатам отриманих оптимальних параметрів та типу характеристики, побудуємо графіки, які описують кутову швидкість асинхронного електроприводу та втрати електроенергії при оптимальному та некерованому режимах розгону відповідно за параметрами баштового крана КБ-674 (рисунок 7).



а) *б*)

Рисунок 7. – Графіки функцій, які відповідають втратам потужності (чорна крива) та кутовій швидкості ротора електродвигуна (сіра крива) для баштового крана КБ - 674: (*а*) – прямий пуск; (*б*) – при оптимальних параметрах частотно-керованого приводу

На рисунку 7 видно, що найбільші втрати електроенергії у приводі механізму зміни вильоту вантажу, як при прямому пуску так і оптимальному режимах руху, виникають до виходу асинхронного електродвигуна на усталену швидкість.

Встановлення оптимальних параметрів налаштування частотного перетворювача збільшує тривалість розгону приводу досліджуваного механізму зміни вильоту вантажу (наприклад для

крана КБ-674 у 15,7 рази), однак при цьому суттєво знижуються втрати електроенергії у асинхронному електроприводі (для цього ж крана у 24,1 рази).

У таблиці 4 наведено величину енергетичних втрат у електроприводі при прямому пуску та при різних характеристиках наростання частоти. Найнижчі (оптимальні) значення виділені жирним шрифтом.

Таблиця 4. – Величина втрат електроенергії при різних способах керування асинхронним електродвигуном

Тип керування асинхронним електроприводом	Марки баштових кранів			
	КБ-674	200 ЕС-Н 10	MTD 128	5 LC 5010 5t
Прямий пуск	5871	8726	11573	18648
Частотне керування				
Лінійна характеристика	275	424	**1281**	**846**
S – подібна характеристика	**243**	**377**	1652	1050
Подвійна *S* – подібна характеристика	334	591	1775	1398
U – подібна характеристика	373	686	1685	1594

Аналіз даних, які наведено у таблиці 4, дає змогу встановити, що розгін приводу механізму зміни вильоту вантажу баштового крана КБ-674 на *S*–подібний характеристиці дозволяє мінімізувати втрати електроенергії у діапазоні від 12 до 35 % в порівнянні із іншими характеристиками. Для баштового крана 200 ЕС-Н 10 при використанні цієї ж характеристики втрати електричної енергії мінімізуються в діапазоні від 11 до 45 %, в порівнянні з іншими досліджуваними характеристиками.

Для баштових кранів MTD 128 та 5 LC 5010 5t розгін приводу за лінійною характеристикою дозволяє мінімізувати втрати електроенергії у діапазоні від 22 до 30 % і від 19 до 47 % відповідно.

Щоб мінімізувати енергетичні втрати у асинхронному електроприводі для досліджуваних баштових кранів в налаштуванні частотного перетворювача бажано встановлювати лінійну або *S* – подібну характеристики наростання частоти напруги живлення асинхронного електродвигуна механізму зміни вильоту вантажу.

Висновки

Для мінімізації енергетичних втрат у приводі механізму зміни вильоту вантажу, використано модифікований метод оптимізації роєм часточок, який із високим ступенем вірогідності забезпечує знаходження глобального мінімуму критерію оптимізації. Визначено, що мінімальні енергетичні втрати у приводі будуть мати місце якщо за S – подібною характеристикою розганяти механізми зміни вильоту вантажу баштових кранів КБ-674 та 200 ЕС-Н 10 і за лінійною характеристикою кранів MTD 128 та 5 LC 5010 5t. Тривалість розгону при використанні оптимальних налаштувань частотного перетворювача збільшилась у 2…16 рази, однак енергетичні втрати мінімізуються в 9…24 рази (у порівнянні із прямим пуском електродвигуна). Знайдено, що оптимальні механічні характеристики дозволяють зменшити енергетичні втрати у межах від 11 до 47 % в порівнянні із не оптимальними налаштуваннями частотних перетворювачів.

Список використаної літератури

1. Ho T., Suzuki K., Tsume M., Tasaki R., Miyoshi T., Terashima K. A switched optimal control approach to reduce transferring time, energy consumption, and residual vibration of payload's skew rotation in crane systems. / T. Ho, K. Suzuki, M. Tsume, R. Tasaki, T. Miyoshi, K. Terashima. Control Engineering Practice. 2019. Vol. 84. 247–260.
2. Rams H., Schöberl M., Schlacher K. Optimal Motion Planning and Energy-Based Control of a Single Mast Stacker Crane. / H. Rams, M. Schöberl, K. Schlacher. IEEE. Transactions On Control Systems Technology. 2017. Vol. 26. Issue 4. 1449–1457.
3. Sun N., Wu Y., Chen H., Fang Y. An energy-optimal solution for transportation control of cranes with double pendulum dynamics: Design and experiments. / N., Sun, Y., Wu, H., Chen, Y., Fang. Mechanical Systems and Signal Processing. Vol. 102. 2018. 87–101.
4. Wu Z., Xia X. Energy Efficiency of Overhead Cranes. / Z. Wu, X. Xia. 9-th IFAC. World Congress on International Federation of Automatic Control. 2014. Vol. 19. 19–24.
5. Hoang N., Lee S. Energy-based Approach for Controller Design of Overhead Cranes: a Comparative Study / N. Hoang, S. Lee. Applied Mechanics and Materials. Vol. 365-366. 2013. 784–787.
6. He J., Chen Y., Wu K., Zhao Y., Wang Z., Chen Z. Energy flow analysis of crane hoisting system and experimental of potential energy. J. He, Y. Chen, K. Wu, Y. Zhao, Z. Wang, Z. Chen. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition). 2018. Vol. 48. Issue 4. 1106-1113.

7. Ловейкін В.С. Оптимізація режиму руху механізму зміни вильоту вантажу баштового крана з горизонтальною стрілою. / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич, О.В. Стехно. Машинобудування. 2017. Вип. 20. 11-18.
8. Ромасевич Ю. О. Динамічна оптимізація режимів руху механізмів вантажопідйомних машин як мехатронних систем : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.05.05 "Піднімально-транспортні машини" / Ю. О. Ромасевич – Одеса. 2015. – 40 с.
9. Баштовий кран КБ-674 / URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%91-674 (дата звернення 20.09.2019).
10. Баштовий кран Liebherr 200 EC-H 10 / URL: http://ru.8sbzfqbnedk.ru-p1ai/liebherr/39-liebherr-200-ec-h10 (дата звернення 20.09.2019).
11. Баштовий кран Potain MTD 128 / URL: https://www.manitowoccranes.com/ru-RU/cranes/potain/top-slewing/mdt-city/MDT-128 (дата звернення 20.09.2019).
12. Баштовий кран LINDEN COMANSA серии LC 500 / URL http://ru.8sbzfqbnedk.ru.p1ai/linden-comansa/16-lc-500 (дата звернення 20.09.2019).
13. Преобразователи частоты FR-E7: руководство по експлуатации: артикул 212650. Версия B. Mitsubishi Electric Industrial Automation. – 2008. – 512 с.
14. Преобразователи частоты FR-S500 E EC: технический каталог № 147012-E: Mitsubishi Electric Industrial Automation. – 2005. – 28 с.
15. Romasevych Y., Loveikin V. A Novel Multi-Epoch Particle Swarm Optimization Technique. / Y. Romasevych, V. Loveikin. Bulgarian academy of sciences. Cybernetics and information technologies. Vol. 18. No. 3. 62–74.

STARTING MODE OPTIMIZATION OF THE TOWER CRANE LUFFING MECHANISM

Loveikin V. S., Romasevich Yu. A., Stekhno A. V.
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Abstract. The article presents a method that allows to minimize the losses of electrical energy in the asynchronous electric drive of the tower crane's luffing mechanism during its start-up. In order to carry out the calculation the known mathematical model of an asynchronous motor has been supplemented by the differential equation of motion of luffing mechanism, which describes the stage of the rope becking off.

A considerable number of electric drives of the modern tower cranes are equipped with frequency inverters. They have tuning parameters (duration of increasing of frequency of supply voltage, initial supply voltage of electric motor, and type of characteristic of increasing of frequency of supply voltage). Therefore it has been suggested to determine such value of these parameters that allow to reduce energy losses in the luffing mechanism.

A modified Particle Swarm Method (ME-PSO) has been applied in the study. It allowed to find the global minimum of the function of energy losses.

The optimal values of the duration of increasing of frequency of supply voltage, initial voltage of supply of asynchronous electric motor, and the type of characteristic of increasing of frequency of supply voltage for drives of the luffing mechanism for four tower cranes are determined: КБ-674, 200 EC-H 10 (Liebherr), MTD 128 (Potain) and 5 LC 5010 5t (LINDEN COMANSA).

The convergence analysis of the modified algorithm (ME-PSO) has been carried out and a comparative analysis of energy losses have been performed (the compared characteristics are: direct start and different characteristics of increasing the frequency of the supply voltage).

Keywords: tower crane, luffing mechanism, electric drive, energy losses, optimization, parameters, modified PSO algorithm, MISO function.