

В. О. КОВАЛЕНКО, М. Б. СТРЕЛКОВ, В. В. СТРИЖАК, О. В. ТУРЧИН, О. М. ВУДВУД

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ В МОСТОВИХ КРАНАХ

В статті розглянуто експериментальне дослідження енергоспоживання мостових кранів, обладнаних різними типами приводів: традиційним на основі двигуна з фазним ротором та частотно-регульованим. Метою дослідження є експериментальне визначення залежності зміни спожитої енергії від часу експлуатації кранів. Дослідження проводилося в умовах реального виробництва, де два крани з різними приводами експлуатувались в однакових умовах. Вимірювання енергоспоживання проводилися щомісячно протягом 11 місяців. Результати показали, що крани з частотно-регульованими приводами споживають в середньому на 50% менше енергії, ніж крани з двигунами з фазним ротором. Встановлено, що крани з частотно-регульованими приводами можуть мати меншу масу при однаковій вантажопідйомності, що також може вплинути на загальну ефективність їх роботи.

Ключові слова: кран мостовий, механізм пересування, енергоефективність, система керування, частотний привід

V. KOVALENKO, M. STRELKOV, V. STRYZHAK, O. TURCHYN, O. VUDVUD

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF ENERGY CONSUMPTION IN BRIDGE CRANES

The article deals with an experimental study of the energy consumption of overhead cranes equipped with different types of drives: traditional motor-based with a phase rotor and frequency-controlled. The aim of the study is to experimentally determine the dependence of changes in energy consumption on the time of crane operation. The study was carried out in a real production environment, where two cranes with different drives were operated under the same conditions. The energy consumption was measured monthly for 11 months. The results showed that cranes with variable frequency drives consume on average 50% less energy than cranes with split-rotor motors. It was found that cranes with variable frequency drives can have a lower weight for the same lifting capacity, which can also affect their overall efficiency.

Keywords: bridge crane, travelling mechanism, energy efficiency, control system, frequency drive

Вступ. Мостові крани відіграють ключову роль в індустрії, забезпечуючи підйом та переміщення важких вантажів. Покращення енергоефективності систем керування цих кранів є важливим завданням для зменшення споживання енергії, підвищення екологічної безпеки та зниження вартості експлуатації. Сучасною тенденцією є використання частотно-регульованого приводу для кранових механізмів, що, як відомо з численних джерел, дозволяє зменшити динамічні навантаження та споживання енергії. Ця тенденція існує досить давно, і за цей час накопичено досвід створення кранів, спроектованих і побудованих з урахуванням живлення приводів від частотного перетворювача. Завдяки цьому можна простежити, як змінилися загальні параметри таких кранів у порівнянні з аналогічними параметрами кранів з традиційним приводом від двигуна з фазним ротором, які досі використовуються.

Огляд досліджень Споживання енергії кранами і зменшення рівня цього споживання знаходить найширший інтерес у дослідників з усього світу, що свідчить про беззаперечну актуальність теми. В статті [1] пропонується підхід до планування роботи порталних кранів, який враховує баланс між ефективністю та енергоспоживанням, перетворюючи цю задачу в проблему маршрутизації транспортних засобів. Розроблено інтегрований метод імітаційної оптимізації, який використовує генетичний алгоритм для глобального пошуку та метод рою часток для локального пошуку, з проведенням обчислювальних експериментів для перевірки його ефективності. В багатокранових системах часто виникають колізії між кранами, що призводить до значних витрат енергії для їх уникнення. Стаття [2] пропонує підхід до енергоефективного планування багатокранових систем та вибору необхідної кількості кранів, що дозволяє точно оцінювати енергоспоживання кранів у різних фазах роботи, моделює

багатокранову систему у віртуальному просторі, виявляє колізії та пропонує методи їх уникнення. В статті [3] аналізується енергоспоживання різних двигунів невмоколісного козлового крану. Прододилось експериментальне дослідження в порту Фелікстоу, де збирались дані протягом восьми днів нормальної роботи. Дані були проаналізовані щодо робочих та холостих режимів руху механізмів, а також енергоспоживання різних двигунів. Аналіз показав, що в середньому близько половини споживаної енергії потенційно можна рекуперувати. При цьому очікується економія палива та зниження викидів CO₂. В статті [4] вирішується проблема високого енергоспоживання через неоптимальний дизайн металокопструкції кранів. Для вирішення проблеми значної ваги та матеріалоемності пропонується енергоощадний метод дизайну. Запропоновано дві оптимізаційні моделі для мінімізації ваги копструкції. Розроблено багатокритеріальну оптимізаційну модель для енергоощадного дизайну з метою мінімізації відходів під час виробництва. В статті [5] розглядаються проблеми проектування систем кранів, зокрема зосереджуючись на питаннях витрат і споживання енергії. Складність полягає в нечітких детермінантах, таких як витрати, навантаження та споживання енергії, що посилюється необхідністю балансування протиріччя між багатоцільовими вимогами в реальних умовах. Автори розробили математичну модель з метою мінімізації витрат і споживання енергії, враховуючи фактори, такі як навантаження крана, період відновлення та обмеження бюджету. Розглянуті робти відображають сучасні напрями економії енергії: планування маршрутів, вдосконалення дизайну металокопструкції, оптимізація керування механізмами. Питання енергозбереження діючих кранів розглянуто недостатньо. Також залишається недостатньо висвітленим питання порівняння споживання енергії кранів, що працюють в однакових умовах, наприклад, з однаковим середнім перевантажувальним циклом. Вирішенню саме цього питання і присвячена дана стаття.

Мета дослідження - експериментально визначити залежність зміни спожитої енергії від часу експлуатації кранів обладнаних різними типами приводів – на основі двигуна з фазним ротором і частотно-регульованим.

Результати досліджень. У якості порівняльного експерименту було проведено дослідження кількості спожитої енергії при роботі двох кранів, які працюють в одному виробничому цеху в одному прольоті в м. Харків на виробничих потужностях ТОВ «ПСЕ» (рис. 1). Крани функціонують на ділянці з механозварювальними роботами по виготовленню металокопструкцій. Приводи крану позначеного на рисунку 1 літерою «а» обладнані двигунами з фазним ротором. Цей привід широко використовується для вантажопідійомних машин через ряд переваг, основними з яких є нижча вартість в порівнянні з іншими приводами і простота будови, відповідно простота обслуговування. В діючих кранах даний привід залишається в експлуатації, як в даному прикладі. Кран, позначений літерою «б» має сучасну копструкцію і обладнаний досконалішим приводом – частотно-регульованим.

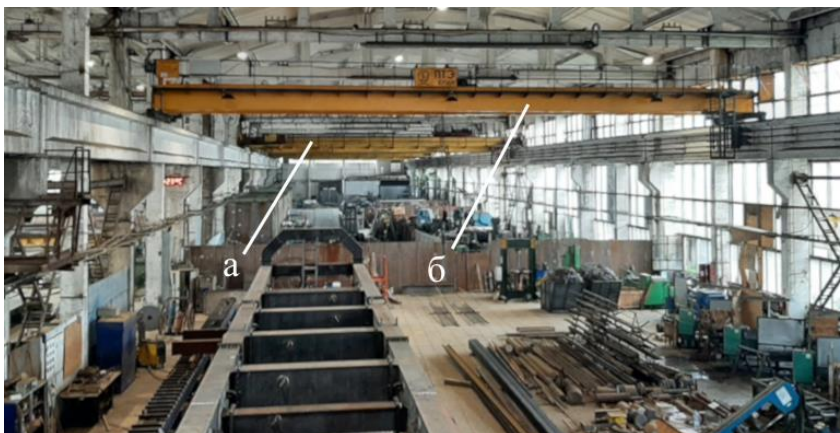


Рис. 1. Крани у виробничому приміщенні задіяні для проведення порівняльного дослідження: а – кран з приводами на основі двигунів з фазним ротором; б - кран з частотно-регульованим приводом

Оскільки крани встановлені в одному прольоті і задіяні в одному і тому самому технологічному циклі підприємства зроблено припущення, що їх середній перевантажувальний цикл є однаковим. Тобто обидва крани переміщують вантаж однакової середньої ваги на однакову середню відстань. Це припущення тим більше є справедливим, оскільки час спостереження і вимірювання спожитої енергії відбувається впродовж місяців і можливі відхилення усереднюються. В таблиці 1 наведені параметри кранів.

Таблиця 1. Порівняння параметрів досліджуваних кранів

№ п/п	Найменування	рис. 1, а	рис. 1, б
1	Вантажопідйомність крана, т.	10,0	10,0
2	Проліт, м.	22,5	22,5
3	Діапазон підйому, м.	12,0	12,0
4	Маса крану, т	17,8	12,2
5	Швидкість підйому, м/хв	7,0	5,0
6	Швидкість пересування візка, м/хв	36,0	25,0
7	Швидкість пересування крану, м/хв	50,0	33,0
8	Тип та потужність двигуна механізму підйому	МТН-411-8 , $P_H=15\text{кВт}$	DRS132M4BE11, $P_H=7,5\text{кВт}$
9	Тип та потужність двигуна механізму пересування візка	МТ-11-6 , $P_H=2\times 2,2\text{кВт}$	DR2S71M4, $P_H=2\times 0,5\text{кВт}$
10	Тип та потужність двигуна механізму пересування крану	МТВ-311-8 , $P_H=2\times 7,5\text{кВт}$	DRS90M4 $P_H=2\times 1,5\text{кВт}$
11	Рід струму, частота, напруга	3ф, 380В, 50Гц	3ф, 380В, 50Гц
12	Умови довкілля	загальнопромислове	загальнопромислове
13	Система керування	Релейна-контакторна з виводом резисторів в фазному роторі	На базі перетворювачів частоти
14	Місце керування	радіопульт	радіопульт

З таблиці випливає, що при однакових вантажопідйомності, діапазоні піднімання і прольоті кран з частотно-регульованим приводом має менші швидкості механізмів і, як наслідок, менші потужності електродвигунів. Однак, в нашому випадку можна припустити, що така обставина не буде мати вплив на кінцевий результат експерименту через те, що ми вимірюємо кількість спожитої енергії за тривалий час і враховується весь перевантажувальний цикл в цілому. Тому з припущення про однаковість умов роботи крану і відповідно однаковість середнього перевантажувального циклу, випливає, що для здійснення такої ж самої механічної роботи механізм з меншими швидкостями повинен працювати довше. Тобто менша миттєва потужність буде споживатись довший час. Важливим параметром маса крану. У випадку частотно-регульованого приводу необхідно звернути увагу, що кран тої ж самої вантажопідйомності і прольоту має меншу вагу. Це свідчить про додаткову перевагу, яка потребує подальшого вивчення.

Для вимірювання спожитої електричної енергії використані лічильники, показані на рис. 2. Причому на кожному крані встановлено окремий лічильник промислового зразка, що має відповідне опломбування. За допомогою даних лічильників один раз на місяць проводились вимірювання кількості спожитої енергії краном в цілому. Результати вимірювання наведені в таблиці 2.



а



б

Рис. 2 - Вимірювальні пристрої, використані в порівняльному дослідженні
а – лічильник електричної енергії крану з приводами на основі двигунів з фазним ротором;
б - лічильник електричної енергії крану з частотно-регульованим приводом

Таблиця 2. Результати вимірювання кількості спожитої енергії по місяцям кранами з двигунами з фазним ротором (faz) і частотно-регульованим приводом (freq), кВт·год

№	Місяць	faz, кВт·год	freq, кВт·год
1	Травень 2022	29	18
2	Червень 2022	60	38
3	Липень 2022	65	40
4	Серпень 2022	65	35
5	Вересень 2022	60	40
6	Жовтень 2022	84	61
7	Листопад 2022	85	63
8	Грудень 2022	83	55
9	Січень 2023	75	45
10	Лютий 2023	35	19,5
11	Березень 2023	20	16
	Σ	661	430,5

Представимо наведені результати вимірювань у вигляді графіка, де по горизонтальній вісі відкладемо порядкові номери місяців, а по вертикальній кількість спожитої енергії, що відповідає кожному місяцю (рис. 3). З рисунку видно, що кран з двигунами з фазним ротором має постійно вищі значення споживання енергії (точки синього кольору на графіку розташовуються вище). Для кількісної оцінки знайдемо апроксимуючі функції лінійної форми, які усереднюють результати, і також розташуємо їх на графіку. Апроксимуючі функції знайдено методом найменших квадратів, за допомогою вбудованих функцій Excel.

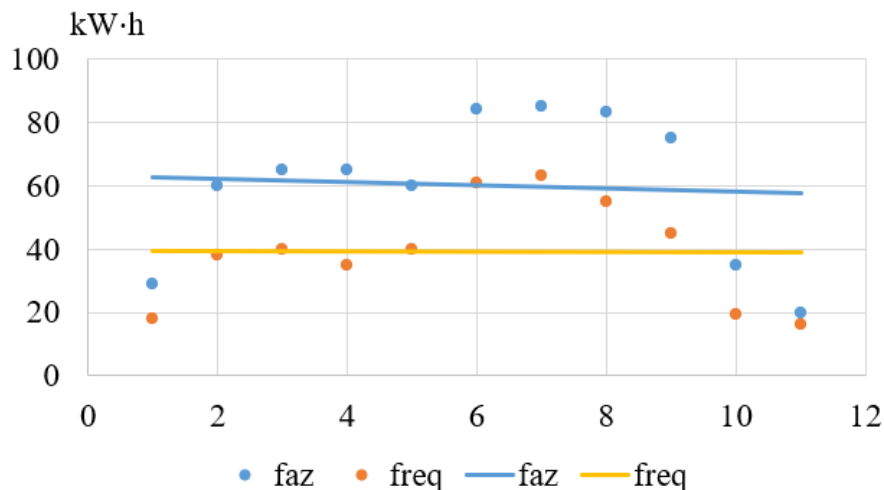


Рис. 3 – Порівняльний аналіз вимірювань спожитої електричної енергії f_{az} – кран обладнаний двигунами з фазним ротором, f_{freq} - кран обладнаний частотно-регульованим приводом

Результати порівняльного аналізу свідчать про значну економію енергії при застосуванні частотно-регульованого приводу. Середнє значення зменшення кількості спожитої енергії складає 50%.

Висновки. В статті розв'язана задача експериментального визначення залежності зміни спожитої енергії від часу експлуатації кранів обладнаних різними типами приводів – на основі двигуна з фазним ротором і частотно-регульованим. Для досягнення мети обрано реальні крани з однаковими вантажопідйомністю і умовами роботи. Зроблено припущення про однаковість середнього перевантажувального циклу. Обрано вимірювальні прилади та зібрані дані, щодо споживання енергії. Виконано обробку експериментальних даних та оцінку зменшення кількості спожитої енергії краном з частотно-регульованим приводом. Встановлено, що мостовий кран з таким типом приводу споживає в середньому на 50% електроенергії менше. Крім того з аналізу параметрів діючих кранів встановлено, що кран з частотно-регульованим приводом може мати меншу масу за інших рівних умов (вантажопідйомність, проліт, середній перевантажувальний цикл), що може бути предметом подальшого вивчення.

Список літератури

1. Junliang He, Youfang Huang, Wei Yan, Yard crane scheduling in a container terminal for the trade-off between efficiency and energy consumption *Advanced Engineering Informatics*, Volume 29, Issue 1, 2015, Pages 59-75, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.09.003>
2. Ning Zhao, Zhuorui Fu, Yu Sun, Xuening Pu, Lei Luo, Digital-twin driven energy-efficient multi-crane scheduling and crane number selection in workshops, *Journal of Cleaner Production*, Volume 336, 2022, 130175, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130175>
3. Vicky Papaioannou, Stefano Pietrosanti, William Holderbaum, Victor M. Becerra, Rayner Mayer, Analysis of energy usage for RTG cranes, *Energy*, Volume 125, 2017, Pages 337-344, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.122>
4. Hang Xu; Gening Xu; Qing Dong; Yunsheng Xin Comprehensive research on energy-saving green design scheme of crane structure based on computational intelligence *AIP Advances* Volume 11, Issue 7, July 2021 <https://doi.org/10.1063/5.0050653>
5. Su, Tai-Sheng, Wu, Chin-Chun, and Yang, Huei-Ru. 'An Analysis of Energy Consumption and Cost-effectiveness for Overhead Crane Drive Systems by Using Fuzzy Multi-objective Linear Programming'. 1 Jan. 2018 : 6241 – 6253.

References (transliterated)

1. Junliang He, Youfang Huang, Wei Yan, Yard crane scheduling in a container terminal for the trade-off between efficiency and energy consumption *Advanced Engineering Informatics*, Volume 29, Issue 1, 2015, Pages 59-75, ISSN 1474-0346, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.09.003>

2. Ning Zhao, Zhuorui Fu, Yu Sun, Xuening Pu, Lei Luo, Digital-twin driven energy-efficient multi-crane scheduling and crane number selection in workshops, Journal of Cleaner Production, Volume 336, 2022, 130175, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130175>
3. Vicky Papaioannou, Stefano Pietrosanti, William Holderbaum, Victor M. Becerra, Rayner Mayer, Analysis of energy usage for RTG cranes, Energy, Volume 125, 2017, Pages 337-344, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.122>
4. Hang Xu; Gening Xu; Qing Dong; Yunsheng Xin Comprehensive research on energy-saving green design scheme of crane structure based on computational intelligence AIP Advances Volume 11, Issue 7, July 2021 <https://doi.org/10.1063/5.0050653>
5. Su, Tai-Sheng, Wu, Chin-Chun, and Yang, Huei-Ru. 'An Analysis of Energy Consumption and Cost-effectiveness for Overhead Crane Drive Systems by Using Fuzzy Multi-objective Linear Programming'. 1 Jan. 2018 : 6241 – 6253.

Надійшла (received) 18.05.2024 р.

Відомості про авторів / About the Authors

Коваленко Валентин Олександрович (Valentyn Kovalenko) – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9161-198X>; e-mail: valentyn.kovalenko@khpi.edu.ua

Стрелков Максим Борисович (Maksym Strelkov) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання, м. Харків, Україна; e-mail: maksym.strelkov@mit.khpi.edu.ua.

Стрижак Всеволод Вікторович (Vsevolod Stryzhak) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3032-6004>; e-mail: vsevolod.stryzhak@khpi.edu.ua

Турчин Ольга Володимирівна (Olha Turchyn) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9153-3704>; e-mail: olha.turchyn@khpi.edu.ua

Вудвуд Олександр Миколайович (Oleksandr Vudvud) кандидат технічних наук, доцент, Національний університет "Одеська політехніка", завідувач кафедри підйомно-транспортного та робототехнічного обладнання. м. Одеса, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4807-3634>; e-mail: o.m.vudvud@op.edu.ua