

DOI 10.32820/2079-1747-2020-26-5-17

УДК 621.873

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМАМИ ЗМІНИ ВИЛЬОТУ ВАНТАЖУ ТА ПОВОРОТУ БАШТОВОГО КРАНА

©Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Муштин Д.І.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Інформація про авторів:

Ловейкін Вячеслав Сергійович; ORCID: 0000-0003-4259-3900; vloveykin@mail.ru; доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри конструювання машин і обладнання; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус № 11, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна

Ромасевич Юрій Олександрович; ORCID: 0000-0001-5069-5929; romasevichyuriy@ukr.net; доктор технічних наук, доцент; професор кафедри конструювання машин і обладнання; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус № 11, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна

Муштин Денис Іванович; ORCID: 0000-0003-2416-1565; denismushtyn@gmail.com; інженер; аспірант кафедри конструювання машин і обладнання; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус № 11, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна

Проведено розробку структурно-функціональної блок-схеми системи оптимального керування механізмами зміни вильоту вантажу та повороту баштового крана. Виконано детальний опис окремих функціональних блоків схеми та їх логічний зв'язок. Робота системи керування за представленою структурно-функціональною блок-схемою полягає у проведенні діагностичних операцій апаратної та програмної частин системи, попередньому розрахунку діаграм швидкостей механізмів, їх уточненні із врахуванням оптимальних законів руху механізмів (ця операція виконується із врахуванням обмежень зі сторони частотно-керованого приводу механізмів крана). Остання операція у алгоритмі пов'язана із реалізацією руху механізмів крана за уточненими діаграмами та коригуванні кінцевого положення вантажу у площинах руху візка по стрілі і повороту крана. Система керування дає змогу реалізувати оптимальні закони руху механізмів із врахуванням фактичних фазових координат динамічної системи, особливостей частотно-керованого приводу механізмів та забезпечує усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі.

Крім того, було наведено рекомендації стосовно вибору мікроконтролера, датчиків та частотних перетворювачів приводів механізмів повороту крана та переміщення візка, а також протоколу передачі даних між елементами системи керування. Детально наведено перелік обов'язкових функцій частотних перетворювачів, які виступають джерелами живлення приводів механізмів баштового крана, та мікроконтролерів, які виконують операції розрахунку керуючих сигналів, збору даних та взаємодії з оператором крана. Вказано виробників та лінійки пристроїв, які розроблені для умов експлуатації вантажопідйомної техніки. Для датчиків кутового та лінійного положень механізмів крана наведено вирази, які дають змогу визначити раціональну точність використовуваних датчиків (оптичних енкодерів).

Ключові слова: оптимальне керування, баштовий кран, поворот, зміна вильоту, датчики, частотний перетворювач.

Ловейкин В.С., Ромасевич Ю.А., Муштин Д.И. „Разработка системы оптимального управления механизмами изменения вылета и поворота башенного крана“.

Проведена разработка структурно-функциональной блок-схемы системы оптимального управления механизмами изменения вылета груза и поворота башенного крана. Выполнено детальное описание отдельных функциональных блоков схемы и их логическая связь. Работа системы управления по представленной структурно-функциональной блок-схеме заключается в проведении диагностических операций аппаратной и программной частей системы, предварительном расчете диаграмм скоростей механизмов, их уточнении с учетом оптимальных законов движения механизмов (эта операция выполняется с учетом ограничений со стороны частотно-управляемого привода механизмов крана). Последняя операция в алгоритме связана с реализацией движения механизмов крана по уточненным диаграммам и корректировке конечного положения груза в плоскостях движения тележки по стреле и поворота крана. Система управления позволяет реализовать оптимальные законы движения механизмов с учетом фактических фазовых координат динамической системы, особенностей частотно-управляемого привода механизмов и обеспечивает устранение колебаний груза на гибком подвесе.

Кроме того, были приведены рекомендации по выбору микроконтроллера, датчиков и частотных преобразователей приводов механизмов поворота крана и перемещения тележки, а также протокола передачи данных между элементами системы управления. Подробно приведен перечень обязательных функций частотных преобразователей, выступающих источниками питания приводов механизмов башенного крана, и микроконтроллеров, которые выполняют операции расчета управляющих сигналов, сбора данных и взаимодействия с оператором крана. Указано производители и линейки устройств, разработанных для условий эксплуатации грузоподъемной техники. Для датчиков углового и линейного положений механизмов крана приведены выражения, позволяющие определить рациональную точность используемых датчиков (оптических энкодеров).

Ключевые слова: оптимальное управление, башенный кран, поворот, изменение вылета, датчики, частотный преобразователь.

Loveikin V., Romasevych Y., Mushtyn D. "Development of the optimal control system of slewing and trolley movement mechanisms of a tower crane".

The development of the structural and functional block diagram of the optimal control system for the trolley movement and slewing mechanisms of a tower crane has been carried out. A detailed description of the individual functional blocks of the system and their logical connection is presented. The operation of the control system according to the presented structural and functional block diagram consists in carrying out diagnostic operations of the hardware and software parts of the system, preliminary calculation of the speed diagrams of the mechanisms, their correction taking into account the optimal laws of the mechanisms movement (this operation is performed taking into account the limitations of the frequency-controlled drive of the crane mechanisms). The last operation in the algorithm is connected with the implementation of the movement of the crane mechanisms according to the corrected diagrams and the adjustment of the final position of the load in the planes of the trolley movement (along the boom) and the slewing rotation of the crane. The control system allows one to implement the optimal laws of movement of the mechanisms, taking into account the actual phase coordinates of the dynamic system, the features of the frequency-

controlled drive mechanisms and ensures the elimination of oscillations of the load on a flexible suspension.

In addition, recommendations are given on the selection of a microcontroller, sensors and frequency inverters of drives of slewing and trolley movement, as well as a data transfer protocol between the elements of the control system. The list of mandatory functions of frequency inverters acting as power sources for the drives of the tower crane mechanisms and microcontrollers that perform the operations of calculating control signals, collecting data and interacting with the crane operator is given in detail. The manufacturers and ranges of devices designed for the operating conditions of hoisting machinery are presented. For the sensors of the angular and linear positions of the crane mechanisms, expressions are given to determine the rational accuracy of the sensors (optical encoders).

Keywords: optimal control, tower crane, slewing, trolley movement, sensors, frequency inverter.

Постановка проблеми

Оптимальне керування механізмами баштового крана, зокрема, механізмами повороту та зміни вильоту вантажу (переміщення візка), реалізується за допомогою спеціалізованої системи керування. Вона представляє собою апаратну та програмну частини, які у взаємодії реалізують всі можливості оптимального керування рухом механізмами на практиці. Перший етап у синтезі такої системи керування полягає у розробці концепції алгоритму її роботи. Вона представляє собою певну структуру блоків (окремих операцій), між якими встановлені функціональні зв'язки і дає змогу виконати загальний опис операцій по керуванню роботою механізмів із врахуванням оптимальних законів руху механізмів. Така схема є ланкою, яка пов'язує між собою роботу інженерів-розробників системи керування: технологів, механіків-конструкторів, електриків, програмістів та дизайнерів. Звичайно, подальша деталізація дозволить уточнювати технічне завдання на розробку системи оптимального керування. Однак, при цьому концепція структурно-функціональна схема змінюватися не буде, оскільки вона визначає найбільш раціональний спосіб реалізації оптимального керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У більшості робіт з оптимального керування рухом механізмів баштових кранів використано критерії швидкодії [1-12] та лінійно-квадратичні критерії [4, 11, 12]. Всі ці роботи характеризуються вимогою усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі.

У роботі [1] модель баштового крана представлена у вигляді системи чотирьох нелінійних диференціальних рівнянь, які описують поворот башти, рух візка по стрілі та коливання вантажу на гнучкому підвісі у двох площинах (вдвож руху візка та перпендикулярно напрямку його руху). У постановці задачі використані обмеження на швидкість і прискорення візка, а також на швидкість і прискорення башти. Для знаходження квазіоптимального за швидкодією керування автори розробили алгоритм, який визначає параметри заданих наперед (базисних) кусочних функцій руху окремих мас системи. Результати теоретичних досліджень були апробовані шляхом проведення експериментальних лабораторних досліджень, що, однак, не дало змогу встановити практичну застосовність отриманих результатів.

У роботі [2], в якій використана нелінійна модель сумісної роботи декількох механізмів крана (поворот крана, рух візка та підйом вантажу), обмеження накладаються на прискорення башти, візка та вантажу. Для знаходження мінімуму критерію швидкодії використано

градієнтний метод. Ця робота також не містить апробацій експериментальних досліджень у виробничих умовах, хоча теоретичні та лабораторні дані мають гарний збіг.

У статті [3] автори на основі спеціалізованого програмного забезпечення отримали оптимальні за швидкістю керування робочими рухами (обертання башти, підйом вантажу, пересування візка) баштового крана. Отримані результати можуть бути застосовані лише для випадків невеликих переміщень, оскільки задача розв'язана для випадку відсутності усталеного режиму руху механізмів. У роботі [4] автори розвинули підходи щодо усунення коливань вантажу обертових (у тому числі і баштових) кранів, використавши лінійно-квадратичний критерій оптимізації. Розв'язана у такій постановці задачі проілюстрована графічними залежностями. Крім того, у цій роботі були розроблені питання реалізації керування, зокрема, вказана структура керованого приводного механізму.

Стаття [5] присвячена розробці оптимального за швидкістю керування рухом механізму повороту крана на основі використання принципу максимуму Л.С. Понтрягіна [6]. Використовуючи нелінійні рівняння руху системи автори знайшли розв'язок задачі оптимальної швидкодії. Функцією керування була прийнята величина пропорційна до прискорення візка. Через це практична реалізація результатів роботи може викликати ускладнення.

У роботі [7] цей же метод використано для задачі оптимізації швидкодії повороту баштового крана. Однак, тут використана лінійна модель руху системи.

У роботі [8] було знайдено наближений розв'язок задачі оптимального за швидкістю керування механізмом повороту баштового крана. Модель, яка використана у розрахунках, є нелінійною із змінними параметрами (довжина гнучкого підвісу). Це досить сильно ускладнило методику розв'язування та не дозволило у кінцевому випадку знайти її точний розв'язок. Проведений у роботі аналіз підходів привів авторів до висновку, що неможливість зведення математичної моделі системи до нормальної форми не дала змогу застосувати принцип максимуму Л.С. Понтрягіна.

У роботі [9] на основі результатів, які отримані для механізмів поступального переміщення крана [10] і які ґрунтуються на методі Л.С. Понтрягіна, було запропоновано компенсувати силу Коліоліса, яка виникає при повороті крана. Це дало змогу отримати оптимальний за швидкістю закон руху механізму повороту крана фактично без розв'язання задачі. У статті також наведено рекомендації стосовно реалізації оптимального керування за допомогою засобів керованого асинхронного електроприводу.

У роботі [11] на основі рівнянь Лагранжа другого роду отримана математична модель баштового крана, яка, будучи представленою у матричному вигляді, описує поворот башти, рух візка, підйом вантажу та його коливання у двох площинах. Використовуючи метод конструювання оптимальних регуляторів, автори роботи звели задачу мінімізації лінійно-квадратичного функціоналу до системи рівнянь Рікатті. Однак, застосовуючи критерій, автори роботи не пояснили його фізичну сутність. Отримані у ході розрахунків результати були проаналізовані за допомогою побудованих графічних залежностей.

У дисертаційній роботі А.Л. Galafshani [12] побудовано математичну модель баштового крана та виконано постановку оптимізаційної задачі усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі за умови мінімізації інтегрального функціоналу, який відображав квадратичні значення фазових координат руху системи. На положення окремих мас системи та їх швидкості були накладені обмеження. Аналіз отриманих результатів показав, що деякі з них неможливо реалізувати на практиці.

Таким чином, у більшості робіт з оптимального керування рухом механізмів баштового крана використані нелінійні математичні моделі руху зведених мас. Крім того, теоретичні розрахунки та експериментальні дослідження проведені лише для параметрів лабораторних моделей баштових кранів, що ускладнює їх апробацію для реальних вантажопідйомних машин. Остання, у свою чергу, передбачає розробку структурно-функціональної схеми системи керування механізмами крана.

Постановка мети та завдань дослідження

Метою роботи є розробка структурної схеми системи оптимального керування механізмами зміни вильоту вантажу та повороту крана, а також рекомендацій стосовно її апаратної частини. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: 1) виконати розробку схеми системи оптимального керування механізмами зміни вильоту вантажу та повороту крана; 2) розробити рекомендації стосовно апаратної частини системи (мікроконтролера, протокола передачі даних, датчиків та частотних перетворювачів).

Виклад основного матеріалу

Для системи керування механізмами повороту крана та переміщення візка на стрілі структурно-функціональну схему системи оптимального керування можна представити у вигляді блок-схеми, яка зображена на рис. 1.

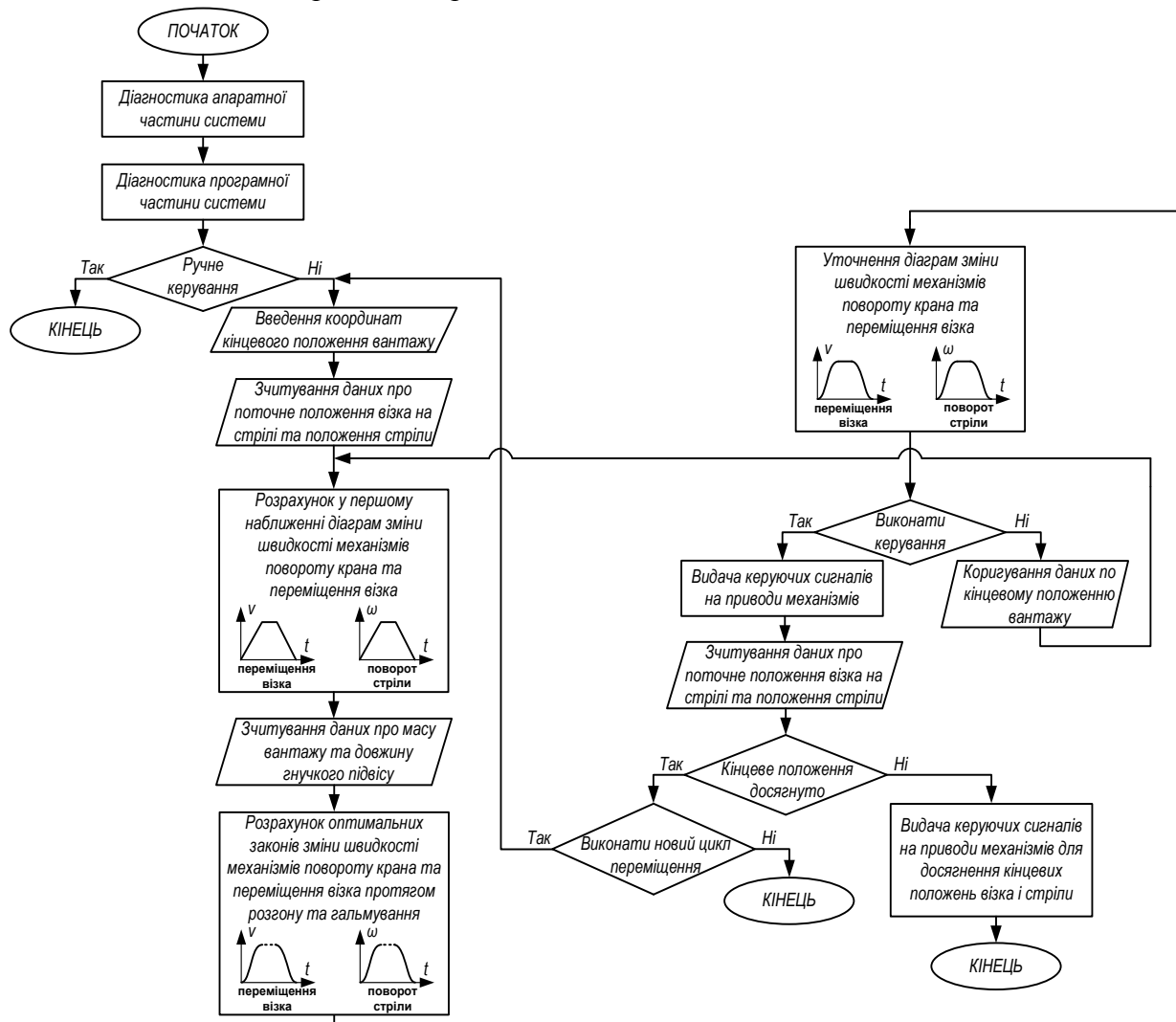


Рис. 1 – Структурно-функціональна блок-схема роботи системи оптимального керування механізмами зміни вильоту вантажу та повороту крана

Опишемо блок-схему, що зображена на рис. 1. На початковому етапі роботи системи необхідна ініціалізація процедур апаратної та програмної діагностики. Апаратна діагностика полягає у оцінці працездатності роботи критичних пристроїв (мікроконтролера, датчиків, привода тощо) та систем зв'язку. Програмна діагностика вимагає проведення процедур перевірки працездатності основних програмних блоків (підпрограм) та системи в цілому. Це виконується шляхом застосування підпрограм діагностики.

Після проведення діагностики оператор крана повинен обрати одну з опцій: ручне чи автоматичне керування (випадок для якого будуть застосовані закони оптимального керування механізмами).

При автоматичному керуванні оператором виконується введення кінцевих координат вантажу у робочій зоні крана. На цьому етапі можна задавати ці координати наближено. Надалі система керування виконує зчитування даних про поточне положення візка на стрілі та кутове положення стріли. Це дає змогу розрахувати відстань, на яку необхідно перемістити візок і/або повернути кран.

Після цього виконується розрахунок у першому наближенні діаграм зміни швидкості візка і повороту крана. Такі діаграми приймаються трапецієподібними. Це впливає з того, що, по-перше, у подальшому їх досить просто модифікувати без зміни (або з незначною зміною) тривалості усталеного режиму руху, а по-друге, такі діаграми надзвичайно зручні для того, щоб забезпечити необхідну відстань, на яку необхідно перемістити візок і/або повернути стрілу крана.

На наступному етапі виконується зчитування даних про масу вантажу та довжину гнучкого підвісу. Ці дані необхідні для того, щоб виконати розрахунок оптимальних законів руху обох механізмів протягом їх розгону та гальмування.

Отримавши всі необхідні дані система керування виконує розрахунок діаграм зміни швидкостей протягом розгону та гальмування механізмів. При цьому застосовуються оптимальні закони керування рухом механізмами. Розрахунок всіх законів виконується у неперервній формі (у вигляді поліноміальних залежностей з коефіцієнтами з плаваючими комами). Надалі ці вирази переводяться у дискретну форму з певним кроком дискретизації за часом (як правило він відповідає мінімальному часу наростання частоти напруги живлення частотно-керуваного приводу).

Зазначимо, що оптимальні діаграми зміни швидкості механізмів будуть відрізнятися від лінійних. Крім того, будуть відрізнятися і тривалості перехідних режимів руху (наприклад, збільшення тривалості може бути викликано вимогою забезпечення перевантажувальної здатності приводу, або вимогою неперевищення максимального струму двигуна тощо). Це вплине на шлях, який візок і/або стріла проходить протягом перехідних режимів руху. Для того, щоб врахувати цей фактор на наступному етапі алгоритму виконується уточнення діаграм швидкостей механізмів шляхом зміни тривалості усталеного режиму їх руху (окремо для кожного механізму).

Після цього видається запит на виконання керування і при позитивній відповіді (погодження виконує оператор крана) виконується керування механізмами шляхом видачі керуючих сигналів на їх частотно-керувані приводи.

Після того, як весь цикл керування було реалізовано, виконується зчитування даних з датчиків положення візка на стрілі та кутового положення стріли. У випадку, коли кінцеве положення було досягнуто система генерує новий запит на виконання нового переміщення.

Якщо запит не підтверджується оператором (що свідчить про те, що всі необхідні операції були виконані) то алгоритм керування закінчується.

У випадку коли все ж таки кінцеве положення візка чи стріли не відповідає заданому, виконується видача керуючих сигналів на привод відповідного механізму. Такі сигнали призводять до руху того чи іншого механізму на „повзучій” швидкості до заданого положення. Це дає змогу досягнути кінцевого положення із достатньою точністю.

Зазначимо, що у випадку коли один із механізмів не повинен рухатись (наприклад, необхідно виконати лише переміщення візка вздовж стріли) всі описані вище розрахунки спрощуються: вони виконуються лише для одного механізму, а узагальнена координата, яка відповідає руху нерухомого механізму, приймається константою.

Реалізація оптимального керування полягає не тільки у розробці алгоритму функціонування системи. Важливим завданням у вирішенні цього питання є правильний вибір пристроїв та апаратів, які фактично формують фізичний вплив на динамічну систему. До таких пристроїв належать: мікроконтролер, датчики (довжини гнучкого підвісу, маси вантажу, положення візка на стрілі та кутового положення стріли), а також частотний перетворювач, який виступає джерелом живлення приводних двигунів механізмів повороту крана та переміщення візка.

Всі ці пристрої працюють у специфічних умовах і тому необхідно надати рекомендації стосовно їх вибору. Використання цих рекомендацій дозволить розробити апаратну частину системи, яка б була придатною до тривалої експлуатації, надійною та забезпечувала б виконання функцій по керуванню рухом механізмами.

Крім того, необхідно вказати рекомендації щодо протоколів передачі даних, які будуть використовуватись для комунікації між вказаними пристроями.

Мікроконтролер системи керування механізмами повинен реалізувати функції [13]:

- 1) автоматизованого керування механізмами крана за командами, що надходять від органів керування крісла-пульта оператора крана;
- 2) взаємодії з підсистемою візуалізації (панелями оператора) для відображення і зміни параметрів і характеристик крана;
- 3) взаємодії з датчиками та частотними перетворювачами приводів механізмів;
- 4) обмеження команд оператора крана у випадках, коли це може призвести до виходу обладнання з ладу, завдати шкоди або суперечить правилам експлуатації, техніки безпеки;
- 5) контролю стану всіх елементів системи (частотних перетворювачів, двигунів, модулів керування, автоматичних вимикачів тощо);
- 6) гнучкої параметризації основних характеристик механізмів крана (швидкість, час розгону / гальмування тощо).

Крім того, специфіка реалізації оптимальних законів руху механізмів баштового крана вимагає підтримки у мікроконтролері математичних функцій.

Робочий цикл мікроконтролера можна описати послідовністю наступних операцій [14]: опитування входів (датчиків та каналів, які під'єднані до джойстика оператора крана), виконання програми (в ній виконується розрахунок керуючих параметрів: кутової швидкості або крутного моменту для обох двигунів механізмів), видача сигналів (через обраний протокол передачі даних), допоміжні операції. Ці операції повторюються в циклі постійно.

Серед виробників контролерів, які знайшли використання у галузі вантажопідйомної техніки, можна виділити наступні [14]: Siemens (серія Simatic [15, 16]), Schneider Electric (серія Altivar IMC [17]), ABB (серія AC500 [18]), Unitronics (серія Vision350 [19]) та інші.

Важливим питанням при виборі мікроконтролера є протокол його зв'язку з периферійними пристроями. Це питання на пряму пов'язано із використовуваними протоколами передачі даних. На даний час існують десятки стандартів передачі даних між пристроями промислових комп'ютеризованих систем [20]. У галузі вантажопідйомної техніки такими протоколами є Ethernet/IEEE 802.3 [21], CAN [22-24] та TTP [22], LAN [25], Modbus RTU [26]. Найбільш поширеним є протокол CAN. Зазначимо, він має певні підвиди, які широко використовуються у різних регіонах: в країнах Європи застосовують CAN Open [27], а в США – CAN Bus [28]. Оскільки більшість сучасних кранів комплектуються переважно електронікою європейських брендів, то бажано використовувати протокол CAN Open.

Для вимірювання величин довжини гнучкого підвісу вантажу, положення візка та стріли та кутового положення стріли необхідно використовувати енкодери [29]. Енкодер, який генерує сигнали про положення візка, раціонально встановлювати так, щоб він мав кінематичний зв'язок з канатним барабаном цього механізму. Теж саме відноситься до вимірювання довжини гнучкого підвісу вантажу. Енкодер механізму повороту крана раціонально встановлювати з кінематичним зв'язком з поворотною баштою або стрілою. Ці рекомендації обґрунтовані тим, що енкодер повинен давати сигнал по фактичне положення рухомого елемента, тобто наявність зазорів та люфтів у кінематичних зачепленнях не повинні вимірюватись енкодером.

Зазначимо, енкодери повинні бути відповідним чином захищені від дії навколишнього середовища (пилу, вологи, агресивних газів, сонячної радіації, електромагнітних перешкод тощо). При виборі енкодерів особливу увагу необхідно приділити ступеню їх захищеності IP.

Точність енкодерів повинна визначатись з врахуванням наступної нерівності:

$$\Delta_{доп.л} \geq \frac{\pi D}{N}, \quad (1)$$

де $\Delta_{доп.л}$ – допустима похибка визначення лінійного параметру (положення візка або довжини гнучкого підвісу вантажу), м; D – діаметр канатного барабана, м; N – точність енкодера, імп/об. Можна записати аналогічну до (1) формулу для визначення допустимої похибки визначення кутового положення стріли:

$$\Delta_{доп.к} \geq \frac{360}{N}, \quad (2)$$

де $\Delta_{доп.к}$ – допустима похибка визначення кутового параметру (положення стріли), град. Неправильне визначення точності енкодера, без врахування виразів (1) та (2), може призвести до перевантаження мікропроцесора даними, а недостатня його точність веде до неякісного позиціонування стріли та візка, що збільшує тривалість операцій по „доводці” цих механізмів.

Датчик маси вантажу – це тензометр S-подібного типу, або типу „балка”. Перший тип тензометра доцільно закріплювати у місцях, де встановлюються обмежувачі вантажопідйомності (наприклад, у стріловому розчалі на оголовку стріли [30]). Другий тип бажано встановлювати у місці закріплення нерухомого кінця каната до металоконструкції крана. Незалежно

від місця встановлення тензодатчика повинні бути таровані. Крім того, захищеність тензометричного датчика (IP) повинна відповідати умовам його експлуатації.

Якісна реалізація оптимального керування пов'язана із застосуванням частотних перетворювачів з векторним керуванням [31, 32], або з скалярним керуванням, які охоплені зворотним зв'язком по положенню і швидкості двигуна [33]. Зазначимо, для вантажопідйомних машин, які значну долю циклу переміщення вантажу працюють у перехідних режимах, раціонально застосовувати саме векторне керування електромагнітним моментом. Це викликано тим, що скалярний метод керування (для вантажопідйомних машин він полягає у тому, що амплітуда напруги живлення двигунів змінюється пропорційно до частоти), не забезпечує енергоефективність роботи двигунів.

Крім того, при виборі частотного перетворювача доцільно розглянути можливість (функцію) рекуперативного гальмування [34-36]. При цьому необхідно враховувати: 1) середню кількість пусків і зупинок механізму за годину; 2) інерційні характеристики механізму. Якщо зведений до вала двигуна момент інерції механізму є доволі великим і кількість пусків і гальмувань механізмів значна, то застосування рекуперативного блоку є доцільним. Для остаточної оцінки доцільності необхідно проводити порівняльні розрахунки енерговитрат при роботі механізму для обох варіантів: із рекуперативним блоком і без нього. Для першого випадку необхідно враховувати вартість рекуперативного блоку, а також фактор того, що якість рекуперованої електроенергії, як правило, є невисокою (у випадку рекуперації енергії у інших частотний перетворювач цим фактором можна знехтувати через те, що вхідний блок перетворювача являє собою трифазний мостовий випрямляч).

Обов'язковими функціями частотних перетворювачів двигунів механізмів повороту крана та зміни вильоту вантажу є наступні:

- 1) можливість моніторингу навантаження приводів механізмів;
- 2) наявність захисних функцій (заклинювання, перевантаження, коротке замикання, обрив фази, регульовані часострумові характеристики тощо);
- 3) діагностика електрообладнання та самодіагностика;
- 4) можливість взаємодії із мікропроцесорною системою керування за схемою „ведучий - ведений”;
- 5) різноманітність налаштовуваних параметрів (частота несучої ШІМ, початкова частота, початкова напруга живлення, тривалість наростання та спадання частоти напруги живлення тощо);
- 6) можливість створення високого пускового крутного моменту;
- 7) достатня кількість релейних (для підключення гальм) виходів та цифрових і аналогових (дублюючих) керуючих входів;
- 8) можливість реалізації різних типів гальмування (рекуперативне, електродинамічне, керуванням механічними гальмами, на вибігу).

Ці функції повинні бути налаштовані так, щоб взаємодія частотного перетворювача з мікроконтролером по каналу керування та частотного перетворювача з електродвигуном і гальмами по електросиловим каналам давала можливість надійної і якісної реалізації оптимального керування рухом обох механізмів.

Виробники частотних перетворювачів, намагаючись задовольнити специфіку задач керування приводами механізмів вантажопідйомних машин, як правило, виділяють їх у окрему лінійку. Серед найпоширеніших у цій галузі є такі частотні перетворювачі: Schneider Electric (лінійки Altivar Process ATV900, Altivar Machine ATV340 та ATV320 [37]), Siemens

(лінійки MICROMASTER 440, SINAMICS V20, SINAMICS S120 [38]), Mitsubishi Electric (лінійка FR-A [39]), Danfoss (лінійка VLT Drives [40]), ABB (лінійка ACS880 [41]) та інші.

Висновки

1. Розроблено структурно-функціональну схему системи оптимального керування механізмами переміщення візка та повороту крана. Вона дозволяє реалізувати оптимальні закони руху механізмів, що усувають маятникові коливання вантажу на гнучкому підвісі. Описано алгоритм роботи системи, який полягає у діагностиці обладнання і програмної частини систем, визначенні заданого та кінцевого положень вантажу, розрахунку та уточнення законів руху механізмів, реалізації керування та корекції положення вантажу (за необхідності) шляхом видачі на приводи механізмів серії коригуючі сигнали.

2. Обґрунтовано рекомендації стосовно вибору апаратної частини системи оптимального керування (мікроконтролер, датчики довжини гнучкого підвісу, маси вантажу, положення візка на стрілі та кутового положення стріли), а також частотного перетворювача. Крім того, наведено загальні рекомендації стосовно вибору протоколу передачі даних між елементами системи.

Список використаних джерел

1. An Antiswing Trajectory Planning Method With State Constraints for 4-DOF Tower Cranes: Design and Experiments / Zhuoqing Liu, Tong Yang, Ning Sun, Yongchun Fang // *IEEE Access*, 2019. – Vol. 7. – P. 62142-62151. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2915999
2. Real-time Nonlinear Model Predictive Path-Following Control of a Laboratory Tower Crane / Martin Böck, Andreas Kugi // *IEEE Transactions on control system technology*, 2016. – Vol. 22, №4. – P. 1461-1473.
3. Макаревич Е. В. Разработка оптимального управления движениями башенного крана / Е. В. Макаревич, В. Н. Шамардина, Ф. Палис, С. Палис // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2011. – № 3. – С. 170-171.
4. Палис С. Система демпфирования колебаний для подъемных кранов вращения [Электронный ресурс] / Стефан Палис, Франк Палис, Марио Лехнерт ; пер. с англ. Зюзин Д. Г. – Режим доступа : <http://masters.donntu.org/2009/eltf/zyuzin/library/translate.htm>. (дата обращения 25.02.2020) – Название с экрана.
5. A real-time optimal control method for swing-free tower crane motions / W. Devesse, M. Ramteen, L. Feng, J. Wikander // 2013 *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. Madison, WI, 2013. – P. 336-341
6. Корн Г. А. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. А. Корн, Т. М. Корн. – М. : Наука, 1973. – 832 с.
7. Герасимьяк Р. П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р. П. Герасимьяк, В. А. Лещёв. – Одесса : СМІЛ, 2008. – 192 с.
8. Research Into Payload Swaying Reduction Through Cable Length Manipulation During Boom Crane Motion / Alexander A. Kostikov, Alexander V. Perig, Oleksii V. Larichkin, Alexander N. Stadnik, Eduard P. Gribkov // *FME Transactions*, 2019 – № 47. – P. 464-476. DOI: 10.5937/fmet1903464K.
9. Тепляков А. Г. Реализация оптимального управления частотным электроприводом механизма поворота / А. Г. Тепляков // *Електромашинобудування та електрообладнання*. – 2004. – Вип. 62. – С. 36-39.
10. Герасимьяк Р. П. Оптимальное управление крановым механизмом передвижения / Р. П. Герасимьяк, Л. В. Мельникова // *Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы*. – 1999. – № 1. – С. 87-94.
11. Carmona I. G. Control of a two wired hammerhead tower crane / I. G. Carmona, J. Collado // *Nonlinear Dynamics*. – 2016. – № 84. – P. 2137-2148. DOI: 10.1007/s11071-016-2634-3.
12. Golafshani A. L. Modeling and Optimal Control of Tower Crane Motions : A thesis of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering / A. L. Golafshani. – 1999. – 133 p. – URL : https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk1/tape7/PQDD_0003/NQ44760.pdf (23.03.2020).

13. Функции программируемого логического контроллера и панели оператора на кранах [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://kzk.kiev.ua/chastotnye-kranovye-sistemy-i-programmiruemye-logicheskie-kontrollery> (дата обращения 23.03.2020). – Название с экрана.
14. Мишин А. В. Программирование контроллеров грузоподъемных машин : метод. указания / А. В. Мишин, П. А. Сорокин. – М. : МГУПС (МИИТ), 2015. – 42 с.
15. Автоматизированные системы управления грузоподъемными кранами [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.electrolibrary.info/loadlifting/100-avtomatizirovannye-sistemy-upravleniya-gruzopodemnymi-kranami.html> (дата обращения 23.03.2020). – Название с экрана.
16. Система управления мостовым краном КМТРМ30-10 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.asep.kz/projects-solutions/kran-system/azf-kazhrom-kran-kmtrm30-10/> (дата обращения 23.03.2020). – Название с экрана.
17. Внедрение современной автоматизированной системы управления краном на базе платформы MachineStruxure от Schneider Electric при реконструкции крана мостового г/п 30/5т [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.prom-resource.spb.ru/page/machinestruxure-on-bz> (дата обращения 23.03.2020). – Название с экрана.
18. Safety PLC ensures safe crane operation [Electronic resource] – URL : <https://www.designworldonline.com/safety-plc-ensures-safe-crane-operation/> (23.03.2020). – The title from the screen.
19. Need a system for both control and monitoring? an All-in-One PLC+HMI offers a single solution for both problems [Electronic resource]. – URL : <https://unitronicsplc.com/testimonials/kone-cranes/> (23.03.2020) – The title from the screen.
20. List of automation protocols [Electronic resource]. – URL : https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_automation_protocols (23.03.2020). – The title from the screen.
21. CRANE CONTROL NETWORK / Alojz Slutej, Fetah Kolonic, Alen Poljungan [Electronic resource] – URL : http://bib.irb.hr/datoteka/204929.E05-37_F_Slutej.pdf (23.03.2020). – The title from the screen.
22. Performance evaluation of network protocol for automated transfer crane system / Kyoung-Nam Ha, Man-Ho Kim, Kyung Chang Lee, Suk Lee // *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*. – 2005 – Vol. 11, № 8. – P. 709–716.
23. Cranes go digital [Electronic resource]. – URL : <http://www.cranestodaymagazine.com/features/cranes-go-digital/> (23.03.2020). – The title from the screen.
24. The wireless monitoring system of tower cranes based on MCP2515/CAN bus / Yaping Tang, Haibo Wu, Hailong Liu // *Proceedings of the 2015 International Conference on Intelligent Systems Research and Mechatronics Engineering. Series: Advances in Intelligent Systems Research*. – 2015. – P. 1635-1639. DOI: 10.2991/isrme-15.2015.332
25. Crane Control and Automation. Global Solutions. TMEIC. I-1105-A. Revised March 2015. – P. 32
26. Crane Weight Indicator / Force Measuring Controller Modbus RTU Communication Protocol [Electronic resource]. – URL : <http://www.weighingindicatorcontroller.com/sale-10938144-crane-weight-indicator-force-measuring-controller-modbus-rtu-communication-protocol.html> (23.03.2020). – The title from the screen.
27. CAN Open [Electronic resource]. – URL : <https://en.wikipedia.org/wiki/CANopen> (23.03.2020). – The title from the screen.
28. CAN Bus [Electronic resource] – URL : https://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus (23.03.2020). – The title from the screen.
29. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков : по материалам семинара „Practical design techniques for sensor signal conditioning”. [автор перевода Горшков Б. Л.] / Analog Devices, AUTEX Ltd. – С.-Пб. : АВТЭКС, 2005. – 311 с.
30. Невзоров Л. А. Башенные краны / Л. А. Невзоров, Г. Н. Пазельский, В. А. Романова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1980. – 326 с.
31. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen / F. Blaschke // *Siemens Zeitschrift*, 1971. – Bd. 45, H. 10. – P. 757-760.
32. Depenbrosk M. Direct self control (DSC) of inverter-fed induction machines / M. Depenbrosk // *IEEE Trans. Power Electron.* – 1985. – Vol. 3, № 3. – P. 420–429.
33. Бозе Б. К. Современная силовая электроника и преобразователи переменного тока / Б. К. Бозе // *Prentige Hall PTR*, 2002. – 738 с.
34. Ромасевич Ю. О. Динамічна оптимізація режимів руху механізмів вантажопідйомних машин як мехатронних систем : дис. д-ра техн. наук: 05.05.05 / Ромасевич Юрій Олександрович. – Одеса, 2015. – 519 с.

35. Котеленко С. В. Повышение эффективности функционирования системы рекуперации электрической энергии в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах : дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Котеленко Светлана Владимировна – Тула, 2014. – 109 с.
36. Проектирование электроприводов крановых механизмов. Техническая коллекция Schneider Electric. Вып. 12. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://profsector.com/media/catalogs/566dcd7cb36cc.pdf> (23.03.2020). – Название с экрана.
37. Преобразователи частоты ALTIVAR для грузоподъемных кранов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://ua.automation.com/content/frequency-altivar-modulator> (23.03.2020) – Название с экрана.
38. Преобразователи частоты SIEMENS [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.tekhar.com/Programma/Siemens/Privod_tech/Preobrazovateli/AC_drive/index_AC.htm (23.03.2020) – Название с экрана.
39. Преобразователи частоты Mitsubishi Electric FR-A760 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://rusautomation.ru/privodnaya-tehnika/mitsubishi-fr-a760> (23.03.2020). – Название с экрана.
40. Преобразователи частоты для электроприводов грузоподъемных кранов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://drives.ru/upload/page_id_1097/kranovabrosura.pdf (23.03.2020). – Название с экрана.
41. Smooth tower crane operation with ACS880 drives [Electronic recourse]. – URL : <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000220703&LanguageCode=en&DocumentPartId=1&Action=Launch> (23.03.2020) – Title from the screen.

References

1. Zhuoqing Liu, Tong Yang, Ning Sun & Yongchun Fang 2019, ‘An Antiswing Trajectory Planning Method With State Constraints for 4-DOF Tower Cranes: Design and Experiments’, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 62142-62151.
2. Böck, M & Kugi, A 2016, ‘Real-time Nonlinear Model Predictive Path-Following Control of a Laboratory Tower Crane’, *IEEE Transactions on control system technology*, vol. 22, no. 4, pp. 1461-1473.
3. Makarevych, EV, Shamardyna, VN, Palys, F & Palys, S 2011, ‘Razrobotka optimalnogo upravleniya dvyzheniyamy bashennoho krana’, *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy*, no. 3, pp. 170-171.
4. Palys, S, Palys, F & Lekhnert, M 2009, *Systema dempfyrovannya kolebanyi dlia podemnykh kranov vrashcheniya*, viewed 25 February 2020, <<http://masters.donntu.org/2009/eltf/zyuzin/library/translate.htm>>.
5. Devesse, W, Ramteen, M, Feng, L & Wikander, J 2013, ‘A real-time optimal control method for swing-free tower crane motions’, *2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Madison, pp. 336-341
6. Korn, HA & Korn, TM 1973, *Spravochnyk po matematyke dlia nauchnykh robotnykov y ynzhenerov*, Nauka, 1973.
7. Herasymiak, RP & Leshchov, VA 2008, *Analyz y syntez kranovykh elektromekhanicheskyykh system*, SMYL, 2008.
8. Kostikov, AA, Perig, AV, Larichkin, OV, Stadnik, AN & Gribkov, EP 2019, ‘Research Into Payload Swaying Reduction Through Cable Length Manipulation During Boom Crane Motion’, *FME Transactions*, no. 47, pp. 464-476.
9. Teplakov, AH 2004, ‘Realyzatsiya optimalnogo upravleniya chastotnym elektroprivodom mekhanizma povorota’, *Elektromashynobuduvannya ta elektroobladnannya*, iss. 62, pp. 36-39.
10. Herasymiak, RP & Melnykova, LV 1999, ‘Optimalnoe upravlynye kranovym mekhanizmom peredvyzheniya’, *Avtomatika. Avtomatyzatsiya. Elektrotekhnicheskyye komplekxy y systemy*, no. 1, pp. 87-94.
11. Carmona, IG & Collado, J 2016, ‘Control of a two wired hammerhead tower crane’, *Nonlinear Dynamics*, no. 84, pp. 2137-2148.
12. Galafshani, AL 1999, ‘Modeling and Optimal Control of Tower Crane Motions’, *Doct.pfilos.n. thesis*.
13. Funktsyy prohrammyruemoho lohycheskoho kontrollera y pany operatora na kranakh n.d., viewed 23 March 2020, <<https://kzk.kiev.ua/chastotnye-kranovye-sistemy-i-programmiruyemye-logicheskie-kontrollery>>.
14. Myshyn, AB & Sorokyn, PA 2015, *Prohrammyrovanye kontrollerov hruzopodemnykh mashyn*, Moskovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshheniya, Moskva.
15. Avtomatyzirovannyye systemy upravleniya hruzopodemnyy kranamy n.d., viewed 23 March 2020, <<http://www.electrolibrary.info/loadlifting/100-avtomatizirovannyye-sistemy-upravleniya-gruzopodemnyimi-kranami.htm>>.
16. Systema upravleniya mostovym kranom KMTPM30-10 n.d., viewed 23 March 2020, <<http://www.asep.kz/projects-solutions/kran-system/azf-kazhrom-kran-kmtrm30-10/>>.

17. Vnedrenye sovremennoi avtomatyzyrovannoi systemy upravleniya kranom na baze platformy MachineStruxure ot Schneider Electric pry rekonstruksyy krana mostovoho h/p 30/5t n.d., viewed 23 March 2020, <<http://www.prom-resource.spb.ru/page/machinestruxure-on-b>>.
18. Safety PLC ensures safe crane operation n.d., viewed 23 March 2020, <<https://www.designworldonline.com/safety-plc-ensures-safe-crane-operation/>>.
19. Need a system for both control and monitoring? an All-in-One PLC+HMI offers a single solution for both problems n.d., viewed 23 March 2020, <<https://unitronicsplc.com/testimonials/kone-cranes/>>.
20. List of automation protocols n.d., viewed 23 March 2020, <https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_automation_protocols>.
21. CRANE CONTROL NETWORK by Alojz Slutej, Fetah Kolonic, Alen Poljungan n.d., viewed 23 March 2020, <http://bib.irb.hr/datoteka/204929.E05-37_F_Slutej.pdf>.
22. Kyoung-Nam Ha, Man-Ho Kim, Kyung Chang Lee & Suk Lee 2005, 'Performance evaluation of network protocol for automated transfer crane system', *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 11, no. 8, pp. 709-716.
23. Cranes go digital n.d., viewed 23 March 2020, <<http://www.cranestodaymagazine.com/features/cranes-go-digital/>>.
24. Yaping Tang, Haibo Wu & Hailong Liu 2015, 'The wireless monitoring system of tower cranes based on MCP2515/CAN bus', *International Conference on Intelligent Systems Research and Mechatronics Engineering. Series: Advances in Intelligent Systems Research*, pp. 1635-1639.
25. *Crane Control and Automation. Global Solutions. TMEIC. I-1105-A. Revised March 2015*, pp. 32.
26. Crane Weight Indicator. Force Measuring Controller Modbus RTU Communication Protocol n.d., viewed 23 March 2020, <<http://www.weighingindicatorcontroller.com/sale-10938144-crane-weight-indicator-force-measuring-controller-modbus-rtu-communication-protocol.html>>.
27. CAN Open n.d., viewed 23 March 2020, <<https://en.wikipedia.org/wiki/CANopen>>.
28. CAN Bus n.d., viewed 23 March 2020, <https://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus>.
29. *Metody praktycheskoho konstruyrovaniya pry normyrovanny syhnalov s datchykov: po materyalam semynara „Practical design techniques for sensor signal conditioning”* 2005, Analog Devices, AUTEX Ltd.
30. Nevzorov, LA, Pazelskyi, HN & Romanova, VA 1980, *Bashennye krany*, 4th edn, Vysshaya shkola, Moskva.
31. Blaschke, F 1971, 'Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen', *Siemens Zeitschrift*, vol. 45, no. 10, pp. 757-760.
32. Depenbrock, M 1985, 'Direct self control (DSC) of inverter-fed induction machines', *IEEE Trans. Power Electron*, no. 3, vol. 3, pp. 420-429.
33. Boze, BK 2002, *Sovremennaya sylovaia elektronika y preobrazovately peremennogo toka*, Prentige Hall PTR.
34. Romasevych, YuO 2015, 'Dynamichna optymizatsiia rezhymiv rukhu mekhanizmiv vantazhopidomnykh mashyn yak mekhatronnykh system', Doct.tekh.n. thesis, Odesa.
35. Kotelenko, SV 2014, 'Povyshenye effektivnosti funktsyonyrovaniya systemy rekuperatsyy elektrycheskoi enerhyi v mnohodvyhatelnykh podemno-transportnykh mekhanizmach', Doct.tekh.n. thesis, Tula.
36. *Proektyrovanye elektropriyvodov kranovykh mekhanizmov. Tekhnicheskaya kolleksiya Schneider Electric* 2009, iss. 12, viewed 23 March 2020, <<https://profsector.com/media/catalogs/566dcd7cb36cc.pdf>>.
37. Preobrazovately chastoty ALTIVAR dlia hruzopodemnykh kranov n.d., viewed 23 March 2020, <<http://ua.automation.com/content/frequency-altivar-modulator>>.
38. Preobrazovately chastoty SIEMENS n.d., viewed 23 March 2020, <http://www.tekhar.com/Programma/Siemens/Privod_tech/Preobrazovately/AC_drive/index_AC.htm>.
39. Preobrazovately chastoty Mitsubishi Electric FR-A760 n.d., viewed 23 March 2020, <<https://rusautomation.ru/privodnaya-tehnika/mitsubishi-fr-a760>>.
40. Preobrazovately chastoty dlia elektropriyvodov hruzopodemnykh kranov n.d., viewed 23 March 2020, <https://drives.ru/upload/page_id_1097/kranovabrosura.pdf>.
41. Smooth tower crane operation with ACS880 drives n.d., viewed 23 March 2020, <<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000220703&LanguageCode=en&DocumentPartId=1&Action=Launch>>.

Стаття надійшла до редакції 30 червня 2020 р.