

## КЕРУВАННЯ ВАНТАЖОПІДЙОМНИМ ПРИСТРОЄМ КРАНА-МАНІПУЛЯТОРА ПІД ЧАС ОПУСКАННЯ ВАНТАЖУ У ВАННУ З АГРЕСИВНОЮ РІДИНОЮ

О.І. Толочко<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, В.П. Стяжкін<sup>2\*\*</sup>, канд. техн. наук, О.М. Рижков<sup>2\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського»,

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,

e-mail: [tolochko.ola@gmail.com](mailto:tolochko.ola@gmail.com)

<sup>2</sup>Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: [sash1319@gmail.com](mailto:sash1319@gmail.com)

*Розроблено структурну модель механічної частини системи електроприводу вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора установки дезактивації металевих відходів, що виконує функцію підйому-опускання кошика з забрудненим металом у ванну з дезактивуючою рідиною. У процесі розробки моделі враховано зміну моменту статичного опору, зумовлену дією виштовхувальної сили при зануренні кошика з вантажем у рідину, та зміну моменту інерції приводу при роз'єднанні колони і кошика після досягнення ним дна ванни. Шляхом Simulink-моделювання доведено доцільність застосування для вантажопідйомного пристрою системи позиційного електроприводу. Бібл. 7, рис. 7.*

**Ключові слова:** кран-маніпулятор, вантажопідйомний пристрій, виштовхувальна сила, система позиційного електроприводу

**Постановка проблеми.** У даній роботі досліджується керований електропривод (ЕП) вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора установки дезактивації металевих відходів у складі комплексу переробки небезпечних відходів[1, 2].

Металеві відходи відвантажуються на стіл прийому і видачі у кошику, після чого у роботу включається кран-маніпулятор, який за допомогою автоматичної зачепи захоплює кошик з відходами та переміщає його до модуля ультразвукової дезактивації з ваннами, що містять кислий або лужний розчини. Перед наближенням крана-маніпулятора до потрібної ванни, її кришка автоматично відкривається і вантажопідйомний пристрій, виконаний у вигляді телескопічної колони, опускає кошик у ванну. Після досягнення ним дна ванни рухома частина колони опускається ще на невелику відстань, щоб відчепити від кошика гачки, а потім знову підіймається на максимальну висоту. Тоді кришка ванни закривається і запускається ультразвуковий процес дезактивації.

Система електроприводу вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора складається з асинхронного двигуна, що живиться від інтелектуального перетворювача частоти (ПЧ) серії Unidrive SP Control Techniques [3]. Вимірювальна система компанії Kubler [4] представляє собою основу з встановленим на ній абсолютним енкодером зі шківом і натяжним колесом. Для передачі руху використовується зубчастий ремінь. У процесі опускання кошика існує ризик розплескування дезактивуючої рідини за межі ванни, що є неприпустимим та небезпечним, тому необхідно забезпечити високу точність позиціонування, щоб кошик досягав дна ванни за нульової швидкості. Також необхідно враховувати те, що у разі знаходження кошика у рідині на нього діє виштовхувальна сила, яка призводить до динамічної зміни навантаження.

У [5] розглянуто процес опускання вантажу в рідину на гнучкому канаті за допомогою гідравлічного приводу, для якого розроблено регулятор моменту та спостерігач стану, що оцінює силу тягіння вантажу. У [6] розглядається синхронізація руху вантажу з хвилями задля зменшення гідродинамічних сил за рахунок мінімізації варіацій між вертикальними швидкостями вантажу та води. Проте керування рухом телескопічної колони, яке враховує зміни моменту статичного опору та запобігає розплескуванню рідини, в цих роботах не розглядається.

**Метою роботи** є вибір доцільного варіанту формування системи керування електроприводом вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора установки дезактивації металевих відходів з позицій забезпечення вимог технологічного процесу.

**Матеріали і результати досліджень.** Схематично вантажопідйомний пристрій крана-маніпулятора з кошиком, який занурено у ванну, наведено на рис. 1, де позначено: 1 – двигун, 2 – редуктор,

3 – барабан, 4 – продольний блок, 5 – рухома частина колони, 6 – гачки зацепу кошика, 7 – поперечний блок, 8 – основа телескопічної колони, 9 – ванна, 10 – кошик.

Під час руху вантажу в рідині на нього, згідно з законом Архімеда, діє окрім сили тяжіння виштовхуюча сила, яка визначається виразом

$$F_A(h) = \rho_p V(h)(g \pm a),$$

де  $\rho_p$  – щільність рідини;  $V(h)$  – об'єм рідини, витісненої кошиком з вантажем, що залежить від глибини занурення кошика  $h$ ;  $g = 9.8 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння;  $a$  – прискорення кошика. У формулі знак «+» діє при зануренні вантажу, а знак «-» – при його підйманні. З урахуванням малості прискорення  $a \ll g$ , що є дійсним для більшості кранів-маніпуляторів, сила Архімеда визначається рівнянням

$$F_A(h) = \rho_p g V(h). \quad (1)$$

Якщо припустити, що вантаж є однорідним та його об'єм рівномірно розподілено за висотою кошика і повністю його заповнює, то

$$V(h) = \begin{cases} 0 & \text{при } (h > h_{p0}), \\ S_k(h_p - h) & \text{при } 0 < h < h_{p0} \text{ \& } (h_p - h) \leq h_k, \\ S_k h_k & \text{при } 0 < h < h_{p0} \text{ \& } (h_p - h) > h_k, \end{cases} \quad (2)$$

де  $S_k$  – площа дна кошика;  $h_{p0}$ ,  $h_p$  – початковий (до занурення кошика) та поточний рівень рідини у ванні відповідно;  $h_k$  – висота

кошика;  $h$  – позиція нижнього краю колони, яка має значення 0 тоді, коли кошик з вантажем торкається дна ванни.

Із балансу обсягів кошика з відходами, що занурюється, та рідини, що виштовхується з ванни з площею дна  $S_B$

$$S_k(h_p - h) = S_B(h_p - h_{p0}),$$

випливає

$$h_p = \frac{h_{p0} - k_S h}{1 - k_S}, \quad h_p = \frac{h_{p0} - k_S h}{1 - k_S}, \quad (3)$$

де  $k_S = S_k / S_B$ .

З урахуванням дії виштовхувальної сили статичний момент навантаження двигуна вантажо-підйомного пристрою визначатиметься формулою

$$M_c(h) = (mg - F_A(h))r, \quad r = v_{\text{ткуст}} / \omega_{\text{уст}}, \quad (4)$$

де  $v_{\text{ткуст}}$ ,  $\omega_{\text{уст}}$  – усталені значення лінійної швидкості переміщення телескопічної колони та кутової швидкості обертання вала двигуна відповідно. Маса  $m$  у рівнянні (4) у разі опускання кошика складається з маси рухомої частини телескопічної колони  $m_{\text{тк}}$ , маси порожнього кошика  $m_k$  та маси вантажу  $m_B$ , а після досягнення кошиком дна – тільки з маси  $m_{\text{тк}}$ . В радіусі приведення не враховано кут нахилу канатів.

При відчепленні кошика з вантажем від телескопічної колони змінюється стрибком сумарний момент інерції установки, приведений до валу двигуна

$$J_{\Sigma 1}(h) = J_d + (m_{\text{тк}} + m_k + m_B)r^2, \quad J_{\Sigma 2}(h) = J_d + m_{\text{тк}}r^2. \quad (5)$$

Якщо вантаж має довільну форму та є різномірним, то характер зміни виштовхувальної сили, а відповідно і залежності  $M_c(h)$  стає більш складним. Відомо тільки те, що при зануренні вантажу він буде монотонно зростаючим. Для такого об'єкта керування досить важко розрахувати тахограму, яка б забезпечила досягнення кошиком з вантажем дна ванни при нульовій швидкості без додавання зворотнього зв'язку за положенням.

Щоб порівняти можливості систем регулювання швидкості та положення, розробимо структурну модель механічної частини системи електроприводу з врахуванням миттєвої зупинки кошика та

стрибокподібної зміни сумарного моменту інерції електроприводу при досягненні кошиком дна ванни. Така *Simulink*-модель зображена на рис. 2.

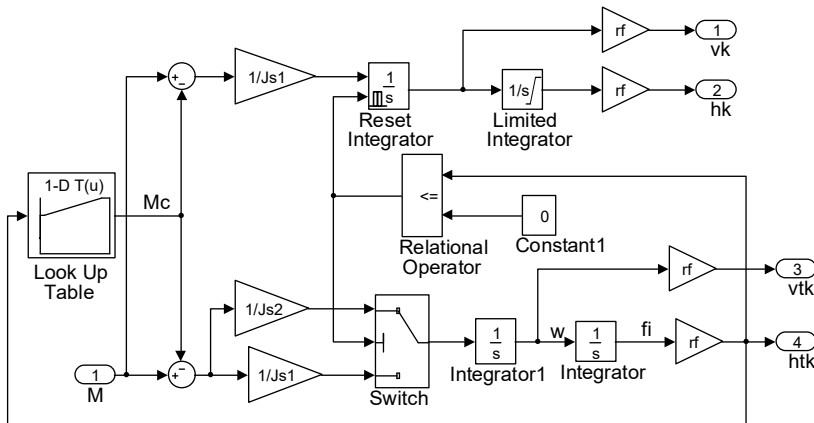


Рис. 2

з дном ванни положення кошика моделюється інтегратором з обмеженням (*Limited Integrator*), а швидкість кошика – інтегратором зі скиданням (*Reset Integrator*). Скидання у початковий рівень (у даному випадку в 0) відбувається за досягненням інтегратора, що імітує положення колони, нульового рівня. Останнє є ознакою стикання кошика з дном ванни. Щоб утримати цей стан у продовженні моделювання, параметр *External reset* інтегратора *Reset Integrator* встановлено у стан *Level hold*.

Результати моделювання традиційної потокоорієнтованої системи векторного керування швидкістю [7] телескопічної колони у разі опускання її з початкового рівня  $h_0=0.85$  м зі швидкістю  $v_{\text{тк,уст}}=0.132$  м/с з урахуванням особливостей механічної частини приводу згідно зі структурною математичною моделлю рис. 2 наведено на графіках рис. 3 та 4. В модельному експерименті застосовано асинхронний двигун 4А80В4У3 з параметрами:  $P_n=1,5$  кВт;  $n_n=1395$  об/хв;  $U_{\text{фн}}=220$  В;  $I_{\text{сн}}=3,3$  А;  $M_n=10,27$  Нм;  $J_d=0,00355$  кг·м<sup>2</sup>;  $R_s=7,1$  Ом;  $R'_r=3,92$  Ом;  $L_{\text{сг}}=0,015$  Гн;  $L'_{r\text{г}}=0,022$  Гн;  $L_m=0,372$  Гн. Маса  $m_{\text{тк}}=1000$  кг;  $m_k=120$  кг;  $m_b=680$  кг.

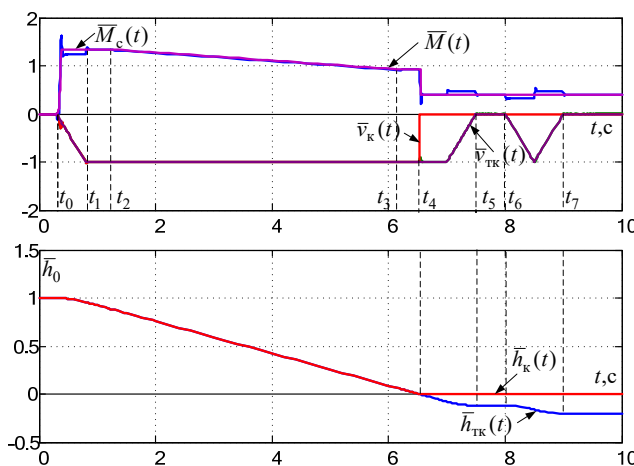


Рис. 3

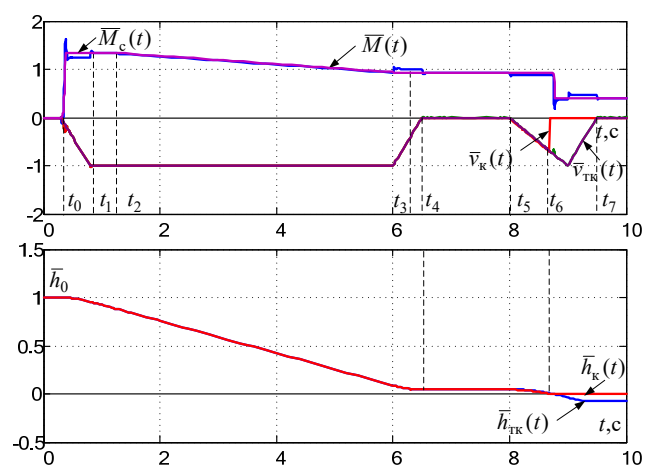


Рис. 4

На рис. 3 процес першого гальмування колони розпочинається з запізненням, а на рис. 4 – з випередженням. На рисунках позначено:  $t_0$  – час початку розгону;  $t_1$  – час закінчення розгону;  $t_2$  – час початку занурення кошику;  $t_3$  – час закінчення занурення кошику;  $t_4$  – час досягнення кошиком дна;  $t_5$  – час закінчення першого гальмування колони;  $t_6, t_7$  – моменти часу початку та закінчення додаткового руху колони вниз, призначеного для відчеплення гачків від кошика. Сигнали на графіках наведено у відносних одиницях:  $\bar{M} = M / M_n$ ,  $\bar{v}_{\text{тк}} = v_{\text{тк}} / v_{\text{тк,уст}}$ ,  $\bar{v}_k = v_k / v_{\text{тк,уст}}$ ,  $\bar{h} = h / h_0$ .

З рис. 3 видно, що у випадку, коли кошик з вантажем опускається на дно ванни раніше, ніж його швидкість досягне нульового рівня, в момент стикання  $t_4$  швидкість миттєво знижується з початкового рівня до нуля, тобто стикання відбувається з великим ривком, внаслідок чого частина дезактивуючого розчину може вихлюпнутися з ванни. Між тим телескопічна колона продовжує рух донизу (ділянка  $t_4-t_5$ ) внаслідок похибки у розрахунку тахограми, а потім ще здійснює додаткове переміщення задля відчеплення гачка (ділянка  $t_6-t_7$ ). У такий спосіб колона опускається на більшу відстань ніж регламентовано технологічним процесом і може навіть частково зануритися в розчин, що не припустимо.

З рис. 4 видно, що у випадку, коли при виході на нульову швидкість (момент часу  $t_5$ ) кошик з вантажем не досягає дна ванни, то процес стикання відбувається під час завдання на додатковий рух телескопічної колони (ділянка  $t_6-t_7$ ). Між тим додаткове переміщення колони скорочується (ділянка  $t_4-t_7$ ), внаслідок чого відчеплення гачка від кошика може не відбутися. При збільшенні похибки у розрахунку тахограми вантаж взагалі може не досягнути дна.

Наведені графіки вказують на доцільність використання для приводу телескопічної колони крана-маніпулятора системи регулювання положення.

Щоб система позиційного електроприводу відпрацювала без перерегулювання та без дотягування великих, середніх та малих переміщень, в ній застосовують або нелінійний регулятор положення, або задавальний пристрій. Структурну схему одного з варіантів такого пристрою наведено на рис. 5, на якому позначено  $\varphi_{зп}^*$ ,  $\varphi_{зп}$  – завдання на усталене та поточне значення кутового положення,  $\omega_{зп}^*$ ,  $\omega_{зп}$  – завдання на усталене та поточне значення швидкості обертання двигуна,  $\varepsilon_0$  – обмеження на прискорення.

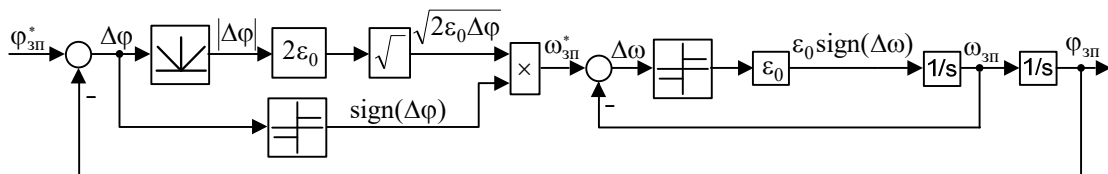


Рис. 5

Внутрішній контур задавального пристрою (рис. 5) являє собою задатчик інтенсивності, призначенням якого є забезпечення зміни швидкості двигуна за лінійним законом. Принцип дії задавального пристрою впливає з рівняння рівноприскореного руху. Відпрацювання заданого переміщення без перерегулювання та дотягування досягається за рахунок правильного вибору моменту початку гальмування. В цей момент похибка положення  $\Delta\varphi$  повинна бути такою, щоб у разі лінійного закону зміни швидкості положення механізму досягло заданого значення саме в ту мить, коли швидкість стане нульовою, тобто у момент початку гальмування повинно виконуватися рівняння  $\Delta\varphi = \varphi_{зп}^* - \varphi_{зп} = \omega^2 / 2\varepsilon_0$ , звідки отримуємо  $\omega = \sqrt{2\varepsilon_0\Delta\varphi}$ . Враховуючи можливість зміни знаку розузгодження за положенням, остаточно маємо

$$\omega_{зп}^* = \sqrt{2\varepsilon_0|\Delta\varphi|} \cdot \text{sign}(\Delta\varphi). \quad (6)$$

Перевага застосування задавального пристрою полягає у спрощенні налаштування регуляторів та у можливості налаштування задатчика положення окремо від електроприводу. Враховуючи змінний характер моменту статичного опору, регулятор швидкості слід виконати пропорційно-інтегральним, а на його вході треба встановити фільтр у вигляді аперіодичної ланки.

Перехідні процеси у такій системі показано на рис. 6. На рис. 7 наведено графік похибки позиціонування досліджуваних кранових механізмів, з якого видно, що динамічна похибка не перевищує 6 мм, а статична похибка відсутня. Шляхом математичного моделювання перевірено також працездатність системи при врахуванні нерівномірності розташування вантажу у кошику. Виявлено, що похибка позиціонування у випадку монотонної та повільної зміни Архімедового зусилля практично не відрізняється від похибки, зображеної на рис. 7.

Отже, система позиційного електроприводу відповідає усім вимогам, що ставляться до системи керування телескопічною колоною описаного вище крана-маніпулятора. На інтервалі  $t_0-t_4$  колона та кошик рухаються як єдине ціле. Стикання кошика з дном ванни відбувається на нульовій швидкості,

що запобігає розплескуванню дезактивууючої рідини; після паузи колона продовжує зниження на задану відстань, достатню для звільнення гачків.

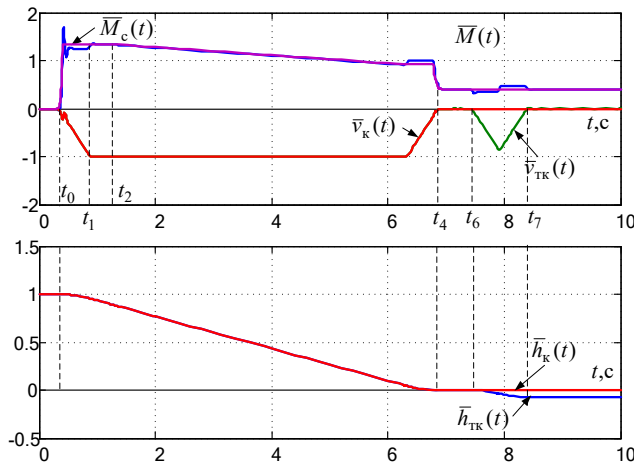


Рис. 6

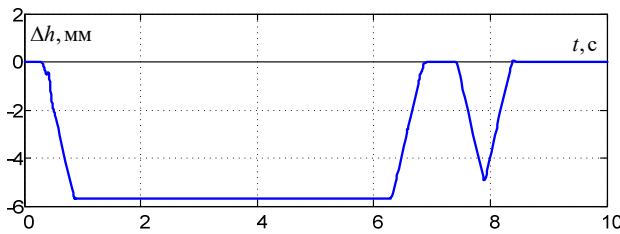


Рис. 7

електроприводу із задавальним пристроєм, про-порційно-інтегральним регулятором швидкості та лінійним пропорційним регулятором положення задовольняє вимогам технологічного процесу (а саме вимогам позиціонування) і може бути рекомендована для вантажопідіймних пристроїв кранів-маніпуляторів.

Роботу виконано за проектом «Розвиток теорії, розроблення методів інтелектуалізації технологічних процесів та засобів керування, моніторингу, діагностування і вимірювання в електроенергетичних та електротехнічних системах» (шифр – «ІНТЕХЕН-2»), державний номер реєстрації 0120U002125.

1. Стяжкін В.П., Подейко П.П., Зайченко О.А., Гаврилюк С.И., Рыжков А.М. Автоматизированная система управления электроприводами мостового крана-манипулятора для установки дезактивации металлов. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2015. № 19 (95). С. 71-74.
2. Рыжков О.М., Кондратенко І.П., Толочко О.І., Стяжкін В.П. Шляхи побудови системи автоматичного керування краном-маніпулятором. XXIV міжнародна конференція з автоматичного управління: *Автоматика-2017*, Київ, Україна, 13-15 вересня, 2017. С. 104-105.
3. Universal Variable Speed AC Drive for induction and servo motors. *Control Techniques*. 2012. URL: [https://www.galco.com/techdoc/cont/sp2202\\_um.pdf](https://www.galco.com/techdoc/cont/sp2202_um.pdf) (дата звернення 02.08.2019).
4. Компоненты систем автоматизации СВ АЛЬТЕРА. *Svaltera*. 2016. URL: [http://www.svaltera.ua/upload/iblock/9e7/price\\_6\\_sensors\\_.pdf](http://www.svaltera.ua/upload/iblock/9e7/price_6_sensors_.pdf) (дата звернення 02.08.2019).
5. Jinbo Wu, Zeyu Yang, Donglai Wu. Impedance control of secondary regulated hydraulic crane in the water entry phase. *Ocean Engineering*. 2018. No 169. Pp. 134-143.
6. Johansen T.A., Fossen T.I., Sagatun S.I., Nielsen F.G. Wave synchronizing crane control during water entry in offshore moonpool operations-experimental results. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2003. Vol. 28(4). Pp. 720-728.
7. S.-K. Sul. Control of electric machine drive systems. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. 424p.

## Висновки

1. Розроблена структурна Simulink-модель вантажопідійомного пристрою крана-маніпулятора у складі комплексу переробки небезпечних відходів адекватно відображає наступні особливості технологічного процесу: зміну моменту статичного опору та моменту інерції приводу у разі занурення кошика з вантажем у дезактивууючий розчин, миттєве зменшення швидкості кошика до нуля та відділення маси кошика від маси колони при досягненні кошиком дна ванни.

2. У разі застосування в електроприводі вантажопідійомного пристрою крана-маніпулятора системи регулювання швидкості будь-яка похибка у розрахунку тахограми приводить до ривків під час досягнення кошиком дна ванни (що призводить до розплескування дезактивууючої рідини та неприпустимого занурення телескопічної колони або її деталей у дезактивууючу рідину) або до зависання кошика над дном та порушення процесу відокремлення кошика від колони.

3. Запропонована система позиційного

## УПРАВЛЕНИЕ ГРУЗОПОДЪЕМНЫМ УСТРОЙСТВОМ КРАНА-МАНИПУЛЯТОРА В ПРОЦЕССЕ ОПУСКАНИЯ КОРЗИНЫ В ВАННУ С АГРЕССИВНЫМ РАСТВОРОМ

О.И. Толочко<sup>1</sup>, докт. техн. наук, В.П. Стяжкин<sup>2</sup>, канд. техн. наук, А.М. Рыжков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины «КПІ ім. І. Сикорського»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: [tolochko.ola@gmail.com](mailto:tolochko.ola@gmail.com)

<sup>2</sup>Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: [sash1319@gmail.com](mailto:sash1319@gmail.com)

*Разработана структурная модель механической части системы электропривода грузоподъемного устройства крана-манипулятора установки дезактивации металлических отходов, которая выполняет функцию подъема-опускания корзины с загрязненным металлом в ванну с дезактивирующей жидкостью. При разработке модели учтено изменение момента статического сопротивления, обусловленное действием выталкивающей силы при погружении корзины с грузом в жидкость, и изменение момента инерции привода при разъединении колонны и корзины при достижении дна ванны. Путем Simulink моделирования доказана целесообразность применения для грузоподъемного устройства системы позиционного электропривода. Библ. 7, рис. 7.*

**Ключевые слова:** кран-манипулятор, подъемная колонна, выталкивающая сила, система позиционного электропривода

## CONTROL OF OVERHEAD CRANE MANIPULATOR HOIST MECHANISM FOR LOWERING BASKET TO THE BATH WITH AGGRESSIVE SOLUTION

O.I. Tolochko<sup>1</sup>, V.P. Stiazhkin<sup>2</sup>, A. M. Ryzhkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,  
Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: [tolochko.ola@gmail.com](mailto:tolochko.ola@gmail.com)

<sup>2</sup>The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine  
Peremohy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: [sash1319@gmail.com](mailto:sash1319@gmail.com)

*The paper analyses mathematical model for hoisting mechanism of overhead crane manipulator. This crane is expected to operate in waste processing plant in process of deactivation metal. The hoisting mechanism has the form of telescopic column. This column used to submerging basket full of polluted scrap metal in bath with deactivation substance. The model takes into account changes of static torque resistance and motor inertia. The torque resistance change is produced by buoyancy force when basket with load submerging and motor inertia when basket detached from column after sinking to the bath bottom. Results of Simulink modelling showed point to use position control systems. References 7, figures 7.*

**Key words:** crane manipulator, hoisting mechanism, buoyancy force, position control systems

1. Stiazhkin V.P., Podeiko P.P., Zaichenko O.A., Havryliuk S.Y., Ryzhkov A.M. Automated control system for electric drives of a overhead crane for installation of metal decontamination. *Elektrotekhnicheskiye i kompiuternyye systemy*. 2015. No 19 (95). Pp. 71-74. (Rus)
2. Ryzhkov O.M., Kondratenko I.P., Tolochko O.I., Stiazhkin V.P. Ways to build an automatic crane manipulator control system. XXIV mizhnarodna konferentsiia z avtomatychnoho upravlinnia *Avtomatyka-2017*, Kyiv, Ukraine, September 13-15, 2017. Pp. 104-105. (Ukr)
3. Universal Variable Speed AC Drive for induction and servo motors. *Control Techniques*. 2012.  
URL: [https://www.galco.com/techdoc/cont/sp2202\\_um.pdf](https://www.galco.com/techdoc/cont/sp2202_um.pdf) (Access date 02.08.2019).
4. Komponenty system avtomatyzacyy SV ALJTERA. *Svaltera*. 2016.  
URL: [http://www.svaltera.ua/upload/iblock/9e7/price\\_6\\_sensors\\_.pdf](http://www.svaltera.ua/upload/iblock/9e7/price_6_sensors_.pdf) (Access date 02.08.2019). (Rus)
5. Jinbo Wu, Zeyu Yang, Donglai Wu. Impedance control of secondary regulated hydraulic crane in the water entry phase. *Ocean Engineering*. 2018. No 169. Pp. 134-143.
6. Johansen T.A., Fossen T.I., Sagatun S.I., Nielsen F.G. Wave synchronizing crane control during water entry in offshore moonpool operations-experimental results. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2003. Vol. 28(4). Pp 720-728.
7. S.-K. Sul. Control of electric machine drive systems. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. 424p.

Надійшла 04.09.2019  
Остаточний варіант 25.02.2020