

# РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПІДЙОМНОГО ПРИСТРОЮ КРАНА- МАНІПУЛЯТОРА

Богута О.С., магістрант, Толочко О.І., д.т.н., проф.

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу*

**Вступ.** В даній роботі досліджується електропривод (ЕП) крану-маніпулятора в складі комплексу переробки небезпечних відходів, призначений для дезактивації поверхонь металу [1].

Система електроприводу підйому телескопічної колони складається з асинхронного двигуна, що живиться від перетворювача частоти (ПЧ) серії Unidrive SP Control Techniques [2]. Вимірювальна система компанії Kubler [3] представляє собою основу з встановленим на ній абсолютним енкодером зі шківом і натяжним колесом. Для передачі руху використовується зубчастий ремінь.

При опусканні кошику існує ризик розплескування дезактивуючої рідини за межі ванни, що є неприпустимим та небезпечним. Тому необхідно забезпечити високу точність позиціонування, щоб кошик досягав днища ванни при нульовій швидкості. При цьому необхідно враховувати те, що при знаходженні кошика в рідині на нього діє виштовхувальна сила, яка призводить до динамічної зміни моменту статичного опору.

**Мета роботи.** Розробка математичної моделі підйомального пристрою зі врахуванням зміни моменту статичного опору внаслідок дії виштовхувальної сили при зануренні металу у рідину та відокремлення маси кошика з вантажем від телескопічної колони при досягненні кошиком дна ванни.

**Матеріали і результати досліджень.** Схематично механізм підйому-спуску колони наведено на рис. 1, де позначено: 1 – двигун, 2 – редуктор, 3 – барабан, 4 – нерухомий блок, 5 – колона, 6 – гачок, 7 – рухомий блок.

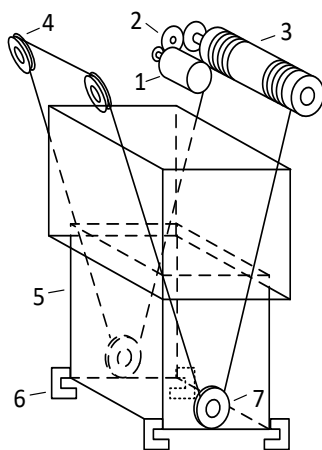


Рисунок 1 – Схема механізму підйому-спуску з телескопічною колоною

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

$$F_A(h) = \rho_p V(h)(g \pm a), \quad (1)$$

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 (1) знак «+» діє при зануренні вантажу, а знак «-» при його підйманні; до того ж при розгоні кошика  $a > 0$ , а при гальмуванні –  $a < 0$ . Але у випадку, коли  $a \ll g$ , що є дійсним для більшості кранів-маніпуляторів, впливом прискорення занурюваного в рідину вантажу на величину зусилля Архімеда можна знехтувати. Якщо припустити, що вантаж є однорідним та його об'єм рівномірно розподілено за висотою кошика і повністю його заповнює, то

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

де  $S$  – площа дна кошика  $h_p$  – рівень рідини у ванні;  $h_k$  – висота кошика;  $h$  – позиція нижнього краю колони, яка має значення 0 тоді, коли кошик з вантажем торкається дна ванни.

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

$$M_c(h) = (mg - F_A(h))r, \quad r = v_{\text{тк уст}} / \omega_{\text{уст}} \quad (3)$$

де  $v_{\text{тк уст}}$ ,  $\omega_{\text{уст}}$  – усталені значення лінійної швидкості переміщення телескопічної колони та кутової швидкості обертання вала двигуна відповідно.

Маса  $m$  у рівнянні (3) при опусканні кошика складається з маси телескопічної колони  $m_{\text{тк}}$ , маси порожнього кошика  $m_k$  та маси вантажу  $m_b$ , а після досягнення кошиком дна – тільки з маси  $m_{\text{тк}}$ .

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

$$J_{\Sigma 1}(h) = J_d + (m_{\text{тк}} + m_k + m_b)r^2, \quad J_{\Sigma 2}(h) = J_d + m_{\text{тк}}r^2. \quad (4)$$

Позиція колони  $h$  в рівняннях (3) та (4) пов'язана з кутом повороту двигуна  $\varphi$  виразом

$$h = \varphi \cdot r. \quad (5)$$

Розробимо структурну математичну модель механічної частини системи електроприводу зі врахуванням миттєвої зупинки кошика та стрибкоподібної зміни сумарного моменту інерції електроприводу при досягненні кошиком дна ванни. Така *Simulink*-модель зображена на рис. 2.

Залежність  $M_c(\varphi)$  при виконанні припущення (2) імплементована в модель у вигляді попередньо розрахованої таблиці (блок *Look Up Table*). Дві паралельні гілки моделі відображають той факт, що при опусканні кошика на дно маса кошика з вантажем відокремлюється від телескопічної колони з приводним двигуном. Керований ключ *Switch* в момент відокремлення зменшує сумарний момент інерції системи, приведений до валу двигуна, згідно з рівняннями (4). Для імітації миттєвої зупинки кошика при стиканні його з дном ванни положення кошика формується інтегратором з обмеженням (*Limited Integrator*), а швидкість кошика – інтегратором зі скиданням (*Reset Integrator*). Скидання у початковий рівень (в даному випадку у 0), відбувається при досягненні інтегратором, що імітує положення колони, нульового рівня. Останнє є ознакою стикання кошика з дном ванни. Щоб утримати цей стан при продовженні моделювання, параметр *External reset* інтегратора *Reset Integrator* встановлено у стан *Level hold*.

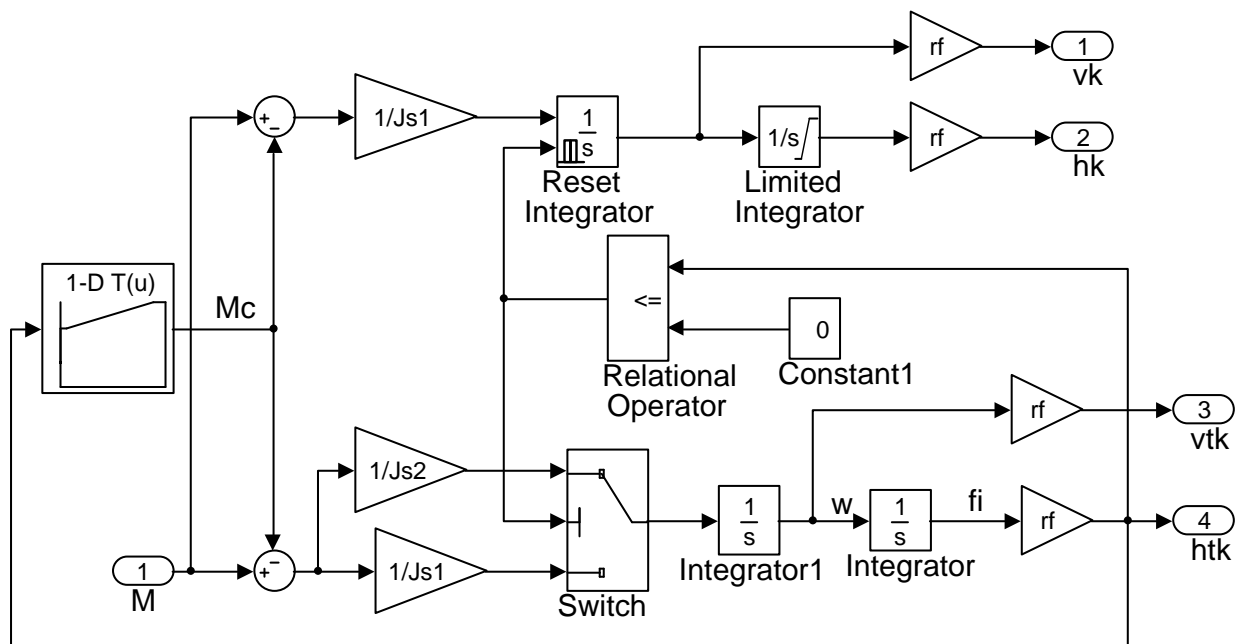


Рисунок 2 – Структурна схема механічної частини

Результати моделювання традиційної потокоорієнтованої системи векторного керування швидкістю телескопічної колони при опусканні її з початкового рівня  $h_0=0.85$  м з урахуванням особливостей механічної частини приводу згідно зі структурною математичною моделлю рис. 2 наведені на графіках рис. 3 та рис. 4. В модельному експерименті застосовано асинхронний двигун 4A80B4Y3 з такими параметрами:  $P_n=1,5$  кВт;  $n_n=1395$  об/хв;  $U_{fn}=220$  В;  $I_{sn}=3,3$  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;  $L_{s\sigma}=0,015$  Гн;  $L_{r\sigma}=0,022$  Гн;  $L_m=0,372$  Гн.

На рис. 3 процес першого гальмування колони розпочинається з запізненням, а на рис. 4 – з випередженням. На цих рисунках позначені:  $t_0$  – 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 приведені у відносних одиницях:  $\bar{M} = M / M_n$ ,  $\bar{v}_{\text{TK}} = v_{\text{TK}} / v_{\text{TKуст}}$ ,  $\bar{v}_k = v_k / v_{\text{TKуст}}$ ,  $\bar{h} = h / h_0$ .

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 розрахуку тахограми, а потім ще здійснює додаткове переміщення для відчеплення гачка ( $t_6-t_7$ ). У такий спосіб колона опускається на більшу відстань ніж регламентовано технічним процесом, в наслідок чого колона може зануритися в ванну, що є неприпустимо.

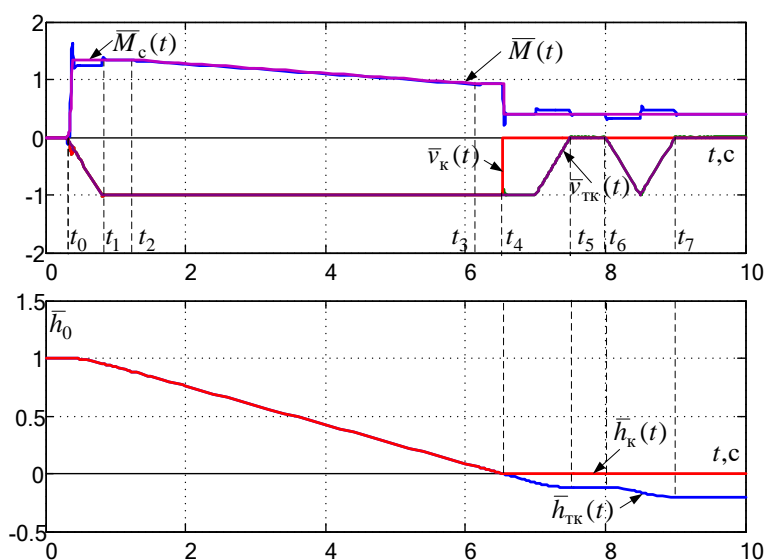


Рисунок 3 – Перехідні процеси гальмування системи векторного керування швидкістю з запізненням

Між тим телескопічна колона продовжує рух донизу (ділянка  $t_4-t_5$ ) внаслідок похибки у розрахунку тахограми, а потім ще здійснює додаткове переміщення для 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.

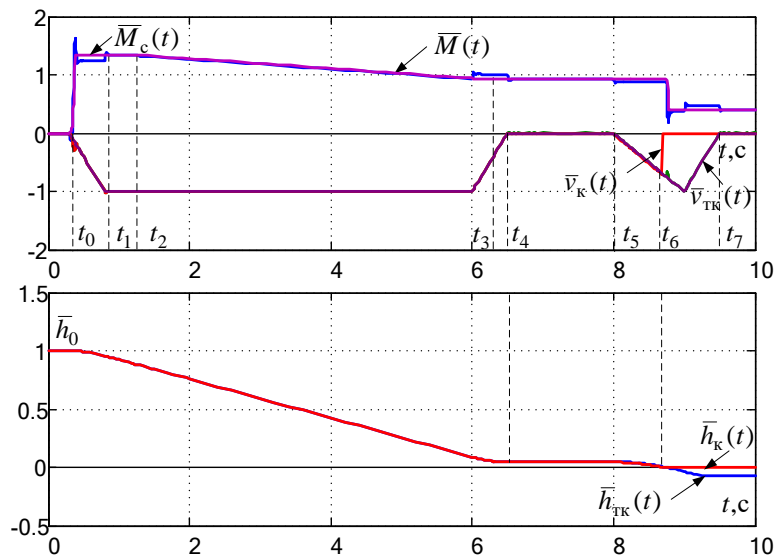


Рисунок 4 – Перехідні процеси гальмування системи векторного керування швидкістю з випередженням

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 при розрахунку тахограми вантаж взагалі може не досягнути дна.

Наведені графіки підтверджують адекватність запропонованої моделі та вказують на доцільність використання для приводу телескопічної колони крана-маніпулятора системи регулювання положення.

**Висновки.** Запропонована математична структурна модель механічної частини підйомального пристрою крана-маніпулятора з вантажем відображує такі особливості механізму, як зміна моменту навантаження при зануренні вантажу в рідину, миттєва зупинка кошика при досягненні ним дна ванни та зміна моменту інерції електроприводу при відчепленні кошика з вантажем від телескопічної колони. Таку модель можна використовувати при порівнянні різноманітних систем керування підйомних пристроїв.

#### Перелік посилань

1. Стяжкин 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 № 19 (95). 2015. 71-74 с.
2. Universal Variable Speed AC Drive for induction and servo motors. [Електронний ресурс]. Control Techniques. 2012. Режим доступу до ресурсу: [https://www.galco.com/techdoc/cont/sp2202\\_um.pdf](https://www.galco.com/techdoc/cont/sp2202_um.pdf).
3. Компоненты систем автоматизации СВ АЛЬТЕРА. [Електронний ресурс]. Svaltera. 2016. Режим доступу до ресурсу: [http://www.svaltera.ua/upload/iblock/9e7/price\\_6\\_sensors\\_.pdf](http://www.svaltera.ua/upload/iblock/9e7/price_6_sensors_.pdf).
4. Система управления положением: А.с. 1513415. СССР, МКИ G 05 В 11/01, G 05 D 3/12 / О.И. Толочко, П.Х. Коцегуб, Ю.В. Губарь, В.А. Столба. – №4327001/24-24; Заявлено 27.07.89; Опубл. 07.10.89, Бюл. №37. 6 с.