

DOI: 10.31653/smf52.2026.107-115

дата першого надходження: 18.02.26
дата прийняття статті до друку після
рецензування: 24.03.26
дата публікації: 05.05.26

Стукаленко О.М.¹, Дулдiєр А.П.²¹ORCID: 0000-0002-3025-7013, ²ORCID: 0000-0009-4844-777X

Національний університет «Одеська морська академія»

ЕФЕКТИВНІСТЬ ФРИКЦІОНА У ЗДВОЄНОМУ ПІДВІСІ СУДНОВОГО ВАНТАЖОПІДЙОМНОГО ПРИСТРОЮ ПРИ ВІДМОВІ ШКЕНТЕЛЯ ПІД ЧАС ОПУСКАННЯ ВАНТАЖУ

Постановка проблеми в загальному вигляді.

Одноєю із загроз, що виникають під час технічної експлуатації суднових вантажопідйомних пристроїв (СВПП), є пошкодження вантажу внаслідок обриву троса під час виконання навантажувально-розвантажувальних чи ремонтно-монтажних робіт у машинному відділенні крупнотоннажних суден.

Наслідки подібних аварій включають не лише матеріальні втрати, пов'язані з пошкодженням вантажу, простоем судна під час ліквідації наслідків, витратами на ремонт СВПП та елементів судна, що постраждали від вантажу, але й трагічні людські жертви та серйозні екологічні катастрофи. Наприклад, у 1998 році під час підйому південного верхнього модуля платформи Petronius стався обрив троса, внаслідок чого модуль упав у Мексиканську затоку. Вартість оцінювалася приблизно у 116 мільйонів доларів США. У період з 1999 року по 2013 більш 60 чоловік загинули внаслідок обриву тросів і більш 65 пов'язаних з ними травмовано [1].

Проблему запобігання аваріям у СВПП із напрямними вирішують шляхом використання уловлювачів, які забезпечують утримання вантажу чи вантажонесучих елементів у разі несправності підйомного механізму. У конструкції суднових підйомників із гнучким підвісом платформи, відповідно до вимог Регістру [2], передбачено застосування чотирьох підвісів. У разі обриву одного із тросів платформа залишається утриманою на трьох, що дозволяє перемістити її до положення, де можна безпечно виконати розвантаження та провести заміну пошкодженого троса.

Для СВПП з вільним підвісом вантажу завдання ускладнюється. Одним із можливих рішень є підвищення надійності таких систем

шляхом впровадження часткового навантаженого резервування за допомогою подвійного поліспастового підвісу. У цьому випадку передбачається використання двох окремих тросів: якщо один з них обривається, навантаження автоматично перерозподіляється на другий. Завдяки такому підходу пристрій переходить із стану несправного і неприцездатного до стану несправного, але працездатного, що дозволяє уникнути аварійної ситуації та успішно завершити вантажну операцію. Під час перерозподілу навантажень у елементах вантажного пристрою можуть виникати значні динамічні зусилля. Відомі запропоновані технічні рішення можна класифікувати на чотири групи. Перша група не містить засобів для зниження динамічних навантажень у разі обриву троса – характерне рішення. У другу групу входять здвоєні підвіси, обладнані зрівняльними пристроями, що мають амортизаційні елементи, які сприяють зменшенню динамічних навантажень при аварійному утриманні вантажу. Третя група технічних рішень передбачає зрівняльні пристрої, оснащені гідравлічним демпфером. Четверта група представлена конструкціями, до складу яких входить фрикціон, призначений для обмеження зусилля.

Для реалізації перелічених технічних рішень необхідне визначення величини зусиль, які можуть виникнути під час перехідних процесів після обриву троса за різних режимів роботи вантажопідйомного пристрою. Недостатність результатів досліджень процесів, що відбуваються у силовому ланцюзі СВПП з вільним підвісом вантажу після обриву троса, обумовлює відсутність ефективних засобів для запобігання падіння вантажу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження перехідних процесів під час перерозподілу зусиль у силовому ланцюзі вантажних пристроїв після обриву троса, якими займалися автори робіт [3-9], містили результати визначення ефективності використання здвоєних підвісів із постійним опором фрикціона зрівняльного пристрою у вантажних пристроях мостового типу у випадку обриву троса при підйомі вантажу з жорсткої основи «з підхопленням».

Інші дослідники провели дослідження перехідних процесів у вантажних пристроях при обриві троса здвоєного підвісу без урахування впливу податливості металоконструкції вантажного пристрою. Результати, що отримані вказаними авторами, можна застосовувати лише для випадків, коли механізм підйому знаходиться на

жорсткій основі – у ліфтах, підйомних платформах, або у випадку знаходження вантажного візка крана біля опори.

Стукаленко М. І. [10] визначив розрахункові динамічні зусилля у силовому ланцюзі мостового крана у випадку відмови троса у зведеному підвісі з балансиrom під час опускання вантажу у режимі генераторного гальмування. Визначено, що за роботи з номінальним вантажем розрахункові коефіцієнти динамічності перевищують запаси міцності, що не дає змоги запобігти руйнуванню елементів крана. Однак є можливість утримати після обриву вантаж, вагою меншою за номінальну, яку і було знайдено під час досліджень.

Стосовно ефективності використання фрикціону з постійним опором для утримання вантажу після обриву троса під час опускання вантажу мостовим краном досліджень не проведено.

Постановка завдання. Метою даної роботи є визначення ефективності використання фрикціону з постійним опором у зрівняльному пристрої зведеного вантажного підвісу для забезпечення утримання вантажу після обриву троса під час опускання вантажу в режимі генераторного гальмування.

Для цього необхідно:

- скласти динамічну модель вантажопідйомного пристрою при утриманні вантажу після обриву троса;

- виконати математичне моделювання поведінки динамічної моделі;

- вибрати метод дослідження математичної моделі та провести ці дослідження;

- визначити розрахункові динамічні зусилля та коефіцієнти динамічності у силовому ланцюзі при утриманні вантажу;

- порівняти отримані коефіцієнти динамічності і коефіцієнти запасу міцності елементів пристрою;

- провести аналіз отриманого математичного результату.

Виклад основного матеріалу дослідження. Досліджений випадок обриву троса безпечного зведеного поліспасти з постійним опором фрикціону зрівняльного пристрою при сталому опусканні вантажу в режимі генераторного гальмування.

Динамічна модель для даного випадку представлена на рис.1, де m_1 – маса обертових частин механізму підйому, приведена до поступального переміщення y_1 , кг; y_1 – переміщення маси m_1 , приведене до переміщення вантажу, м; m_2 – маса вантажу, кг; G – вага вантажу, Н; y_2 – переміщення вантажу, м; m_3 – приведена маса метало-

конструкції крана, кг; F – зусилля у металоконструкції, яке визначається за формулою

$$F = c_3 y_3,$$

де c_3 – жорсткість металоконструкції крана, Н/м; y_3 – переміщення маси m_3 , м;

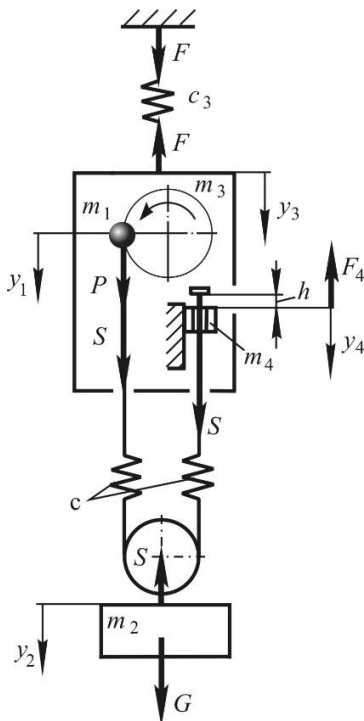


Рис. 1. Динамічна модель опускання вантажу після обриву троса здвоєного поліспастового підвісу

P — рушійне зусилля привода, приведене до вантажу

$$P = P_0 + \beta \dot{y}_1,$$

де P_0 – зусилля в момент пуску двигуна при нерухомому роторі; β – коефіцієнт жорсткості механічної характеристики двигуна; \dot{y}_1 – швидкість маси m_1 ; c – жорсткість поліспастового підвісу після обриву троса, Н/м. m_4 – маса рухливих частин фрикціону зрівняльного пристрою, приведена до вантажу, кг; h – приведена до переміщення вантажу довжина ділянки вільного ходу зрівняльного елемента, м;

y_4 – приведенне до переміщення вантажу переміщення рухливих частин демпфера, м; S – зусилля в поліспастовому підвісі, Н; F_4 – зусилля опору фрикціону зрівняльного пристрою, приведенне до вантажу, Н,

$$F_4 = kG,$$

де k – заданий коефіцієнт опору фрикціону.

Рух мас після обриву троса складається з чотирьох етапів.

На першому етапі відбувається рух мас після обриву одного з тросів під час вибору слабину, що утворилася, у цілому тросі. Рівняння, що описують рух мас на першому етапі, мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} m_3 \ddot{y}_3 + c_3 y_3 &= 0 \\ m_1 \ddot{y}_1 + \beta_1 \dot{y}_1 &= P_0; \\ m_2 \ddot{y}_2 &= G. \end{aligned} \right\}$$

Початкові умови для першого етапу

$$\begin{aligned} t_1 = 0, \quad y_3 &= \frac{G}{c_3}, \quad \dot{y}_3 = 0, \\ y_1 &= 0, \quad \dot{y}_1 = v_{20}, \\ y_2 &= 0 \quad \dot{y}_2 = v_{20}, \end{aligned}$$

де v_{20} – швидкість опускання вантажу у сталому режимі, м/с.

Після вибору ділянки вільного ходу зрівняльного елемента відбувається прикладення навантаження до поліспастового підвісу – починається другий етап руху мас.

Умова переходу до другого етапу

$$v_{20}t + \frac{gt^2}{2} = h - \frac{G}{2c} + y_1 - \left(\frac{G}{c_3} - y_3 \right).$$

Рух мас на другому етапі описується системою рівнянь

$$\left. \begin{aligned} m_3 \ddot{y}_3 + c_3 y_3 - c(y_2 - y_3 - y_1) &= 0; \\ m_1 \ddot{y}_1 + \beta_1 \dot{y}_1 - c(y_2 - y_3 - y_1) &= P_0; \\ m_2 \ddot{y}_2 + c(y_2 - y_3 - y_1) &= G. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Зусилля, що діє на поліспастовий підвіс, визначається за формулою

$$S = c(y_2 - y_3 - y_1). \quad (2)$$

Початкові умови для другого етапу

$$\begin{aligned} t_2 = 0, \quad y_3 &= (y_3)_1, \quad \dot{y}_3 = (\dot{y}_3)_1 \\ y_1 &= 0, \quad \dot{y}_1 = (\dot{y}_1)_1, \\ y_2 &= (y_2)_1, \quad \dot{y}_2 = (\dot{y}_2)_1, \end{aligned}$$

де $(y_3)_1$ – переміщення маси m_3 в кінці першого етапу; $(\dot{y}_3)_1, (\dot{y}_1)_1, (\dot{y}_2)_1$ – швидкості мас m_3, m_1 і m_2 кінці першого етапу.

При досягненні зусилля у поліспастовому підвісі величини спрацьовування фрикціона починається третій етап руху мас. В цей час зусилля у поліспастовому підвісі обмежується силами тертя фрикціона.

Умова переходу від другого етапу до третього

$$S = F_4.$$

Рівняння, що описують рух мас на третьому етапі мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} m_3 \ddot{y}_3 + c_3 y_3 - c(y_2 - y_3 - y_4 - y_1) &= 0; \\ m_1 \ddot{y}_1 + \beta \dot{y}_1 - c(y_2 - y_3 - y_4 - y_1) &= P_0; \\ m_4 \ddot{y}_4 - c(y_2 - y_3 - y_4 - y_1) &= -kG; \\ m_2 \ddot{y}_2 + c(y_2 - y_3 - y_4 - y_1) &= G. \end{aligned} \right\}$$

Зусилля в поліспастовому підвісі визначається за формулою

$$S = c(y_2 - y_3 - y_4 - y_1).$$

Початкові умови для третього етапу

$$\begin{aligned} t_3 = 0, \quad y_3 &= (y_3)_2, \quad \dot{y}_3 = (\dot{y}_3)_2, \\ y_1 &= (y_1)_2, \quad \dot{y}_1 = (\dot{y}_1)_2, \\ y_2 &= (y_2)_2, \quad \dot{y}_2 = (\dot{y}_2)_2, \\ y_4 &= 0, \quad \dot{y}_4 = 0. \end{aligned}$$

Четвертий етап починається після зупинки рухомих частин фрикціону і відбуваються пружні коливання мас.

Умова переходу до етапу, на якому відбувається рух мас після вимикання фрикціону з роботи

$$\dot{y}_4 = 0.$$

Рух мас на четвертому етапі описується системою рівнянь (1). Зусилля, що діє на поліспастовий підвіс, визначається за формулою (2).

Початкові умови для четвертого етапу

$$\begin{aligned}
 t_4 = 0, \quad y_3 = (y_3)_3, \quad \dot{y}_3 = (\dot{y}_3)_3, \\
 y_1 = (y_1)_3, \quad \dot{y}_1 = (\dot{y}_1)_3, \\
 y_2 = (y_2)_3 - (y_4)_3, \quad \dot{y}_2 = (\dot{y}_2)_3.
 \end{aligned}$$

Математична модель реалізована у формі програми для ЕОМ з використанням розв'язання рівнянь методом Рунге-Кутта 4-го порядку.

Результати обчислювальних експериментів для мостового крана вантажопідйомністю 20 т приведені на рис. 2 у вигляді графіків залежностей зусиль у поліспастовому підвісі й у металоконструкції від часу: $S(t)$ і $F(t)$.

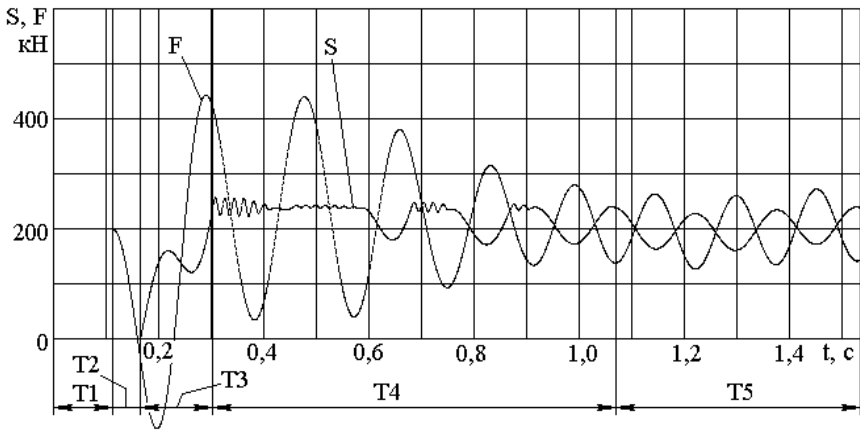


Рис. 2. Графіки залежностей $F(t)$ і $S(t)$ для випадку обриву троса безпечного зведеного поліспасти при опусканні вантажу

На графіках ділянка T1 відповідає стану системи до обриву троса. Ділянка T2 показує стан системи під час вільного руху вантажу, коли зусилля у підвісі відсутнє, а металоконструкція здійснює пружні вільні коливання. На ділянці T3 показані зусилля у підвісі та металоконструкції під час зростання навантаження до моменту спрацювання фрикціону зрівняльного пристрою. Ділянка T4 відповідає етапу, на якому фрикціон поглинає енергію, що виникла під час вільного руху вантажу. На ділянці T5 показані зусилля у пружних зв'язках після виключення фрикціону з роботи.

Максимальне зусилля $S = 250$ кН, коефіцієнт динамічності 1,25. Максимальне зусилля $F = 450$ кН, коефіцієнт динамічності 2,25. У досліджуваній конструкції крана коефіцієнт запасу міцності троса 5.

Отже для нового неспрацьованого цілого троса коефіцієнт запасу міцності після відмови другого складе 2,5. Аналіз результатів свідчить про те, що застосування фрикціону з постійним опором у зрівняльному пристрої здвоєного поліспасти для даної конструкції крана дозволяє знизити динамічні навантаження на поліспастовий підвіс до величин, при яких коефіцієнт динамічності навантаження поліспастового підвісу менше існуючих запасів міцності троса. Однак розрахункові динамічні навантаження в металокопструкції крана виявляються такими, що величина коефіцієнту запасу міцності металокопструкції виявляється недостатньою для запобігання аварії крана. Запас міцності металокопструкції розглянутого крана, відповідно до вимог Регістра, 2,18. Тобто розрахункові напруження перевищать границі плинності матеріалу R_{eH} , що призведе до пластичних деформацій та втрати остійності копструкції.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

Забезпечення виключення руйнування металокопструкції вимагає подальших досліджень динамічних процесів у силовому ланцюзі крана після обриву троса вантажного поліспасти, та визначення необхідних законів опору руху зрівняльних елементів.

Отримані диференційні рівняння можна використовувати для створення графічної моделі перехідних процесів у силовому ланцюзі мостового крана при утриманні вантажу після обриву троса при опусканні вантажу за допомогою здвоєного підвісу з постійним опором фрикціону у зрівняльному пристрої.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Vickress D. J. Steel Wire Rope Failures Who Is Accountable? / 2013. URL: <https://www.maintworld.com/HSE/Steel-Wire-Rope-Failures-Who-Is-Accountable>.
2. Регістр судноплавства України. Правила щодо вантажопідіймальних пристроїв морських суден. Вид. 2026.
3. Jiao, Qq., Li, Bl., Qin, Yx. *et al.* Research on Dynamic Characteristics of Lifting Rope-Breaking for the Nuclear Power Crane. *J Fail. Anal. and Preven.* 21, 1220–1230 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11668-021-01154-2>
4. Torkar M., Arzenšek B. Failure of crane wire rope // *Engineering Failure Analysis.* 2002. Vol. 9. No. 2. P. 227–233. [https://doi.org/10.1016/S1350-6307\(01\)00016-3](https://doi.org/10.1016/S1350-6307(01)00016-3)

5. Mapelli C., Barella S. Failure analysis of a cableway rope // *Engineering Failure Analysis*. 2009. Vol. 16. No. 5. P. 1666–1673. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.12.011>
6. Mojallizadeh M. R., Brogliato B., Prieur C. Modeling and control of overhead cranes: A tutorial overview and perspectives // *Annual Reviews in Control*. 2023. Vol. 56. Art. 100877. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.03.002>.
7. Maghsoudi M., Ramli L., Sudin S., Mohamed Z., Husain A., Wahid H. Improved unity magnitude input shaping scheme for sway control of an underactuated 3D overhead crane with hoisting // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 123. P. 466–482. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.12.056>
8. Швачунов А.С., Дорохов Н.Ю. Проектування пристроїв, що запобігають аваріям вантажопідіймальних кранів у разі обриву каната // *УПА. Машинобудування: зб. наук. пр.* 2013. № 11. С. 76-81.
9. Дорохов М. Ю., Вовненко О. Є. Удосконалення конструкції механізму головного підйому ливарного крана, що запобігає падінню вантажу при обриві каната // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2018. № 2 (44). С.90 – 95. Режим доступу: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/ddma/Herald_2\(44\)_2018/article/19.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/ddma/Herald_2(44)_2018/article/19.pdf).
10. Стукаленко М. І., Стукаленко О. М., Василюк Д. І. Запобігання аварії мостового крана при обриві каната здвоєного поліспасти з балансиrom // *Вісник Одес. держ. акад. будівн. та архітект. Одеса*, 2019. Вип. 74. С. 67-74.