

УДК 621.867.2

DOI: 10.15276/pidtt.1.60.2019.08

Ткачук К. В., Суглобов В. В.

*Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»*

## ВИЗНАЧЕННЯ ВІТРОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ, ДІЮЧИХ НА МЕХАНІЗМ ЗМІНИ ВІЛЬОТУ СТІЛИ

**Анотація.** Розглянуті питання роботи механізму зміни вильоту стріли при динамічних навантаженнях від дії вітру різної інтенсивності. Досліджено залежність рухів стрілової системи та напрямку вітру на показники зусилля, діючого на зубчасту рейку механізму зміни вильоту. В роботі запропоновано методику розрахунку вітрових навантажень з урахуванням зміни пульсації вітру та вітрового тиску за висотою.

**Ключові слова:** стрілова система, зубчаста рейка, пульсація вітру, виліт стріли, статична складова, динамічна складова, момент, порталний кран.

**Вступ.** Експлуатація кранів в портах супроводжується додатковим вітровим навантаженням, яке впливає не тільки на роботу механізму пересування крана та механізму обертання, але й на механізм зміни вильоту стріли. Відомі методи [1-2] не дають цілісного підходу обліку і впливу вітрових навантажень на роботу кранів. Так, сербськими вченими [1] запропонована динамічна модель вітрових навантажень на металоконструкцію порталного крана в залежності від кута дії вітрового потоку та при певних положеннях стрілової системи. Але відсутність аналітичних залежностей вітрових навантажень від загальних координат руху кранових механізмів не дозволяє виконувати дослідження впливу на показники ефективності та працездатності кранів. В роботі Іваненка О. І. [2] вирішено проблему ідентифікації швидкості вітру, що дає змогу прогнозувати рух крана згідно з вітровими картами району. В зазначених роботах при розрахунках механізму зміни вильоту стріли не враховується складова вітрового навантаження, що спричиняє зменшенню надійності роботи кранових механізмів.

Авторами [3] було виконано аналіз діючих зусиль на рейку механізму зміни вильоту та встановлено, що сила від тиску вітру змінюється залежно від сполучення напрямків вітру й рухів стрілової системи.



Зміна положення стріли призводить до зміни положень інших ланок, які визначаються координатами хобота –  $\varphi_2, y_2$ ; відтяжки –  $\varphi_3$ ; противаги –  $\varphi_4$ ; вантажу –  $x_1$ . За рахунок сил інерції і сили власної ваги вантаж не тільки змінює своє положення, а й робить коливання у вертикальній площині [4, 11].

Кінетична енергія шарнірно-зчленованої стрілової системи складається з кінетичної енергії приводу механізму зміни вильоту  $T_o$ , стріли  $T_c$ , хобота  $T_x$ , відтяжки  $T_e$ , противаги  $T_n$ , вантажу  $T_{e.e}$ .

$$T = T_o + T_c + T_x + T_e + T_n + T_{e.e},$$

$$T = \frac{1}{2} J \cdot \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} J_1 \cdot \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} J_2 \cdot \dot{\varphi}_2^2 + \frac{1}{2} m_2 (x_2^2 + y_2^2) + \frac{1}{2} J_3 \cdot \dot{\varphi}_3^2 + \frac{1}{2} J_4 \cdot \dot{\varphi}_4^2 + \frac{1}{2} m \cdot x_1^2, \quad (1)$$

де  $J, J_1, J_2, J_3, J_4$  – моменти інерції щодо власних осей обертання ротора електродвигуна приводу механізму зміни вильоту, стріли, хобота, відтяжки, противаги,

$m, m_2$  – маси вантажу і хобота разом з контрхоботом,

$\dot{\varphi}_1, \dot{\alpha}, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3, \dot{\varphi}_4$  – кутові швидкості ротора електродвигуна, стріли, хобота, відтяжки, противаги,

$\dot{x}_2, \dot{y}_2, \dot{x}_1$  – складові лінійних швидкостей центрів мас хобота та вантажу.

Кутові та лінійні швидкості ланок шарнірно-зчленованої стрілової системи пов'язані з узагальненими координатами і швидкостями залежностями:

$$\dot{\varphi}_1 = \alpha \frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha}; \dot{\varphi}_2 = \alpha \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha}; \dot{\varphi}_3 = \alpha \frac{\partial \varphi_3}{\partial \alpha}; \dot{\varphi}_4 = \alpha \frac{\partial \varphi_4}{\partial \alpha}; \dot{x}_2 = \alpha \frac{\partial x_2}{\partial \alpha}; \dot{y}_2 = \alpha \frac{\partial y_2}{\partial \alpha}, \quad (2)$$

де  $\frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha}, \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha}, \frac{\partial \varphi_3}{\partial \alpha}, \frac{\partial \varphi_4}{\partial \alpha}, \frac{\partial x_2}{\partial \alpha}, \frac{\partial y_2}{\partial \alpha}$  – оператори передачі руху першого порядку.

Загальний момент інерції шарнірно-зчленованої стрілової системи без урахування вантажу:

$$J_{cc} = J \left( \frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha} \right)^2 + J_1 + J_2 \left( \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha} \right)^2 + m_2 \left( \left( \frac{\partial x_2}{\partial \alpha} \right)^2 + \left( \frac{\partial y_2}{\partial \alpha} \right)^2 \right) + J_3 \left( \frac{\partial \varphi_3}{\partial \alpha} \right)^2 + J_4 \left( \frac{\partial \varphi_4}{\partial \alpha} \right)^2 \quad (3)$$

Одною з найбільш навантажених ланок стрілової системи є зубчаста рейка приводного механізму. Зусилля в зубчастій рейці створюється силами і моментами сил інерції ланок:

$$F_{ин} = J \varphi_1 \frac{i}{R_d} + \frac{J_1 \ddot{\alpha} + m_2 y_2 \frac{\delta y_2}{\delta \alpha} + m_2 x_2 \frac{\delta x_2}{\delta \alpha} + J_2 \ddot{\varphi}_2 \frac{\delta \varphi_2}{\delta \alpha} + J_3 \ddot{\varphi}_3 \frac{\delta \varphi_3}{\delta \alpha} + J_4 \ddot{\varphi}_4 \frac{\delta \varphi_4}{\delta \alpha} + m \ddot{y}_1 \frac{\delta y_1}{\delta \alpha} + m \ddot{x}_1 \frac{\delta x_1}{\delta \alpha}}{\frac{\delta L_2}{\delta \alpha}}, \quad (4)$$

де  $\ddot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_2, \ddot{\varphi}_3, \ddot{\varphi}_4$  – кутове прискорення ротора електродвигуна, хобота, відтяжки, противаги;  $\ddot{y}_2, \ddot{y}_1$  – вертикальне прискорення

відповідно центру мас хобота і вантажу;  $\ddot{x}_2, \ddot{x}_1$  – горизонтальне прискорення відповідно центру мас хобота і вантажу;  $i$  – передатне число приводу механізму зміни вильоту,  $R_d$  – радіус ділильного кола приводної шестерні механізму зміни вильоту;  $L_2$  – робоча частина зубчастої рейки.

Крім того, на зусилля в зубчастій рейці впливають: сила від неврівноваженого вантажного моменту, сила від неврівноваженого стрілового моменту, сила від тиску вітру на стрілову систему, сила від ваги вантажу при відхиленні канатів від вертикалі.

Проаналізуємо вплив сили від тиску вітру на механізм зміни вильоту стріли та визначимо шляхи зменшення сумарної сили в зубчастій рейці для зменшення потужності привода.

Для цього побудуємо розрахункову схему дії вітрового зусилля (рис. 2).

На схемі позначені ланки та відстані, значення яких суттєво впливають на розрахунки вітрового навантаження.

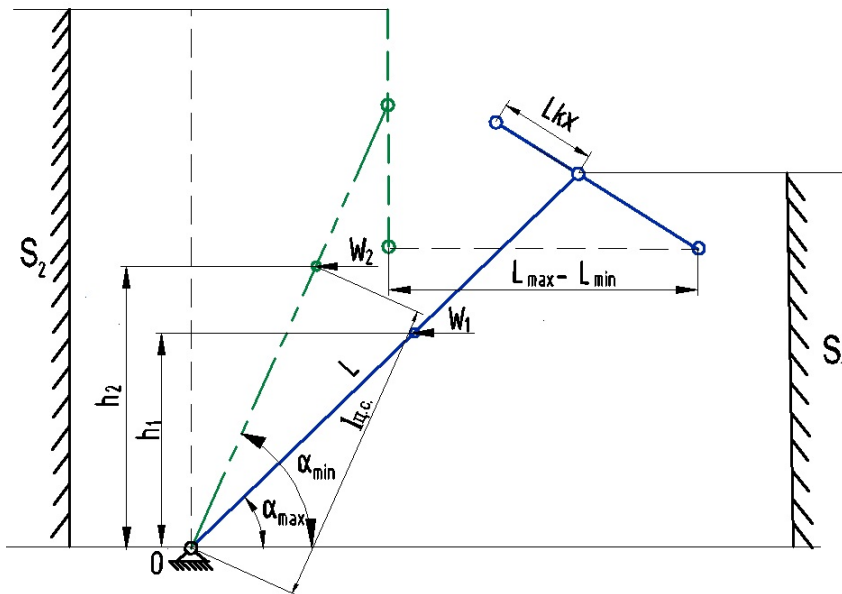


Рисунок 2 – Схема визначення вітрового зусилля на стрілову систему порталного крана

До них належить:  $\alpha_{max}$  – кут нахилу стріли при максимальному вильоті,  $\alpha_{min}$  – кут нахилу стріли при мінімальному вильоті,  $L$  – довжина стріли,  $l_{ц.с.}$  – відстань до центру ваги стрілової системи,  $L_{max} - L_{min}$  – різниця максимального вильоту стріли та мінімального,  $L_{кx}$  – довжина контрхоботу,  $h_1, h_2$  – плече дії рівнодіючої сили тиску вітру, що створює момент при максимальному вильоті та при мінімальному вильоті відповідно,  $S_1, S_2$  – вертикальна проекція навітряної площі стрілової системи при максимальному вильоті та при мінімальному

вильоті відповідно,  $W_1, W_2$  – рівнодіюча сила вітрового навантаження на стрілову систему при максимальному вильоті та при мінімальному вильоті відповідно.

Визначимо статичну складову вітрового навантаження на стрілу:

- для максимального вильоту  $L_{\max}$  :

$$W_1 = W_o \cdot S_1, \quad (5)$$

- для мінімального вильоту  $L_{\min}$  :

$$W_2 = W_o \cdot S_2, \quad (6)$$

де  $W_o$  - розподілений тиск вітру в даній зоні висоти

$$W_o = q \cdot k \cdot c \cdot n, \quad (7)$$

де  $q$  - динамічний тиск (залежить від швидкості вітру),  $k = 1, 2, 5 \dots 1, 75$  - коефіцієнт, що враховує зміну тиску за висотою,  $c = 1, 2$  - коефіцієнт аеродинамічної сили,  $n = 1$  - коефіцієнт перевантаження.

Вертикальна проекція навітряної площі стрілової системи:

- для максимального вильоту  $L_{\max}$  :

$$S_1 = B \cdot L \cdot \sin \alpha_{\max} \quad (8)$$

- для мінімального вильоту  $L_{\min}$  :

$$S_2 = 1,4 B \cdot L \cdot \sin \alpha_{\min} \quad (9)$$

де  $B$  - усереднена ширина навітряної площі стріли.

Визначимо динамічну складову вітрового навантаження на стрілу:

- для максимального вильоту  $L_{\max}$  :

$$W^o_1 = W_1 \cdot k_1 \cdot \xi \cdot \zeta_1, \quad (10)$$

- для мінімального вильоту  $L_{\min}$  :

$$W^o_2 = W_2 \cdot k_2 \cdot \xi \cdot \zeta_2, \quad (11)$$

де  $k_1 = 1, 2, 5$  - коефіцієнт, що враховує зміну тиску за висотою для максимального вильоту,  $k_2 = 1, 75$  - коефіцієнт, що враховує зміну тиску за висотою для мінімального вильоту,  $\xi = 2, 5$  - коефіцієнт динамічності,  $\zeta_1, \zeta_2$  - коефіцієнт пульсації вітру при максимальному та мінімальному вильоті стріли відповідно.

## 2. Методика розрахунку динамічної складової вітрового навантаження

Для зручності розрахунків авторами запропонована методика визнаення динамічної складової вітрового навантаження, яка зроблена на платформі MS Excel. На рис. 3 представлено приклад розрахунку для стріли порталного крана (для хобота та відтяжки виконуються аналогічні операції, але з іншими конструктивними параметрами та коефіцієнтами).

Для шарнірно-зчленованої стрілової системи загальне зусилля

(9) від дії вітру визначається як сума максимальних значень статичної та динамічної складових вітрового навантаження на стрілу, хобот та відтяжку:

$$F_g = W_c^c + W_c^d + W_x^c + W_x^d + W_g^c + W_g^d, \quad (12)$$

де  $W_c^c, W_x^c, W_g^c, W_c^d, W_x^d, W_g^d$  - значення статичної та динамічної складової вітрового навантаження, діючих на стрілу, хобот, відтяжку відповідно.

Тоді момент, створений силою тиску вітру (рис. 4) визначається за формулою, яка будується автоматично в процесі комплексного автоматизованого синтезу [11-12]:

$$M_g = F_g \cdot l_{ц.с.} \cdot \sin \alpha + N_g \cdot r_g, \quad (13)$$

Розрахунок динамічної складової вітрового навантаження на стрілу				Довідкові дані			
<b>Вхідні дані</b>				Позначення	Значення	Од. виміру	
1	Коефіцієнт надійності за навантаженням	$\gamma_f =$	1,4	-			
2	Тип місцевості	См. прим.	A	-			
3	Вітровий район	См. прим.	V	-			
4	Еквівалентна висота над землею	$z_e =$	20	м			
5	Аеродинамічний коефіцієнт	$c =$	1,20	-			
6	Коефіцієнт кореляції пульсації вітру	$v =$	0,95	-			
7	Коефіцієнт динамічності	$\xi =$	2,50	-			
<b>Результати розрахунків</b>				Позначення	Значення	Од. виміру	
8	Нормативне значення вітрового тиску	$w_0 =$	60	кг/м <sup>2</sup>			
9	Швидкість вітру (довідкові дані)	$v_g =$	30,2	м/с			
10	Параметр	$k_{t0} =$	108,6	км/ч			
11	Параметр	$k_{t0} =$	1	-			
12	Параметр	$\alpha =$	0,25	-			
13	Параметр	$\zeta_{t0} =$	0,76	-			
14	Коефіцієнт, який враховує зміну вітрового тиску за висотою	$k(z_e) =$	1,25	-			
15	Коефіцієнт пульсації вітру	$\zeta(z_e) =$	0,64	-			
16	Нормативне значення середньої складової вітрового навантаження	$w_m =$	90,0	кг/м <sup>2</sup>			
17	Нормативне значення пульсаційної складової вітрового навантаження	$w_p =$	136,6	кг/м <sup>2</sup>			
18	Нормативне значення вітрового навантаження	$w =$	226,6	кг/м <sup>2</sup>			
19	Розрахункова вітрово навантаження на стрілу	$W =$	9,5	кН			

Рисунок 3 – Приклад розрахунку динамічної складової вітрового навантаження на стрілу

В роботі було визначено значення навантаження від тиску вітру, що діє на рейку механізму зміни вильоту при вильотах стріли 8, 10, 16, 22, 28 і 36 метрів, при різних напрямках вітру та при різних комбінаціях навантаження рейки (табл. 1).

Таблиця 1 – Значення сили від тиску вітру в рейці крана

Умови навантаження	Значення сил в кН при вильотах стріли, м					
	8	10	16	22	28	36
8→36→36→8←	152,1	149,58	130,81	79,07	95,36	22,7
36→8→8→36←	-152,1	-149,58	-130,81	-79,07	-95,36	-22,7

Аналіз виконаних розрахунків показав, що навантаження  $F_b$  від сили тиску вітру залежить від величини площі проекції на вертикальну площину навітряної поверхні стрілової системи, що визначається кутом нахилу стріли. У всіх випадках навантаження  $F_b$  буде мати максимальне значення при мінімальному вильоті стріли, а мінімальне значення – при максимальному вильоті.

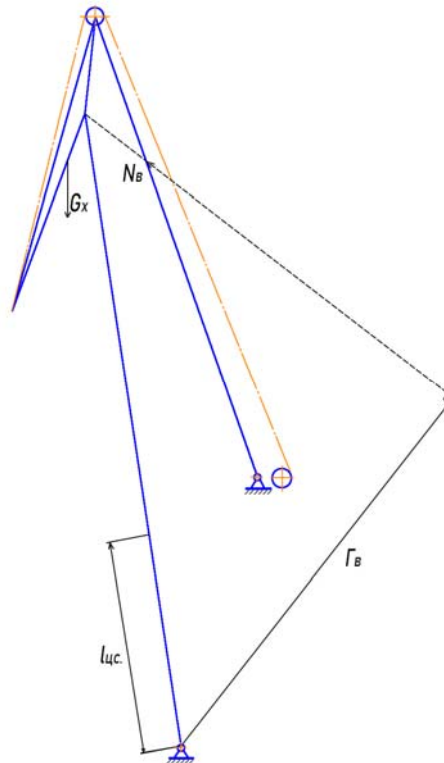


Рисунок 4 – Схема для визначення моментів від вітрового навантаження на шарнірно-зчленовану стрілову систему крана

Таким чином, одним із шляхів зниження навантаження на рейку механізму зміни вильоту й, тим самим, зменшення потужності привода, є зменшення моменту  $M_b$  від вітрового навантаження.

Вплинути на момент від вітрового навантаження  $M_b$  не можна без зменшення навітряної площі стрілової системи, що визначено конструкцією шарнірно-зчленованої стрілової системи. З огляду на пульсацію швидкості вітру й зміну його напрямку, нормами розрахунку кранів [13] регламентовано для визначення потужності



електродвигунів механізмів приймати середнє вітрове навантаження  $F_{el}$ , рівним  $F_{el} = 0,6 F_e$ , де  $F_e$  – максимальне навантаження в робочому стані.

ДСТУ 1451–77 також установлює, що вітрове навантаження, що враховується при визначенні потужності приводних двигунів кранових механізмів, не повинне перевищувати 70% від статичної складової вітрового навантаження. Це положення також повинне бути використане при визначенні вітрового моменту  $M_e$  й навантаження  $F_e$ , що діють на рейку механізму зміни вильоту, а також при визначенні потужності електродвигуна.

**Висновки.** В роботі встановлена сутність процесу роботи стрілової системи при різних вітрових навантаженнях, комбінаціях напрямків вітру та вильотів стріли. Складена розрахункова схема дії вітрових навантажень з урахуванням зміни швидкості вітру за висотою крана та пульсації вітру. Вперше запропонована методика розрахунку динамічної складової вітрового навантаження при різних умовах дії тиску вітру. Викладені розробки будуть використані для подальшого вивчення питань експлуатаційної надійності механізму зміни вильоту стріли та досліджень синтезу шарнірно-зчленованих систем порталних кранів.

### Список використаної літератури

1. Radoicic Goran. Dynamic response of heavy-lifting shipyard machines to resonant environmental load conditions / Goran Radoicic, Miomir Jovanovic // Facta Universitatis. Series: Working and Living Protection, Vol. 12, №3, 2015. – 341-358 p.

2. Іваненко, О. І. Дослідження руху вантажопідійомних кранів під дією вітрових навантажень / О. І. Іваненко, Л. О. Приходько // Підйомно-транспортна техніка: Наук.-техн. журн. – Одеса : ОНУ, ПТАНУ, 2016. – Вип. № 4 (52). – С. 72 – 77

3. Суглобов В. В. Оптимизация действующих нагрузок на механизм изменения вылета стрелы с целью снижения энергопотребления крана / В.В. Суглобов, В.А. Михеев, Е. В. Ткачук // Захист металургійних машин від поломок: міжвузівський тематичний зб. наук. пр.– Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2014. – Вип. №15. – С. 133 – 141.

4. Ловейкін, В. С. Исследование движущих сил в механизме изменения вылета стреловой системы крана / В. С. Ловейкин, Д. А. Паламарчук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини: Зб. наук. праць. – Київ: КНУБА, 2014. – № 84. – С. 39–45.

5. Vulfson I. Dynamics of cyclic machines. New York, Springer Publ., 2015. 390 p.



6. Ткачук, К. В. Обґрунтування раціональних конструктивних параметрів шарнірно-зчленованих стрілових систем порталних кранів : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.05/ Ткачук Катерина Володимирівна; Українська інженерно-педагогічна академія. – Харків, 2017. – 23 с.

7. Суглобов В. В. Пути повышения эксплуатационных качеств порталных кранов промышленного назначения на стадии проектирования / В.В. Суглобов, В.А. Михеев, Е. В. Ткачук // Підйомно-транспортна техніка: Науково-технічний та виробничий журнал. – Одеса: Одеський національний університет, Підйомно-транспортна академія наук України, 2013. – Вип. №2 (38). – С. 4 – 11.

8. Ловейкін, В. С. Режимно-параметрична оптимізація технічних систем / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич // Машинобудування: зб. наукових праць. – Харків: УПА, 2017. – № 19. – С. 90–95.

9. Коваленко, В. А. Пути повышения надёжности работы механизма изменения вылета порталных кранов / В. А. Коваленко, Д. О. Берников, А. Ф. Моисеенко // Машинобудування: Зб. наукових праць. – Харків: УПА. – №15, 2015. – С. 18 – 27

10. Суглобов В. В. Определение варьируемых конструктивных параметров уравнивающих устройств / В. В. Суглобов, С. В. Ракша, Е. В. Ткачук // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – Дніпро: Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 2018. – Вип. №4 (76). – С. 89 – 100.

11. Суглобов В. В. Определение конструктивных параметров шарнирно-сочленённых стреловых систем порталных кранов / В. В. Суглобов, Е. В. Ткачук // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – Дніпро: Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 2017. – Вип. №1 (67). – С. 157 – 167.

12. Ткачук К. В. Обґрунтування раціональних конструктивних параметрів шарнірно-зчленованих стрілових систем порталних кранів: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.05/ Ткачук Катерина Володимирівна. – ; Українська інженерно-педагогічна академія. – Харків, 2017. – 178 с.

13. ДБН В. 1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования / В. Н. Гордеев, М. А. Микитаренко, А. В. Перельмутер, А. В. Шимановский // ОАО «Украинский научно-исследовательский и проектный институт стальных конструкций им. В. Н. Шимановского, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. – Киев: Минстрой Украины, 2006. – 65 с.

---

## DETERMINATION OF WIND LOADS ACTING ON THE BOOM CHANGE MECHANISM

Tkachuk K. V., Suglobov V. V.  
*Pryazovskyi State Technical University*

**Annotation.** The issues of the mechanism of change in the departure of the stre-ly under dynamic loads from the action of wind of different intensity are considered. The dependence of the movement of the boom system and the direction of the wind on the indicators of the force acting on the gear rail of the departure change mechanism is investigated. In this paper, for the first time, a method for calculating wind loads is proposed, taking into account the change in wind pulsation and wind pressure altitude. It has been established that it is impossible to influence the moment from wind load without changing the windward area of the elements of the boom system. The proposed developments will be used for further study of the operational reliability of the mechanism for changing the luffing angle and studying the synthesis of the stream system of port cranes.

**Keywords:** boom system, rack rail, wind ripple, boom reach, static component, dynamic component, moment, gantry crane