

УДК 621.87

АНАЛІЗ ВПЛИВУ МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИВОДУ ПРИ ГАЛЬМУВАННІ НА ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ

Шевченко С.І., Полупан Є.В.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE DRIVE DURING BRAKING ON DYNAMIC LOADS

Shevchenko S., Polupan E.

У статті розглянуто результати теоретичного аналізу, впливу механічної характеристики механізму пересування мостового крану в процесі гальмування, на величину динамічного навантаження яке виникає в металоконструкції крана. Наведено приклад, моделювання процесу гальмування механізму пересування мостового крану, вантажопідйомністю 15 тонн. Розглянуто варіанти гальмування механізму пересування мостового крану стандартним колодковим гальмом, ступінчастим гальмуванням, гальмуванням противовключенням електродвигуна механізми пересування крану і комбіноване гальмування.

Ключові слова: мостовий кран, гальмівна характеристика, динамічні навантаження, процес гальмування, гальмівний момент.

Вступ. Мостові крани відносяться до машин підвищеної небезпеки, недотримання встановлених правил їх експлуатації і обслуговування спричиняє не тільки порушення виробничого і технологічного процесів, але приводить до серйозних аварій, матеріального збитку, а іноді до людських жертв. Одним з відповідальних вузлів механізмів крану, є автоматичні нормально закриті гальмові пристрої, тому що їм за короткі строки необхідно перетворювати кінетичну енергію механізму в теплову, без втрат своєї працездатності та стабільності гальмування. Найчастіше застосовувані автоматичні нормально закриті гальмові пристрої мають недоліки [1-3], що в значній мірі впливає на динамічні навантаження, які виникають в металоконструкції крану при гальмуванні [4-6].

Постановка проблеми. При експлуатації мостових кранів спостерігається виникнення залишкових деформацій і втомні тріщини, які накопичуються і розвиваються в металоконструкції крана. Однією з причин виникнення даного явища, є надто «жорсткі» характеристики перехідного процесу гальмування механізму пересування крану, які супроводжуються різким підвищенням додаткових динаміч-

них навантажень коливального характеру і негативно позначаються на весь робочий цикл крану. Одним з напрямків вирішення цього завдання, є використання раціональних параметрів перехідного процесу гальмування механізму пересування крану. У зв'язку з цим, дослідження впливу гальмівних характеристик механізму пересування крану на динамічні навантаження які виникають в його металоконструкції, є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз робіт [1-8] показав, що інерційні навантаження, що виникають у металоконструкції крана при гальмуванні механізму пересування, складаються з коливань вантажу всього на канатах і коливань головних балок металеві конструкції крана. Високочастотні коливання приводу не позначаються на низькочастотних коливаннях металоконструкції і вантажу. Тому дослідження процесу гальмування крану з достатньою для практичних розрахунків точністю, можна виконати на дискретній трьох масовій двох зв'язковій динамічній моделі (рис. 1), що враховує основні параметри реальної конструкції мостового крану. При моделюванні прийняті наступні допущення:

- вантаж розглядається як зосереджений, з масою в центрі ваги;
- гнучкий підвіс вантажу замінений пружним зв'язком з умовною горизонтальною жорсткістю (що приводить до підвищення навантажень на 4...5 %);
- зневажаємо зазорами в приводі механізму пересування крану (що приводить до зменшення навантажень на 2...5%);
- сила опору пересуванню у процесі гальмування не змінюється;
- пробуксовка коліс відсутня.

Відзначимо, що в даній моделі вантажний візок розташований у середині прольоту моста, тільки в цьому випадку горизонтальне інерційне навантаження в металоконструкції крана приймає максима-

льні значення. Використання такої розрахункової схеми виправдане, оскільки положення вантажного візка практично не впливає на відхилення вантажу від вертикалі, тому що частота його коливань суттєво нижче частоти пружних коливань металоконструкції і тривалості процесу гальмування, а рівень динамічних навантажень на металоконструкцію при переміщенні візка до кінцевих балок зменшується.

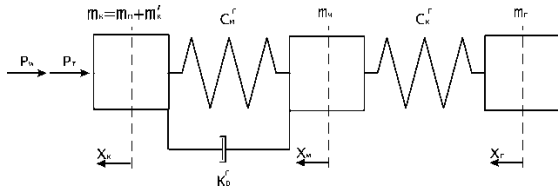


Рис. 1. Трьох масова двох зв'язкова динамічна модель

Мета статті. Мета роботи полягає в оцінці впливу гальмової характеристики механізму пересування крана, на величину максимального горизонтального інерційного навантаження виникаючого в металоконструкції головних балок і максимальну амплітуду відхилення вантажу від вертикалі.

Основний зміст. Процес гальмування крана складний і характеризується безліччю параметрів, визначні з яких є [1-8]: час гальмування t_T , величина максимального горизонтального інерційного навантаження на металоконструкцію P_m^{max} (характеризуюча динамічне навантаження), максимальна амплітуда відхилення вантажу від вертикалі після зупинки крана A^{max} . Зазначені параметри всебічно описують процес гальмування і багато в чому визначають експлуатаційні характеристики мостового крана. Величина P_m^{max} урахує як власні коливання металоконструкції, так і коливання вантажу і безпосередньо впливає на надійність і довговічність металоконструкції крана. Максимальна амплітуда A^{max} характеризує оброблюваність вантажу і пов'язана з необхідною точністю зупинки крана, а разом із часом гальмування t_T впливає на тривалість робочого циклу.

Рух, представленої на рисунку 1 динамічної моделі крана, описується системою диференціальних рівнянь [1]:

$$\begin{cases} m_k \cdot \ddot{x}_k + k_D^2 \cdot (\dot{x}_k - \dot{x}_m) + \\ + C_M^2 \cdot (x_k - x_m) + P_2 + P_w = 0 \\ m_m \cdot \ddot{x}_m - k_D^2 \cdot (\dot{x}_k - \dot{x}_m) - \\ - C_M^2 \cdot (x_k - x_m) + C_K^2 \cdot (x_m - x_z) = 0 \\ m_z \cdot \ddot{x}_z - C_K^2 \cdot (x_m - x_z) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Для того щоб оцінити вплив процесу гальмування на динамічні навантаження які виникають в металоконструкції крана, розглянемо гальмування механізму пересування крана по різних механічних

характеристиках, які забезпечуються: стандартним, ступінчастим, противовимкненням двигуна, змішаним гальмуванням. Як приклад, виконаємо моделювання процесу гальмування мостового крана загального призначення вантажопідйомністю $15/3$ т прольотом 26 м, виробництва заводу «Підійомник» ГОСТ3332-54, технічні характеристики і розрахункові значення якого представлені в таблиці 1. При моделюванні всі початкові умови процесу гальмування для різних механічних характеристик прийняті однаковими згідно таблиці. Інтегрування системи диференціальних рівнянь (1) виконувалося чисельним методом з використанням персонального комп'ютеру та програм Mathcad та Matlab. Для кожного варіанта методом Рунге-Кутта вирішувалася система рівнянь (1) з постійним кроком інтегрування рівним $0,0025$ с. На кожному кроці інтегрування обчислювалися поточні значення V_k , P_m і A для $t > 0$, які зрівнювалися з попередніми значеннями і більше значення записувалося. У результаті чисельного інтегрування системи рівнянь обчислюються значення параметрів V_k , P_m^{max} для $t > 0$, A^{max} для $t > t_T$, і t_T які характеризують один з варіантів гальмування крана по одній з механічних характеристик.

Таблиця

Характеристики мостового крана вантажопідйомністю 15 т прольотом 26 м ГОСТ3332-54

Технічна характеристика	Позначення	Числове значення
Вантажопідйомність, т	Q	15,000
Маса крана, т	m_{kp}	35,266
Проліт крана, м	L	26
Висота підйому вантажу, м	H	8
Потужність двигуна механізму пересування, кВт	N	7,5×2
Частота обертання ротора двигуна, хв^{-1}	n_d	695
Передатне відношення привода пересування	U_m	20,49
Радіус ходового колеса, м	r_{xk}	0,35
Номінальна швидкість пересування крана, м/с	V_k	1,26
Наведені маси, кг	m_k m_m m_z	21901 16962 15000
Коефіцієнти жорсткості, Н/м	c_m c_k	6237498 18393
Коефіцієнт демпфірування, Н·с/м	k_D^2	292
Опір пересуванню крана, кН	PW	9,228
Наведена до ходових коліс гальмова сила привода, кН	P_2	17,42

У результаті моделювання процесу гальмування шляхом рішення диференціальних рівнянь (1) при стандартному гальмуванні, з гальмівним моментом $M_T=175$ Н м, отримані графічні залежності перехідного процесу які представлені на рисунку 2. Наведена до поступального руху крана гальмова си-

ла привода при цьому дорівнювала $P_z=17,42$ кН, та визначалася по формулі:

$$P_z = \frac{M_T \cdot U_m \cdot \eta_m}{r_{xx}} \quad (2)$$

Аналіз отриманих графіків показує, що в результаті гальмування крана колодковим гальмом величина максимального горизонтального інерційного навантаження на металоконструкцію становить $P_m^{max}=31,22$ кН, максимальна амплітуда відхилення вантажу від вертикалі після зупинки крана $A^{max}=0,50$ м, при цьому гальмівний шлях $l_T=1,51$ м, та час гальмування $t_T=2,76$ с.

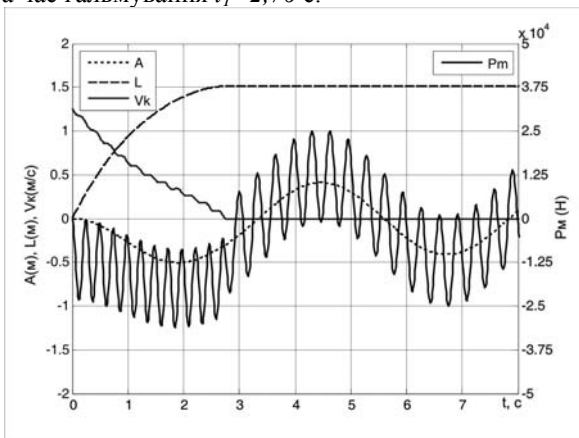


Рис. 2. Гальмування крана колодковим гальмом $M_T=350$ Н м

Графік гальмування крана за допомогою гальмових пристроїв, що забезпечують ступінчате гальмування, з оптимізованими параметрами механічної характеристики [9], представлений на рисунку 3. Гальмовий момент першої ступені для двох гальм $M_{T1}=160$ Н м (45% від номінального $M_T=350$ Н м) та час роботи першої ступені $t_1=1,6$ с.

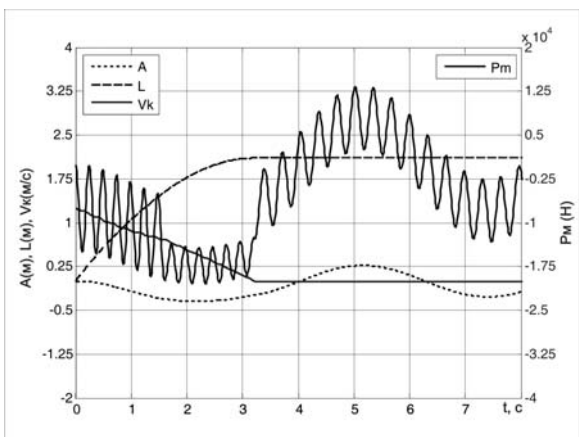


Рис. 3. Ступінчате гальмування крана $M_{T1}=160$ Н м, $t_1=1,6$ с, $M_T=350$ Н м

Наведена до поступального руху крана гальмова сила привода P_z в режимі ступінчатого гальмування описується рівнянням:

$$P_z = \begin{cases} P_{z1} = \frac{M_{T1} \cdot U_m \cdot \eta_m}{r_{xx}} & \text{при } t \leq t_1 \\ P_{z2} = \frac{M_T \cdot U_m \cdot \eta_m}{r_{xx}} & \text{при } t > t_1 \end{cases} \quad (3)$$

Внаслідок гальмування по даній механічній характеристиці отримані наступні значення: величина максимального горизонтального інерційного навантаження на металоконструкцію $P_m^{max}=20,51$ кН, максимальна амплітуда відхилення вантажу від вертикалі після зупинки крана $A^{max}=0,35$ м, гальмовий шлях $l_T=2,11$ м, при часі гальмування $t_T=3,23$ с.

Поряд з наведеними характеристиками гальмування, у практиці експлуатації мостових кранів досить широко використовується гальмування механізму пересування противовключенням електродвигуна, хоча даний вид гальмування не рекомендується. Механічна характеристика привода пересування в режимах противовключення, залежить від встановленого на приводі електродвигуна. У нашому випадку встановлений електродвигун МТ-311-8, із кратністю максимального моменту $\lambda_k=2,5$, максимальним моментом $M_k=265$ Н м, і синхронною частотою обертання ротора двигуна $n_0=750$ хв⁻¹. Рівняння наведеної гальмівної сили привода в режимі противовключення, має вигляд:

$$P_z(M_k, S_{kq}, V_k') = \frac{2 \cdot M_k \cdot S_{kq} \cdot V_0 \cdot U_m \cdot \eta_m}{r_{xx} \cdot \left((V_0 + V_k') + \frac{S_{kq}^2 \cdot V_0^2}{V_0 + V_k'} \right)} \quad (4)$$

де S_{kq} – критичне ковзання на q -ій механічній характеристиці;

V_0 – швидкість пересування крана, відповідно до синхронної частоти обертання ротора двигуна, м/с;

V_k – поточне значення швидкості пересування крана, м/с.

Номінальне ковзання при гальмовому режимі визначається за виразом:

$$S_H = \frac{n_0 - n_d}{n_0}$$

Тоді згідно [10], критичне ковзання:

$$S_{kq} = S_H \cdot \left(\lambda_k + \sqrt{\lambda_k^2 - 1} \right)$$

Швидкість пересування крана, відповідна до синхронної частоти обертання ротора двигуна, визначається по формулі:

$$V_0 = \frac{V_k \cdot n_0}{n_d}$$

Розраховані механічні характеристики привода пересування крана с електродвигуном МТ-311-8 у режимі гальмування противовключенням представ-

лені на рисунку 4. Гальмування протиковключенням здійснюємо по шостій механічній характеристиці, тому що вона найбільше близько підходить по величині до наведеної до ходових коліс гальмівної сили привода $P_z=17,42$ кН, і становить $P_z=16,92$ кН. Критичне ковзання на даній механічній характеристиці дорівнює $S_{к6}=0,363$, а швидкість пересування крана, відповідна до синхронної частоти обертання ротора двигуна $V_0=1,36$ м/с.

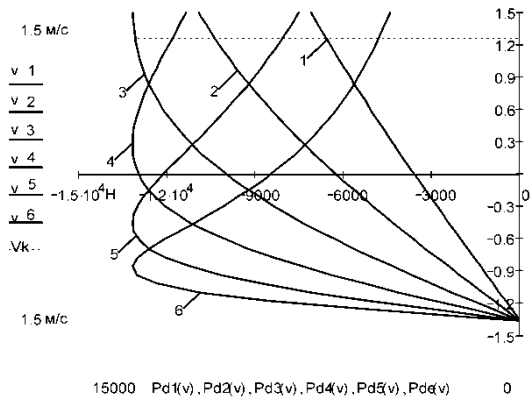


Рис. 4. Механічні характеристики приводу в режимі гальмування протиковключенням

У результаті розрахунків системи диференціальних рівнянь з урахуванням наведеної гальмівної сили привода в режимі протиковключення отримані графіки перехідного процесу гальмування (рис. 5).

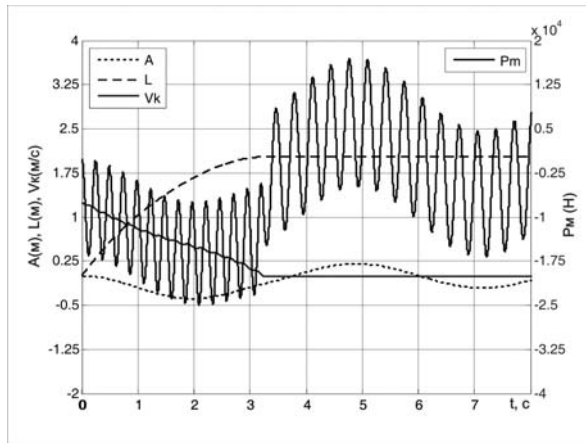


Рис. 5. Гальмування протиковключенням по механічній характеристиці $S_{к6}=0,363$, $P_z=16,92$ кН

Аналіз представлених графіків показує, що в результаті гальмування механізму пересування крана протиковключенням збільшується величина максимального горизонтального інерційного навантаження на металоконструкцію $P_m^{max}=24,97$ кН та час гальмування $t_T=3,24$ с а гальмівний шлях $l_T=2,02$ м, і максимальна амплітуда відхилення вантажу від вертикалі після зупинки крана $A^{max}=0,31$ м зменшується в порівнянні зі ступінчастим гальмуванням. Однак слід зазначити, що наведена гальмова сила привода в даному режимі гальмування менше ніж розрахун-

кова на 500 Н, а також гальмування протиковключенням не рекомендується і пов'язане зі значними енерговитратами.

При комбінованому гальмуванні, гальмування крану здійснюється у два етапи. На першому етапі гальмування здійснюється протиковключенням електродвигуна, що створює найкращі умови динамічного навантаження металоконструкції і елементів приводу, а далі, при досягненні краном певної зниженої швидкості V_c , двигун відключається, і спрацьовують колодкові гальма (з гальмівним моментом M_T) до повної зупинки крана. У цьому випадку, після зупинки крана, величина наведена до ходових коліс гальмівної сили привода буде рівна $P_z=17,42$ кН. Наведена до поступального руху крана гальмівна сила привода P_z в даному режимі запишеться у вигляді:

$$P_z(M_k, S_k, V_k) = \begin{cases} \frac{2 \cdot M_k \cdot S_{kq} \cdot V_0 \cdot U_m \cdot \eta_m}{r_{хк} \cdot \left((V_0 + V_k') + \frac{S_{kq}^2 \cdot V_0^2}{V_0 + V_k'} \right)} \text{ при } V_k' > V_c \\ \frac{M_T \cdot U_m \cdot \eta_m}{r_{хк}} \text{ при } V_k' \leq V_c \end{cases} \quad (5)$$

Провівши додаткові дослідження, знаходимо, що найбільш раціональне комбіноване гальмування, реалізується, на першому етапі по першій механічній характеристиці $S_{к1}=7,184$, на другому – стандартними колодковими гальмами, відрегульованими на гальмівний момент $M_T=350$ Н·м. Час роботи першого етапу складає $t_1=1,7$ с. У результаті розрахунків отримані графічні залежності перехідного процесу комбінованого гальмування, представлені на рисунку 6.

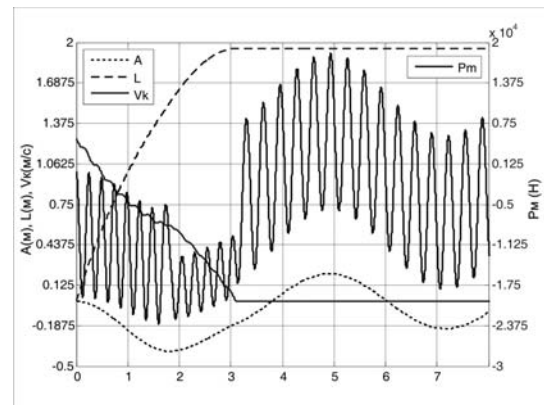


Рис. 6. Комбіноване гальмування протиковключенням та колодковим гальмом ($S_{к1}=7,184$, $t_1=1,7$ з $P_z=17,42$ кН)

При представленому виді гальмування отримані наступні значення: величина максимального горизонтального інерційного навантаження на металоконструкцію $P_m^{max}=23,46$ кН, максимальна амплітуда відхилення вантажу від вертикалі після зупин-

ки крана $A^{max}=0,39$ м, гальмовий шлях $l_T=1,95$ м, при часі гальмування $t_T=3,11$ с.

Висновок. У результаті аналізу процесу гальмування механізму пересування мостового крана по розглянутих варіантах (2-5), можна зробити наступні висновки:

- доведена можливість поліпшення техніко-експлуатаційних характеристик вантажопідійомних кранів що перебувають в експлуатації, шляхом раціонального керування приводу механізму пересування крана в гальмівних режимах;

- виконаний порівняльний аналіз різних способів гальмування (стандартного, динамічного, комбінованого і ступінчатого) показав доцільність розробки систем і гальмових пристроїв здатних забезпечувати різний характер зміни гальмівного моменту в процесі гальмування механізму пересування крана для створення раціонального гальмування;

- на прикладі визначено, що шляхом формування раціональної гальмівної характеристики привода пересування крана при ступінчатому гальмуванні, знижується величина горизонтального інерційного навантаження в середньому на 34%, з незначним збільшенням часу гальмування на 14% у порівнянні з гальмуванням, реалізованим стандартними колодковими гальмами. Слід також зазначити, що максимальна амплітуда відхилення вантажу від вертикалі після зупинки крана, також знижується на 30%, що дозволяє скоротити час обробки вантажу.

Л і т е р а т у р а

1. Будиков Л.Я. Многопараметрический анализ динамики грузоподъемных кранов мостового типа. – Луганск: Изд-во ВУГУ, 1997. – 210 с.
2. Гайдамака В.Ф. Работа грузоподъемных машин при бесступенчатом торможении. – Харьков: Вища школа, 1988. – 141 с.
3. Старченко В.Н., Шевченко С.И., Кобзева Л.И., Мушкаев Я.В., Игнатьев О.Л. Повышение эффективности работы мостового крана в процессе торможения // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля №5(123) 2008. – Луганськ: Вид-во СЧУ ім. В. Даля, 2008. – С. 112-117.
4. Dresig H., Vulfson J.I. Dynamik der Mechanismen. – Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1989. – 370 p.
5. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов. – М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
6. Dresig, H.; Holzweißig, F.: Maschinendynamik. 12. aktualisierte Auflage, Springer- Verlag Berlin – Heidelberg, Nov. 2016, ISBN 978-3-662-52712-2; ISBN 978-3-662-52713-9 (eBook)
7. Dresig, H.; Fidlín, A.: Schwingungen mechanischer Antriebssysteme (Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese). Springer Verlag Berlin-Heidelberg, 3. überarbeitete und erweiterte Auflage, Okt. 2014. ISBN 978-3-642-24116-1 ; ISBN 978-3-642-24117-8 (eBook)
8. Шевченко С.І. Підвищення ефективності роботи вантажопідіймальних кранів мостового типу. // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2017. - №3(233). – С.230-233.
9. Шевченко С.И. Снижение динамических нагрузок кранов мостового типа путем применения тормозных

устройств с самоусилением // Научно-технический та виробничий журнал "Підійомно-транспортна техніка" №4 2008. – Дніпропетровськ: Вид-во ДІПТ, 2008. – С. 38-46.

10. Автоматизированный электропривод/ Под общ. ред. Н. Ф Ильинского, М.Г. Юнькова. - М.: Энергоатомиздат, 1990. – 544 с.

R e f e r e n c e s

1. Budikov L.Ya. Multiple parameter analysis of dynamics of load-lifting cranes of bridge type. – Lugansk: Look-in the EUGU, 1997. – 210 p.
2. Gaydamaka V. F. Operation of load-lifting machines at stepless braking. – Kharkiv: Vishcha school, 1988. – 141p.
3. Starchenko V. N., Shevchenko S. I., Kobzeva L. I., Mushkayev Ya. V., Ignatyev O. L. Increase in overall performance of the bridge crane in the course of braking//Vesnik Of Volodymyr Dal East Ukrainian National University No. 5(123) 2008. – Lugansk: Look-in the EUNU of. V. Dahl, 2008. – P. 112-117.
4. Dresig H., Vulfson J.I. Dynamik der Mechanismen. – Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1989. – 370 p.
5. Lobov N. A. Dynamics of load-lifting cranes. – M.: Mechanical engineering, 1987. – 160 p.
6. Dresig, H.; Holzweißig, F.: Maschinendynamik. 12. aktualisierte Auflage, Springer- Verlag Berlin – Heidelberg, Nov. 2016, ISBN 978-3-662-52712-2; ISBN 978-3-662-52713-9 (eBook)
7. Dresig, H.; Fidlín, A.: Schwingungen mechanischer Antriebssysteme (Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese). Springer Verlag Berlin-Heidelberg, 3. überarbeitete und erweiterte Auflage, Okt. 2014. ISBN 978-3-642-24116-1 ; ISBN 978-3-642-24117-8 (eBook)
8. Shevchenko S.I. Improvement of the efficiency of the vantezohid-lifting cranes of the bridge type. //Vesnik Of Volodymyr Dal East Ukrainian National University No 3 (233) 2017. – Severodonetsk: Look-in the EUNU of. V. Dahl, 2017. - P.230-233.
9. Shevchenko S. I. Decrease in dynamic loadings of cranes of bridge type by use of brake mechanisms with self-strengthening//Naukovo-tekhn_chny that the virobnychi magazine "Podyomno-transportna of a Tekhnik" No. 4 2008. – Dnepropetrovsk: Look-in DІПТ, 2008. – P. 38-46.
10. Automated electric drive / Under the general. edit N.F Il'inskogo, M.G. Yunkova - Moscow: Energoatomizdat, 1990. - 544 p.

Шевченко С.И., Полупан Е.В. Анализ влияния механической характеристики привода при торможении на динамические нагрузки.

В статье приведены результаты теоретического анализа, влияния процесса торможения механизма передвижения крана мостового типа, на величину горизонтальных инерционных нагрузок возникающих в главных балках и максимальную амплитуду раскачивания груза. В работе выполнен пример, моделирование процесса торможения механизма передвижения крана, грузоподъемностью 15 тонн по различным механическим характеристикам. Рассмотрены варианты торможения: стандартным нормально замкнутым тормозом, ступенчатым тормозом, торможение противовключением электродвигателя механизма передвижения и комбинированное.

Ключевые слова: крана мостового типа, процесс торможения механизма передвижения, динамические

нагрузки в металлоконструкции крана, тормозной момент, время торможения крана.

Shevchenko S., Polupan E. Analysis of the influence of the mechanical characteristics of the drive during braking on dynamic loads.

The article discusses the results of a theoretical analysis of the influence of the mechanical characteristics of the bridge crane movement mechanism in the process of braking, on the magnitude of the dynamic load arising in the metal structures of the crane bridge. An example is given of the modeling of the braking process of the bridge crane movement mechanism, with a lifting capacity of 15 tons. The options for braking the movement mechanism of a bridge crane with a standard shoe brake, stepped braking, braking by the anti-switching of the motor of the moving mechanism and combined braking are considered. The evaluation of the considered methods of braking the mechanism of movement of the crane, taking into account the basic parameters of the transition process: the braking time; the magnitude of the maximum horizontal inertial

load in the metal; maximum amplitude of deviation of the load from the vertical after stopping the bridge crane. Using the example, it was determined that by forming a rational braking characteristic of the crane movement drive, it is possible to reduce the horizontal inertial load and reduce the maximum amplitude of load deviation from the vertical after the crane stops, with a slight increase in braking time.

Keywords: *the bridge crane, dynamic loadings, process of braking, the brake momen., braking torque, time of braking of the bridge crane*

Полупан Е.В. – к.т.н., доц. кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» СНУ ім. В. Даля, м. Северодонецьк.

Рецензент: д.т.н., проф. **Чернецька-Білецька Н.Б.**

Стаття подана 10.04.2019