

УДК 621.874

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.1.188

## ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ, ЯКІ ВИНИКАЮТЬ У ГОЛОВНІЙ БАЛЦІ МОСТОВОГО КРАНА

Фідровська Н. М.<sup>1</sup>, Чернишенко О. В.<sup>2</sup>, Превозник І. А.<sup>2</sup>, Нестеренко В. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

<sup>2</sup>Українська інженерно-педагогічна академія

<sup>3</sup>Первомайська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

*Анотація.* Досліджено коливальні процеси, які виникають в головній балці мостового крана під час пересування вздовж мосту вантажного візка. Були здійснені розрахунки, враховуючи жорсткість перерізу та інтенсивність розподілення маси головної балки.

*Ключеві слова:* балка, рейка, колесо, прогін, частота коливання, міст, кран, візок, жорсткість.

### Вступ

Коливальні процеси мають дуже важливе значення для машин. Для мостових кранів несні металокопункції є пружними системами з безкінечною кількістю вільності. Їхнє коливання описується диференціальним рівнянням у часткових похідних. У цьому випадку виникають певні складності під час вирішення завдань щодо сумісної роботи моста та кранових механізмів.

Для вантажопідйомних машин проблема впливу динамічних навантажень є актуальною, оскільки типовою особливістю цих машин є значні навантаження на механізми від ваги вантажу, що піднімається, власної ваги металокопункції, а також малі швидкості руху механізмів, гнучкий підвіс вантажу та значні ударні навантаження.

Це визначає важливість динамічних розрахунків, без яких неможливе створення машин з високими техніко-економічними показниками.

### Мета і постановка завдання

Вантажопідйомні машини мають свої особливості, зокрема значні навантаження на механізми від ваги вантажу і власної ваги кранових металокопункцій, а також низькі швидкості руху механізмів. Крім того, для кранів характерна велика маса елементів, які рухаються, циклічна робота в процесі повторного режиму, гнучкий підвіс вантажу та значні ударні навантаження. Все це підвищує значення динамічних розрахунків під час проектування вантажопідйомних машин.

Здійснення динамічних розрахунків необхідне для вибору таких параметрів конструкцій, які дозволять зменшити динамічні

зусилля, а отже, зменшити зношення поверхонь, які труться, а також підвищити довготривалість металокопункцій і механізмів.

### Аналіз публікацій

Питання коливань механічних систем досліджували такі вчені, як С. П. Тимошенко [1], В. Д. Шевченко [2], В. Г. Піскунов [3], С. А. Казак [4], В. І. Сухінін [5], Н. А. Лобов [6], Я. Г. Пановко [7], J. J. Kalker [8], R. K. Alexejew [9], М. М. Гохбер [10], А. В. Вершинський [11] та інші.

Вантажопідйомна машина є єдиною динамічною системою, яка складається з механізмів, несної металокопункції, приводів, рейкового шляху та будівельних конструкцій, на яких працює кран. Врахувати в динамічних розрахунках всі взаємозв'язки елементів машини дуже складно, зокрема тому, що не всі фактори впливають на динамічні навантаження однаково.

Під час складання розрахункових динамічних схем зазвичай враховують маси елементів, пружну податливість силових елементів, залежність розгінних і гальмових зусиль двигунів від швидкості, змінення зусиль механічних гальм у часі, змінення зведених мас механізмів, залежність сил тертя від швидкості.

Розрахункова динамічна схема має задовольняти таким вимогам:

– вона має певною мірою бути адекватною реальній системі та відображати основні фізичні властивості системи, яка розраховується;

– система розрахування має бути не надто складною, щоб мати розв'язок динамічної задачі.

Ускладнення розрахункової схеми може бути виправдане спробою отримати новий розв'язок.

У розрахункових динамічних схемах для спрощення розрахункових рівнянь і співвідношень реальні параметри машин (маса, коефіцієнти жорсткості, податливості та демпфування, швидкості), а також зовнішні навантаження замінюють зведеними величинами.

Найбільша кількість ушкоджень металоконструкцій мостових кранів виникає внаслідок ударів ходових коліс через перекося та наявність стиків рейкових колій.

Якщо балка має рівний опір згинанню, то визначення її жорсткості на згинання здійснити досить просто. Але частіше застосовують балки зі ступінчастою зміною перерізу. Тоді прогін у таких балках може визначитися безпосереднім інтегруванням диференційного рівняння пружної лінії, або графоаналітичним методом з використанням аналогії Мора.

Визначення динамічних навантажень у металоконструкціях мостових кранів базуються на методиках М. М. Гохберга, Р. Е. Винограда, С. А. Казака та Н. А. Лобова.

#### Виклад основного матеріалу

У процесі пересування мостових кранів і вантажних візків виникають додаткові динамічні навантаження в рейках і кранових металоконструкціях, причиною яких є різноманітні геометричні відхилення рейкових шляхів і ходових коліс, зокрема поганий стан рейкових стиків, наявність вибоїн на рейках і поверхнях кочення ходових коліс, нерівності на бокових поверхнях рейок і на ребордах, вм'ятини, лиски, відхилення форми кранових ходових коліс тощо.

Якщо умовно прийняти, що маса балки, яка рівномірно розподілена вздовж всієї її довжини, зосереджена в трьох перерізах (всередині прольоту і двох крайніх опорах) [2] (рис. 1), то одержуємо систему з одним ступенем вільності, де  $M = \frac{ml}{2}$ .

Координати рухомої сили визначаються її швидкістю  $v$  та часом руху  $t$  від початку лівого боку балки.

Прогін балки в момент руху  $t$  від одиничної сили  $F = 1$

$$f(t) = F\xi(t).$$

Прогін балки буде викликати динамічна сила, яка з'являється в процесі пересування

ходових коліс вантажного візка рейкою. Якщо рейка спирається вздовж всієї довжини на масивний фундамент, то в перерізі рейки, що знаходиться на відстані  $x_1, x_2$  від тиску ходових коліс  $P_1, P_2$ , момент згинання визначиться за формулою [12]:

$$M = \frac{1}{4\beta} (P_1\varphi_1 + P_2\varphi_2 + \dots), \quad (1)$$

де

$$\varphi = e^{-\beta x_i} (\cos \beta x_i - \sin \beta x_i), \quad \beta = \sqrt[4]{\frac{kB}{4EI}},$$

де  $B$  – ширина подошви рейки,  $I, E$  – момент інерції і момент пружності рейки,  $K$  – модуль основи.

Тиск під подошвою рейки

$$P = \frac{\beta}{2B} (P_1\psi_1 + P_2\psi_2 + \dots). \quad (2)$$

Рівняння коливань системи буде мати такий вид:

$$\ddot{z} + \omega z = \frac{\beta}{2M} \left\{ P_1 e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) + P_2 e^{-\beta(x+a)} [\cos \beta(x+a) - \sin \beta(x+a)] \right\}, \quad (3)$$

де  $M$  – зосереджена маса,  $a$  – база крана,  $\omega$  – частота коливань.

Закон коливань буде мати вид

$$z = C_1 \cos wx + C_2 \sin wx + z_{\text{hast}}, \quad (4)$$

де

$$z_{\text{hast}} = A e^{-bx} (\cos dx - \sin dx); \quad (5)$$

$$A = \frac{\beta}{2M}; \quad b = \beta;$$

$$d = \sqrt{P_1 - P_2 e^{-\beta a} (\cos \beta a + \sin \beta a) - \beta^2 - \omega};$$

$$w = \sqrt{\omega}.$$

Власні коливання мають частоту

$$\omega = \sqrt{\frac{C}{M}} = \sqrt{\frac{96EJ}{ml^4}} = \frac{9,8}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}.$$

Коефіцієнти  $C_1, C_2$  знаходимо з початкових умов:

$$z = 0 \Big|_{x=0} \quad \text{і} \quad z = 0 \Big|_{x=l}.$$

Тоді одержуємо

$$C_1 = -\frac{\beta}{2M},$$

$$C_2 = -\frac{\beta [\cos \omega l + e^{-\beta l} (\cos dl - \sin dl)]}{2M \sin \omega l}.$$

Рівняння (4) можна записати як

$$z = -\frac{\beta}{2M} \left[ \cos \omega x + \frac{\cos \omega l + e^{-\beta l} (\cos dl - \sin dl)}{\sin \omega l} \times \right. \\ \left. \times \sin \omega x + e^{-\beta x} (\cos dx - \sin dx) \right]. \quad (6)$$

Якщо  $\omega l \rightarrow \frac{\pi}{2}$ , то маємо критичний резонансний режим.

### Висновки

Як демонструють розрахунки, резонансний режим коливальності залежить від характеристик балки, тобто її прогону, жорсткості перерізу та інтенсивності розподілення маси.

### Література

1. Тимошенко С. П. Устойчивость упругих систем. Москва: Гостехтеоретиздат, 1955.
2. Будівельна механіка металевих конструкцій дорожньо-будівельних, підйомних і транспортних машин: підручник / Пискунов В. Г. та ін. Київ: Вища школа, 2004. 438 с.
3. Расчет крановых конструкций методом конечных элементов / Пискунов В. Г. и др. Москва: Машиностроение, 1991. 240 с.
4. Казак С. А. Динамика мостовых кранов. Москва: Машиностроение, 1968. 332 с.
5. Сухінін В. І. Будівельна механіка та металеві конструкції будівельних і дорожніх машин. Київ: НМК ВО, 1992. 252 с.
6. Лобов Н. А. Динамика передвижения кранов по рельсовому пути. Москва: Из-во МГТУ, 2003. 232 с.
7. Пановко Я. Г., Губанова И. И. Устойчивость и колебания упругих систем. Москва: Наука, 1967. 420 с.
8. Kalker J. J. Review of wheel-mil milling contact theories. The general problem of milling contact. ASME. P.77–82.
9. Alexejev R. K. Statische elastische Wechselwirkung zwischen Fa hrantriebung Krantragwerk in Bruckenbau. Hebezeuge und Forberrnitel. 1973. № 13. Hef.4.

10. Гохберг М. М. Металлические конструкции. Москва: Машиностроение, 1989. 399 с.
11. Вершинский А. В., Гохберг М. М., Семенов В. П. Строительная механика и металлические конструкции. Ленинград: Машиностроение, 1984. 231 с.
12. Ковальский Б. С. Вопросы передвижения мостовых кранов. Луганск: ВГУ, 1998. 39 с.

### References

1. Timochenko S.P. Ustoychivost uprugich system. Moskva: Gostechteoretizdat, 1955.
2. Budivelnna mehanika metalovich konstrukciy dorozhno-budivelnich, pidyomnich i transportnich machin: pidruchnik / Piskunov V. G. ta in. Kiev: Vusha hkola, 2004. 428s.
3. Raschet kranovuh konstrukziy metodom konechnyh elementov / Pyskunov V. G. I dr. Moskva: Mashinostroenie, 1991. 240 s.
4. Kazak S. A. Dynamika mostovuh kranov. Moskva: Mashinostroenie, 1968. 332 s.
5. Suhinin V. I. Budivelnna mehanika ta metalevi konstrukzii budivelnuh i dorozhnikh mashin. Kiev: NKM VO, 1992. 252 s.
6. Lobov N. O. Dynamika peredvigeniya kranov po relsovomu puti. Moskva: Izdat. MGU, 2003. 232 s.
7. Panovko Y. G., Gubanova I. I. Ustoyshivost i kolebaniya uprugich system. Moskva: Nauka, 1967. 420 s.
8. Kalker J. J. Review of wheel-mil milling contact theories. The general problem of milling contact. ASME. P.77–82.
9. Alexejev R. K. Statische elastische Wechselwirkung swischen Fa hrantriebung Krantragwerk in Bruckenbau. Hebezeuge und Forberrnitel. 1973. № 13. Hef.4.
10. Gohberg M. M. Metalisheskie konstrukzii. Moskva: Mashinostroenie, 1989. 399s.
11. Verhinskiy A. V., Gohberg M. M., Semenov V. P. Stroitel'naya mehanika i matalicheskie konstrukzii. Leningrad: Machinostroenie, 1984. 231 s.
12. Kovalsky B. Voprosy peredvishenyay mostovych kranov. Lugansk: VGU, 1998. 39 s.

**Фідровська Наталія Миколаївна**<sup>1</sup>, д.т.н., професор, +380997905534, nfidrovskaya@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5248-273X

**Чернишенко Олександр Вячеславович**<sup>2</sup>, к.т.н., +30661666853, chernishen.alex@gmail.com ORCID: 0000-0003-3255-1088

**Презвоник Ігор Анатолійович**<sup>2</sup>, аспірант, +380501607060, igorperevoznuk1970@gmail.com ORCID: 0000-0002-4278-523X

**Нестеренко Вікторія Володимирівна**<sup>3</sup>, к.т.н., доцент, +380(067)976-81-74, [vik6462@ukr.net](mailto:vik6462@ukr.net)

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

<sup>2</sup>Українська інженерно-педагогічна академія

<sup>3</sup>Первомайська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

**Динамические нагрузки, возникающие в главной балке мостового крана**

**Анотація.** Установлено, что около 80 % отказов грузоподъемных машин связано с динамическими нагрузками, которые приводят к повышенному износу трущихся элементов, усталостному разрушению несущих металлоконструкций и деталей машин и появлению недопустимых остаточных деформаций. Это говорит о важности динамических расчетов, без которых невозможно создание машин с высокими технико-экономическими показателями. Вопросы уменьшения металлоемкости мостовых кранов является очень актуальным, поэтому уточнение методики расчетов металлоконструкции моста крана имеет важное значение. Динамические процессы, которые возникают в металлоконструкциях мостовых кранов, значительно увеличивают напряженное состояние балок и должно учитываться при расчетах. В статье рассмотрены вопросы колебаний в главной балке мостового крана, которые возникают при передвижении по мосту грузовой тележки. Условно принято, что масса, которая равномерно распределена по всей длине балки, сконцентрирована в трех точках, а именно в середине пролета и в двух крайних точках. Были проведены расчеты с учетом условий установки рельсового пути на мосту крана и закона распределения нагрузки от действия ходовых колес, которые передвигаются по главной балке моста мостового крана. При этом учтены характеристики балки, то есть ее пролет, жесткость сечения и интенсивность распределения массы. По результатам расчетов сделан вывод о влиянии характеристик балки на резонансный режим колебаний в главной балке.

**Ключевые слова:** балка, рельс, колесо, прогиб, частота колебаний, мост, кран, тележка, жесткость.

**Фидровская Наталья Николаевна**<sup>1</sup>, д.т.н., профессор, +380997905534, e-mail: nfidrovskaya@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5248-273X

**Чернышенко Александр Вячеславович**<sup>2</sup> к.т.н., +30661666853 e-mail: chernishen.alex@gmail.com ORCID: 0000-0003-3255-1088

**Превозник Игорь Анатоліевич**<sup>2</sup>, аспирант, +380501607060, e-mail: igorperevoznyk1970@gmail.com ORCID: 0000-0002-4278-523X

**Нестеренко Виктория Владимировна**<sup>3</sup>, к.т.н., доцент, +380(067)976-81-74, [vik6462@ukr.net](mailto:vik6462@ukr.net).

<sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

<sup>2</sup>Украинская инженерно-педагогическая академия

<sup>3</sup>Первомайский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова.

**The dynamic loads, which arise in main beam of bridge crane**

**Abstract.** Install, what about 80 % rejections of contemporary weight-lifting machines bond with dynamic loading, which bring to higher shabby surface of frictionless, tiredness destruction hardware and details of mechanism, appearance inadmissible residual strains. That witness about important dynamic calculations, without which impossible create of machines with elevated degree technique – economical index. The questions reduce hardware of bridge cranes are rather actual, therefore elaboration methods calculations of metallic constructions bridge of cranes have important meaning. The dynamic process which arise in metallic constructions of cranes considerable increase strain conditions of beams and due take into consideration at calculations. On the article consideration questions vibrations in main beam of bridge crane, which appears during the moving through the bridge of carry cart. It is taken as a condition, that mass which equally distributed on the whole of the length of the beam, is concentrated in three points, that are in the middle of a span and two border points. Follow the calculations with take into consideration conditionally placing of rail on crane bridge and the law distribution of loading from motion wheels which motion on beam. In this take into consideration characters of beam that is her span, hard of section and intensive distribution of mass in main beam. It is made a conclusion about the influence of characteristic of beam on the resonance regime of vibration.

**Key words:** beam, rail, wheel, bend, frequent of vibration, bridge, crane, cart, hard.

**Fidrovskaya Nataliia Mykolaivna**<sup>1</sup>, Doctor of technical sciences, Professor, +380997905534, e-mail: nfidrovskaya@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5248-273X

**Chernyshenko Oleksandr Viacheslavovych**<sup>2</sup> Associate professor, +30661666853, e-mail: chernishen.alex@gmail.com ORCID: 0000-0003-3255-1088

**Perevoznyk Ihor Anatoliiovych**<sup>2</sup>, postgraduate, +380501607060, e-mail: igorperevoznyk1970@gmail.com ORCID: 0000-0002-4278-523X

**Nesterenko Viktoriia**<sup>3</sup>, PhD, associate professor, tel. +380(067)976-81-74, [vik6462@ukr.net](mailto:vik6462@ukr.net).

<sup>1</sup>Kharkiv National Automobile and Road University

<sup>2</sup>Ukrainian Engineering Pedagogical Academy

<sup>3</sup>May Day branch of the National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov.