

УДК 621.86

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАГРУЖЕННОСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ МОСТОВОГО КРАНА ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ**

И.А. Лагереv

Брянский государственный университет имени академика И.Г.Петровского

Предложены математические модели и методика моделирования эксплуатационной нагруженности металлоконструкции мостового крана общего назначения в нормальных условиях эксплуатации. Рассмотрены вопросы подъема и опускания груза, передвижения грузовой тележки, передвижения крана вдоль пролета. Представлены результаты моделирования для действующего мостового крана.

*Ключевые слова:* мостовой кран, нагруженность, динамика, подъем груза, передвижение грузовой тележки, передвижение крана, компьютерное моделирование, имитационное моделирование.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых-кандидатов наук №МК-92.2014.8.

Сегодня в России эксплуатируется более 130000 мостовых кранов различного типа. По данным Ростехнадзора более 70% из них отработали нормативные сроки службы. Такие краны должны проходить регулярные обследования с целью обеспечения соответствия их технического состояния требованиям безопасности.

После истечения сверхнормативного срока службы кран должен быть немедленно выведен из эксплуатации. Далее экспертная комиссия оценивает возможность дальнейшей эксплуатации грузоподъемной машины. Если дальнейшая эксплуатация небезопасна или не целесообразна, то кран должен быть списан. В некоторых случаях возможен капитальный ремонт грузоподъемной машины с восстановлением показателей надежности. Если кран отвечает всем требованиям безопасности и находится в исправном состоянии, разрешается его дальнейшая эксплуатация и назначается остаточный срок службы или остаточный ресурс. В любом случае для принятия обоснованного решения требуется точная оценка нагруженности несущей металлоконструкции крана.

Под нагруженностью понимается состояние объекта, обусловленное внешними воздействиями и условиями функционирования. Для элементов металлоконструкции крана основными характеристиками нагруженности являются внешние нагрузки или напряжения в опасных зонах. В целом задача оценки нагруженности металлоконструкции мостового крана достаточно сложна в силу влияния на нее множества факторов и наличия множества режимов работы крана. На сегодняшний день существует несколько принципиально разных подходов к описанию нагруженности. Для решения данной задачи также применяются численные методы моделирования динамики механических систем.

В данной статье предложена методика моделирования эксплуатационной нагруженности металлоконструкции мостового крана общего назначения. При этом факторы нагруженности рассматриваются как случайные величины и определяются в ходе имитационного моделирования [1; 2]. Процесс изменения напряжений в металлоконструкции крана при конкретном сочетании факторов нагруженности исследуется в детерминированной постановке с использованием многомассовых динамических моделей [3 – 5].

Значения факторов нагруженности мостовых кранов общего назначения определяются с использованием подходов имитационного моделирования. Имитационное моделирование технологического процесса подъема и перемещения грузов в течение длительного интервала времени может выполняться с учетом расположения основного и вспомогательного технологического оборудования в пределах конкретного производственного участка или цеха. На основании анализа взаимосвязей между различными объектами модели производственного участка вычисляются параметры, выражающие распределение факторов нагруженности. Исходя из особенностей производства, можно выделить несколько вариантов представления параметров распределения. При работе крана с грузами, масса которых варьируется в широ-

ком диапазоне, строится блок распределения массы поднимаемого груза. При малом числе транспортируемых объектов и при отсутствии четкого распределения операций определяется частота повторения конкретных значений массы груза. Оба подхода могут комбинироваться. Параметры распределения определяются после обработки последовательности значений, полученных после серии вычислительных опытов. В каждом вычислительном опыте текущее значение генерируется случайным образом с учетом ранее полученных значений [1]. При моделировании факторов нагруженности металлоконструкции мостового крана, обслуживающего производственный процесс с четко заданной технологией, строятся две взаимосвязанные модели: сетевая имитационная модель и модель производственного участка [2].

Для определения сил, действующих на металлоконструкцию при выполнении краном различных технологических операций разработаны следующие динамические модели:

- модель подъема груза;
- модель опускания груза;
- модель передвижения моста;
- модель передвижения грузовой тележки.

Модель подъема груза с учетом люфта и переменной жесткости канатно-блочной системы, податливости подкрановой конструкции показана на рис. 1. Модель опускания груза имеет аналогичную структуру, только двигатель работает на торможение опускаемого груза.

Элементы данной модели имеют следующее обозначение:  $m_0$  – приведенная масса кранового моста, кг;  $m_1$  – приведенная масса электропривода, кг;  $m_2$  – масса груза, кг;  $m_3$  – приведенная масса подкрановой конструкции, кг;  $x_0, x_1, x_2, x_3$  – перемещения масс  $m_0, m_1, m_2, m_3$  соответственно, м;  $c_0$  – жесткость моста, Н/м;  $c_1$  – жесткость подъемного каната, Н/м;  $c_{II}$  – жесткость подкрановой конструкции, Н/м;  $\beta_0$  – коэффициент демпфирования моста, Нс/м;  $\beta_1$  – коэффициент демпфирования грузовой подвески (каната, полиспаста, грузозахватных органов), Нс/м;  $\beta_{II}$  – коэффициент демпфирования подкрановой конструкции, Нс/м;  $Q$  – вес груза, кг;  $P(\dot{x}_1)$  – приведенное движущее усилие привода механизма подъема, зависящее от скорости ротора электродвигателя, Н [5].

Процесс подъема груза делится на две стадии. Сначала груз неподвижно лежит на поверхности (доотрывная стадия), а потом происходит отрыв груза от основания и его перемещение вверх (послеотрывная стадия).

На доотрывной стадии происходит разгон электропривода, выбор люфтов в грузоподъемном механизме и постепенное натяжение грузового каната. При этом жесткость каната зависит от его натяжения  $S$ , т.е.  $c_1 = c_1(S)$  [3]. Динамика исследуемой системы на доотрывной стадии описывается зависимостями

$$\begin{cases} m_0 \ddot{x}_0 + c_0(x_0 - x_3) + \beta_0(\dot{x}_0 - \dot{x}_3) + c_1(S)(x_0 - x_1) + \beta_1(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) = 0, \\ m_1 \ddot{x}_1 - P(\dot{x}_1) + c_1(S)(x_1 - x_0) + \beta_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) = 0, \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_0(x_3 - x_0) + \beta_0(\dot{x}_3 - \dot{x}_0) + c_{II}x_3 + \beta_{II}\dot{x}_3 = 0. \end{cases}$$

Начальные условия для указанных выше уравнений

$$x_0(0) = 0, x_1(0) = 0, x_3(0) = 0, \dot{x}_0(0) = 0, \dot{x}_1(0) = v_0, \dot{x}_3(0) = 0,$$

где  $v_0$  – приведенная окружная скорость вала электродвигателя на холостом ходу, м/с.

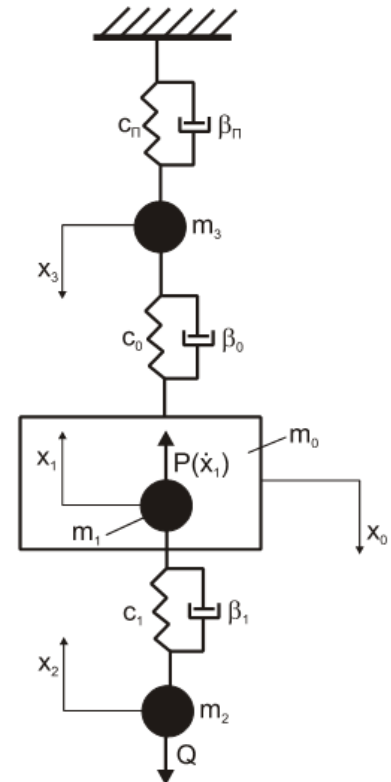


Рис. 1. Модель подъема (опускания) груза

Когда натяжение грузового каната становится равным весу груза ( $S = Q$ ), происходит отрыв груза от основания и его вертикальный подъем. При этом грузовой канат наматывается на барабан механизма подъема и его длина уменьшается пропорционально перемещению массы  $m_2$ , а жесткость каната постепенно растет  $c_1 = c_1(x_2)$  [5]. Динамика исследуемой системы на послеотрывной стадии описывается зависимостями

$$\begin{cases} m_0 \ddot{x}_0 + c_1(x_0 + x_2 - x_1) + \beta_1(\dot{x}_0 + \dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_0(x_0 - x_3) + \beta_0(\dot{x}_0 - \dot{x}_3) = 0, \\ m_1 \ddot{x}_1 + c_1(x_1 - x_0 - x_2) + \beta_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_0 - \dot{x}_2) - P(\dot{x}_1) = 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_1(x_0 + x_2 - x_1) + \beta_1(\dot{x}_0 + \dot{x}_2 - \dot{x}_1) + m_2 g = 0, \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_0(x_3 - x_0) + \beta_0(\dot{x}_3 - \dot{x}_0) + c_{II} x_3 + \beta_{II} \dot{x}_3 = 0. \end{cases}$$

Начальные условия для указанных выше уравнений

$$\begin{aligned} x_0(0) = x_0(t_{\text{отр}}), x_1(0) = x_1(t_{\text{отр}}), x_2(0) = 0, x_3(0) = x_3(t_{\text{отр}}), \\ \dot{x}_0(0) = \dot{x}_0(t_{\text{отр}}), \dot{x}_1(0) = \dot{x}_1(t_{\text{отр}}), \dot{x}_2(0) = 0, \dot{x}_3(0) = \dot{x}_3(t_{\text{отр}}), \end{aligned}$$

где  $t_{\text{отр}}$  – время отрыва груза с основания (определяется в ходе решения), с.

Результаты численного моделирования для крана грузоподъемностью 2 т, пролетом 7 м (параметры динамической модели:  $m_0 = 4460$  кг,  $m_1 = 126000$  кг,  $m_2 = 2000$  кг,  $c_0 = 19200$  кН/м,  $c_1 = 1720$  кН/м,  $\beta_0 = 4,66$  кНс/м,  $\beta_1 = 0,45$  кНс/м) и подкрановой конструкции, состоящей из стальных балок, приведены на рис. 2.

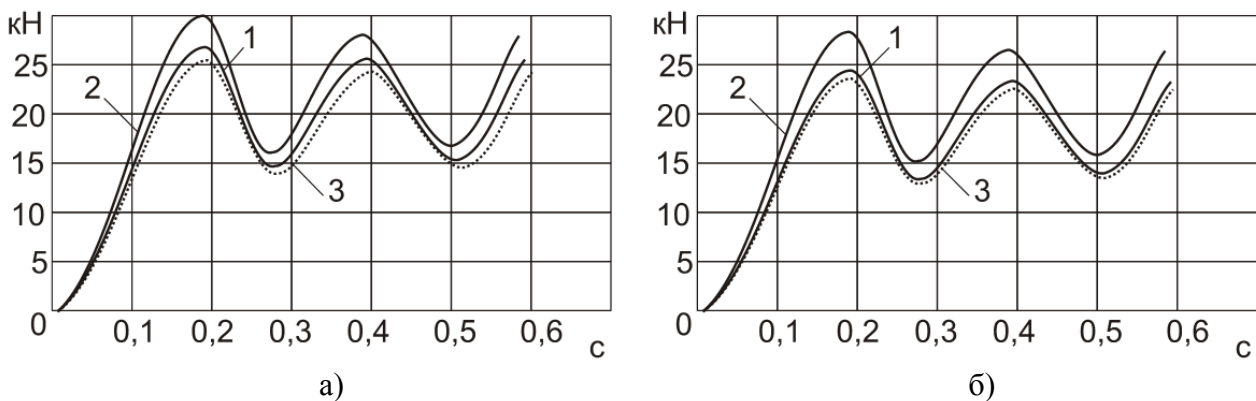


Рис. 2. Результаты моделирования подъема груза:  
 а – усилие в металлоконструкции крана; б – натяжение каната;  
 1 – с учетом динамики пути; 2 – без учета динамики пути;  
 3 – экспериментальные данные [3]

Для исследования вертикальной динамики при передвижении моста крана используется следующая модель (рис. 3). В данной модели не учитываются эффекты взаимодействия ходовых колес с рельсом, указанные в [4]. На ходовые колеса мостового крана действуют случайные кинематические возмущения со стороны подкранового рельса  $\xi_1(t)$  и  $\xi_2(t)$ . В ходе моделирования случайные реализации строятся для каждой стороны крана по алгоритму, описанному в [6]. Возмущение под приводным колесом в каждый момент определяется с учетом пройденного краном пути. Возмущение под не приводным колесом смещено по времени. Считаем, что динамический процесс в металлоконструкции начинается после трогания крана с места, когда кран движется по неровному пути.

На рис. 3 введены дополнительные обозначения элементов:  $m_6$  – приведенная масса концевой балки к опорному узлу, кг;  $m_{кб}$  – приведенная масса концевой и главной балок, кг;  $m_k$  – приведенная масса буксового узла и ходового колеса, кг;  $c_k$  – жесткость опорного узла, Н/м;  $\beta_k$  – коэффициент опорного узла, Нс/м.

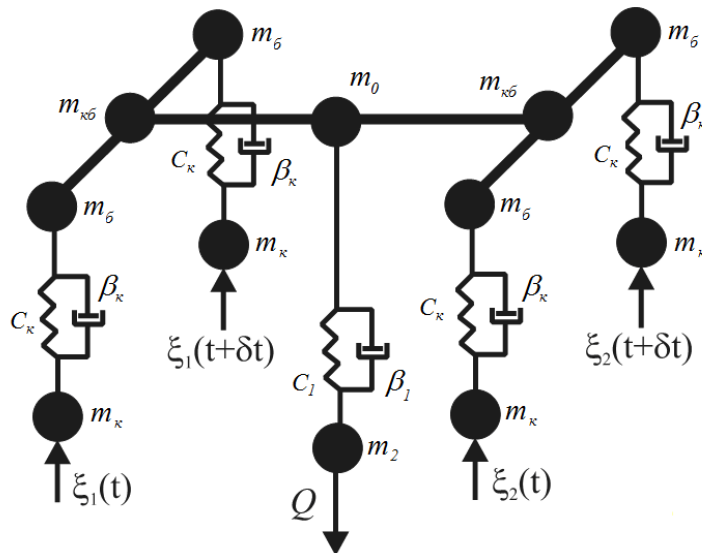


Рис. 3. Модель передвижения крана

Результаты моделирования для исследуемого крана показаны на рис. 4. Перемещение крана из-за неидеальности пути вызывает большие усилия в металлоконструкции, особенно в начале движения и при прохождении крана через стыки рельсов. Динамический процесс является многочастотным. Его многочастотность объясняется наличием различных частот в кинематическом возмущении.

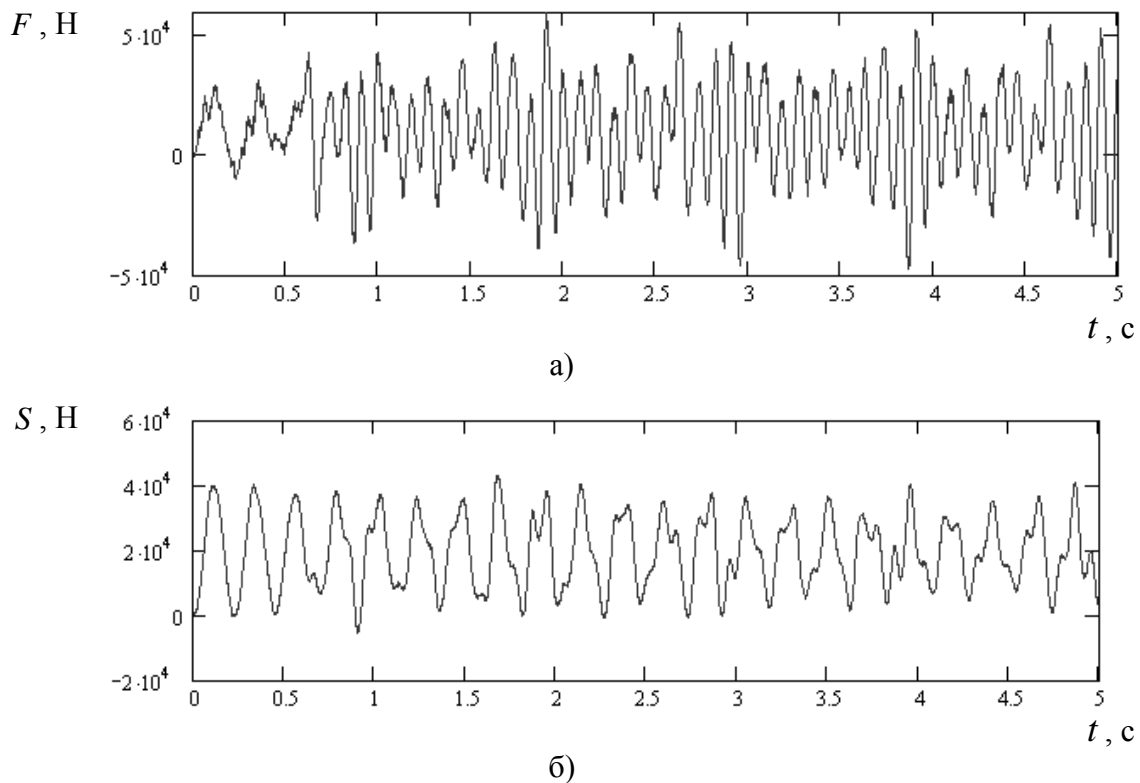


Рис. 4. Результаты моделирования передвижения моста:  
а – график изменения силы в мосту; б – график изменения силы в канате

Для исследования нагруженности при передвижении тележки использована известная итерационная методика [7; 8], на основании которой определяется динамический прогиб главной балки и максимальные напряжения.

С использованием разработанной компьютерной программы для исследуемого крана было получено семейство реализаций процесса изменения напряжений в опасных местах ме-

таллоконструкции. Всего смоделировано 100 реализаций, описывающих нагруженность исследуемого крана в течение года. Каждая реализация содержит примерно 1,9...2,3 млн. циклов изменения напряжений и описывает около 800 циклов работы крана. Фрагмент реализации приведен на рис. 5.

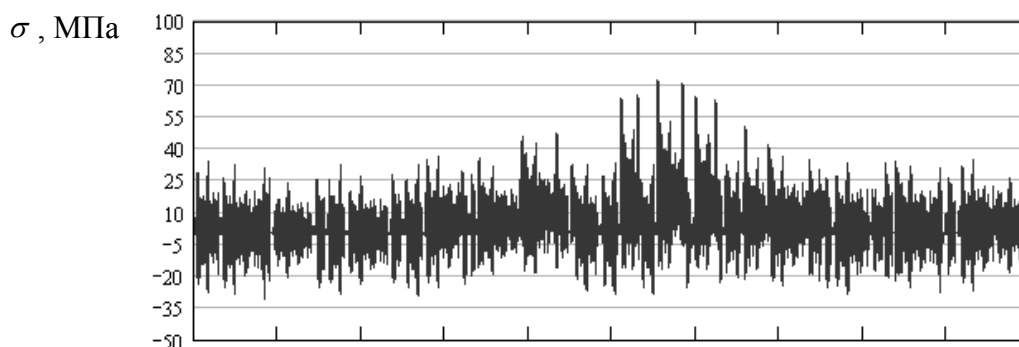


Рис. 5. Фрагмент реализации в центральном сечении главной балки

Разработанные модели и реализующие их прикладные компьютерные программы могут использоваться при проектировании и проведении экспертизы промышленной безопасности мостовых кранов общего назначения. Результаты работы внедрены в ООО «Промбезопасность» (г. Брянск).

#### Список литературы

1. Лагерев, И.А. Моделирование факторов нагруженности металлоконструкции мостового крана на основе сетевой имитационной модели / И.А. Лагерев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2010. – №2. – С. 74-81.
2. Лагерев, И.А. Имитационное моделирование факторов нагруженности металлоконструкции мостового крана / И.А. Лагерев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2009. – №4. – С. 65-70.
3. Лобов, Н.А. Динамика грузоподъемных кранов / Н.А. Лобов. – М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
4. Лобов, Н.А. Динамика передвижения кранов по рельсовому пути / Н.А. Лобов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 232 с.
5. Лагерев, И.А. Влияние подкрановой конструкции на динамическую нагруженность мостового крана / И.А. Лагерев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2011. – № 5-3. – С. 3-10.
6. Ушкалов, В.Ф. Статистическая динамика рельсовых экипажей / В.Ф. Ушкалов, Л.М. Резников, С.Ф. Редько. – Киев: Наук. думка, 1982. – 360 с.
7. Филиппов, А.П. Колебания деформируемых систем. / А.П. Филиппов. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1970. – 736 с.
8. Мучников, В.М. Некоторые методы расчета упругих систем на колебания при подвижной нагрузке / В.М. Мучников. – М.: Госстройиздат, 1953. – 130 с.

#### Сведения об авторе

Лагерев И.А. - кандидат технических наук, проректор по инновационной работе ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», lagerev-bgu@yandex.ru.

## OVERHEAD CRANE DYNAMICS SIMULATION

I.A.Lagerev

Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University

Overhead crane in normal operation conditions loading simulation methodic and models are present in this article. Simulation results for real overhead crane are received. This research was supported by the grant no. MK-92.2014.8 of the President of Russian Federation for young scientist support.

**Keywords:** *overhead crane, dynamics, lifting, moving.*

### References

1. Lagerev I.A. Simulation of a bridge crane metal construction loading parameters, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, No.2, pp. 74-81.
2. Lagerev I.A. Simulation of a bridge crane metal construction loading parameters, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, No.4, pp. 65-70.
3. Lobov N.A. *Dinamika gruzopodyemnykh kranov* [The load-lifting cranes dynamics]. Moscow, Mashinostroenie, 1987. 160 p.
4. Lobov N.A. *Dinamika peredvizheniya kranov po relsovomu puti* [Dynamics of movement of the cranes along the track]. Moscow, Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana, 2003. 232 p.
4. Lagerev I.A. Dynamic forces in a bridge crane metal construction under the influence of crane track construction, *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2011, No.5-3, pp. 3-10.
5. Ushkalov V.F., Reznikov L.M., Redko S.F. *Statisticheskaya dinamika relsovykh ekipazhey* [Statistical dynamics of rail vehicles]. Kiev, Naukova dumka, 1982. 360 p.
6. Filippov A.P. *Kolebaniya deformiruemyykh sistem* [Oscillations of deformable systems]. Moscow, Mashinostroenie, 1970. 736 p.
7. Muchnikov B.M. *Nekotorye metody rascheta uprugikh sistem na kolebaniya pri podvizhnoy nagruzke* [Some methods of computation of elastic systems oscillations on the movable load]. Moscow, Gosstroyizdat, 1953. 130 p.

### Author' information

Igor A. Lagerev - Candidate of Technical Sciences, Vice rector for Innovations at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, lagerev-bgu@yandex.ru.