

УДК 621.3.078

ГАШЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИИ МОСТОВОГО КРАНА**О. И. Толочко, Д. В. Бажутин**Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»
ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина. E-mail: tolochko_oi@mail.ru**Ф. Палис**Магдебургский университет им. Отто фон Герике
Universitätsplatz 2, Magdeburg, 39106, Germany

Выполнен анализ горизонтальных поперечных колебаний моста при его перемещении с неподвижной тележкой, закрепленной посередине моста, с помощью пакета Comsol Multiphysics. Разработана линейная математическая модель исследуемого объекта в виде двухмассовой механической системы. Синтезирован модальный регулятор, позволяющий гасить упругие колебания как в линейной модели, так и в модели с распределенными параметрами.

Ключевые слова: мостовой кран, упругие колебания, модальный регулятор, Comsol.**ГАСІННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ПРУЖНИХ КОЛИВАНЬ КОНСТРУКЦІЇ МОСТОВОГО КРАНУ****О. І. Толочко, Д. В. Бажутін**Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»
вул. Артема, 58, м. Донецьк, 83001, Україна. E-mail: tolochko_oi@mail.ru**Ф. Паліс**Магдебурзький університет ім. Отто фон Геріке
Universitätsplatz 2, Magdeburg, 39106, Germany

Виконано аналіз горизонтальних поперечних коливань мосту при його переміщенні з нерухомим візком, що закріплений посередині мосту, за допомогою пакету Comsol Multiphysics. Розроблено лінійну математичну модель досліджуваного об'єкту у вигляді двомасової механічної системи. Синтезовано модальний регулятор, що дозволяє гасити пружні коливання як у лінійній моделі, так і в моделі з розподіленими параметрами.

Ключові слова: мостовий кран, пружні коливання, модальний регулятор, Comsol.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. При исследовании крановых механизмов обычно уделяют внимание колебаниям груза и их гашению. Однако в процессе перемещения моста и тележки упругим деформациям подвергается мост, что приводит к сокращению срока его службы.

Целью данной работы является исследование и разработка методов гашения горизонтальных колебаний моста при его перемещении.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Применение сечений специальной формы позволяет создавать механические конструкции мостовых кранов, которые при относительно небольшой массе обладают достаточно высокой жесткостью. Однако с увеличением пролета податливость конструкции к воздействию упругих колебаний увеличивается.

Особенностью таких объектов является то, что их масса и упругость равномерно распределены по длине конструкции, в результате чего процесс их упругой деформации описывается дифференциальными уравнениями в частных производных (ДУЧП). Для их математического моделирования удобно использовать специализированное программное обеспечение, предназначенное для решения задач механики деформируемого твердого тела, в частности, пакет Comsol Multiphysics, также известный как Femlab [1]. В среде этого пакета модель набирается в виде механической конструкции, а ДУЧП решаются методом конечных элементов.

Упрощенная модель конструкции моста в пакете Comsol Multiphysics приведена на рис. 1. Параметрами этой модели являются геометрические размеры и массы моста и тележки, а также модуль упругости материала, из которого изготовлен мост.

Данная модель выполнена в виде сплошных металлических балок, т.к. создание тонкостенных моделей усложняет модель и увеличивает требуемый объем оперативной памяти, а также время расчета переходных процессов.

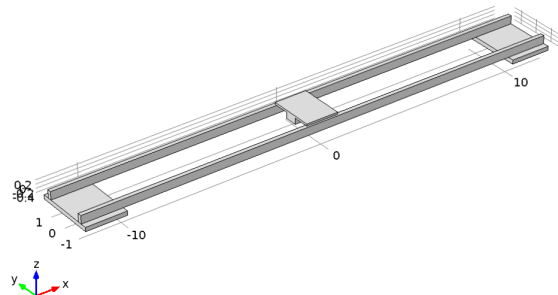


Рисунок 1 – Модель конструкции мостового крана

Поэтому с целью максимального упрощения модели мост представляем в виде двух цельнометаллических профилей с прямоугольным сечением и заниженными значениями плотности и модуля упругости материала так, чтобы масса конструкции и ее жесткость примерно соответствовала реальным данным. Тележка фиксируется в одном положении и моделируется как составная часть конструкции моста.

Расположим тележку посередине моста и приложим к крайним граням данной конструкции усилие, соответствующее разгону моста до скорости 0,5 м/с за 1 с при отработке трапецеидального закона изменения скорости.

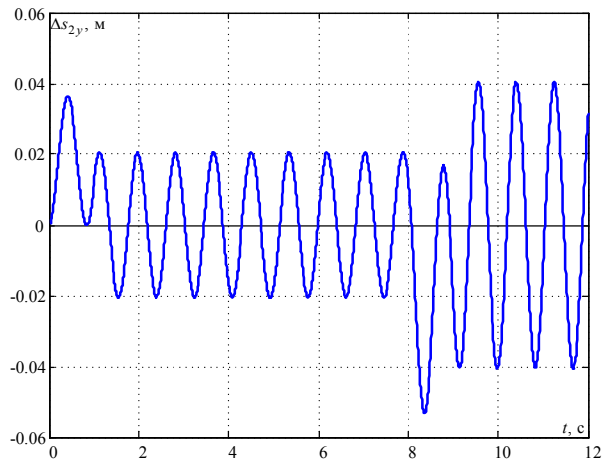
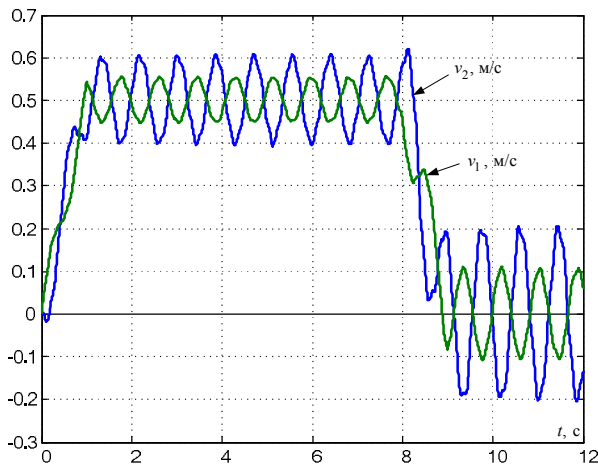


Рисунок 2 – Переходные процессы движения упругой конструкции мостового крана

Графики изменения скорости крайних точек моста v_1 и тележки v_2 , а также максимальной деформации моста в поперечном направлении Δs_2 , которая имеет место в его средней точке, приведены на рис. 2. Из них видно, что рассматриваемые точки конструкции совершают незатухающие колебания, которые постепенно уменьшают ее прочность.

На основании анализа частотного спектра сигнала скорости в пакете Comsol установлено, что наиболее ярко выраженными являются колебания конструкции с частотой $f=1,18$ Гц.

Для подавления этих колебаний необходимо синтезировать соответствующую систему управления скоростью моста, что требует наличия линейной математической модели объекта регулирования.

В данном случае математическую модель объекта можно составить на основании кинематических схем многомассовых систем, приведенных на рис. 3.

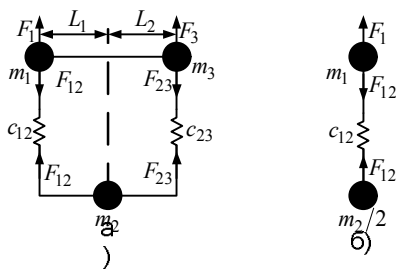


Рисунок 3 – Кинематические модели моста

На рис. 3,а мост условно представлен в виде трех сосредоточенных масс – крайних точек m_1 и m_3 , связанных упругими связями с коэффициентами жесткости c_{12} и c_{23} с точкой m_2 , в которой находится тележка.

Если тележка расположена посередине моста ($L_1=L_2$), то и коэффициенты жесткости упругих связей также должны быть одинаковыми. Если при этом равны между собой и массы, сосредоточенные на концах моста, а также приложенные к ним силы, то кинематическую схему моста можно упростить до двухмассовой, оставив одну опору и центральную точку, массу которой следует уменьшить в два раза. Кинематическая схема для такого случая представлена на рис. 3,б. Ее математическое описание

имеет вид:

$$\begin{cases} m_1 \frac{dv_1}{dt} = F_1 - c_{12} \Delta s_2; \\ \frac{m_2}{2} \frac{dv_2}{dt} = c_{12} \Delta s_2; \\ \frac{ds_1}{dt} = v_1; \quad \frac{ds_2}{dt} = v_2, \end{cases} \quad (1)$$

где F_1 – сила, приложенная к первой массе, F_{12} – упругая сила, $\Delta s_2 = s_1 - s_2$ – величина упругой деформации.

При известных значениях сосредоточенных масс и постоянной времени упругих колебаний двухмассовой системы $T_{12}=1/2\pi f$ можно рассчитать коэффициент жесткости:

$$c_{12} = \frac{m_1 m_2 / 2}{(m_1 + m_2 / 2) T_{12}^2}. \quad (2)$$

Таким образом, одним из главных вопросов при моделировании в данном случае является выбор величин сосредоточенных масс.

В результате исследований линейной модели обнаружено, что при изменении распределения массы моста между опорами и местом расположения тележки желаемая частота упругих колебаний достигается при разных амплитудах сигналов v_1 и v_2 . Наилучшее совпадение этих амплитуд с результатами, полученными в Comsol, обеспечивается при расчете сосредоточенных масс по формулам:

$$\begin{cases} m_1 = m_{c1} + 0,25m_p; \\ m_2 = m_{cT} + 0,5m_p; \\ m_3 = m_{c3} + 0,25m_p. \end{cases} \quad (3)$$

где $m_{c1,3}$ – сосредоточенные массы первой и второй опор соответственно, которые включают в себя массу колес, электроприводов и концевых балок моста, m_p – распределенная масса главных балок моста, m_{cT} – сосредоточенная масса тележки. Такое распределение масс совпадает с рекомендациями, приведенными в [2], хотя в некоторых источниках предлагается массу моста распределять равномерно между опорами, без средней точки [3].

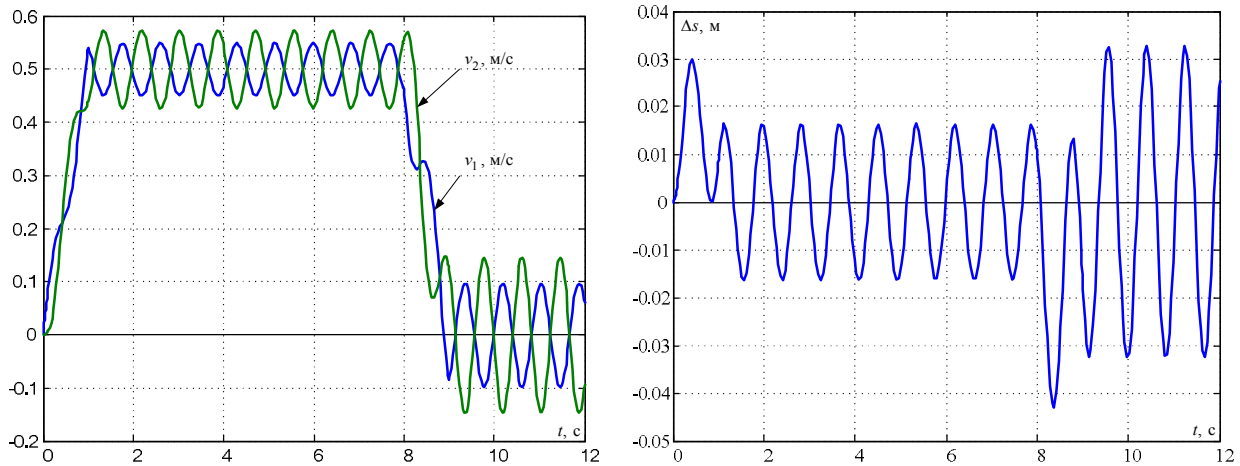


Рисунок 4 – Переходные процессы в линеаризованной системе

Результаты моделирования линейной двухмассовой системы с рекомендуемыми параметрами приведены на рис. 4, из которого видно, что полученная модель достаточно точно воспроизводит процесс перемещения конструкции, полученный в пакете Comsol Mutiphysics. На основании данной модели уже возможно синтезировать регулятор для гашения колебаний.

Одним из способов гашения упругих колебаний является применение регулятора с линейной обратной связью по полному вектору состояний системы.

Контур тока представляем в виде апериодического звена с постоянной времени $T_T = 0,01$ с. Влиянием перекрестных связей для приводов переменного тока и внутренней обратной связи по ЭДС вращения двигателя пренебрегаем.

Для данной системы вектор состояния имеет следующий вид:

$$x = [v_2 \quad F_{12} \quad v_1 \quad F_1]^T. \quad (4)$$

Коэффициенты модального регулятора K рассчитываем по коэффициентам α_i желаемого характеристического полинома, которые определяют динамику замкнутой системы. В результате синтеза получены следующие выражения:

$$K = T_T \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \frac{m_2 m_1 \alpha_0 - m_1 \alpha_2 + c_{12}}{c_{12}} \frac{2m_1 + m_2}{m_2} \\ \frac{m_1 \alpha_1 - \alpha_3}{c_{12}} \frac{2m_1 + m_2}{m_2} \\ m_1 \alpha_2 - \frac{2m_1 + m_2}{m_2} c_{12} \\ \alpha_3 - \frac{1}{T_T} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Результаты моделирования системы с таким регулятором при использовании распределения Бесселя со среднегеометрическим корнем $\Omega_0 = 1/(8T_T)$ приведены на рис. 5. Видим, что колебания в системе отсутствуют, а максимальное значение отклонения средней точки моста уменьшилось по сравнению с результатами, представленными на рис. 4, более чем в два раза.

Следует учитывать, что линейная модель является приближенной, а потому необходимо проверять

адекватность полученных результатов на модели с распределенными параметрами.

Для этого приложим к модели моста в Comsol линейную силу, полученную в системе с модальным регулятором на выходе контура тока. Результаты моделирования представлены на рис. 6.

Видим, что низкочастотные упругие колебания полностью гасятся. При этом остаются незначительные колебания более высокой частоты, не учтенные в линейной модели. Тем не менее, результаты моделирования исследуемого объекта, с учетом распределенности массы и упругости моста по его длине, с высокой степенью точности совпадают с результатами, полученными на линейной модели, что подтверждает адекватность последней.

Дальнейшие исследования, выполненные в Comsol, показали, что при фиксации тележки в других точках моста характер упругих колебаний моста существенно изменяется: появляются дополнительные частоты, изменяющиеся в широком диапазоне. Это делает невозможным применение синтезированного модального регулятора при большом диапазоне перемещений тележки. Для синтеза адаптивной системы управления можно использовать линейную модель моста на основании трехмассовой кинематической схемы (рис. 3,а), в которой изменение положения тележки учитывается изменением коэффициентов упругости и распределения масс.

В этом случае перспективным представляется расчет нескольких модальных регуляторов, соответствующих различным положениям тележки, и плавный переход от одной настройки к другой при помощи нечеткого регулятора типа Сугено.

ВЫВОДЫ. Горизонтальное перемещение моста крана с тележкой, неподвижно закрепленной в его центральной точке, можно с достаточной степенью точности описать двухмассовой системой, заменив распределенные параметры сосредоточенными в соответствии с (3). Такая модель позволяет синтезировать регулятор состояния для эффективного гашения колебаний конструкции моста в направлении его движения. Исследования следует продолжить с учетом движения тележки с подвешенным к ней грузом.

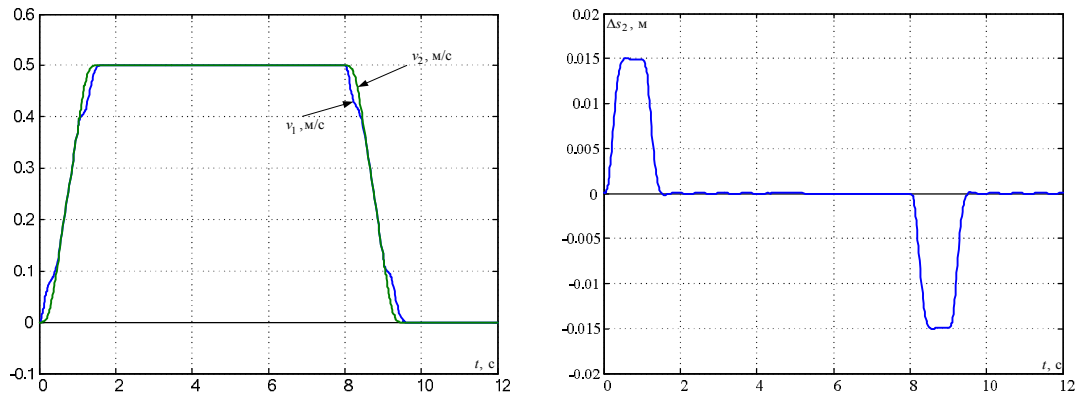


Рисунок 5 – Переходні процеси в лінійній моделі з регулятором стану

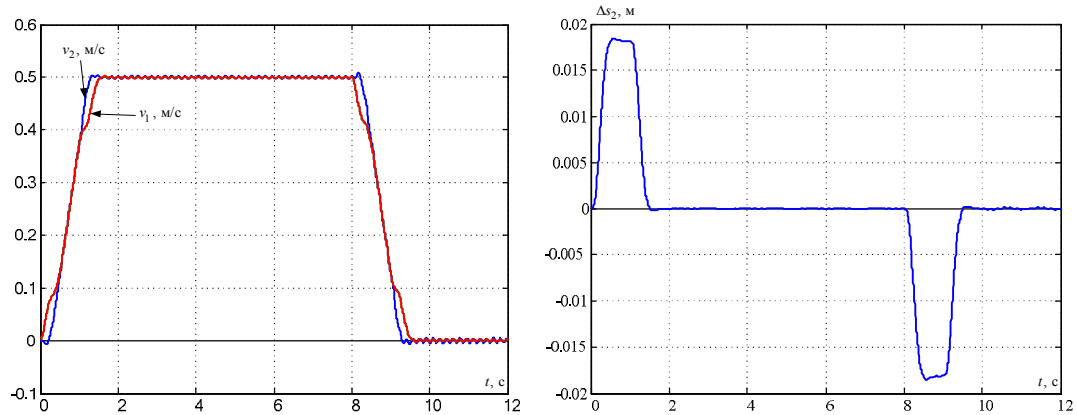


Рисунок 6 – Переходні процеси в моделі з розподіленими параметрами при подачі на неї вихідного сигналу контура току в системі з регулятором стану

Кроме того, необходимо проанализировать характер и возможность гашения вертикальных колебаний моста и тележки с грузом, возникающих при подъеме и опускании груза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Comsol Multiphysics User's Guide. Version 4.2, 2011.

2. Будіков Л.Я. Багатопараметричний аналіз динаміки вантажопідійомних кранів мостового типу: монографія. – Луганськ, вид-во СНУ ім. В. Даля, 2003. – 210 с.

3. Макурин А.В., Морозов Д.И. Динамика продольного перемещения мостового крана с учетом упругости элементов конструкции // Электротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. – № 3 (79). – С. 167–169.

SUPPRESSING THE HORIZONTAL ELASTIC CONSTRUCTION OSCILLATIONS FOR AN OVERHEAD CRANE

O. Tolochko, D. Bazhutin

Donetsk National Technical University
ul. Artema, 58, Donetsk, 83001, Ukraine. E-mail: tolochko_oi@mail.ru

F. Palis

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Universitätsplatz 2, Magdeburg, 39106, Germany

The analysis of horizontal transversal bridge oscillations during its movement with fixed in its middle trolley was carried out in Comsol Multiphysics environment. A linear mathematical model of a plant to be researched was developed as a two-mass mechanical system. A full state feedback controller was developed to suppress elastic oscillations in the linear model, as well as in the model with distributed parameters.

Key words: overhead crane, elastic oscillations, state feedback controller, Comsol.

REFERENCES

1. Comsol Multiphysics User's Guide. Version 4.2, 2011.

2. Budikov L.Ya. *Multiparameter analysis of hoisting overhead cranes dynamics*: Monograph. – Luhansk: V. Dal SNU Press, 2003. – 210 p. [in Russian]

3. Makurin A.V., Morozov D.I. Dynamics of in-plane motion of an overhead crane subject to construction elasticity // *Electrotechnical and Computer*

Systems. – 2011. – № 3 (79). – PP. 167–169. [in Russian]

Стаття надійшла 12.06.2012.

Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Сергіємком С.А.