



ISSN 1998-7927

Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

ВІСНИК

Східноукраїнського національного університету імені Володимира даля

№ 1 0(152) Частина 2 2010

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Луганськ 2010

Малков И.В., Бондарь Л.П., Сыровой Г.В.	
МАТЕРИАЛОВ ПУТЕМ ИХ НАНОМОДИФИКАЦИИ	3
Назарько О.С., Бородіна К.В., Гедрович А.І. СУЧАСНІ МОЖЛИВОСТІ НАПЛАВЛЕННЯ СІДЕЛ КЛАПАНІВ ЗАПІРНОЇ АРМАТУРИ, ЩО ПРАЦЮЄ В АГРЕСИВНОМУ СЕРЕЛОВИЦІІ	7
Оленцевич В. А.	6
РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	
ПО ОБОСНОВАНИЮ РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ КРЕПЛЕНИЙ ГРУЗА ПРИ ВОЗЛЕЙСТВИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ	
СИСТЕМЫ СИЛ	6
Помазков М.В.	Ĩ
МАРШРУТИЗАЦИЯ И РЕСУРС БОЛЬШЕГРУЗНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ БелАЗ В	
УСЛОВИЯХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	1
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ГРАЛИЕНТНОЙ МОЛИФИКАЦИИ ЛЛЯ	
ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАРЫ	
«РЕЛЬС-КОЛЕСО» НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ	5
Симаков С. В., Цепелев А. Б.	
ПРИ НИКЛИЧЕСКОМ ОБЛУЧЕСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	
Сладковский А., Ханишевский Т., Матыя Т.	L
ДИНАМИКА МОСТОВОГО КРАНА. ЧАСТЬ 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДЪЕМА	
ГРУЗА С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ	9
Соколова Я., Гаванюк Г., Соколов В. НЕЛИНЕЙНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОЛЕЛЬ ЭЛЕКТРОГИЛРАВ ПИЧЕСКОГО	
СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА С ДРОССЕЛЬНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ	8
Стоянов А.А.	
ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ	
КОНСТРУКЦИОННЫХ ДЕТАЛЕИ ИЗ ПОРОШКОВЫХ СТАЛЕИ	5
ПОЛИСИЛОКСАНУРЕТАНОВЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ	
КАРБОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МНОГОАТОМНЫХ α-СПИРТОВ)
Тарабановська С.В.	
ЛОГІСТИЧНІ АСПЕКТИ ДІЯЛЬНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ	-
Туманишвили Г., Звиалаури В., Челилзе М., Кавтаралзе Л. В.	2
РАЗРАБОТКА КРУПНОГАБАРИТНЫХ СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	
ВАГОННОЙ ТЕЛЕЖКИ)
ПОСТРОЕНИЕ РАСИЁТНОЙ МОЛЕЛИ КОЛЁСНОЙ ПАРЫ	
ВАГОНА ОТ ВКАТЫВАНИЯ ПРИ ЛВИЖЕНИИ ПОЛВИЖНОГО	
СОСТАВА ПО КРИВОМУ УЧАСТКУ ПУТИ	5
Туранов Х. Т.	
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВКАТЫВАНИЯ ГРЕБНЯ КОЛЕСА КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ВАГОНА ПРИ ЛЕИХЕНИИ ПОЛЕИХИОГО	
СОСТАВА ПО КРИВОМУ УЧАСТКУ ПУТИ	5
Туранов Х. Т., Портнова О. Ю.	
ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ КОЛЁСНОЙ ТЕХНИКИ	
ПОД ДЕИСТВИЕМ СИЛ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА В СРЕЛЕ С ВЯЗКИМ СОПРОТИРЛЕНИЕМ	
Хат-Гарнцаж Г., Гарнцаж Я.	,
ЛОГИСТИЧЕСКИЕ И ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ МЕЖДУНАРОДНОГО ТРАНСПОРТА ОПАСНЫХ ГРУЗОВ	5
Шабарова Э.В. КОНЦЕНЦИИ И ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ В ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЕ	,
Шабарова Э.В.	1
ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР И ЛОГИСТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И МОРСКИХ ПОРТОВ	ł

Вісник СНУ ім. В. Даля №10(152) ч.2/2010

4

Сладковский А., Ханишевский Т., Матыя Т.

ДИНАМИКА МОСТОВОГО КРАНА. ЧАСТЬ 2. МОДЕЛИРО-ВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДЪЕМА ГРУЗА С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ

В статье рассматривается проблематика сложных динамических явлений происходящих во время работы мостовых кранов. Специальное внимание уделяется механизму подъема грузов. Тематика статьи находится на стыке моделирования объектов с распределенными механическими свойствами (модели МКЭ) и объектов с сосредоточенными параметрами, т.е. выполняются гибридные расчеты. Во второй части рассматривается процесс подъема груза с учетом упругости конструкции крана, упругости основания, троса и механизма подъема при постоянном тяговом моменте на канатном барабане.

Вступление

В первой части работы было рассмотрено определение характеристик металлоконструкции мостового крана. В данной части рассматривается представленная ниже динамическая модель механизма подъема грузов. Данное исследование является продолжением работы [1]. Тем не менее, по сравнению со статьей [1] введены следующие модификации:

- учтены реальные параметры, полученные на основе каталожной информации исследуемого мостового крана;
- учтен переменный коэффициент гашения колебаний в тросе при помощи зависимости, описанной в работе [2];
- учтена начальная скорость подъема [3] в связи с управлением тяговым моментом на канатном барабане (в данном случае подразумевается, что начальная скорость может быть уменьшенной в соответствии с [4]), что предназначено для задания предварительного натяжения подъемных канатов. Такое управление подъемом положительно влияет на уменьшение коэффициента динамики при подъеме.

Моделирование динамики подъема груза

Для моделирования был выбран мостовой кран, описанный в первой части работы. Указанная конструкция использует крановую тележку с основными параметрами, представленными в табл. 1. В отличие от работы [1] рассматриваемая динамическая модель является трехмассовой системой, имеющей четыре степени свободы (рис. 1). При этом учитывается масса груза, жесткость металлоконструкции крана, масса тележки, характеристики каната, а также упругость основания, на котором первоначально находится груз.

В результате анализа были рассмотрены следующие случаи:

- модель, не учитывающая уменьшенную начальную скорость (постоянный тяговый момент канатного барабана):
 - о с постоянным демпфированием в тросе (Модель А);
 - о с переменным демпфированием в тросе (Модель В);
- модель, учитывающая уменьшенную начальную скорость (ступенчатое изменение тягового момента канатного барабана):
 - о с постоянным демпфированием в тросе (Модель С);
 - о с переменным демпфированием в тросе (Модель D);
- модель, учитывающая уменьшенную начальную скорость (плавное изменение тягового момента канатного барабана):

- о с постоянным демпфированием в тросе (Модель Е);
- о с переменным демпфированием в тросе (Модель F).

Модели С – F будут рассмотрены в следующей части работы. В данной части рассматриваются модели A и B. В название статьи вынесены слова: «с постоянной скоростью». Очевидно, что данное название взято условно, поскольку в практике чаще всего таким образом именуется подъем груза при постоянном моменте, приложенном на тяговом барабане. В реальности осуществить подъем груза с действительно постоянной скоростью невозможно, поскольку вследствие деформирования различных элементов (каната, мостовой конструкции, грузоподъемного механизма, упругого основания) незначительные отклонения от линейной зависимости для вертикального перемещения груза будут всегда.

Табл. 1

Параметр		Обозначение	Размерность	Величина
Грузоподъемность		Q	Т	20
Рабочие скорости	подъема	Vp	м/мин	7,7
	передвижения тележки	Vj	м/мин	17
Высота подъема		H _{p max}	М	16,5

Общие характеристики крановой тележки



Рис. 1. Твердотельная модель мостового крана

В рассматриваемой модели приняты следующие обозначения:

m₁ – приведенная масса металлоконструкции вместе с массой крановой тележки за исключением канатного барабана; m₂ – масса груза; m₃ – масса узла канатного барабана; b₁ – коэффициент вязкого трения или согласно другим авторам коэффициент сопротивления для металлоконструкции крана; k₁ – жесткость металлоконструкции; g – ускорение свободного падения; M_n – тяговый момент на канатном барабане; φ – угол вращения барабана; k₃ – жесткость подшипников вала барабана; J – массовый момент инерции канатного барабана; r – радиус барабана; b_L – коэффициент вязкого трения каната; I₀ – начальная длина каната; k_p – жесткость основания, на котором в начальный момент лежит груз.

Моделирование рассмотренной системы выполнено с использованием пакета Matlab/Simulink для каждого из описанных выше случаев.

Динамическая модель, не учитывающая уменьшенной начальной скорости подъема

Уравнения движения модели, представленной на рис. 1 можно записать в виде:

$$\ddot{z}_{1}m_{1} = m_{1}g + F_{3} - F_{1} - F_{2}
\ddot{z}_{2}m_{2} = -m_{2}g + F_{dyn} + R_{dyn} + N
\ddot{z}_{3}m_{3} = m_{3}g + F_{dyn} + R_{dyn} - F_{3}
\phi Ji_{w} = M_{n} - (F_{dyn} + R_{dyn})r$$
(1)

где N – реакция упругого основания; z₁ – перемещение (прогиб) центральной части моста; z₂ – вертикальное перемещение груза; z₃ – перемещение оси канатного барабана; F_{dyn} – сила упругости троса; R_{dyn} – сила демпфирования троса; F₁ – сила демпфирования металлоконструкции крана; F₂ – сила упругости металлоконструкции; F₃ – сила упругости подшипников вала канатного барабана.

В расчетной модели было принято, что между крюковой подвеской и канатным барабаном находится один канат. Это определенное упрощение, поскольку в реальности конструкция грузоподъемного механизма представляет собой полиспаст с передаточным отношением i_w=3. Его схема показана на рис. 2.

Силы F₂, F₃, а также N определяются следующим образом:

$$F_{2} = k_{1}z_{1}$$

$$F_{3} = k_{3}(z_{3} - z_{1})$$
(2)

$$N = \begin{cases} 0 & z_2 \ge 0 \\ -k_p z_2 & z_2 < 0 \end{cases}$$
(3)

Уравнение (3) для силы N определяет линейную зависимость данной реакции от перемещения груза, причем в моменте предшествующем началу операции подъема указанная сила имеет максимальное значение, а в момент отрыва груза от основания уменьшается до нуля.

Для малых скоростей подъема сила демпфирования пропорциональна скорости перемещения. Указанный подход может быть использован для определения силы F₁, для которой можно записать зависимость:

$$F_1 = b_1 \frac{dz_1}{dt} = b_1 \dot{z}_1$$
 (4)

В модели учтены динамические силы, действующие в канате, причем указанные силы поделены на силы упругости каната и демпфирующие силы. Сила упругости описывается следующими зависимостями:

$$F_{dyn} = \begin{cases} 0 & \Delta(t) \le l(t) \\ \frac{6E_l A}{l(t)} [\Delta(t) - l(t)] & \Delta(t) > l(t) \end{cases}$$
(5)

$$l(t) = l_0 - r\varphi(t) \tag{6}$$

$$\Delta(t) = l_0 + z_{10} + z_{30} + z_{20} - z_1(t) - z_2(t) - z_3(t)$$
⁽⁷⁾

где I(t) – текущая длина каната, Δ(t) – расстояние по вертикали между грузом и серединой канатного барабана, z₁₀ – начальный прогиб моста; z₃₀ – начальное перемещение оси канатного барабана вследствие деформации подшипниковых узлов; z₂₀ – начальный прогиб основания под собственным весом груза. В знаках перемещений формулы (7) учтены направления координатных осей (рис. 1).

В формуле (5) множитель перед квадратными скобками – это жесткость каната. Как видно, данная жесткость является переменной, зависящей от его длины. В числителе стоит площадь поперечного сечения каната А и приведенный модуль упругости Е_I. Коэффициент 6 учитывает, что в полиспасте (рис. 2) фактически груз поднимается шестью канатами. Согласно статье [2] Е_I зависит от модуля упругости материала каната Е следующим образом:



Рис. 2. Схема грузоподъемного механизма: 1 – направляющие блоки (тип 083DEu исполнение A); 2 – блоки крюковой обоймы (тип 083DEc исполнение A)

Уравнения (5-7) учитывают влияние на величину силы упругости каната не только процесса его наматывания на барабан, но и всех возможных перемещений основных элементов трехмассовой системы, имеющей 4 степени свободы. Учитывается также факт, что в начальный момент в состоянии равновесия указанная сила в канате равна нулю. Сила демпфирования в канате описывается следующей зависимостью:

$$R_{dyn} = i_{w}b_{L}\frac{dz}{dt} = i_{w}b_{L}\left[-\dot{z}_{1} - \dot{z}_{2} - \dot{z}_{3} + r\phi\right]$$
(9)

По сравнению со статьей [1] в формуле (9) учитывается, что реальная скорость канатов в соответствии с передаточным отношением в 3 раза выше по сравнению со скоростью подъема груза. В уравнении (9) коэффициент вязкого трения каната может быть принят величиной постоянной. Однако была также рассмотрена возможность задания перемененной величины b_L. Такой подход был использован ранее в статье [2]. Согласно авторам статьи данный коэффициент может быть принят велисимости:

$$b_L = 2\zeta \sqrt{k_l (m_2 + m_{lb})} \cdot \Psi \tag{10}$$

где k_I – жесткость каната; m_{Ib} – масса каната совместно с массой крюковой подвески; ζ – безразмерный коэффициент демпфирования для стальных канатов. Согласно статье [5] ζ =0,07. Тем не менее, если принять b_L согласно [5], то коэффициент демпфирования будет соответствовать канатам лифтовых систем. В приложении к канатам мостовых кранов он будет очень завышенным. Предлагается его откорректировать при помощи безразмерного коэффициента $\Psi = 0,0144$. Если изменение массы каната практически не влияет на динамические процессы при подъеме и, соответственно, величина m_{Ib} может быть принята постоянной, то величина жесткости при уменьшении длины каната существенно возрастает согласно зависимости

$$k_{l} = \frac{6E_{l}A}{l(t)} \tag{11}$$

Подставляя (11) последовательно в уравнения (10) и (9) получим выражение для силы демпфирования каната с учетом переменного коэффициента вязкого трения:

$$R_{dyn} = \left(2\zeta \sqrt{\frac{6E_{l}A}{l(t)}} (m_{2} + m_{lb})\right) \cdot \Psi \cdot \left[-\dot{z}_{1} - \dot{z}_{2} - \dot{z}_{3} + r\dot{\phi}\right]$$
(13)

На основе приведенных выше уравнений созданы динамические модели при помощи программы Simulink. На рис. 3 представлена такая модель, которая позволяет учесть переменный коэффициент вязкого трения в канате. В данной модели начальные условия представлены следующими зависимостями:

$$z_{10} = \frac{(m_1 + m_3 + m_{lb}) \cdot g}{k_1}; \quad z_{20} = -\frac{m_2 \cdot g}{k_p}; \quad z_{30} = \frac{(m_3 + m_{lb}) \cdot g}{k_3} + z_{10};$$
(14)

Для указанных моделей в качестве начального условия была также принята постоянная скорость подъема груза, которая равняется номинальной скорости подъема (V_p=0,128 м/с) при постоянном тяговом моменте на канатном барабане.

Результаты расчетов для моделей А и В

На основе проведенного моделирования получены некоторые результаты, которые позволяют судить о динамических процессах, имеющих место в рассматриваемой системе. Отличие моделей А и В, как описано выше, состоит в том, что модель В в отличие от модели А учитывает переменное демпфирование в канате. Очевидно, что это, прежде всего, должно быть заметно на графиках силы демпфирования R_{dyn}, что и было показано на рис. 4.



Рис. 3. Модель, позволяющая учесть переменное демпфирование в канате



Рис. 4. Зависимость силы демпфирования каната от времени

Как видно из приведенных графиков, сила демпфирования имеет характер знакопеременный, что связано не с абсолютной скоростью движения каната, а с относительной скоростью перемещения его отдельных сечений, а таковые скорости в свою очередь зависят от колебательных движений в канате в целом. На графике рассмотрена только первая секунда подъема, когда отличие двух моделей наиболее существенно заметно на графиках. Тем не менее, это отличие не превышает 10%. Наиболее важным графиком является зависимость силы упругости в канате от времени, которая показана на рис. 5.



— Модель А — — – Модель В

Рис. 5. Зависимость силы упругости каната от времени

Приведенный график показывает, что в первые моменты подъема сила упругости почти в два раза превышает свое номинальное значение. Тем не менее, по истечении первых 5 секунд отличие силы упругости в канате от номинального значения является уже незначительным, что показывает существенное влияние демпфирования на колебательный процесс в рассматриваемой системе. Отличие моделей А и В для рассматриваемых графиков не столь существенно.

Важное значение имеет также колебательный процесс, связанный с вертикальными перемещениями (прогибами) моста. На рис. 6 представлены данные колебания в зависимости от времени подъема груза.



Рис. 6. Колебания главных балок мостового крана

Как показано на рис. 6 колебательные движения главных балок мостового крана имеют характер затухающий. Тем не менее, если сравнивать затухание этих колебаний с затуханием колебаний в канатах (рис. 5), то декремент затуханий будет меньший. Это обусловлено относительно меньшим уровнем демпфирования металлоконструкции крана по сравнению с уровнем демпфирования канатов. Именно поэтому в отличие от предыдущего графика можно говорить о затухании данных колебаний по прошествии примерно 15 секунд от момента начала подъема, при этом величина прогиба стабилизируется около значения прогиба моста, определенного для случая статического нагружения (см. часть 1).

Сравнение рассматриваемых моделей показывает, что принятие модели с переменным коэффициентом демпфирования способствует быстрейшему гашению колебаний. Тем не менее, различие результатов не столь существенно, как можно было бы ожидать. Очевидно также, что экспериментальное определение коэффициента вязкого трения является одной из наиболее сложных задач, связанных с канатной тематикой.

В заключение можно отметить, что предложенная методика моделирования системы металлоконструкция мостового крана – грузоподъемное устройство – канатная система – груз – упругое основание была успешно проанализирована. Ее эффективность не вызывает сомнений, а возможные погрешности расчета могут быть связаны только с неточностью задания экспериментальных данных, например, уже упоминавшегося коэффициента вязкого трения каната или коэффициента сопротивления металлоконструкции крана.

В следующей части работы планируется проанализировать подъем грузов с учетом возможности регулирования скорости подъема или, соответственно, тя-гового момента на канатном барабане.

Список литературы

1. Matyja T., Sładkowski A.: Modelling of the Lift Crane Vibration Caused by the Lifting Loads. Zdvihaci Zarizeni v Teorii a Praxi 2007. Sbornik prednasek konference s mezinarodni ucasti. Brno, 2007. S. 98 – 105.

2. Gąska D., Margielewicz J.: Numeryczne modelowanie dynamiki podnoszonego ładunku; Transport przemysłowy i maszyny robocze, Nr 1/2008, Wrocław.

3. Norma PN-EN 13001-2: 2004: Bezpieczeństwo dźwignic. Ogólne zasady projektowania; Część 2: Obciążenia.

4. Norma PN-ISO 8686-1: 1999: Dźwignice. Zasady obliczania i kojarzenia obciążeń. Postanowienia ogólne.

5. Chang-Sei K., Keum-Shik H., Moon-Ki K.: Nonlinear robust control of a hydraulic elevator; experomental-based modeling and two-stage Lyapunov redesign, Control Engineering Practice 13 (2005).