

УДК 004.92+519.6

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗА
В КОМПЬЮТЕРНОМ ТРЕНАЖЕРЕ
ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА**

**Е.В. Долгова, Р.А. Файзрахманов, Д.С. Курушин, Л.Н. Кротов,
А.Б. Федоров, А.Ф. Хабибуллин, В.С. Шилов, Е.А. Ромин,
Р.Р. Бакунов, Р.Р. Бикметов, И.С. Полевщиков**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614990, Пермь, Комсомольский проспект, д. 29*

Аннотация. В статье рассматривается построение имитационной модели перемещения груза, подвешенного на стреле погрузочно-разгрузочного устройства. Модель разработана для компьютерного тренажера и ориентирована на использование в режиме реального времени на базе графического движка. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (договор № 13.G25.31.0093) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Ключевые слова: моделирование, тренажер, погрузочно-разгрузочное устройство, графический движок.

1. Состояние проблемы.

Моделирование динамики перемещения груза является важным этапом в процессе создания компьютерных тренажеров погрузочно-разгрузочных устройств. Следует отметить, что моделирование физических процессов применительно к кранам и другим сходным техническим средствам ранее рассматривалось многими авторами. Так, например, модели физики стрелы крана рассмотрены в работах [1-8]. В работе [8] рассмотрена модель стреловых кранов при работе механизмов подъема и изменения вылета, основанная на концепции, представленной в [3]. Для описания программного движения системы изменения вылета (СИВ) крана используются кинематические передаточные функции первого порядка, связывающие скорости звеньев крана с угловой скоростью стрелы. Выражения для кинематических передаточных функций получены для различных конструктивных исполнений стреловых систем, уравнивающих устройств и механизмов изменения вылета, включая уравнивающие устройства, расположенные под поворотной платформой. В процессе построения математической модели кинематические передаточные функции линеаризуются в окрестности программного движения. Однако, следует отметить, что приведенная в работе модель носит достаточно общий характер и изначально не предназначалась для использования в имитаторах компьютерных тренажеров, следовательно, возможность ее применения в режиме реального времени требует дополнительных исследований.

Отметим также работу [2], в которой рассматривается автоматизированная система ограничения массы поднимаемого груза стреловых подъемных кранов, которая включает в себя модель системы, состоящей из груза и стрелы (с возможностью ее деформации). Однако, следует отметить, что приведенная в работе модель используется для

контроля за массой груза, хотя и может быть адаптирована к другим задачам. Однако, адаптация потребует ее значительной конкретизации.

В работе [7] рассматривается моделирование механизмов передвижения кранов с учётом движения механизмов подъёма, вылета стрелы и поворота кранов при динамическом воздействии ветра.

Приведенная система дифференциальных уравнений описывает работу четырёх независимых механизмов порталных кранов: трёх поступательных движений механизмов – передвижения и подъёма груза, радиальное изменение вылета стрелы и вращательное (относительно вертикальной оси) движение крана, а также колебания гибкого подвеса груза. Модель представлена в виде нелинейной, неоднородной системы из семи дифференциальных уравнений второго порядка с переменными коэффициентами, правая часть которых содержит функции ветровой нагрузки. Модель прекрасно проработана, однако в целом ориентирована на моделирование ветровой нагрузки, причем не в режиме реального времени. В рассматриваемом же устройстве преобладающей задачей является моделирование последствий действий оператора устройства, причем, в режиме реального времени.

Таким образом, вышеназванные работы, с одной стороны, содержат результаты, которые могут быть учтены при разработке математической модели имитатора подъемного крана, с другой стороны, их непосредственное использование невозможно, поскольку к имитатору предъявляются следующие основополагающие требования: работа в реальном режиме времени, системная простота реализации, возможность взаимодействия с современной системой компьютерной графики.

2. Основные требования к модели. Выбор математического описания.

Исследования прикладного и теоретического характера, направленные на создание имитационной модели динамики груза в тренажере подъемного крана, включают:

1. Исследования геометрической модели объекта, для которого создается тренажер, с целью сокращения его полигональности до степени, допускающей анимацию динамики объекта в режиме реального времени с сохранением фотореалистических свойств.
2. Разработка и исследование математических моделей физических процессов, происходящих в процессе работы устройства погрузки с целью создания имитатора компьютерного тренажера, пригодного для работы в режиме реального времени.
3. Исследование существующих программно-информационных и технических решений, включая патентные исследования.
4. Исследование существующих решений в области сетевых технологий, являющихся базовыми для определения концепций и конкретных технических решений при создании сетевого варианта многопользовательского компьютерного тренажера .
5. Исследования в области методики создания и использования компьютерного тренажера.

Целевым назначением модели является имитация работы элементов перегрузочного устройства в компьютерном тренажере, предназначенном для обучения операторов соответствующих технических систем.

Главным требованием, предъявляемым к модели, является создание (в комплексе с системой визуализации и рабочими органами тренажера) правдоподобного визуального и тактильного образа, способствующего обучению операторов.

Модель не предназначена для проектирования, изучения прочности конструкций и других нецелевых функций.

Основные требования и допущения, учтенные при построении модели:

1. Модель предназначена для работы в реальном времени.
2. Модель не предназначена для визуализации подробностей аварийных процессов. Так же она не визуализирует выраженную нелинейную геометрию троса (обрывы, захлесты). Если в процессе работы с тренажером, виртуальная техническая конструкция переходит в неустойчивый режим (область хаотических колебаний, разрушение, другие имитации аварии), оператор получает сообщение и обучение приостанавливается.
3. Модель содержит ряд параметров, опытное изменение которых позволяет приблизить характер поведения модели к поведению реального устройства
4. Модель (при сохранении высокого качества имитации) должна быть как можно более простой, и не требовать при реализации громоздких и трудно адаптируемых программных сред.

В состав подъемного крана входит стрела. В основе моделей таких объектов лежит исходная модель физического маятника, модифицируемая применительно к конкретному устройству. Физический маятник - осциллятор, представляющий собой твёрдое тело, совершающее колебания в поле сил относительно точки, не являющейся центром масс этого тела.

Без учета сопротивлением среды, дифференциальное уравнение колебаний физического маятника в поле силы тяжести записывается следующим образом:

$$l \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -g \cdot \sin \varphi ,$$

где φ - угол отклонения маятника от равновесия; g - ускорение свободного падения; l - длина маятника.

Однако, поскольку среда, в которой колеблется маятник, не идеальна, следует так же учитывать коэффициент сопротивления среды k . Тогда, уравнение колебаний в плоскости xOy примет вид:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + k \frac{d\varphi}{dt} + w^2 \sin \varphi = -\cos \varphi \cdot \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{x}{l} \right) + \sin \varphi \cdot \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{y}{l} \right),$$

$$w = \sqrt{\frac{g}{l}} .$$

Малые колебания составляют предмет линейной, а большие — нелинейной теории колебаний. В неаварийных ситуациях колебания груза, подвешенного на стреле, являются малыми.

2. Имитационное моделирование стрелы в тренажере.

Перейдем от формально-математического описания к описанию, удобному для имитационного моделирования в системе компьютерного тренажера. Условное изображение стрелы подъемного крана с тросом и грузом показано на рис. 1. В выбранной

концепции рассматриваются три пространственные координаты (x, y, z) и координата времени t . Будем считать, что начало пространственных координат в начале процесса моделирования совпадает с точкой соприкосновения троса и стрелы, а свисающий трос расположен строго вертикально.

Принятое начало координат и положение координатных осей показаны на рис.1.

Далее введем следующие обозначения.

L – текущая длина свисающего троса от начала координат до груза (рис. 1);

m – масса груза;

P – точка соприкосновения троса со стрелой (в начальный момент времени совпадает с началом координат);

Q – условная точка соединения троса и груза;

причем, L в общем случае может меняться в зависимости от времени ($L(t)$), в результате укорачивания свисающего троса при попытке приподнять груз, а также из-за растягивания троса в результате воздействия силы тяжести.

Введем обозначения углов, образующихся между векторами координатных осей и линией, соединяющей точку P и точку Q так, как это показано на рис. 2:

F_i – угол поворота в плоскости (XY), на который линия между P и Q отклоняется от вертикали;

$P_s i$ – угол поворота в плоскости (YZ), на который линия между P и Q отклоняется от вертикали.

Эти два угла описывают любые отклонения линии PQ от вертикали, которые поддерживает тренажер. Гипотетическое “запрокидывание” груза таким образом, чтобы он оказался выше точки P хотя и возможен в теории колебаний, но здесь не рассматривается, потому что выходит слишком далеко за рамки нормального режима обучения.

В общем случае, как F_i , так и $P_s i$ зависят от времени. В начальный момент времени они равны нулю.

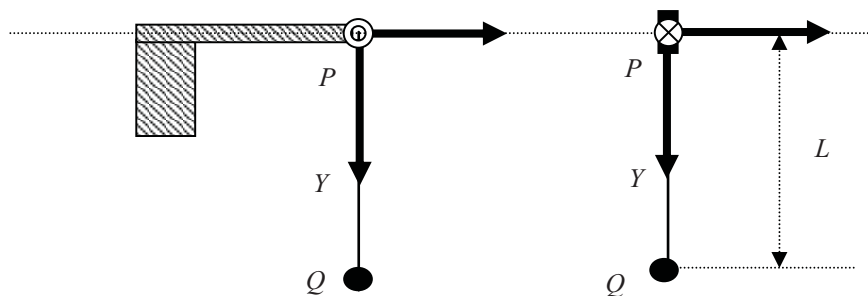


Рис. 1. Схема модели стрелы крана

Построение суб-модели колебаний груза происходит следующим образом. Поскольку точка P в результате действий оператора может перемещаться в пространстве, подвешенный на тросе груз будет колебаться.

Колебания такого рода происходят в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (XY и YZ) и могут быть смоделированы на основе теории маятников. Построим составляющую общей модели, относящуюся к колебательным процессам с точки зрения углов $P_s i$ и F_i .

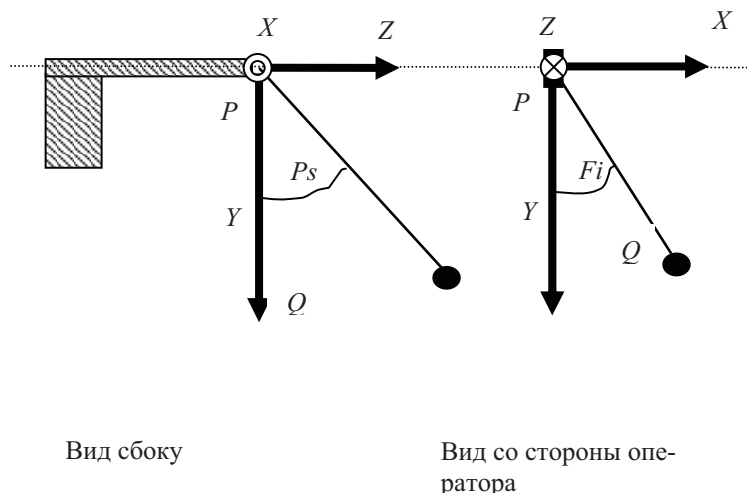


Рис. 2. Обозначения углов

Формула, описывающая колебания груза, в плоскости XY , возникающие из-за перемещения точки P , имеет вид:

$$\frac{d^2 Fi}{dt^2} + k \frac{dFi}{dt} + w^2 \sin Fi = -\cos Fi \cdot \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{x}{L} \right) + \sin Fi \cdot \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{y}{L} \right),$$

где $x(t)$ - местоположение точки P по оси X в момент времени t ;
 $y(t)$ - местоположение точки P по оси Y в момент времени t ;
 k - коэффициент сопротивления среды;
 L - расстояние от точки G до точки P , равное длине натянутого троса;
 g - ускорение свободного падения ($g = 9.8156$ м/сек²).

Происхождение этих колебаний как результата воздействия разнонаправленных сил демонстрирует рис. 3.

Аналогично, формула, описывающая колебания груза в плоскости ZY будет иметь вид:

$$\frac{d^2 Psi}{dt^2} + k \frac{dPsi}{dt} + w^2 \sin Psi = -\cos Psi \cdot \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{z}{L} \right) + \sin Psi \cdot \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{y}{L} \right),$$

где $z(t)$ - местоположение точки P по оси Z в момент времени t .

Отметим, что углы Psi и Fi , близкие к 90 градусам и связанные с этим аномалии колебаний, не моделируются, так как этот режим работы очень далек от штатного и должен быть исключен в тренажере.

В реальности перемещение точки P может совершаться сразу в обеих координатных плоскостях, следовательно, и колебания могут совершаться в обеих плоскостях. Геометрия этого процесса показана на рис. 4. Символом $Teta$ в данном случае обозначен угол между вертикалью и линией, соединяющей точки P и Q .

Обозначенные на рисунке расстояния подчиняются следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} a^2 + b^2 &= d^2, \\ d &= L \cdot \sin Teta, \\ h &= L \cdot \cos Teta, \\ \operatorname{tg} Fi &= a/h, \\ \operatorname{tg} Psi &= b/h. \end{aligned}$$

Тогда:

$$\operatorname{Tg} Teta = \sin Teta / \cos Teta = d/h = (a^2 + b^2)^{1/2} / h.$$

Таким образом, обобщенная модель колебаний груза, подвешенного на тросе, примет вид:

$$\begin{cases} \frac{d^2 Fi}{dt^2} + k \frac{dFi}{dt} + w^2 \sin Fi = -\cos Fi \cdot \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{x}{c} \right) + \sin Fi \cdot \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{y}{c} \right), \\ \frac{d^2 Psi}{dt^2} + k \frac{dPsi}{dt} + w^2 \sin Psi = -\cos Psi \cdot \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{z}{L} \right) + \sin Psi \cdot \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{y}{L} \right). \end{cases}$$

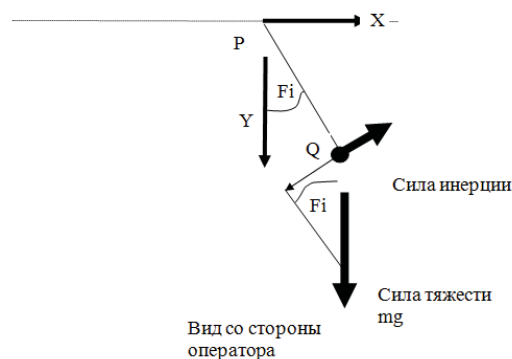


Рис. 3. Физика колебаний в отдельно взятой плоскости

Входными сигналами для модели будут зависимости $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$. Выходными сигналами – зависимости $Fi(t)$ и $Psi(t)$. Начальные условия для решения уравнений:

$$\begin{aligned} Fi(0) &= 0, \\ Psi(0) &= 0, \\ x(t) &= 0, \\ y(t) &= 0, \\ z(t) &= 0. \end{aligned}$$

Численное решение системы дифференциальных уравнений осуществлялось в рамках движка системы трехмерного моделирования Blender. На рис. 5 представлен фрагмент копии экрана, полученный в процессе моделирования, на котором показан фиксированный момент - груз из-за движения стрелы находится в слегка смещенном относительно вертикали положении.

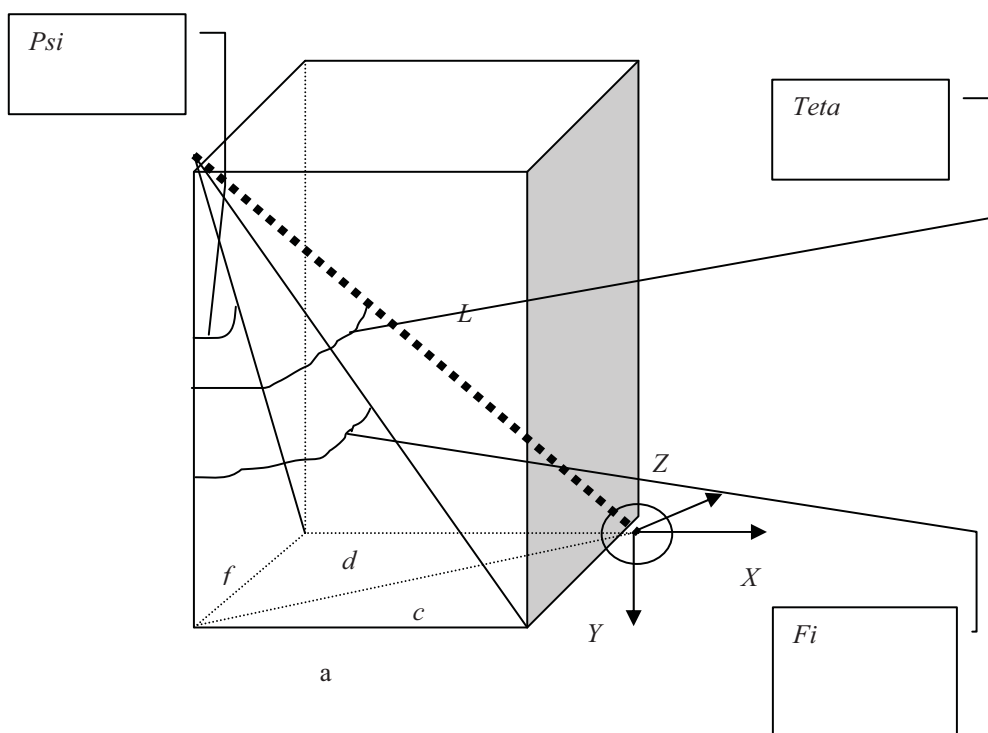


Рис. 4. Геометрия перемещения в двух плоскостях

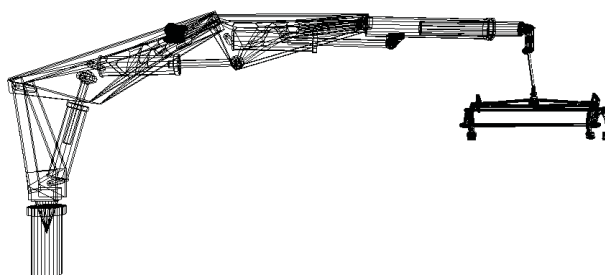


Рис 5. Трехмерная модель стрелы с подвешенным грузом

3. Выводы и применение.

Полученная модель была использована в качестве основы для исследовательского прототипа компьютерного имитатора тренажера крановщика. При реализации вышеописанных моделей были использованы язык *python*, библиотеки математического моделирования *numpy*, а также стандартная "физика" движка графической среды моделирования, так как это позволяет ускорить работу имитатора и избавить его от громоздких дополнительных модулей. Обновление изображения на экране производилось с частотой 60 раз в секунду. Эксперименты с моделью показали высокую реалистичность полученного имитатора.

Таким образом, предложенная модель может служить основой для разработки компьютерных тренажеров кранов и других погрузочно-разгрузочных устройств. При этом она лишена недостатка громоздкости, что особенно важно для систем, которые работают в режиме реального времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (договор № 13.G25.31.0093) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологического производства».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бортяков Д.Е., Орлов А.Н., Шевелев А.Б.* Расчет и анализ частотного спектра порталных кранов // В сб. «Подъемно-транспортные машины и оборудование». Вып. 2. Тула, 1999. С. 27–33, 78 с.
2. *Коровин К.В.* Автоматизированная система ограничения массы поднимаемого груза стреловых грузоподъемных кранов/ Автореферат на соискание уч.степени к.т.н., Челябинск, 2009, 16 с.
3. *Орлов А.Н.* Общая динамическая модель грузоподъемных кранов // В сб. «Оптимизация параметров строительных и дорожных машин». – Ярославль, изд-во Яросл. полит. ин-та, 1992. С.13–20., 85 с.
4. *Орлов А.Н., Сеницын В.Ю.* К расчету частот собственных колебаний грейфера на канатном подвесе // Исследование оптимальных металлоконструкций и деталей подъемно-транспортных машин. Вып. 6. Саратов, 1992. С.28–32., 71 с.
5. *Орлов А.Н., Тахаладзе Г.С.* Автоматизированный выбор оптимальных размеров крановых канатных подвесов груза// В сб. «Автоматизация проектирования в машиностроении». –Л., изд-во ЛПИ им. М.И. Калинина, 1987. С. 17–24., 84 с.
6. *Орлов А.Н.* Поперечные колебания грейфера с учетом ослабления подъемных канатов// В сб. «Динамика, прочность и надежность технологических машин». –Труды СПбГТУ, № 478. – 1998.–С. 48-51., 160 с.
7. *Подобед Н.Е.* Исследование работы механизмов передвижения порталных кранов в морских портах при ветровых нагрузках/ Автореферат на соискание уч.степени к.т.н., Мурманск, 2010., 14 с.
8. *Рудской Д.С.* Анализ и исследование динамического состояния стрелового крана в переходных режимах при подъеме груза/ Материалы межвузовской научной конференции. Ч.III: С.26-27, 2001 //Санкт-Петербургский государственный технический университет, 2001., 75 с.

MODELING OF DYNAMICS OF MOVING THE WEIGHT IN THE COMPUTER SIMULATOR OF THE CARGO HANDLING DEVICE

**E. Dolgova, R. Fayzrakhmanov, D. Kurushin, L. Krotov, A. Fedorov,
A. Khabibulin, V. Shilov, E. Romin, R. Bakunov, R. Bikmetov,
I. Polevshchikov**

29, Komsomolsky prospect, Perm, 614990, Russia

Abstract. Simulation model of the weight attached to the crane arm is considered in this article. The model is developed for the computer training simulator and focused on use in real time calculations in the environment of the graphics engine. This work is done with financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (contract No. 13.G25.31.0093) within implementation of the Resolution of the government of the Russian Federation No. 218 «About measures of the state support of development of cooperation of the Russian higher educational institutions and the organizations realizing complex projects on creation of hi-tech production.

Keywords: modeling, training simulator, loading and unloading device, graphics engine.