



РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ГРУЗОВ И ПОЛУЧЕНИЕ ЕГО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В.В. Курганкин (ОАО «ТЭМЗ»), С.В. Ефимов, М.И. Пушкарев,
С.В. Замятин (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Предложена структура устройства позиционирования грузов (УПГ), получена его математическая модель для исследования процессов перемещения грузов по траекториям, заданным мускульной силой оператора. Получение математической модели устройства основано на использовании алгоритмов идентификации объекта управления по его реакции на тестовый входной сигнал. Произведена апробация работы УПГ на лабораторном стенде.

Ключевые слова: кран-балка, мостовой кран, математическая модель, идентификация объекта управления, устройство позиционирования грузов.

Введение

Существенный прогресс и экономическая эффективность во многих областях промышленности связаны с уровнем развития подъемно-транспортного машиностроения, ориентированного на внедрение комплексной механизации и автоматизации производственных процессов, ликвидацию ручных погрузочно-разгрузочных работ и исключение ручного труда в целом [1–3].

Для выполнения сборочно-монтажных работ в ряде случаев возникает потребность создания и эффективного использования подъемно-транспортного оборудования, в частности, кранов [4, 5]. Управление таким оборудованием может осуществляться различными способами: из кабины, с помощью подвесных пультов управления, со станции оператора и др. [6]. В некоторых случаях при использовании подъемно-транспортного оборудования оператор выполняет

позиционирование грузов за счет непосредственного воздействия на него с помощью мускульной силы (например, монтаж двигателя в моторный отсек автомобиля)¹. В таких приложениях возникает задача повышения качества позиционирования и минимизации влияния человеческого фактора. В связи с этим актуальным является создание устройств позиционирования грузов (УПГ) на базе систем автоматического управления (САУ).

Для синтеза САУ требуется математическое описание объекта управления [6, 7]. Рассмотрим конструкцию разрабатываемого УПГ и процедуру получения его математической модели, отражающую специфику устройства.

Описание устройства и способ задания траектории перемещаемого груза

УПГ представляет собой мостовой кран. Груз подвешивается на тросе, укрепленном на подвижной опоре, и с помощью исполнительных механизмов перемещается в пространстве. Принципиальная схема УПГ изображена на рис. 1.

Блоки 1 и 2, представляющие собой каретки с исполнительными механизмами, позволяют перемещать груз в горизонтальной плоскости по направляющим 3 и 4. Блок 5 представляет собой исполнительный механизм, который перемещает груз в вертикальном направлении. Блок управления 7 на основе сигналов, поступающих с блока датчиков 6, формирует управляющие воздействия на исполнительные механизмы системы, тем самым, перемещая груз в пространстве. Блок 6 содержит датчики натяжения и отклонения троса от вертикали в плоскостях xOz и yOz . Отличие предлагаемой системы от имеющихся аналогов заключается в наличии датчиков, которые позволяют

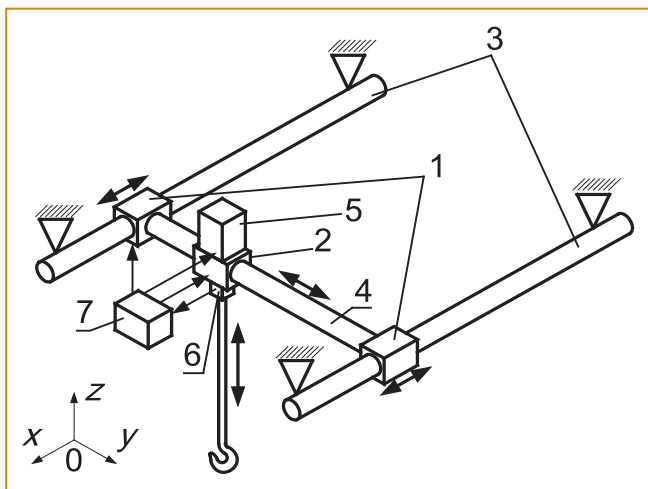


Рис. 1. Принципиальная схема УПГ

¹ Замятин С.В., Курганкин В.В., Замятин В.М. Способ управления перемещением грузов и устройство для его реализации. Патент № 2483997. Россия. Заявлено 16.11.2011.

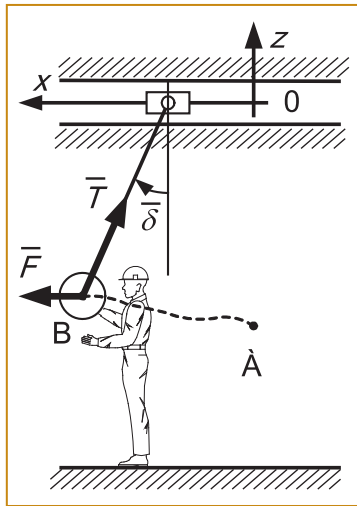


Рис. 2. Способ задания траектории перемещаемого груза

определить отклонение троса от вертикали и силу натяжения троса [8].

Способ задания траектории перемещаемого груза поясняется на двумерной модели УПГ (рис. 2). Для позиционирования груза, подвешенного на тросе, оператор задает траекторию его перемещения из точки А в точку В при помощи собственного усилия F , приложенного непосредственно к грузу. При этом трос отклоняется от вертикали на угол φ . САУ, реализованная в УПГ, на основе данных об угле φ и силе натяжения троса T формирует управляющие сигналы на исполнительные механизмы, тем самым, перемещая груз в заданную точку.

В общем случае УПГ перемещает груз в пространстве. Для этого измеряются три параметра: сила натяжения троса T и углы отклонения троса от вертикали φ и ψ (рис. 3).

Лабораторный стенд, имитирующий работу устройства позиционирования грузов.

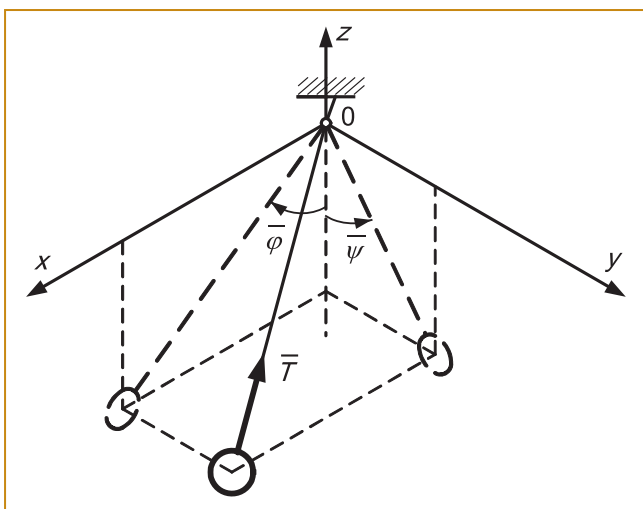


Рис. 3. Измеряемые параметры системы

² Под рабочей зоной оператора понимается высота подвеса груза, комфортная человеку для манипулирования.

³ Идентификация осуществляется для объекта управления, который включает в себя механическую часть системы, подвешенный груз, исполнительные устройства, датчики и блок управления.

Для исследования процессов перемещения грузов и разработки алгоритмов управления УПГ создан лабораторный стенд с габаритными размерами (ДхШхВ) 2,5х2,5х2,5 м и массой перемещаемого груза 1...20 кг.

Для описанного способа задания траектории перемещения груза разработан порядок работы с УПГ (рис. 4).

– Исходное состояние представлено на рис. 4 а.

– Используя пульт управления, оператор подвешивает груз (рис. 4 б), а затем перемещает его в рабочую зону² (рис. 4 в). В результате блок управления получает данные с датчиков о реакции УПГ на перемещение груза, на основе которых происходит идентификация объекта управления³. Далее в блоке управления осуществляется расчет параметров регуляторов УПГ.

– Оператор переводит УПГ в автоматический режим, а затем при помощи собственного усилия, приложенного непосредственно к грузу (рис. 4 г), позиционирует последний в заданную точку пространства (рис. 4 д), выключает автоматический режим и отцепляет трос от груза (рис. 4 е).

Отметим, что для перемещения груза в рабочую зону оператора используется управляющий сигнал ступенчатой формы. Это позволяет переместить груз в требуемую рабочую зону и получить реакцию (переходную характеристику) системы на ступенчатый тестовый сигнал, на основании которой осуществляется идентификация объекта управления с учетом массы подвешенного груза. Идентификация объекта управления (ОУ) и настройка САУ производится всякий раз при подвешивании и перемещении груза в рабочую зону оператора.

Постановка задачи

Пусть УПГ — многомерная система (рис. 1), входными сигналами которой являются значения скорости вращения приводов, а выходными — сила натяжения троса и углы отклонения от вертикали.

Необходимо получить математическую модель работы УПГ на основе его реакции на управляющие ступенчатые сигналы.

Получение математической модели системы позиционирования грузов

Рассмотрим структурную схему, приведенную на рис. 5, в которой $U(t)$ и $Y(t)$ — входной и выходной векторные сигналы соответственно.

Для лабораторного стенда имеем $U = (u_x(t) \ u_y(t) \ u_i(t))^T$, $Y = (\varphi(t) \ \psi(t) \ T(t))^T$, где $u_x(t)$ и $u_y(t)$ — управляющие сигналы, передаваемые на приводы для перемещения груза в направлениях Ox и Oy соответственно; $u_i(t)$ — управляющий сигнал, передаваемый на привод для изменения длины троса.

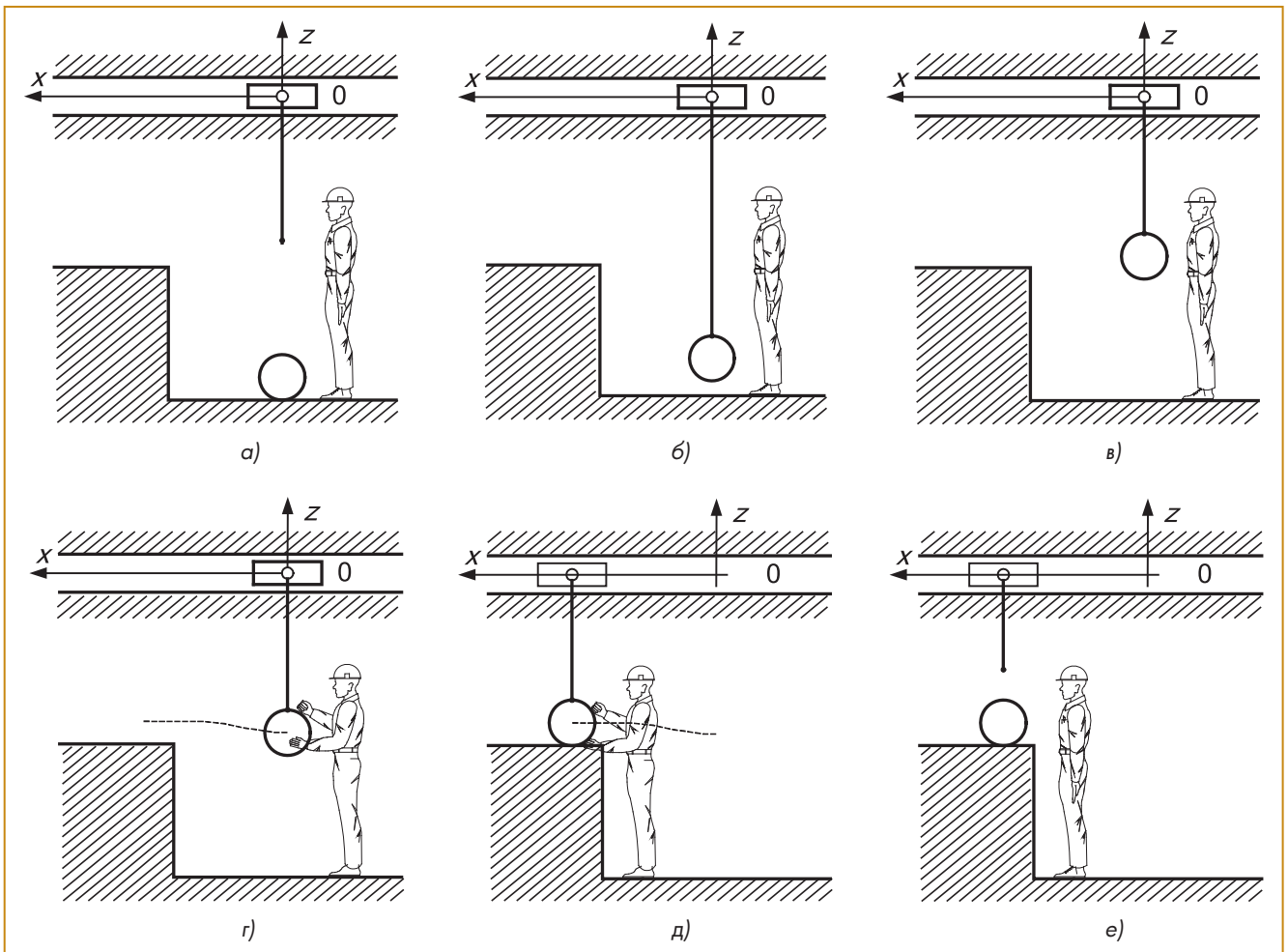


Рис. 4. Процедура позиционирования груза

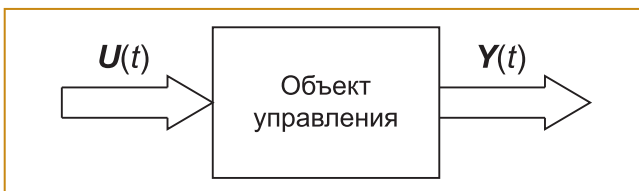


Рис. 5. Структурная схема

Модель УПГ опишем дифференциальными уравнениями. В нашем случае система имеет по три входа и выхода. Представим математическую модель УПГ в матричной форме [10]:

$$\mathbf{W}(s) = \begin{pmatrix} W_{\varphi u_x}(s) & W_{\varphi u_y}(s) & W_{\varphi u_z}(s) \\ W_{\psi u_x}(s) & W_{\psi u_y}(s) & W_{\psi u_z}(s) \\ W_{T u_x}(s) & W_{T u_y}(s) & W_{T u_z}(s) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где s — комплексная переменная интегрального преобразования Лапласа.

Предположим, что взаимное влияние каналов перекрестных связей незначительно, тогда (1) примет вид:

$$\mathbf{W}(s) = \begin{pmatrix} W_{\varphi u_x}(s) & 0 & 0 \\ 0 & W_{\psi u_y}(s) & 0 \\ 0 & 0 & W_{T u_z}(s) \end{pmatrix} = \text{diag}(W_{\varphi u_x}(s) \quad W_{\psi u_y}(s) \quad W_{T u_z}(s)). \quad (2)$$

Задача получения математической модели работы УПГ сводится к нахождению передаточных функций: $W_{\varphi u_x}(s)$, $W_{\psi u_y}(s)$ и $W_{T u_z}(s)$ с помощью методов идентификации в классе одномерных систем [9].

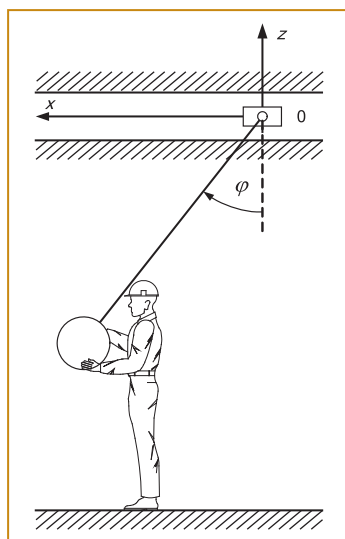


Рис. 6. Перемещение груза в горизонтальной плоскости

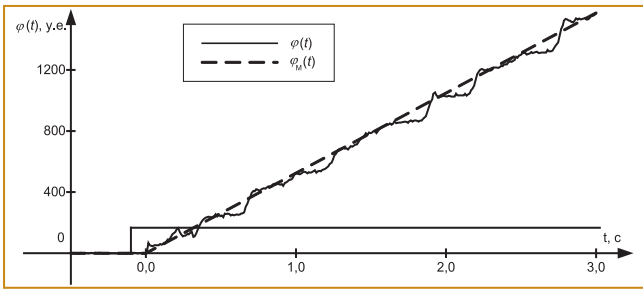


Рис. 7. Результаты идентификации объекта управления

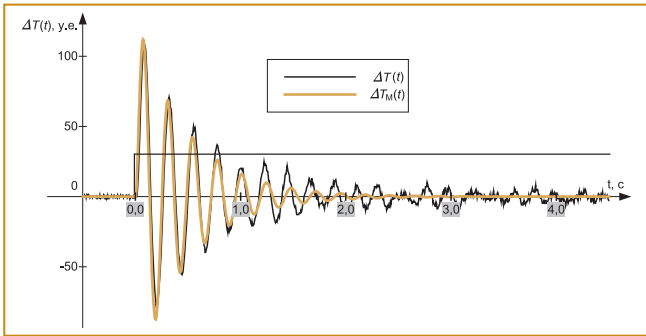


Рис. 8. Результаты идентификации

Модель объекта управления перемещения груза в горизонтальной плоскости

Рассмотрим получение математической модели канала $u_x \rightarrow \varphi$ при перемещении груза в горизонтальной плоскости (рис. 6).

Для исследуемого УПГ (рис. 4) получена его реакция $\varphi(t)$ на входной тестовый сигнал $u_x(t) = 150 \cdot 1(t)$ у.е. (номинальная скорость движения каретки при управлении УПГ оператором). На основе полученных данных запишем:

$$W_{\varphi u_x}(s) = \frac{3,499}{s} \quad (3)$$

Характеристики канала $\varphi(t)$ и модели $\varphi_M(t)$ представлены на рис. 7.

Таким образом, с учетом того, что каналы $u_x \rightarrow \varphi$ и $u_y \rightarrow \psi$ эквиваленты, получена математическая модель УПГ при перемещении груза в горизонтальной плоскости.

Модель объекта управления перемещения груза в вертикальном направлении

Для исследуемого УПГ (рис. 4) с подвешенным грузом массой 20 кг получена реакция $\Delta T(t)$ на входной тестовый сигнал $u_i(t) = 30 \cdot 1(t)$ у.е. (перемещение груза в рабочую зону оператора), на основе которой запишем:

$$W_{\Delta T u_i}(s) = \frac{1,699 \cdot 10^{-1} s}{2,222 \cdot 10^{-5} s^3 + 1,474 \cdot 10^{-3} s^2 + 2,179 \cdot 10^{-2} s + 1} \quad (4)$$

Характеристики канала $\Delta T(t)$ и $\Delta T_M(t)$ модели представлены на рис. 8.

Курганкин Виктор Витальевич – канд. техн. наук, инженер-проектировщик ОАО «Томский электромеханический завод им. В.В. Вахрушева»;

Ефимов Семен Викторович – канд. техн. наук, доцент, **Пушкарев Максим Иванович** – канд. техн. наук, доцент,

Замятин Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доцент ОАР ФГАОУ ВО НИ ТПУ.

E-mail: kurgankin@mail2000.ru, efimov@tpu.ru, pushkarev@tpu.ru, zamsv@tpu.ru

Модель системы позиционирования груза

Используя (2) – (4), получим математическую модель УПГ:

$$W(s) = \text{diag}(W_{\varphi u_x}(s) \quad W_{\psi u_y}(s) \quad W_{T u_i}(s)),$$

где $W_{\varphi u_x}(s) = \frac{3,499}{s}, W_{\psi u_y}(s) = \frac{3,499}{s},$

$$W_{T u_i}(s) = \frac{1,699 \cdot 10^{-1} s}{2,222 \cdot 10^{-5} s^3 + 1,474 \cdot 10^{-3} s^2 + 2,179 \cdot 10^{-2} s + 1}.$$

Оценка адекватности математической модели выполнялась при параметрической идентификации УПГ по каждому из каналов. Максимальное отклонение выходных значений сигналов, полученных по математической модели и от лабораторного стенда УПГ, приведенное к рабочему диапазону значений, не превысило 5%. Кроме того, адекватность полученной модели подтверждена натурными экспериментами на лабораторном стенде.

Заключение

В работе представлена структура УПГ. Рассмотрена процедура получения математической модели системы позиционирования груза, в которой траектории перемещения грузов задаются мускульной силой оператора. Полученные результаты могут быть использованы для синтеза регуляторов системы позиционирования груза.

Список литературы

1. Салтыков В.А., Семенов В.П., Семин В.Г., Федюкин В.К. Машины и оборудование машиностроительных предприятий: учебник. СПб.: БХВ-Петербург. 2012.
2. Степыгин В.И., Чертов Е.Д., Елфимов С.А. Проектирование подъемно-транспортных установок: Уч. пособие. М.: Машиностроение. 2005.
3. Шестопалов К.К. Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. Уч. пособие. М.: Издательский центр «Академия». 2008.
4. Li, Z.-Q., Li, G.-J., Pan, L.-X. Design of multi-point automatic positioning preprogrammed crane control system//Hedongli Gongcheng/Nuclear Power Engineering. 2010. V. 31. P. 112-116.
5. Spruogis, B., Jakstas, A., Turla, V., Iljin, I., Sesok, N. Dynamic reaction forces of an overhead crane on lifting//Transport. 2011. V. 26. P. 279-283.
6. Hicar M., Ritok J. Robust Crane Control// Acta Polytechnica Hungarica. 2006. V. 3. No. 2. P. 91-101.
7. Yakut, O. Application of intelligent sliding mode control with moving sliding surface for overhead cranes // Neural Computing and Applications. 2014. V. 24, No. 6. P. 1369-1379.
8. Kurgankin, V.V., Zamyatin V.M. Method of Control of Object Positioning System and Device Scheme // Applied Mechanics and Materials: Scientific Journal. 2015. V. 756. P. 571-574.
9. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004.