

УДК 62-521/529

И. В. Акиншева

Могилевский государственный университет продовольствия

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСА
ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗОВ НА ПОДВЕСЕ**

Проведен анализ основных направлений исследований в области построения систем управления автоматизированными складскими комплексами. Определен круг задач, которые необходимо решить в процессе моделирования и проектирования. Представлена разработанная схема комплекса для перемещения груза на подвесе и динамическая схема движения каретки с грузом, при использовании которой получена уточненная математическая модель автоматического перемещения объектов с изменяющейся нагрузкой, учитывающая предъявляемые к процессу перемещения требования. Описана математическая модель, по которой производится расчет изменения положения груза, жестко закрепленного на подвесе одним концом, при перемещении несущего устройства и учитывается влияние внешних воздействий. Разработан проект опытной установки в соответствии с проведенным анализом оборудования автоматизированных складов. Определена структура управляющего микропроцессорного устройства, включенного в состав проектируемого комплекса. При выборе технических средств для управляющего устройства учитывалась возможность физической интеграции, согласованность сигналов отдельных элементов и используемого программного обеспечения.

Ключевые слова: автоматизация, модель, нагрузка, перемещение, склад, система управления, позиционирование.

I. V. Akinsheva

Mogilev State University of Food Technology

**MATHEMATICAL MODELING AND DESIGNING OF THE COMPLEX
FOR TRANSPORTATION OF LOADS ON PENDENT**

The analysis of the main areas of research in the field of building control systems for automated warehouse complexes has been carried out. The range of tasks that need to be solved in the process of modeling and design has been determined. A developed scheme of the complex for moving the load on the suspension and a dynamic diagram of the movement of the carriage with the load on the suspension are presented, using which a refined mathematical model of automatic movement of objects with varying loads is obtained, taking into account the requirements for the process of moving. A mathematical model is described, which is used to calculate the change in the position of the load, which is rigidly fixed on the suspension with one end, when the carrier is moved, and the influence of external influences is taken into account. A project of a pilot plant was developed in accordance with the analysis of the equipment of automated warehouses. The structure of the microprocessor control device included in the projected complex has been determined. When choosing technical means for the control device, the possibility of physical integration, consistency of the signals of the individual elements and the software used was taken into account.

Key words: automation, model, load, movement, warehouse, control system, positioning.

Введение. Разработка систем управления комплексами для автоматического перемещения объектов с нагрузкой является актуальной задачей при создании автоматизированных систем управления складскими помещениями промышленных предприятий во всем мире. Исследования в этой области ведутся в производственных лабораториях предприятий, занимающихся разработкой робототехнических комплексов промышленных складов. Ведущие исследования проводят ученые в лабораториях компаний Electric 80 и Vema [1], на территории стран СНГ известны разработки таких компаний, как ООО «ЭВС», Modula и Daifuku [2]. Особенностью представ-

ляемых робототехнических комплексов для оснащения автоматизированных складов является использование направляющих и перемещение по ним в трех измерениях жестко закрепленной каретки-камеры с грузом. Основные исследования ведутся в области повышения точности позиционирования и оптимальном построении каркаса из направляющих. Нерешенной является задача исследования перемещения груза на подвесе, закрепленного жестко одним концом. Такая конструкция позволит снизить затраты на разработку каркаса из направляющих в случае линейного перемещения вдоль одной оси на большие расстояния.

Целью работы является разработка уточненной математической модели и проектирование комплекса для исследования перемещения объектов с нагрузкой.

Для достижения поставленной цели планируется решить следующие задачи:

1) провести анализ действующих на производстве автоматизированных систем для перемещения грузов, выявить существующие недостатки;

2) составить динамическую схему перемещения грузов на подвесе, жестко закрепленных одним концом;

3) разработать методику моделирования и составить уточненную математическую модель автоматизированной системы для перемещения грузов;

4) разработать проект установки, реализующей автоматизированную систему для перемещения грузов, адекватную составленной модели;

5) подобрать и провести анализ согласованности комплектующих, необходимых для разработки автоматизированного комплекса;

6) определить дальнейшее направление исследований.

Актуальность исследования заключается в том, что производственные предприятия, увеличивая производительность, предъявляют повышенные требования к скорости и точности перемещения комплектующих на производственных участках, а также к перемещению готовой продукции внутри складских помещений. Поэтому разработка автоматизированных комплексов по перемещению объектов с нагрузкой является неотъемлемой частью автоматизации производства в целом.

Основная часть. Проведенный анализ показывает, что в мировой практике исследований предпочтение отдается изучению и описанию автоматического перемещения жестко закрепленных грузов, в то время как возникает необходимость в исследовании автоматического перемещения грузов на подвесах, закрепленных жестко одним концом. Недостаточное количество публикаций о результатах исследования в данной области позволяет сделать заключение о перспективности выбранного направления исследований.

В процессе анализа существующих производств и определения их недостатков разработан проект экспериментальной установки, схема которой приведена на рис. 1.

На данном этапе исследования получена математическая модель автоматического перемещения объекта с изменяемой нагрузкой. Благодаря разработанной математической модели, возможно выделение двух основных параметров: массы груза и скорости его перемещения,

используемых в дальнейшем для оптимизации и изменения характеристик системы как в формализованном виде, так и в ходе испытаний [3].

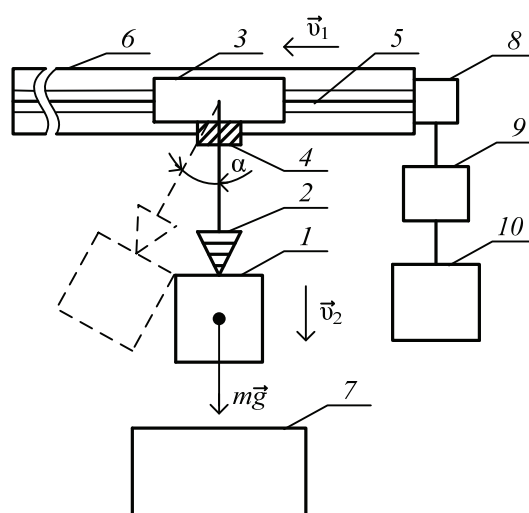


Рис. 1. Схема комплекса для перемещения груза на подвесе:

- 1 – груз массой m ; 2 – подвес с оптическим устройством; 3 – каретка с шаговым двигателем D_2 ; 4 – датчик веса; 5 – комплект ременной передачи; 6 – направляющая рейка; 7 – контейнер; 8 – шаговый двигатель D_1 ; 9 – управляющее микропроцессорное устройство; 10 – персональный компьютер (ПК)

В представленной на рис. 1 схеме введены следующие обозначения: m – масса груза 1; v_1 – скорость движения каретки 3 по горизонтали, обеспечиваемая двигателем D_1 ; v_2 – скорость движения подвеса 2 с грузом 1 по вертикали, обеспечиваемая двигателем D_2 ; α – угол отклонения груза от вертикальной оси при движении.

Для упрощения разрабатываемой математической модели исследуемой системы приняты следующие допущения [4, 5]: угол отклонения α груза от вертикальной оси должен стремиться к нулю ($\alpha \rightarrow 0$); скорость v_2 движения подвеса 2 с грузом 1 по вертикали постоянна ($v_2 = \text{const}$); скорость v_1 движения каретки 3 по горизонтали является переменной величиной.

Итак, необходимой для решения производственной задачи является адаптация в зависимости от массы m груза 1 скорости движения v_1 каретки 3 таким образом, чтобы угол $\alpha \rightarrow 0$.

Адаптировать скорость v_1 нужно для обеспечения движения груза 1 с последующим его точным перемещением в контейнер 7, а также для ликвидации помех при движении грузов с помощью нескольких аналогичных кареток в случае организации движения по конвейеру.

Математическая модель движения груза представляет собой колебательную систему, схема которой представлена на рис. 2.

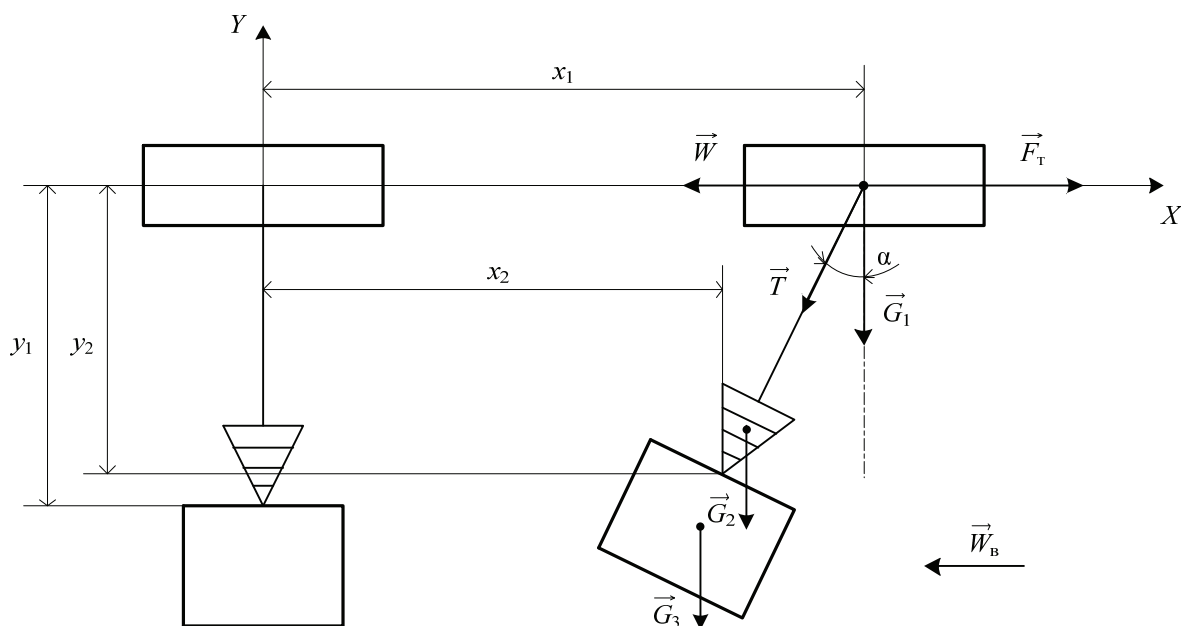


Рис. 2. Динамическая схема движения каретки с грузом на подвесе:

F_T – суммарное тяговое усилие; W – сила сопротивления движению каретки;
 W_B – сила сопротивления воздуха при движении груза; T – сила натяжения каната подвеса;
 G_1 – сила тяжести каретки совместно с датчиком веса;
 G_2 – сила тяжести подвеса с оптическим датчиком; G_3 – сила тяжести груза

В результате использования уравнения движения твердого тела [6] была составлена система уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1}(-T \sin \alpha - F_T - W); \\ \ddot{y}_1 = 0; \\ \ddot{x}_1 = \frac{1}{m + m_2}(T \sin \alpha - W_B); \\ \ddot{y}_1 = \frac{1}{m + m_2}(T \cos \alpha - (G_2 + G_3)). \end{cases} \quad (1)$$

Особенностью разработанной модели является то, что в ней учтена взаимосвязь параметров исследуемой системы: скорости движения каретки v_1 , массы груза m и изменения угла отклонения α от вертикального положения подвеса в зависимости от скорости движения каретки. Благодаря полученной взаимосвязи становится возможным исследовать изменение положения груза на подвесе при изменении скорости движения каретки и массы m груза.

Сила натяжения каната подвеса находится по следующей формуле:

$$T = k_1 \Delta l_1 + \beta \Delta \dot{l}_1,$$

где $k_1 = \frac{ES_1}{l_1}$ – коэффициент жесткости каната;
 E – модуль упругости материала каната;

$S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} c$ – площадь сечения каната; d_1 – диаметр каната; c – коэффициент заполнения сечения каната; $\Delta l = l_1 - l_2$ – удлинение каната; $l_1 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ – длина каната во время движения; l_2 – длина каната в положении равновесия; β – коэффициент рассеивания энергии; $\Delta \dot{l} = \frac{(x_1 - x_2)(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + (y_1 - y_2)(\dot{y}_1 - \dot{y}_2)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}$ – скорость удлинения каната.

Сила тяжести подвеса с оптическим прибором и сила тяжести груза соответственно равны

$$G_2 = m_2 g,$$

$$G_3 = m g,$$

где m_2 – масса подвеса с оптическим датчиком; g – ускорение свободного падения.

Угол отклонения каната от начального положения определяется по формуле

$$\alpha = \arctan \left(\frac{x_1 - \dot{x}_1}{y_1 - \dot{y}_1} \right).$$

Сила сопротивления воздуха при движении груза равна

$$W_B = 500 \rho x_2 c_a n,$$

где ρ – плотность воздуха; c_a – коэффициент аэродинамической силы; n – коэффициент перегрузки.

В исходной системе $\ddot{y}_1 = 0$, так как ранее было принято допущение $v_2 = \text{const}$.

Управляющее микропроцессорное устройство, используемое для управления шаговыми двигателями D_1 и D_2 , включает контроллер модели Nano V 3.0 Arduino, в пакет поставки которого входит программное обеспечение, позволяющее реализовывать алгоритмы управления [7] (рис. 3).

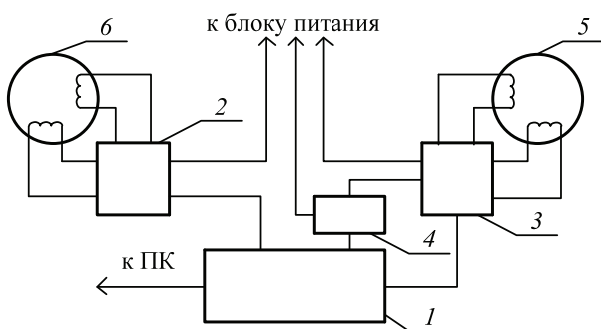


Рис. 3. Схема управляющего микропроцессорного устройства:

- 1 – контроллер; 2, 3 – интерфейсные модули для шаговых двигателей; 4 – датчик веса; 5, 6 – шаговые двигатели D_1 и D_2 соответственно

Также при реализации комплекса для перемещения груза на подвесе, представленного схемами на рис. 1, 3, будут использованы следующие комплектующие.

Обеспечивать движение груза по горизонтали и вертикали будут шаговые двигатели со встроенным редуктором 28BYJ-48 и платой ULN2003 Arduino. Сопряжение шаговых двигателей с контроллером будет производиться через интерфейсные модули модели L298N. Для анализа массы m подвешиваемого груза будет использоваться датчик веса Eleaf для Arduino UNO DIY [8].

В роли оптического устройства может выступать маломощный лазер марки Dot, необходимый для индикации угла отклонения α от вертикальной оси, или датчик положения, предназначенный для определения места расположения контейнера, в который должен быть помещен груз.

Заключение. В результате моделирования получена уточненная математическая модель комплекса по перемещению грузов на подвесе, жестко закрепленных одним концом. Выделены основные параметры рассматриваемого объекта, найдены функциональные взаимосвязи между ними, что позволит разработать алгоритмы, реализующие решение задачи управления разработываемым комплексом по минимизации угла отклонения подвеса от вертикального положения и адаптации скорости движения каретки в зависимости от массы перемещаемого груза.

При разработке проекта комплекса по перемещению грузов на подвесе выполнен выбор комплектующих для реализации управляющего микропроцессорного устройства с учетом согласованности входных и выходных сигналов, используемых программных и технических средств на элементной базе Arduino.

Литература

1. Рахманкулов Р. Автоматизированные складские системы компании MODULA // Control Engineering Россия. 2017. № 1. С. 65–69.
2. The integrated solutions of ELETTRIC 80 and BEMA // Maggio, TISSUEMAG. 2018. № 5. P. 36–39.
3. Akinsheva I. V., Ivanova I. D., Kaminski E. Исследование устойчивости нелинейных объектов // Problemy Inzynierii Rolniczej. 2016. Vol. 1. P. 41–52.
4. Абрамович И. И., Березин В. Н., Яуреи А. Г. Грузоподъемные краны промышленных предприятий. М.: Машиностроение, 1989. 360 с.
5. Козловский В. Б., Паршенцев С. А., Ефимов В. В. Вертолет с грузом на внешней подвеске. М.: Машиностроение: Машиностроение-Полет, 2008. 304 с.
6. Яблонский А. А. Курс теоретической механики. В 2 ч. Ч. 2. Динамика. М.: Высшая школа, 1984. 411 с.
7. Преснухин Л. Н. Микропроцессоры. Средства сопряжения. Контролирующие и информационно-управляющие системы. М.: Высшая школа, 2006. 383 с.
8. Петин В. А., Биняковский А. А. Практическая энциклопедия Arduino. М.: ДМК Пресс, 2017. 152 с.

References

1. Rakhmankulov R. Automated storage systems by MODULA. *Control Engineering Rossiya*, 2017, no. 1, pp. 65–69 (In Russian).
2. The integrated solutions of ELETTRIC 80 and BEMA. *Maggio, TISSUEMAG*, 2018, no. 5, pp. 36–39 (In Italian).
3. Akinsheva I. V., Ivanova I. D., Kaminski E. The study of the stability of nonlinear objects. *Problemy Inzynierii Rolniczej*, 2016, vol. 1, pp. 41–52 (In Russian).

4. Abramovich I. I., Berezin V. N., Yaurei A. G. *Gruzopod'yemnyye krany promyshlennykh predpriyatiy* [Hoisting cranes industrial enterprises]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1989. 360 p.
5. Kozlovskiy V. B., Parshentsev S. A., Efimov V. V. *Vertolet s грузом na vneshney podveske* [Helicopter with external load]. Moscow, Mashinostroeniye, Mashinostroeniye Polet Publ., 2008. 304 p.
6. Yablonskiy A. A. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki. V 2 chastyakh. Chast' 2. Dinamika* [The course of theoretical mechanics. In 2 parts. Part 2. Dynamics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1984. 411 p.
7. Presnukhin L. N. *Mikroprotsessory. Sredstva sopryazheniya. Kontroliruyushchiye i informationno-upravlyayushchiye sistemy* [Microprocessors. Means of coupling. Control and information management systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 383 p.
8. Petin V. A., Binyakovskiy A. A. *Prakticheskaya entsiklopediya Arduino* [Practical encyclopedia Arduino]. Moscow, DMK Press Publ., 2017. 152 p.

Информация об авторе

Акиншева Ирина Владиславовна – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств. Могилевский государственный университет продовольствия (212027, г. Могилев, пр-т Шмидта, 3, Республика Беларусь). E-mail: starrina@mail.ru

Information about the author

Akinsheva Irina Vladislavovna – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Automation of Technological Processes and Production. Mogilev State University of Food Technology (3, Schmidt Ave., 212027, Mogilev, Republic of Belarus). E-mail: starrina@mail.ru

Поступила 15.05.2019