

УДК 517.977.54

С. А. Овцов, В. В. Сарока

Белорусский государственный технологический университет

**РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ЛИНИИ
ДЛЯ ПОГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ПОДВЕСКИ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ**

В статье рассматривается проблема возникновения нежелательной инерции подвески с деталями во время передвижения гальванического робота-манипулятора порталного типа. Раскачивание штанги приводит к уменьшению точности установки рамы автооператора над гальваническими ваннами, нарушению безопасного ведения технологического процесса и увеличению себестоимости продукции.

В связи с заданными условиями, изучая двухмассовую модель системы, разработан метод по устранению колебаний при переходных режимах (разгон или торможение рамы автооператора) переноса деталей между технологическими позициями. Выявлен критерий оптимальности, который включает квадрат амплитуды колебаний, совершаемых подвеской, и квадрат электродинамического усилия, возникающего в обмотках двигателя при передвижении. Данные условия необходимы для максимального быстродействия системы, увеличения точности позиционирования и уменьшения энергозатрат.

С помощью метода динамического программирования Беллмана заданный критерий приведен к минимуму и определена функция оптимального управления робота-манипулятора. На основании полученных математических выкладок синтезирована система оптимального управления и смоделированы графики динамики системы.

В качестве сравнения в статье представлены графики динамики системы с автоматической настройкой оптимального регулятора. Данное сравнение позволяет проверить правильность и точность найденной функции оптимального управления.

Ключевые слова: оптимальное управление, автооператор, критерий оптимальности, функция оптимального управления.

S. A. Ovtsov, V. V. Saroka

Belarusian State Technological University

**THE DEVELOPMENT OF OPTIMAL CONTROL SYSTEMS
BY ROBOTIC-MANIPULATOR OF GALVANIC LINES
FOR MATURITY VIBRATIONS SUSPENSION IN TRANSITION MODES**

The article deals with the problem of unwanted inertia with suspension parts during the movement of galvanic robotic arm gantry. Rocking rod reduces the accuracy of the installation autooperator frame of galvanic baths, a breach of security of the technological process and increase sebestoimsoti products.

In connection with the given conditions, studying the two-mass model of the system, we developed a method to eliminate vibrations during transient (acceleration or deceleration of the frame autooperator) transfer of the parts between technological positions. The optimal criterion which includes the square of the amplitude of oscillations made by the suspension, and the square elektrodinmacheskogo force generated in the motor windings when traveling were revealed. These conditions are necessary to maximize system performance, increase positioning accuracy and reduce energy consumption.

Using the method of dynamic programming Bellman specified criterion reduced to a minimum and determined the optimal function of the robot manipulator control. Based on mathematical calculations, synthesize optimal control system and graphics system modeled dynamics.

As a comparison, the article presents the dynamics of the system graphics with automatic adjustment of the optimal regulator. This comparison allows you to check the correctness and accuracy of the found optimal control function.

Key words: optimal control, autooperator, optimality criterion, the function of optimal control.

Введение. Работа порталного автооператора гальванической линии имеет строго циклический характер, при этом переходные режимы движения механизма занимают значительную часть от всей длительности рабочего

цикла робота. Одним из способов повышения эффективности работы автоматизированной гальванической линии является оптимизация переходных режимов движения автооператора с подвеской (разгон/торможение).

Раскачивание подвески с грузом, которое возникает в течение переходных режимов движения автооператора, является причиной его неравномерного движения, дополнительных нагрузок на элементы привода автооператора. Это угрожает безопасному ведению технологического процесса и сокращает производительность.

Колебания могут затруднять точность установки подвески над заданной позицией соответствующей ванны. Особенно это относится к крупногабаритным и тяжелым обрабатываемым деталям. Колебательный характер движения груза может вносить неопределенность в программу автоматизированной работы робота-манипулятора. Кроме того, значительно возрастают динамические нагрузки на элементы привода и металлоконструкцию автооператора, которые уменьшают их надежность.

Существуют три группы способов устранения колебаний груза:

- маневрирование автооператора за счет ручного управления;
- применение специальных подвесок или направляющих;
- использование адаптивных систем управления приводами автооператоров.

Первые два способа в современных условиях гальванического производства не способны обеспечить достаточное качество устранения колебаний подвески: первый способ связан с психофизическими особенностями рабочего-оператора (усталость и пр.), второй – с необходимостью изменения конструкции подвески и направляющих. Поэтому распространенной является третья группа способов.

Устранять колебания подвески можно, управляя скоростью движения манипулятора либо другим кинематическим или динамическим параметром.

Целесообразным является использование, например, нечеткого регулирования, которое в некотором смысле копирует логику человека, его способы принятия решений, по тем или иным воздействиям на движение автооператора. Однако нечеткому регулированию свойственны те же недостатки, что и ручному: движение портального автооператора не является оптимальным.

Характер влияния на движение элементов автооператора должен обеспечивать минимизацию нежелательных (например, динамические нагрузки, максимальное отклонение оси подвески и т. п.) или максимизацию желаемых свойств (например, плавность движения, быстродействие и т. д.) движения системы.

Основная часть. Поставим комплексную задачу оптимального управления движением автооператора с подвеской. Эта задача заключается в том, что необходимо найти оптимальное

управление движением автооператора при устранении колебаний подвески до момента остановки (т. е. рассматривается процесс торможения). Такая постановка задачи позволяет разогнать портальный автооператор по любому закону, при этом колебания подвески сохраняются в течение установившегося движения. Однако, как известно, установившееся движение автооператора составляет небольшую часть от общей продолжительности его перемещения – оно может даже отсутствовать. Поэтому целесообразно поставить задачу устранения колебаний груза именно в течение торможения подвески.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) определить дифференциальное уравнение, описывающее передвижение робота-манипулятора;
- 2) выявить критерий оптимальности, учитывая необходимый параметры;
- 3) вычислить функцию оптимального управления;
- 4) выполнить синтез оптимального управления движения автооператора во время его торможения и с устранением колебаний подвески с учетом ограничений, накладываемых на величину управления.

Автооператор, как правило, может работать в недетерминированной внешней среде, поэтому важно обеспечение оптимальности процесса при воздействии стохастических внешних возмущений. Для этого необходимо получить информацию о текущем состоянии системы, т. е. следует использовать обратные связи по различным параметрам движения.

Для исследований примем двухмассовую модель механизма передвижения автооператора (рис. 1), которая достаточно широко используется в задачах исследования динамики движения роботов-манипуляторов и оптимизации их движения [1].

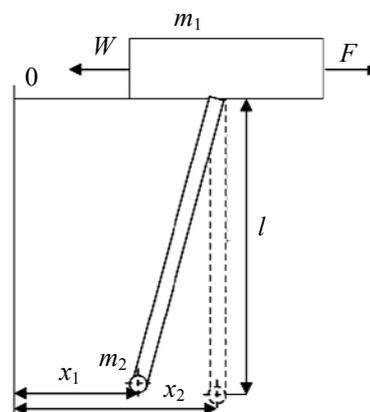


Рис. 1. Двухмассовая модель системы движения робота-манипулятора

Стоит отметить, что рассматривается весь цикл торможения/разгона робота-манипулятора, а не разбивается на определенные этапы. Такое исследование проблемы позволяет получить более точный и наглядный результат. Однако даже с учетом всех перечисленных требований всех недостатков в разработке системы оптимального управления не избежать.

Приведенная расчетная схема описывается системой дифференциальных уравнений [1]:

$$\begin{cases} m_1 \dot{x}_1 + m_2 \dot{x}_2 = F - W \operatorname{sign} \dot{x}_1, \\ \ddot{x}_2 + \frac{g}{l}(x_2 - x_1) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где m_1 – приведенная масса рамы автооператора; x_1, x_2 – начальные и конечные положения подвески при передвижении рамы автооператора соответственно; m_2 – масса подвески с грузом; F – суммарное тяговое или тормозное усилие, действующее на раму; W – приведенная сила сопротивления перемещению рамы; g – ускорение свободного падения; l – длина подвески.

Будем полагать, что при перемещении рамы в течение торможения рама не меняет свою скорость, т. е. $\operatorname{sign} \dot{x}_1 = 1$. Приведенную систему дифференциальных уравнений можно свести к одному уравнению второго порядка относительно разницы перемещений $x = x_1 - x_2$ [1]:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = \frac{F - W}{m_1}, \quad (2)$$

где $\omega = \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)g}{m_1 l}}$ – частота собственных

маятниковых колебаний груза относительно подвижной точки подвеса.

Дифференциальное уравнение (2) можно представить в виде системы канонических уравнений, если принять следующие обозначения

$$u = \frac{F - W}{m_1}, \quad y_1 = x:$$

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2, \\ \dot{y}_2 = u - \omega^2 y_1. \end{cases} \quad (3)$$

В качестве критерия оптимизации выберем комплексный (кинематически-динамический) интегральный критерий, который отражает в соответствующих пропорциях величину квадрата отклонения подвески с грузом от вертикали и величину квадрата динамической составляющей приводного усилия:

$$I = \int_0^T \left[k_1 \dot{x}^2 + k_2 \left(\frac{F - W}{m_1} \right)^2 \right] dt, \quad (4)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты, стоящие при единичных условиях и которые можно записать в таком виде [2]:

$$\begin{cases} k_1 = \delta_1 \bar{I}_1^{-1}, \\ k_2 = (1 - \delta_1) m_1^2 \bar{I}_2^{-1}, \end{cases} \quad (5)$$

где δ_1 – весовой коэффициент, учитывающий важность первого слагаемого в подынтегральном выражении критерия (5); \bar{I}_1, \bar{I}_2 – минимально возможные значения единичных критериев.

Такая структура критерия позволяет получить оптимальное управление движением автооператора.

Поясним выбор именно такого критерия. По некоторым видам операций транспортировки требуется, чтобы величина отклонения подвески с грузом от вертикали была минимальной. Предыдущие исследования основываются на принципе максимума, что, как известно, увеличивает динамические нагрузки в приводе механизма перемещения рамы, хотя общая продолжительность торможения минимальна.

Что касается минимизации динамической составляющей приводного усилия, то это позволит сократить электрические потери в обмотках двигателя, поскольку эквивалентный момент асинхронного двигателя и двигателя постоянного тока независимого возбуждения примерно пропорциональны эквивалентному току, который определяет электрические потери [3].

С учетом введенных выше обозначений критерий по выражению (4) можно переписать в следующем виде:

$$I = \int_0^T \left[k_1 y_1^2 + k_2 u^2 \right] dt. \quad (6)$$

Для минимизации критерия (6) используем метод динамического программирования Р. Беллмана [4]. Основное функциональное уравнение запишем так:

$$\min \left[k_1 y_1^2 + k_2 u^2 + \frac{\partial S}{\partial y_1} y_2 + \frac{\partial S}{\partial y_2} (u - \omega^2 y_1) \right] = 0, \quad (7)$$

где S – функция Беллмана.

Минимум правой части уравнения (7) будем искать по параметру управления u , для чего продифференцируем его по u и приравняем полученное выражение к нулю:

$$2k_2 u + \frac{\partial S}{\partial y_2} = 0. \quad (8)$$

Найдем из уравнения (8) искомое u :

$$u = -\frac{1}{2k_2} \frac{\partial S}{\partial y_2}. \quad (9)$$

Подставим найденное значение u в уравнение (7), в результате чего получим:

$$k_1 y_1^2 + \frac{\partial S}{\partial y_1} y_2 - \frac{\partial S}{\partial y_2} y_1 \omega^2 - \frac{1}{4k_2} \left(\frac{\partial S}{\partial y_2} \right)^2 = 0. \quad (10)$$

Выражение (10) является нелинейным дифференциальным уравнением в частных производных. Искать его решение следует в виде квадратичной формы, как принято при решении подобных задач [5]:

$$S = A_1 y_1^2 + A_2 y_1 y_2 + A_3 y_2^2, \quad (11)$$

где A_1, A_2, A_3 – постоянные коэффициенты, которые необходимо определить.

Возьмем частные производные выражения (11) относительно y_1 и y_2 :

$$\frac{\partial S}{\partial y_1} = 2A_1 y_1 + A_2 y_2, \quad (12)$$

$$\frac{\partial S}{\partial y_2} = A_2 y_1 + 2A_3 y_2. \quad (13)$$

Подставим полученные формулы (12) и (13) в уравнение (10) и получим:

$$\left(k_1 - \frac{A_3^2}{4k_2} - A_3 \omega^2 \right) y_1^2 + \left(A_2 - \frac{A_2^2}{k_2} \right) y_1^2 + \left(2A_1 - \frac{A_2 A_3}{k_2} - 2A_2 \omega^2 \right) y_1 y_2 = 0. \quad (14)$$

Уравнение (14) будет справедливым в том случае, когда выражения в скобках будут равны нулю, поскольку $y_1 \neq 0, y_2 \neq 0$. Поэтому формулу (14) можно заменить системой нелинейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} k_1 - \frac{A_3^2}{4k_2} - A_3 \omega^2 = 0, \\ A_2 - \frac{A_2^2}{k_2} = 0, \\ 2A_1 - \frac{A_2 A_3}{k_2} - 2A_2 \omega^2 = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Из решения системы уравнений (15) выберем один действительный корень, который не приводит к потере устойчивости системы.

Подставив найденные корни в выражение (9), получим следующую функцию оптимального управления:

$$u = \frac{y_1 \left[k_2 \omega^2 - \sqrt{k_2 (k_1 + k_2 \omega^4)} \right]}{k_2} - \frac{\sqrt{2} y_1 y_2 \sqrt{k_2 \left[\sqrt{k_2 (k_1 + k_2 \omega^4)} - k_2 \omega^4 \right]}}{k_2}. \quad (16)$$

Итак, нам удалось синтезировать функцию управления $u = u(y_1, y_2, k_1, k_2, \omega)$.

Используя пакет Matlab, можно смоделировать оптимальную систему управления передвижением робота-манипулятора с автоматической настройкой регулятора. Однако следует отметить, что установки для синтеза регулятора подобраны теоретическим путем, чтобы обеспечить идеальные переходные процессы.

После моделирования получаем следующие графики динамики системы: погашение колебаний подвески с деталями (рис. 2) и уменьшение электродинамического усилия (рис. 3).

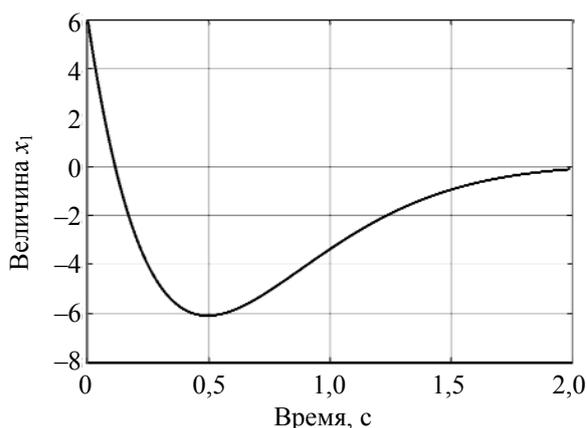


Рис. 2. График динамики системы относительно амплитуды раскачивания

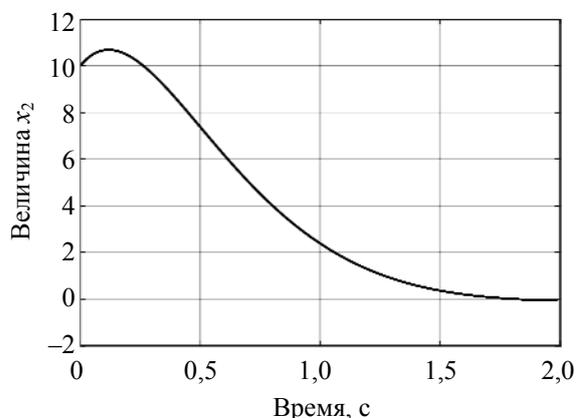


Рис. 3. График динамики системы относительно скачка электродинамического усилия

Как видно из графиков, время переходного процесса составляет 2 с, отклонение от желаемого

мой величины для амплитуды – 60%, а для электродинамического усилия – 6,5%.

С помощью найденной функции (16) можно создать структурную схему системы управления автооператором (рис. 4).

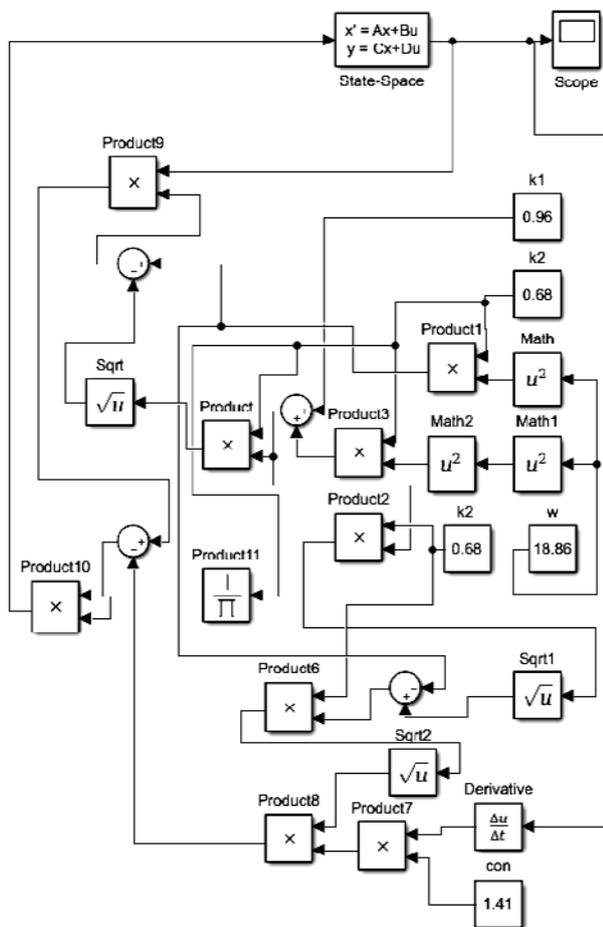


Рис. 4. Структурная схема системы управления с оптимальным регулятором

В ходе моделирования получаем следующие графики динамики системы (рис. 5 и 6).

В результате моделирования время переходного процесса улучшилось (0,9 с), а также уменьшилось отклонение от желаемой величины для амплитуды (34%). Однако стоит отметить, что отклонение для электродинамического усилия возросло (36%).

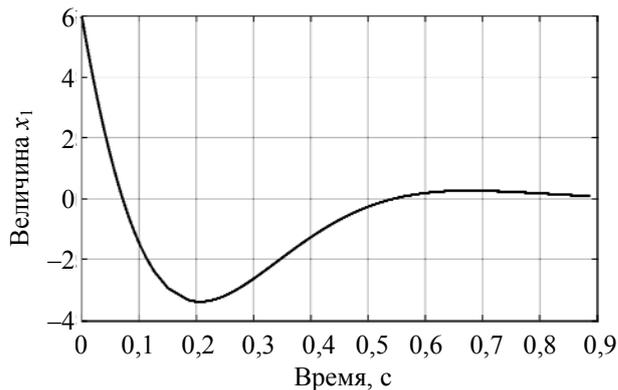


Рис. 5. График динамики системы относительно амплитуды раскачивания с оптимальным регулятором

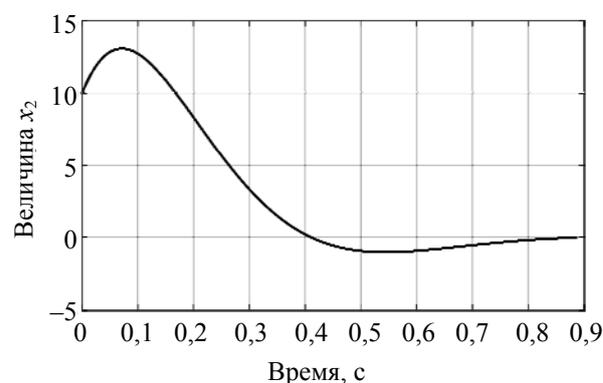


Рис. 6. График динамики системы относительно скачка электродинамического усилия с оптимальным регулятором

Заключение. Использование метода динамического программирования и прямого вариационного метода дает возможность осуществить оптимизацию режима торможения рамы, причем характер оптимального управления движением рамы в горизонтальном направлении является плавным, а абсолютное значение управления не превышает установленные пределы.

Недостатком полученного оптимального управления является то, что длина подвески остается неизменной во времени – это делает невозможным совмещать две операции: перемещение рамы и подъем/опускание груза, что, в свою очередь, увеличивает продолжительность перемещения груза из одного положения в другое.

Литература

1. Ловейкин В. С., Ромасевич Ю. О. Комплексный синтез оптимального управления движением грузоподъемного крана // Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении. 2011. № 45. С. 385–389.
2. Геронимус Я. Л., Перельмутер М. М. О некоторых методах определения оптимального закона движения, рассматриваемого как управляющее воздействие // Машиноведение. 1966. № 6. С. 6–24.
3. Смехов А. А., Ерофеев Н. И. Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами // М.: Машиностроение, 1975. 239 с.
4. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М.: Наука, 1965. 460 с.

5. Олейников В. А., Золотов Н. С., Пришвин А. М. Основы оптимального и экстремального управления. М.: Высш. шк., 1969. 296 с.

References

1. Loveykin V. S., Romasevich Yu. O. A comprehensive synthesis of the optimal motion control crane. *Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov v mashinostroenii i priborostroenii* [Automation of production processes in mechanical engineering and instrument], 2011, no. 45, pp. 385–389 (In Russian).
2. Geronimus Y. L., Perel'muter M. M. Some methods of determining the optimum law of motion, considered as the control action. *Mashinovedeniye* [Knowing machines], 1966, no. 6, pp. 6–24 (In Russian).
3. Smekhov A. A., Erofeev N. I. *Optimal'noye upravleniye pod'yemno-transportnymi mashinami* [Optimal control of handling machinery]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1975. 239 p.
4. Bellman R., Dreyfus S. *Prikladnyye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya* [Applications of dynamic programming]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 460 p.
5. Oleynikov V. A., Zolotov N. S., Prishvin A. M. *Osnovy optimal'nogo i ekstremal'nogo upravleniya* [Foundations of optimal control and extreme]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1969. 296 p.

Информация об авторах

Овцов Сергей Александрович – аспирант кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: s.ovtsov@mail.ru

Сарока Виктор Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: viksar@mail.ru

Information about the authors

Ovtsov Sergey Aleksandrovich – PhD student, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: s.ovtsov@mail.ru

Saroka Viktor Viktorovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: viksar@mail.ru

Поступила 15.12.2016