

УДК 517.977.54

С. А. Овцов, В. В. Сарока

Белорусский государственный технологический университет

**ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ РАБОТЫ АВТООПЕРАТОРА
ПОРТАЛЬНОГО ТИПА ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ЛИНИИ
МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ БЕЛЛМАНА**

В статье рассматривается проблема повышения быстродействия процесса переноса деталей между технологическими позициями в гальванической линии в условиях нежелательной инерции подвески с деталями во время передвижения гальванического робота-манипулятора портального 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 уменьшения времени переходного процесса (разгон или торможение рамы автооператора) для переноса деталей между технологическими позициями. Выявлен критерий оптимальности, который включает квадрат времени переходного процесса 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.

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

S. A. Ovtsov, V. V. Saroka

Belarusian State Technological University

**INCREASE IN THE SPEED OF OPERATION OF THE PORTAL OPERATOR
OF THE GALVANIC LINE TYPE BY THE DYNAMIC PROGRAMMING OF BELLMAN**

The article considers the problem of increasing the speed of the process of transferring parts between technological positions in the galvanic line under the conditions of undesirable inertia of the suspension with parts during the movement of the galvanic robot manipulator of the portal type. Rocking of the rod leads to a decrease in the accuracy of the installation of the auto operator's frame over the galvanic baths, the disruption of safe operation of the technological process and the increase in the cost of production.

In connection with the given conditions, studying the two-mass model of the system, a method has been developed for reducing the time of the transient process (acceleration or braking of the auto-operator frame) for transferring parts between technological positions. An optimality criterion is found that includes the square of the time of the transient process and the square of the electrodynamic force arising in the motor windings during the movement. These conditions are necessary for maximum system speed, increasing positioning accuracy and reducing power consumption.

Using Bellman's dynamic programming method, the specified criterion is minimized and the optimal control function of the robot manipulator is determined. Based on the mathematical calculations obtained, the optimal control system was synthesized and the dynamics graphs of the system were simulated.

Key words: speed, optimal control, auto operator, criterion of optimality, optimal control function.

Введение. Работа портального 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, дополнитель-

ных 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 полное устранение 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.

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 с учетом повышения быстродействия всего процесса передвижения с учетом большой протяженности

гальванической линии до момента остановки. Рассмотрение такой задачи позволяет разгонять портальный автооператор по любому закону, при этом колебания подвески сохраняются в течение установившегося движения, а время переходного процесса заметно сокращается.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) определить дифференциальное уравнение, описывающее передвижение робота-манипулятора;
- 2) задать критерий оптимальности, учитывающий необходимые параметры;
- 3) вычислить функцию оптимального управления;
- 4) выполнить синтез оптимального управления движением автооператора во время его торможения 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. необходимо 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, 2].

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 перечисленных ранее требований всех недостатков в разработке системы оптимального управления не избежать.

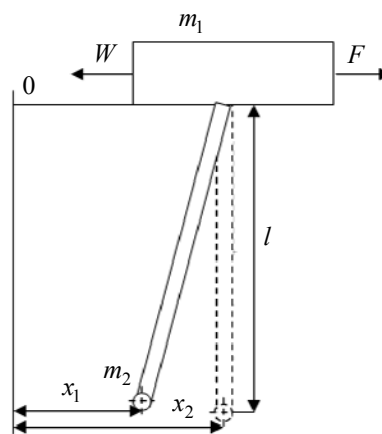


Рис. 1. Двухмассовая модель системы движения робота-манипулятора

Приведенная расчетная схема описывается системой дифференциальных уравнений [2]:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + m_2 x_2 \frac{g}{l} = F - W, \\ m_2 \left(\frac{d^2 x_2}{dt^2} - \frac{d^2 x_1}{dt^2} \right) + m_2 x_2 \frac{g}{l} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

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.

Приведенную систему дифференциальных уравнений можно свести к одному уравнению второго порядка [2, 3]:

$$\frac{d^2 x_2}{dt^2} + \omega^2 x_2 = \frac{F - W}{m_1}, \quad (2)$$

где $\omega = \sqrt{\frac{g}{l} \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right)}$ – частота собственных маятниковых колебаний груза относительно подвижной точки подвеса.

Дифференциальное уравнение (2) можно представить в виде системы канонических уравнений, если принять следующие обозначения $u = \frac{F - W}{m_1}$, $z_1 = x_2$:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2, \\ \dot{z}_2 = (u - \omega^2 z_1). \end{cases} \quad (3)$$

В качестве критерия оптимизации выберем комплексный (кинематически-динамический) интегральный критерий, который отражает в соответствующих пропорциях величину квадрата времени передвижения автооператора и величину квадрата динамической составляющей приводного усилия [2, 3]:

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

где k_1 и k_2 – коэффициенты, стоящие при единичных условиях.

Поясним выбор именно такого критерия. Для уменьшения времени переходного процесса необходимо повысить скорость передвижения автооператора с учетом безопасного ведения технологического процесса. Следовательно,

но, необходим нестандартный критерий оптимальности с переменной времени в подынтегральном выражении.

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 [4].

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

$$I = \int_0^T \left[k_2 z_2^2 + k_1 u^2 \right] dt. \quad (5)$$

Для минимизации критерия (5) используем метод динамического программирования Р. Беллмана [5]. Основное функциональное уравнение запишем так:

$$\min \left[k_2 z_2^2 + k_1 u^2 + \frac{\partial S}{\partial z_1} z_2 + \frac{\partial S}{\partial z_2} (u - \omega^2 z_1) \right] = 0, \quad (6)$$

где S – функция Беллмана.

Минимум правой части уравнения (6) будем искать по параметру управления u , для чего про дифференцируем его по u и приравняем полученное выражение к нулю:

$$2k_1 u + \frac{\partial S}{\partial z_2} = 0. \quad (7)$$

Найдем из уравнения (7) искомое u :

$$u = -\frac{1}{2k_1} \frac{\partial S}{\partial z_2}. \quad (8)$$

Подставим найденное значение u в уравнение (6), в результате чего получим:

$$k_2 z_2^2 + \frac{\partial S}{\partial z_1} z_2 - \frac{\partial S}{\partial z_2} z_1 \omega^2 - \frac{1}{4k_1} \left(\frac{\partial S}{\partial z_2} \right)^2 = 0. \quad (9)$$

Уравнение (9) является нелинейным дифференциальным уравнением в частных производных. Искать его решение следует в виде квадратичной формы, как принято при решении подобных задач [6]:

$$S = A_1 z_2^2 + A_2 z_1 z_2 + A_3 z_1^2, \quad (10)$$

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

Возьмем частные производные выражения (10) относительно u_1 и u_2 :

$$\frac{\partial S}{\partial z_1} = A_2 z_2 + 2A_3 z_1, \tag{11}$$

$$\frac{\partial S}{\partial z_2} = 2A_1 z_2 + A_2 z_1. \tag{12}$$

Подставим полученные выражения (11) и (12) в уравнение (10) и получим:

$$z_2^2 \left(k_2 + A_2 - \frac{A_1^2}{k_1} \right) - z_1^2 \left(A_2 \omega^2 + \frac{A_2^2}{4k_1} \right) + z_1 z_2 \left(2A_3 - 2\omega^2 A_1 - \frac{A_1 A_2}{k_1} \right) = 0. \tag{13}$$

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:

$$\begin{cases} k_2 + A_2 - \frac{A_1^2}{k_1} = 0, \\ A_2 \omega^2 + \frac{A_2^2}{4k_1} = 0, \\ 2A_3 - 2\omega^2 A_1 - \frac{A_1 A_2}{k_1} = 0. \end{cases} \tag{14}$$

Из решения системы уравнений (14) выберем один действительный корень, который не приводит к потере устойчивости системы.

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

$$u = 2\omega^2 z_1 - \frac{z_2 \sqrt{k_1(k_2 - 4\omega^2 k_1)}}{k_1}. \tag{15}$$

Итак, нам удалось синтезировать функцию управления $u = u(z_1, z_2, k_1, k_2, \omega)$.

Использование метода динамического программирования и прямого метода всех вариаций позволяет достичь оптимального режима торможения, характер оптимального управления движением рамки в горизонтальном направлении является плавным, а абсолютное контрольное значение не превышает заданные пределы. Это уменьшает динамическую нагрузку на двигатели автооператора.

Недостаток оптимальной системы управления системой «подвеска – рама» – слабое управление в конце торможения при низкой энергии колебаний.

Используя пакет Matlab, можно синтезировать оптимальную систему управления, используя найденную оптимальную функцию u .

Полученные математические расчеты позволяют составить структурную схему оптимального регулятора (рис. 2).

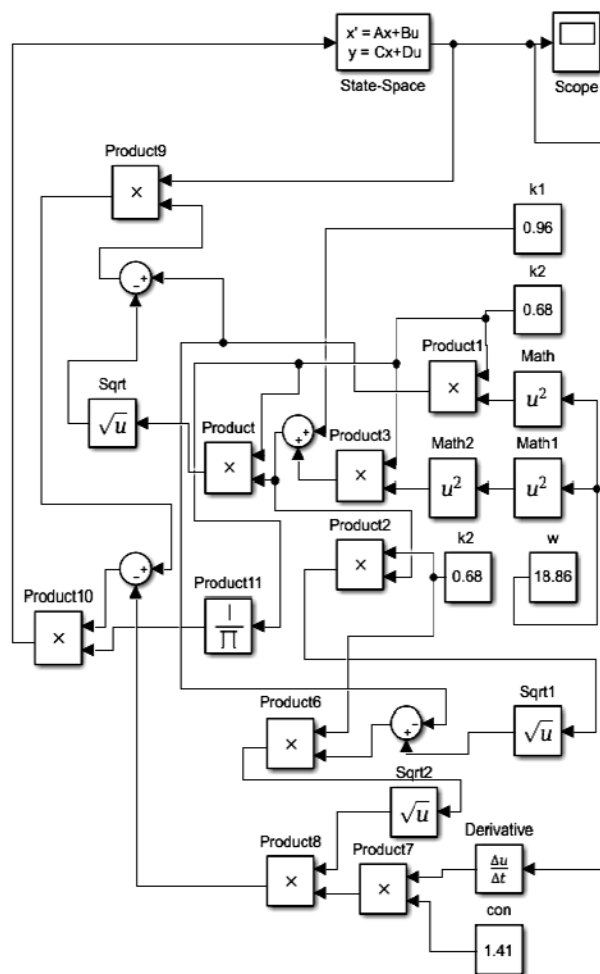


Рис. 2. Структурная схема системы управления с оптимальным регулятором

В ходе моделирования получаем следующие графики динамики системы (рис. 3 и 4).

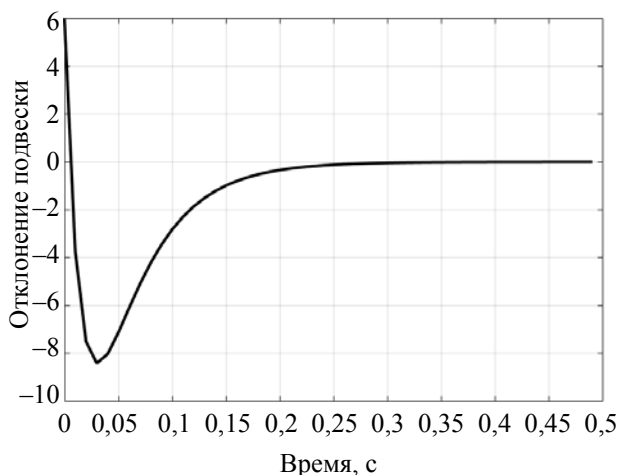


Рис. 3. График динамики системы относительно отклонения подвески

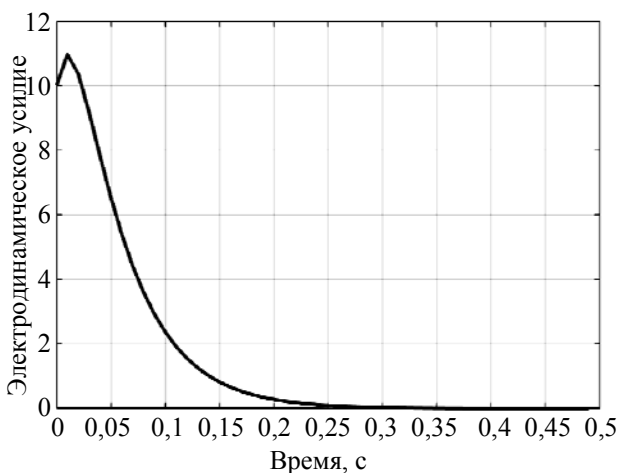


Рис. 3. График динамики системы относительно скачка электродинамического усилия

Как видно из графиков, время переходного процесса составляет 0,5 с, сдвиг от желаемой величины для отклонения подвески – 8,3, а для электродинамического усилия – 6,5.

Заключение. Во время процесса переноса деталей между технологическим положением было обнаружено, что при ускорении и тормо-

жении автооператора возникают нежелательные колебания подвески, которые приводят к уменьшению точности позиционирования. Поэтому была рассчитана функция оптимального управления движения автооператора, на основе которой был синтезирован оптимальный регулятор. Это управление позволяет быстро удалить нежелательную инерцию, тем самым увеличивая скорость движения автоматического манипулятора.

Важно учитывать то, что данный способ повышения быстродействия робота-манипулятора гальванической линии целесообразно использовать только при большой протяженности технологической линии. В противном случае, повышение быстродействия автооператора не будет давать экономического эффекта в виде уменьшения энергопотребления, а нагрузка на двигатель рамы существенно возрастет.

Также для повышения быстродействия робота-манипулятора в гальванической линии можно использовать векторное управление с оптимальным регулятором, что будет рассматриваться в дальнейшем.

Литература

1. Геронимус Я. Л., Перельмутер М. М. О некоторых методах определения оптимального закона движения, рассматриваемого как управляющее воздействие // *Машиноведение*. 1966. № 6. С. 6–24.
2. 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.
3. Овцов С. А., Сарока В. В. Разработка оптимальной системы управления роботом-манипулятором гальванической линии для погашения колебаний подвески в переходных режимах // *Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика*. 2017. № 1. С. 63–68
4. Смехов А. А., Ерофеев Н. И. *Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами*. М.: Машиностроение, 1975. 239 с.
5. Беллман Р., Дрейфус С. *Прикладные задачи динамического программирования*. М.: Наука, 1965. 460 с.
6. Олейников В. А., Золотов Н. С., Пришвин А. М. *Основы оптимального и экстремального управления*. М.: Высш. шк., 1969. 296 с.

References

1. Geronimus Ya. 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).
2. 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).
3. Ovtsov S. A., Saroka V. V. Development of the optimal control system for the robot manipulator of the galvanic line for the damping of suspension oscillations in transient modes. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 3, Physics and mathematics. Informatics, 2017, no. 1, pp. 25–27 (In Russian).
4. Smekhov A. A., Erofeev N. I. *Optimal'noye upravleniye pod'yemno-transportnymi mashinami* [Optimal control of handling machinery]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1975. 239 p.
5. Bellman R., Dreyfus S. *Prikladnyye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya* [Applications of dynamic programming]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 460 p.
6. 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

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

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

Information about the authors

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

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

Поступила 15.12.2016