

<https://doi.org/10.26160/2572-4347-2021-14-8-13>

## СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГИИ НА ДВИЖЕНИЕ ОБЪЕКТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПНЕВМОПРИВОДА С ОПТИМАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДРОССЕЛИРОВАНИЕМ

*Бохонский А.И., Варминская Н.И.*

**Ключевые слова:** оптимальное управление, экономия энергии, пневматический привод, дросселирование.

**Аннотация.** Найдены законы изменения во времени площадей дроссельных отверстий, обеспечивающие оптимальное перемещение объекта из исходного в конечное состояние покоя со снижением энергозатрат на управление типа «разгон-торможение». Выполнен численный анализ динамики переносного движения объекта.

## REDUCING ENERGY FOR OBJECT MOVEMENT WHEN USING A PNEUMATIC DRIVE WITH OPTIMUM THROTTLE CONTROL

*Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I.*

**Keywords:** optimal control, energy saving, pneumatic drive, throttling.

**Abstract.** The laws of time changing of the throttling aperture areas are found, which ensure the optimal movement of the object from the initial to the final state of quiescence with a decrease in energy consumption for control of the "acceleration-deceleration" type. The numerical analysis of the dynamics of the translational movement of the object is carried out.

### Введение

В работах [1-3] предложены и исследованы реверсионно конструируемые оптимальные управления переносным поступательным и вращательным движением объектов как абсолютно твердых и деформируемых систем. Показано [1], что при использовании сконструированного нового типа управления возможна экономия энергии при практической реализации движения объекта из исходного в конечное состояние покоя, заданном перемещении и фиксированном времени движения.

В статье [8] с использованием теории пневмоприводов [4-6] дано решение задачи оптимального поступательного перемещения объекта с привлечением для реализации кососимметричного управления изменения площадей дроссельных отверстий (согласно полученным аналитическим зависимостям). В [1] отражены результаты синтеза управлений, которые приводят к существенной экономии энергии при реализации движений.

Представляет теоретический и особенно практический интерес задача использования пневмопривода (с управляемым дросселированием) для реализации нового типа оптимального управления.

*Цель исследования* – анализ законов изменения площадей дроссельных отверстий при реализации пневмоприводом управлений поступательным переносным движением объектов.

### Моделирование оптимального переносного движения

Расчетные аналитические зависимости получены с использованием следующих допущений: изменение плотности рабочего тела не влияет на

характеристики расхода; динамические характеристики расхода совпадают со статическими; в рассматриваемый момент времени во всех точках камер давления одинаковы; закон Клапейрона-Менделеева выполняется в любой момент времени.

В [3] получены универсальные аналитические зависимости в случае оптимального управления типа «разгон-торможение» при перемещении объекта из исходного в конечное состояние покоя. Для произвольной степени полинома перемещение имеет вид:

$$S_e(t) = \frac{L}{2T_1(n+1)} \left( T_1^{-(n+1)} (T_1 - 2t)^{n+2} + 2(n+2)t - T_1 \right), \quad (1)$$

где  $n = 1, 3, 5, 7, \dots$ ;  $T_1$  – общее время движения;  $L$  – перемещение.

Из (1) скорость  $V_e(t) = \frac{dS_e(t)}{dt}$ , ускорение (управление)  $U_e(t) = \frac{dV_e(t)}{dt}$ .

В случае  $n = 1$  из (1) следует классическая задача Лагранжа оптимального управления. Энергия, затрачиваемая на реализацию такого управления ( $m = 1$  кг):

$$A_1 = 2 \int_0^{T_1/2} U_e(t)V_e(t)dt = \frac{2,25L}{T_1^2}.$$

Если  $n = 3$ , то:

$$U_e(t) = \frac{10L}{T_1^2} \frac{(T_1 - 2t)^3}{T_1^3}, \quad V_e(t) = \frac{10L}{T_1^2} \frac{(T_1 - t)(2t^2 - 2T_1t + T_1^2)t}{T_1^3}, \quad (2)$$

$$S_e(t) = \frac{L}{T_1^2} \frac{(5T_1^3 - 10T_1^2t + 10T_1t^2 - 4t^3)t^2}{T_1^3}.$$

Графики зависимостей (2) изображены на рисунке 1.

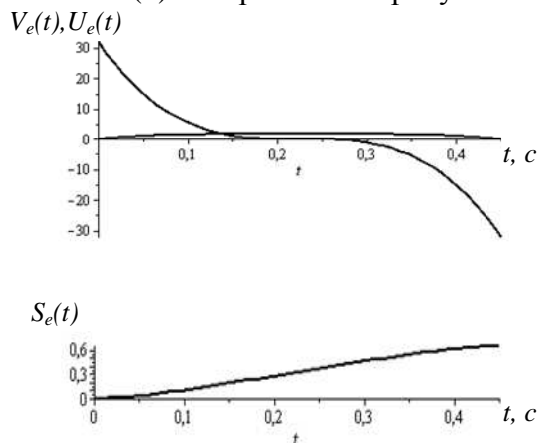


Рис. 1. Графики движения объекта: перемещения  $S_e(t)$ , скорости  $V_e(t)$  и ускорения  $U_e(t)$  (при  $n = 3$ )

В произвольный момент времени массы воздуха в камерах (полостях) цилиндра равна:

$$m_1(t) = P_1 S \frac{(x_0 + S_e(t))}{RT}, \quad m_2(t) = P_2 S \frac{(L - x_0 - S_e(t))}{RT}, \quad (3)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения цилиндра. Общая масса воздуха в цилиндре  $m = SL\gamma$ , где  $\gamma$  – плотность воздуха,  $m = m_1 + m_2$ . Система уравнений для определения давлений в камерах преобразуется к виду:

$$P_1 S \frac{(x_0 + S_e(t))}{RT} + P_2 S \frac{(L - x_0 - S_e(t))}{RT} = SL\gamma,$$

$$P_1 - P_2 = m_* U_e(t),$$

где второе уравнение отражает динамику переносного движения объекта массы  $m_*$ .

Массовый расход воздуха может быть представлен приближенно зависимостями [5]

$$G_1 = \frac{dm_1}{dt} = 0,0015 d_1^2 P_m \sqrt{1 - \frac{P_1}{P_m}},$$

$$G_2 = \frac{dm_2}{dt} = 0,0015 d_2^2 P_m \sqrt{1 - \frac{P_2}{P_m}},$$

где  $d_1, d_2$  – диаметры условных проходов распределителя.

Энергия, затрачиваемая на реализацию данного управления, равна:

$$A_3 = 2 \int_0^{\tau_1/2} U_e(t) V_e(t) dt = \frac{1,5625 L^2}{T_1^2}.$$

Для данного управления энергозатраты на 30% меньше по сравнению с известным управлением, найденным классическим вариационным методом (т.е. при  $n = 1$ ).

Схема пневмопривода изображена на рисунке 2.

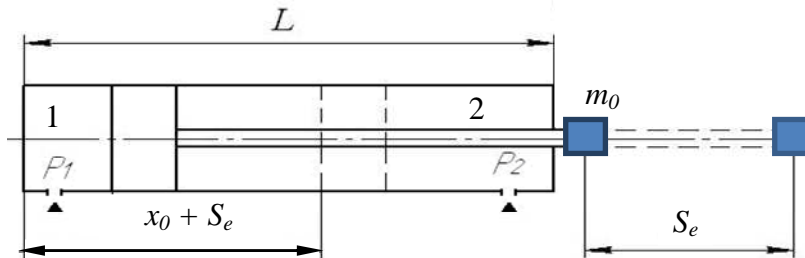


Рис. 2. Пневмопривод с перемещаемой массой:  $x_0$  – длина полости предварительного наполнения;  $L$  – общее перемещение

Массы воздуха в камерах 1 и 2 определяются с использованием уравнения Клапейрона-Менделеева:  $\frac{PV}{RT} = m$ , где  $P$  – давление в камере;  $V$  – объем воздуха;  $T$  – абсолютная температура; здесь принято  $R = R/M$ ,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $M$  – молярная масса.

Полагая  $\frac{\pi d^2}{4} = \delta(t)$ , где  $\delta(t)$  – площадь дроссельного отверстия, можно записать  $\delta_1(t) = \frac{\pi d_1^2}{4}$ ,  $\delta_2(t) = \frac{\pi d_2^2}{4}$ .

С учетом производных по времени от масс (3) получены выражения для определения переменных площадей дроссельных отверстий:

$$\begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} \left( (x_0 + S_e(t)) + P_1 \frac{dS_e}{dt} \right) \frac{S}{RT} &= G_1, \\ \frac{dP_2}{dt} \left( (L - x_0 - S_e(t)) - P_2 \frac{dS_e}{dt} \right) \frac{S}{RT} &= G_2. \end{aligned} \tag{4}$$

Из уравнений (4) следуют выражения для площадей дроссельных отверстий как функций времени:

$$\begin{aligned} \delta_1(t) &= \frac{\pi S_1 \left( \dot{P}_1 (x_0 + S_e(t) + P_1 V_e(t)) \right)}{4 \cdot 0,0015 P_m \sqrt{1 - P_1/P_m} RT}, \\ \delta_2(t) &= \frac{\pi S_2 \left( \dot{P}_2 (L - x_0 - S_e(t) - P_2 V_e(t)) \right)}{4 \cdot 0,0015 P_m \sqrt{1 - P_2/P_m} RT}. \end{aligned}$$

Для построения графиков  $\delta_1(t)$  и  $\delta_2(t)$  приняты следующие исходные данные:  $T_1 = 0,45$  с;  $L = 0,65$  м;  $S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(0,02)^2}{4}$ ;  $P_a = 10^5$  Па;  $\gamma = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>;  $R = 286,55$  Дж/(кг·град);  $m_* = 2$  кг;  $T = 373^\circ$ .

Графики  $\delta_1(t)$  и  $\delta_2(t)$  изображены на рисунке 3.

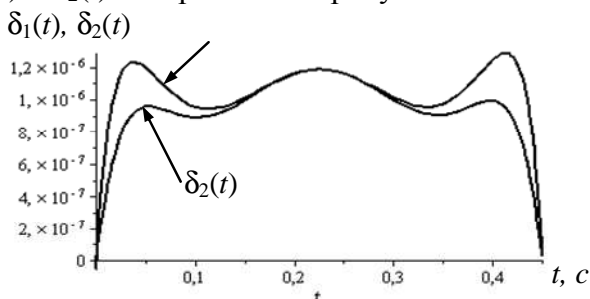


Рис. 3. Графики площадей дроссельных отверстий:  $\delta_1(t)$  - для классического управления;  $\delta_2(t)$  - для нового типа управления

$P_1(t) - P_2(t)$

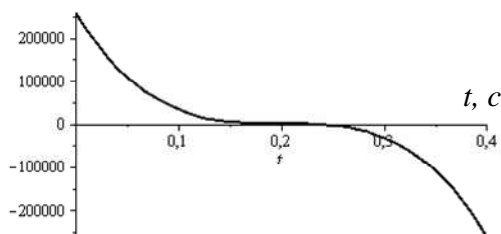


Рис. 4. Графики управления  $U = P_1(t) - P_2(t)$

Важно отметить, что расход воздуха для первой камеры больше, чем расход при наполнении второй камеры. График управления как разности давлений  $P_1(t) - P_2(t)$ , изображенный на рисунке 4, имеет кососимметричный характер и по форме соответствует ускорению, изображенному на рисунке 1.

### Список литературы

1. Бохонский А.И. Энергоемкость управления перемещением объектов // *Фундаментальные основы механики*. – 2017. – №2. – С. 38-41.
2. Бохонский А.И. Конструирование управляемого движения объекта / А.И. Бохонский, А.И. Рыжков // *Мехатроника, автоматика и робототехника*. – 2017. – №1. – С. 64-69.
3. Бохонский А.И. Конструирование оптимального управления движения объектов как абсолютно твердых и деформируемых тел / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – Орел, 2016. – С. 70-76.
4. Герц Е.В. Пневматические приводы. – М.: Машиностроение, 1969. – 360с.
5. Герц Е.В. Расчет пневмоприводов / Е.В. Герц, Г.В. Крейнин.– М.: Машиностроение, 1975. – 272 с.
6. Дмитриев В.М. Основы пневмоавтоматики / В.М. Дмитриев, В.С. Градецкий. – М.: Машиностроение, 1973. – 360 с.
7. Бохонский А.И. Реализация оптимальных нагрузений упругой системы с помощью пневмопривода / А.И. Бохонский, Е.В. Исаева // *Вестник СевНТУ: сб.науч.тр.* – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2002. – Вып. 5. – С.175-179.
8. Бохонский А.И. Реализация оптимального переносного поступательного движения упругого объекта пневмоприводом с управлением дросселированием / А.И. Бохонский, М.М. Майстришин // *Вестник СевНТУ: Сер. Механика, энергетика, экология*. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. – С. 134-138.

### References

1. Bokhonsky A.I. Energy intensity of objects motion control // *Fundamental foundations of mechanics*. – 2017. – №2 – P. 38-41.
2. Bokhonsky A.I. Designing an object controlled movement / A.I. Bokhonsky, A.I. Ryzhkov // *Macaronis, Automation and Robotics: mater. int. scientific and practical conf.* – 2017. – №1. – P. 64-69.
3. Bokhonsky A.I. Designing the optimal motion control for the absolutely rigid and deformable objects / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, A.I. Ryzhkov // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – Orel: SRC MS, 2016. – P. 70 – 76.
4. Hertz E.V. Pneumatic drives. – М.: Mechanical Engineering, 1969. – 360 p.
5. Hertz E.V. Calculation of pneumatic drives / E.V. Hertz, G.V. Kreinin. – М.: Mechanical Engineering, 1975. – 272 p.

6. Dmitriev V.M. Fundamentals of pneumatic automation / V.M. Dmitriev, V.S. Hradetsky. – M.: Mechanical Engineering, 1973. – 360 p.
7. Bokhonsky A.I. Implementation of optimal loading of an elastic system using a pneumatic drive / A.I. Bokhonsky, E.V. Isaeva // Bulletin of SevNTU: collection of scientific foundations. – Sevastopol: Publ. house of SevNTU, 2002. – Issue 5. – P. 175-179.
8. Bokhonsky A.I. Implementation of the optimal translational motion of an elastic object with a pneumatic drive with throttling control / Bokhonsky, M.M. Maistrishin // Bulletin of SevNTU: Mechanics, energy, ecology. – Sevastopol: Publ. house of SevNTU, 2010. – P. 134-138.

<p><b>Бохонский Александр Иванович</b> – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Цифровое проектирование», Севастопольский государственный университет, г.Севастополь, Российская Федерация, bohon.alex@mail.ru</p>	<p><b>Bokhonsky Alexander Ivanovich</b> – doctor of technical sciences, professor, professor of the Digital Design Department, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, bohon.alex@mail.ru</p>
<p><b>Варминская Наталья Ивановна</b> – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой физики и общетехнических дисциплин, Черноморское высшее военно-морское училище им. П.С.Нахимова, г.Севастополь, Российская Федерация, nvarminska@gmail.com</p>	<p><b>Varminskaya Natalia Ivanovna</b> – candidate of technical sciences, associate professor, head of the Department of Physics and General Technical Disciplines, Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov, Sevastopol, Russian Federation, nvarminska@gmail.com</p>

*Received 26.10.2021*