

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА УСТАНОВОЧНЫХ ДВИЖЕНИЙ МЕХАНИЗМОВ МАШИН

© 2024

- С. П. Приходько** ассистент, аспирант кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы»;
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону;
sergey.161.96@gmail.com
- В. С. Сидоренко** доктор технических наук, профессор кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы»;
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону;
vsidorenko@donstu.ru
- Д. А. Коротыч** ассистент, аспирант кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы»;
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону;
daniilberuk@gmail.com

Создание новых и совершенствование действующих машин и механизмов требует развития приводостроения и создания новых систем приводов, способных конкурировать с известными на сегодняшнее время схмотехническими решениями. В этих условиях создание комбинированных пневмомеханических приводов является важной научно-технической задачей. Целью настоящей работы является повышение быстродействия при заданной точности вспомогательных движений целевых механизмов технологических машин путём создания пневмомеханического привода с улучшенными энергетическими и динамическими характеристиками. Представлено техническое решение позиционного пневмомеханического привода исполнительных движений технологического оборудования, разработаны математическая и компьютерная модели. При этом используется метод решения дифференциального уравнения в программе SiminTech. В результате получена осциллограмма переходных процессов. Разработанные модели позволяют проводить динамический анализ пневмомеханических систем.

Позиционный пневмомеханический привод; система приводов; целевой механизм; технологическое оборудование; математическая модель

Цитирование: Приходько С.П., Сидоренко В.С., Коротыч Д.А. Исследование динамических характеристик пневмомеханического привода установочных движений механизмов машин // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 2. С. 132-142. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-132-142

Введение

Технологическое оборудование современного производства должно отвечать требованиям интенсификации рабочих процессов, гибкости и переналаживаемости, выполнять сложные алгоритмы многих исполнительных движений. Механизмы исполнительных движений обеспечивают взаимное расположение инструмента и обрабатываемой заготовки, функционирование транспортирующих, ориентирующих, фиксирующих и других целевых механизмов, что во многом определяет эффективность и качество процессов обработки. Такими механизмами оснащена большая часть автоматизированного металлообрабатывающего оборудования (координатно-сверлильные станки, станки с ЧПУ, робототехнические устройства и др.). Время выполняемых ими позиционных перемещений достигает 30...35% оперативного времени обработки и является важным резервом повышения производительности [1 – 3]. Поэтому создание новых и совершенствование действующих механизмов исполнительных движений (координатные и подающие столы, револьверные инструментальные головки и магазины и

другие) приобретает самостоятельное значение и является важной задачей. Её решение требует единого подхода к синтезу схемотехнических решений исполнительных механизмов, оптимальных по конструкции и рабочим процессам.

Техническое предложение

В результате проведённого ранее анализа [6] было выявлено, что причинами ограничения позиционирования в заданной координате выступают сложная термодинамика движения и высокая сжимаемость воздуха. Максимальная точность позиционирования может быть достигнута разрывом кинематической связи привода с объектом управления.

Позиционный цикл предлагаемого привода состоит из следующих движений: быстрый подвод, переключение на скорость позиционирования, останов в заданной координате, быстрый отвод. Точность и быстродействие являются главными критериями эффективности, которые отвечают за перемещением в заданную координату при выполнении позиционного цикла. Типовая позиционная траектория движения исполнительного механизма представлена на рис. 1.

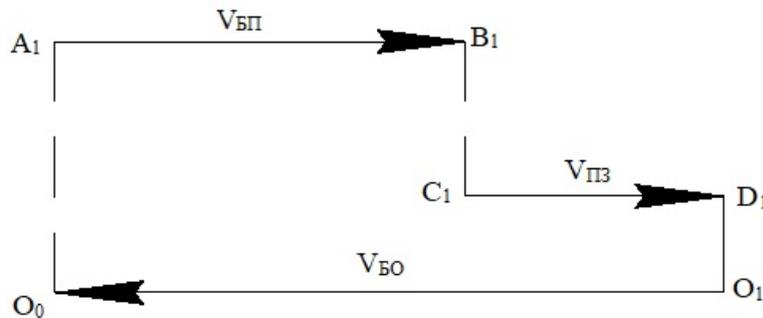


Рис. 1. Траектория движения исполнительного механизма

Траектории движения $A_1B_1 - C_1D_1 - O_1O_0$ называется оптимальной траекторией движения, так как обеспечивает минимальное время перемещения до заданной координаты (A_1B_1 – быстрый подвод со скоростью $V_{БП}$, C_1D_1 – движение со скоростью позиционирования $V_{ПЗ}$). Такая траектория получена благодаря решению задачи обеспечения оптимального быстродействия при перемещении подвижных частей механизмов машин. Траектория движения характеризуется следующими элементами [3 – 5]:

1. Начальная точка O_0 – исходное положение «стоп» – выходное звено привода жёстко зафиксировано начальная скорость $V_0 = 0$, длина перемещения $L = 0$;

2. Участок движения O_0A_1 характеризует разгон объекта управления до скорости быстрого подвода $V_{БП}$ по заданной траектории;

3. Участок движения A_1B_1 – установившееся движение со скоростью быстрого подвода $V_{БП}$;

4. В момент прибытия в точку B_1 – переключение на скорость позиционирования $V_{ПЗ}$;

5. Участок B_1C_1 – характеризует переключение на скорость позиционирования $V_{ПЗ}$;

6. Участок движения C_1D_1 – движение со скоростью позиционирования $V_{ПЗ}$;
7. В момент прибытия в точку D_1 – останов движения привода;
8. Участок движения O_1O_0 – движение исполнительного механизма в исходное положение со скоростью $V_{БО}$.

Схема предлагаемого пневмомеханического привода представлена на рис. 2.

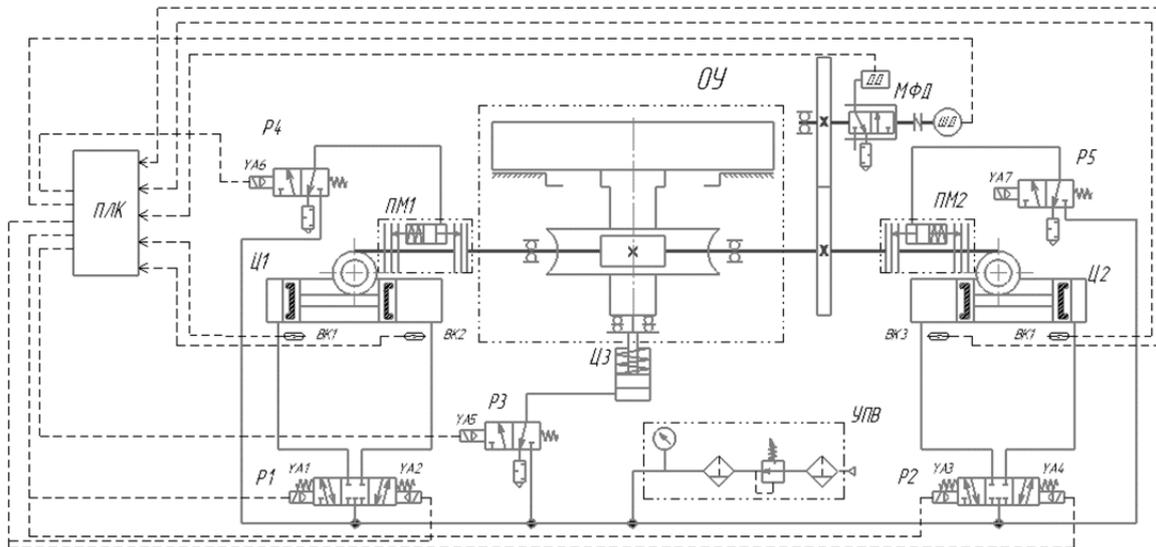


Рис. 2. Схема принципиальная пневмомеханического привода:

УПВ – блок подготовки сжатого воздуха; P1, P2, P3, P4, P5 – распределители; Ц1, Ц2 – поворотные цилиндры; Ц3 – пневмоцилиндр; ПМ1, ПМ2 – пневмофрикционные муфты; BK1, BK2, BK3, BK4 – датчики положения; ПЛК – программируемый логический контроллер; ОУ – координатный стол

По структуре привод состоит из подсистемы питания в виде блока подготовки сжатого воздуха УПВ, двухдвигательной силовой подсистемы с разжимом-зажимом и системой фиксации планшайбы координатного стола от её проворота, механической подсистемы в виде пневмофрикционных муфт ПМ1 и ПМ2, подсистемы управления на базе программируемого логического контроллера (ПЛК) и объекта управления – координатного стола ОУ. Разжим-зажим и фиксация планшайбы координатного стола ОУ осуществляется пневмоцилиндром Ц3. В исходном состоянии распределители P1, P2 и P3 находятся в положениях, обеспечивающих фиксацию планшайбы и одно из крайних положений поворотного цилиндра Ц1. Выполнение следующего перемещения осуществляется программируемым логическим контроллером ПЛК по сигналам датчиков положение BK1, BK2 и BK3, BK4, регистрирующих исполнение перемещения по логико-вычислительным блокам ПЛК. Одновременно с началом движения Ц1 и включением ПМ1 Ц3 осуществляет разжим планшайбы. Пневмофрикционные муфты ПМ1 и ПМ2 управляются распределителями P4 и P5, обеспечивая поворот и поддержание вращения выходного вала в одном направлении при изменении направления хода поршней поворотных пневмоцилиндров Ц1 и Ц2 [6].

Математическое моделирование

На основе принципов и правил математического описания динамических подсистем с механическими связями была составлена математическая модель пневмомеханического привода, которая представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих изменение параметров системы.

Были приняты следующие допущения [4; 6 – 8]:

- давление и температура сжатого воздуха, поступающего от источника питания, считаются постоянными ($p_n = \text{const}$, $T_n = \text{const}$), так как магистраль питания подключена через регулятор давления к ресиверу достаточно большого объёма;
- термодинамические процессы, происходящие в пневмоприводе, считаются адиабатными, поскольку позиционирование происходит за достаточно короткий отрезок времени;
- так как давление в пневмоприводе не превышает 10 бар (1 МПа), то сжатый воздух считается идеальным газом, подчиняющимся закону Клапейрона-Менделеева;
- сухое трение в подвижных сопряжениях пневмоаппаратов из-за наличия консистентной смазки не учитывается.

Расчётная схема пневмомеханического привода представлена на рис. 3.

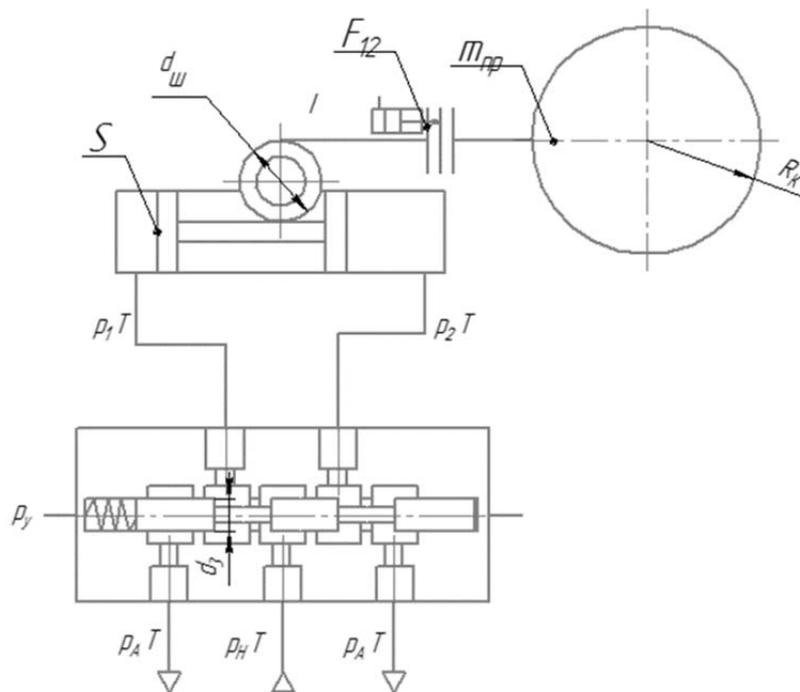


Рис. 3. Расчётная схема пневмомеханического привода

Все уравнения, составляющие модель пневмомеханической системы, могут быть объединены в две группы: уравнения расхода и уравнения движения [3 – 5].

Уравнение движения поршня цилиндра исполнительного механизма:

$$I_{\text{imp}} \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} = (p_1 - p_2) S R_w - M_{\text{IC}} \text{sign} \frac{d\varphi}{dt} - \alpha M_1, \quad (1)$$

где $I_{\text{imp}} = m_n R_w^2$ – приведённый момент, Н·м; m_n – масса подвижных частей привода, кг; R_w – радиус шестерни, м; p_1, p_2 – давление воздуха соответственно в нагнетательной и выхлопной полости цилиндров, Па; S – эффективная площадь полости пневмоцилиндра, м²; $M_{\text{IC}} = M_{\text{BT}} + M_{\text{T0}}$ – момент сопротивления движению, Н·м; m_n – масса подвижных частей привода, кг; α – булев параметр; M_1 – упругий момент ПМ1, Н·м.

Уравнение движения вала исполнительного механизма:

$$I_{\text{лп}} \frac{d^2 \varphi_{\text{л}}}{dt^2} = \beta M_2 - M_{\text{лс}} \text{sign} \frac{d\varphi_{\text{л}}}{dt} - M_{\text{мфд}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{лп}} = I_{\text{вин}} + I_{\text{лп.см}}$ – приведённый момент, Н·м; β – булев параметр; M_2 – упругий момент ПМ2, Н·м; $M_{\text{лс}} = M_{\text{лвт}} + M_{\text{лто}}$ – момент сопротивления движению, Н·м; $M_{\text{мфд}}$ – момент на датчике, Н·м.

Уравнение движения золотника управляющего устройства:

$$m_{\text{лп}} \frac{d^2 x_y}{dt^2} + k \frac{dx_y}{dt} + c_n (x_0 \pm x_y) = p_y \frac{\pi d_3^2}{4} - F_{\text{то}} \text{sign} \frac{dx_y}{dt}, \quad (3)$$

где $m_{\text{лп}}$ – приведённая масса ОУ, кг; коэффициент вязкого трения, кг/с; x_y – перемещение золотника, м; c_n – коэффициент жёсткости пружины золотника; p_y – давление управления, Па; d_3 – диаметр золотника распределителя, м; $F_{\text{то}}$ – суммарная сила сопротивления движению, Н.

Уравнение углового перемещения реечной передачи:

$$W_p g - \delta V_R = 0, \quad (4)$$

где W_p – угловое перемещение, рад/с; $g = 2\pi/N_p X_R$ – передаточное число; N_p – число зубьев шестерни; X_R – расстояние между зубьями рейки; V_R – скорость рейки.

Пневматическая подсистема привода описывается уравнением давления воздуха в напорной полости:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{k f_1 \sqrt{RT_M}}{S(x + x_{01}) \sqrt{\xi_1}} \sqrt{p_H^2 - p_1^2} - \frac{k p_1}{x + x_{01}} \cdot \frac{dx}{dt}, \quad (5)$$

где p_1 – давление воздуха в нагнетательной магистрали, Па; k – показатель адиабаты; f_1 – площади проходного сечения трубопроводов, м²; R – газовая постоянная, Дж/кг·К; T_M – температура в нагнетательной магистрали, К; S – эффективная площадь полости пневмоцилиндра, м²; p_H – давление компрессора, Па; x – текущее положение поршня пневмоцилиндра, м; x_{01} – отношение начальных («пассивных») объёмов V_{01} пневмопривода к полезной площади поршня поршневого и штоковой полости пневмоцилиндра соответственно; ξ_1 – коэффициент сопротивления подводящей линии; $\frac{dx}{dt}$ – скорость перемещения поршня, м/с.

Уравнение давления воздуха в выхлопной полости:

$$\frac{dp_2}{dt} = - \frac{k f_2 \sqrt{RT_M}}{S(L - x + x_{02}) \sqrt{\xi_2}} \left(\frac{p_2}{p_m} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{p_2^2 - p_a^2} + \frac{k p_2}{L - x + x_{02}} \cdot \frac{dx}{dt}, \quad (6)$$

где p_2 – давление воздуха в выхлопной магистрали, Па; k – показатель адиабаты; f_2 – площади проходного сечения трубопроводов, m^2 ; R – газовая постоянная, Дж/кг·К; T_m – температура в нагнетательной магистрали, К; S – эффективная площадь полости пневмоцилиндра, m^2 ; L – максимальный ход поршня, м; x – текущее положение поршня пневмоцилиндра, м; p_a – атмосферное давление, Па; x_{02} – отношение начальных («пасивных») объёмов V_{02} пневмопривода к полезной площади поршня поршневой и штоковой полости пневмоцилиндра соответственно, м; ξ_2 – коэффициент сопротивления выхлопной линии; $\frac{dx}{dt}$ – скорость перемещения поршня, м/с.

Система дифференциальных уравнений может решаться различными численными методами (Эйлера, Рунге-Кутта и т.п.) при заданных начальных условиях, параметрах привода и управляющих воздействиях, функционально зависящих от координаты выходного звена [9].

Блок-схема математической модели представлена на рис. 4.

В соответствии с предлагаемой моделью была разработана программа математического моделирования системы пневмомеханического привода. На рис. 5 – 8 представлены графики изменения по времени давления в полости пневмоцилиндра, скорости движения поршней пневмоцилиндра, перемещения поршней пневмоцилиндра, изменения углового перемещения и угловой скорости планшайбы координатного стола.

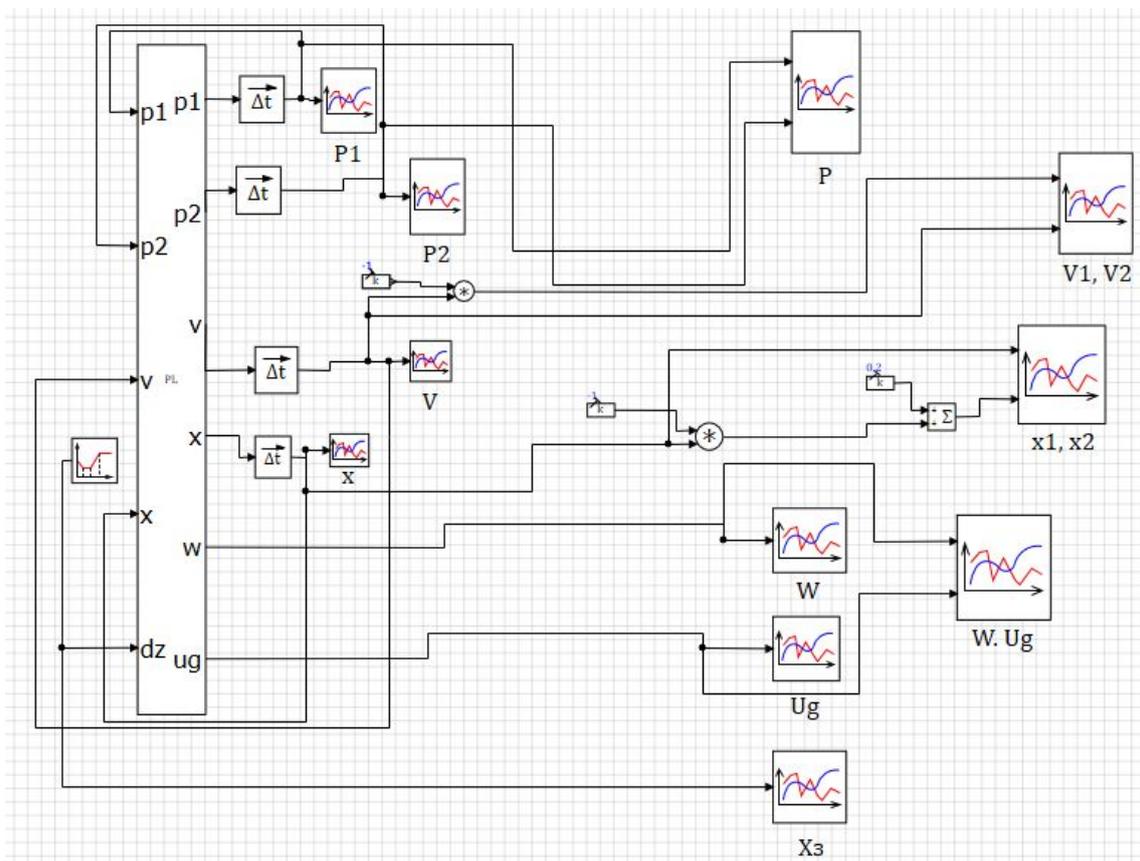


Рис. 4. Блок-схема математической модели пневмомеханического привода

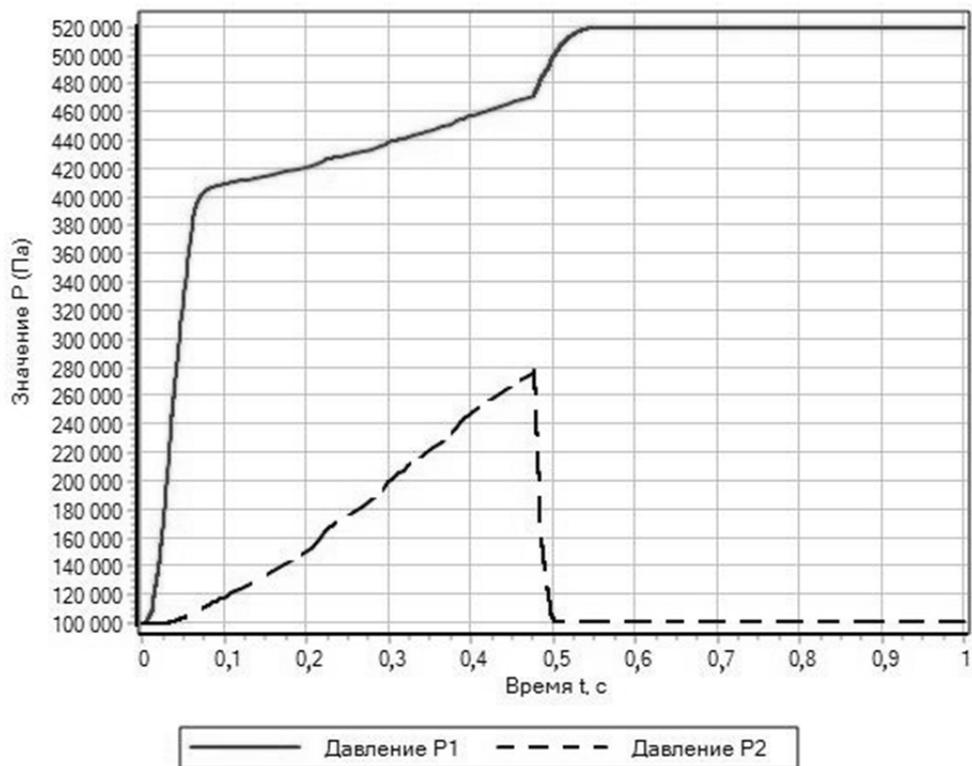


Рис. 5. График изменения давления в полостях пневмоцилиндра по времени

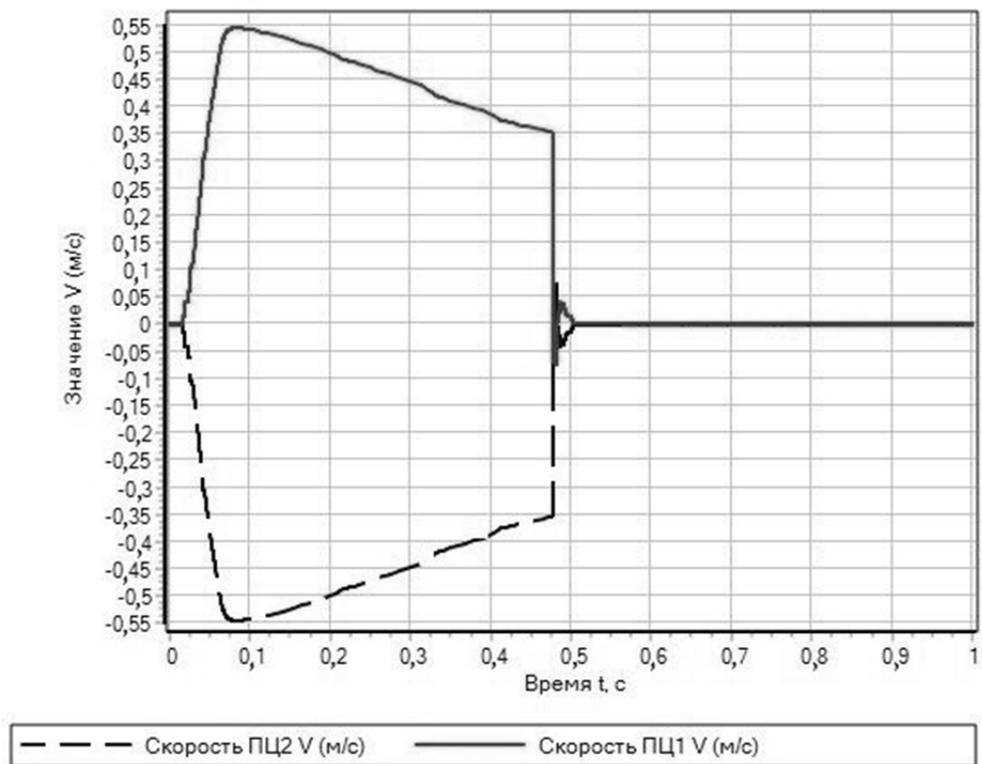


Рис. 6. График изменения скорости движения поршней пневмоцилиндра по времени

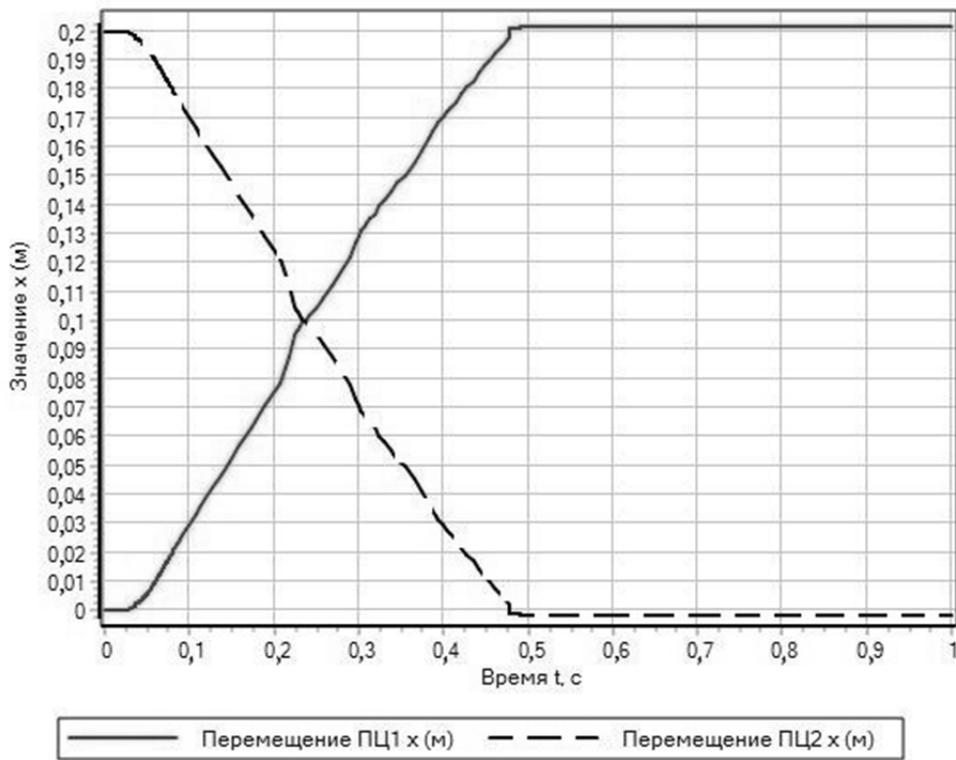


Рис. 7. График изменения перемещения поршней пневмоцилиндра по времени

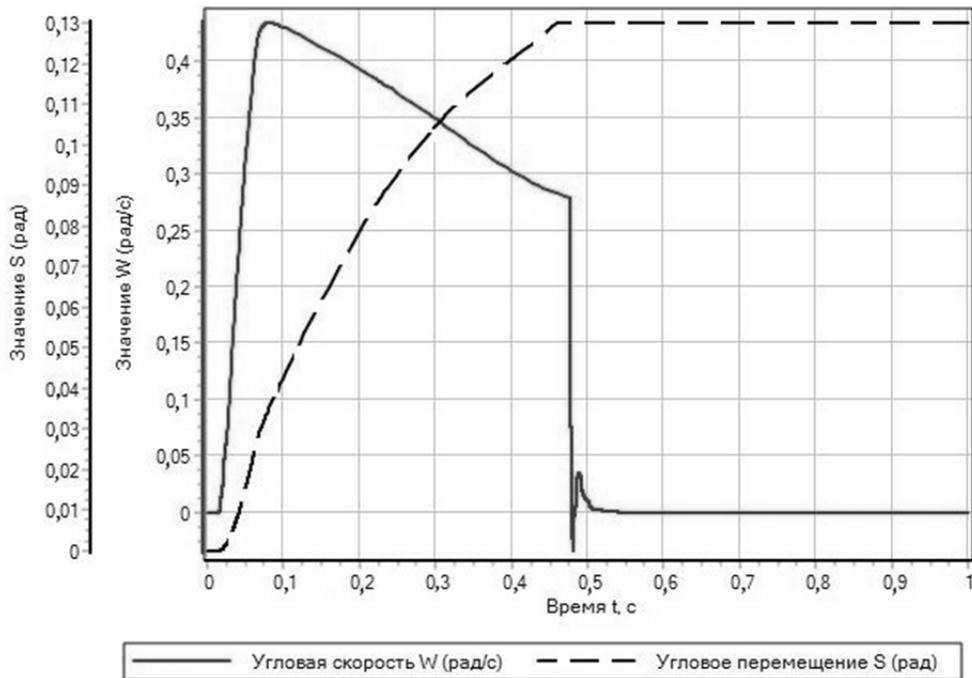


Рис. 8. График изменения углового перемещения и угловой скорости планшайбы координатного стола по времени

Выводы

Полученные результаты подтверждают функциональные возможности предлагаемого привода и позволяют оценить процессы, протекающие в нем при позиционировании объекта управления. По графикам можно определить что за 0,05 сек происходит переключение золотника распределителя, полное перемещение поршня пневмоцилиндра происходит за 0,47 сек с максимальной скоростью 0,55 м/с, что приводит во вращение планшайбу координатного стола через реечную передачу. Планшайба перемещается на 0,13 рад с максимальной угловой скоростью 0,45 рад/с, за один ход пневмоцилиндра. Предложенная модель привода позволяет проводить вычислительный эксперимент при различных позиционных циклах. Компьютерная модель может модернизироваться и корректироваться с целью введения иных управляющих воздействий и других параметров после проведения соответствующих экспериментов.

Библиографический список

1. Wang J., Gordon T. Energy optimal control of servo-pneumatic cylinders through nonlinear static feedback linearization // *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2012. V. 134, Iss. 5. DOI: 10.1115/1.4006084
2. Дао Тхе Ань. Позиционный пневмопривод повышенного быстродействия и точности. Дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2016. 206 с.
3. Mosadegh B., Polygerinos P., Keplinger C., Wennstedt S., Shepherd R.F., Gupta U., Shim J., Bertoldi K., Walsh C.J., Whitesides G.M. Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly // *Advanced Functional Materials*. 2014. V. 24, Iss. 15. P. 2163-2170. DOI: 10.1002/adfm.201470092
4. Sidorenko V.S., Korotych D.A., Grishenko V.I., Kharchenko A.N. Simulation of pneumatic actuator position system for long stroke mounting movements // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1029. DOI: 10.1088/1757-899X/1029/1/012039
5. Дао Т.А., Мажидов Р.Н. Моделирование процесса позиционирования пневмопривода промышленного робота // *Молодёжный научно-технический вестник*. 2014. № 6.
6. Prikhodko S.P., Sidorenko V.S., Kharchenko A.N., Grishenko V.I. High-speed pneumomechanical drive of the executive movements of machine mechanisms movements // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1029. DOI: 10.1088/1757-899x/1029/1/012015
7. Обухова Е.Н., Грищенко В.И. Моделирование динамики процесса позиционирования пневмопривода двустороннего действия // *Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Интеллектуальные системы, управление и мехатроника – 2018»* (29-31 мая 2018 г., Севастополь). Севастополь: СевГУ, 2018. С. 165-168.
8. Terryn S., Brancart J., Lefeber D., Assche G.V., Vanderborght B. Self-healing soft pneumatic robots // *Science Robotics*. 2017. V. 2, Iss. 9. DOI: 10.1126/scirobotics.aan4268
9. Галлямов Ш.Р., Стариков К.В., Целищев В.А. Экспериментальное исследование характеристик пневмопривода FESTO с пропорциональным распределителем расхода // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2011. Т. 15, № 1 (41). С. 26-33.

INVESTIGATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE PNEUMATIC-MECHANICAL DRIVE OF THE INSTALLATION MOVEMENTS OF MACHINE MECHANISMS

© 2024

- S. P. Prikhodko** Assistant Professor, Postgraduate Student of the Department of “Hydraulics, Hydraulic and Pneumatic Control Systems and Thermal Processes”; Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation; sergey.161.96@gmail.com
- V. S. Sidorenko** Doctor of Science (Engineering), Full Professor of the Department of “Hydraulics, Hydraulic and Pneumatic Control Systems and Thermal Processes”; Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation; vsidorenko@donstu.ru
- D. A. Korotych** Assistant, Postgraduate Student of the Department of “Hydraulics, Hydraulic and Pneumatic Control Systems and Thermal Processes”; Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation; daniilberuk@gmail.com

The creation of new and improvement of existing machines and mechanisms requires the development of drive engineering and the creation of new drive systems capable of competing with currently known circuit solutions. Under these conditions, the creation of combined pneumatic-mechanical drives is an important scientific and technical task. The purpose of this work is to increase the speed at a given accuracy of auxiliary movements of the target mechanisms of technological machines by creating a pneumatic-mechanical drive with improved energy and dynamic characteristics. The technical solution of a positioning pneumatic-mechanical drive of executive movements of technological equipment is presented, mathematical and computer models are developed. In this case, the method of solving the differential equation in the SimInTech program is used. As a result, an oscillogram of transients is obtained. The developed models allow for dynamic analysis of pneumatic-mechanical systems.

Positioning pneumatic-mechanical drive; drive system; target mechanism; technological equipment; mathematical model

Citation: Prikhodko S.P., Sidorenko V.S., Korotych D.A. Investigation of the dynamic characteristics of the pneumatic-mechanical drive of the installation movements of machine mechanisms. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 2. P. 132-142. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-132-142

References

1. Wang J., Gordon T. Energy optimal control of servo-pneumatic cylinders through nonlinear static feedback linearization. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2012. V. 134, Iss. 5. DOI: 10.1115/1.4006084
2. Dao The Anh. *Pozitsionnyy pnevmoprivod povyshennogo bystrodeystviya i tochnosti. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Positioning pneumatic actuator of increased speed and accuracy. Thesis for a Candidate Degree (Engineering)]. Rostov-on-Don, 2016. 206 p.
3. Mosadegh B., Polygerinos P., Keplinger C., Wennstedt S., Shepherd R.F., Gupta U., Shim J., Bertoldi K., Walsh C.J., Whitesides G.M. Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly. *Advanced Functional Materials*. 2014. V. 24, Iss. 15. P. 2163-2170. DOI: 10.1002/adfm.201470092
4. Sidorenko V.S., Korotych D.A., Grishenko V.I., Kharchenko A.N. Simulation of pneumatic actuator position system for long stroke mounting movements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1029. DOI: 10.1088/1757-899X/1029/1/012039
5. Dao T.A., Mazhidov R.N. Simulating the process of positioning an industrial robot pneumatic actuator. *Molodezhnyy Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik*. 2014. No. 6. (In Russ.)

6. Prikhodko S.P., Sidorenko V.S., Kharchenko A.N., Grishenko V.I. High-speed pneumomechanical drive of the executive movements of machine mechanisms movements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1029. DOI: 10.1088/1757-899x/1029/1/012015

7. Obukhova E.N., Grishchenko V.I. Modelirovanie dinamiki protsessa pozitsionirovaniya pnevmoprivoda dvustoronnego deystviya. *Sbornik trudov IV Vserossiyskoy Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii Molodykh Uchenykh, Aspirantov i Studentov «Intellektual'nye Sistemy, Upravlenie i Mekhatronika – 2018» (May, 29-31, 2018, Sevastopol)*. Sevastopol: Sevasopol State University Publ., 2018. P. 165-168. (In Russ.)

8. Terry S., Brancart J., Lefeber D., Assche G.V., Vanderborght B. Self-healing soft pneumatic robots. *Science Robotics*. 2017. V. 2, Iss. 9. DOI: 10.1126/scirobotics.aan4268

9. Gallyamov Sh.R., Starikov K.V., Celischev V.A. Experimental research of characteristics of the pneumatic actuator FESTO with proportional allocation of the expenditure. *Vestnik UGATU*. 2011. V. 15, no. 1 (41). P. 26-33. (In Russ.)