

УДК 681.521.35

doi: 10.18698/0536-1044-2023-4-30-37

Пневматические регуляторы на основе эффекта силового действия струи

В.А. Макаров, А.З. Казарян, Ф.А. Королев

МИРЭА — Российский технологический университет

Pneumatic controllers based on the jet force action effect

V.A. Makarov, A.Z. Kazaryan, F.A. Korolev

MIREA — Russian Technological University

Рассмотрены схемы пневматических регуляторов, принцип действия которых основан на эффекте силового действия струи на плоскую пластину. Главными узлами таких регуляторов являются опора пластины и компенсационная схема регенеративной обратной связи, на основе которых построены пневматические схемы управления, реализующие основные законы регулирования. Предложенные устройства улучшают статические характеристики благодаря линейности. Приведены схемы аэростатического подшипника, регенеративной обратной связи, струйно-пневматического пропорционального и пропорционально-интегрального регуляторов, блока предварения и дифференцирования, пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора и полупропорционального регулятора.

Ключевые слова: пневматические регуляторы, силовое действие струи, статические характеристики, пропорциональный регулятор, пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор, полупостоянно работающий пропорциональный регулятор

The paper considers schemes of pneumatic regulators, which operation principle is based on the jet force action effect on the flat plate. The main nodes of such regulators include the plate support and the compensatory circuit of the regenerative feedback forming the basis for building pneumatic control circuits that implement the basic laws of regulation. The proposed devices are able to improve static characteristics due to their linearity. Schemes are provided of aerostatic bearing, regenerative feedback, jet-pneumatic proportional and proportional-integral controllers, precession and differentiation block, proportional integral differential controller and semi-proportional controller.

Keywords: pneumatic regulators, jet force action, static characteristics, proportional regulator, proportional integral differential regulator, semi-permanent operating proportional regulator

Основная задача управления технологическими параметрами заключается в повышении класса точности регуляторов. Эту задачу можно решить путем обеспечения линейности статических характеристик регуляторов, в том числе и пневматических, предназначенных для управления параметрами в пожаровзрывоопасных производствах. Для повышения класса точно-

сти пневматических регуляторов можно воспользоваться эффектом силового действия струи на пластину, угол поворота которой пропорционален давлению.

Эффект силового действия струи успешно применяют в датчиках контроля плотности, вязкости, влажности и других физико-технических параметров, что существенно улучшает

их статические и динамические характеристики [1–5]. Накопленный опыт применения этого эффекта в устройствах контроля позволил решать задачи по разработке пневматических регуляторов [6–8].

Цель исследования — анализ работы пневматических регуляторов, принцип работы которых основан на эффекте силового действия струи.

Чтобы построить узлы пневматических регуляторов, основанные на эффекте силового действия струи на пластину ограниченных размеров, при которых улучшаются не только статические, но и динамические характеристики, необходимо решить такие основные задачи как:

- 1) разработка опоры пластины, являющейся чувствительным элементом;
- 2) создание компенсационной измерительной схемы углового перемещения пластины;
- 3) разработка схемы управления, реализующая основные законы регулирования [9–12].

Для решения первой задачи разработан аэростатический подшипник (рис. 1), обладающий минимальным трением и не вносящий погрешность при работе [13, 14]. Аэростатический подшипник состоит из цилиндрического ротора 4 со скошенными поверхностями, образующими с притертыми поверхностями статора дроссели 1 и 5. С двух сторон ротора закреплены пластины 2 и 3, являющиеся чувствительными элементами пневматического регулятора.

При подаче сжатого воздуха через центральный канал 6 статора ротор, окруженный воздушной подушкой, совершает высокочастотные

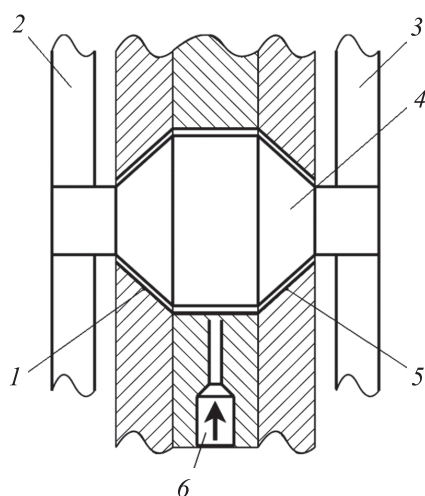


Рис. 1. Конструктивная схема аэростатического подшипника

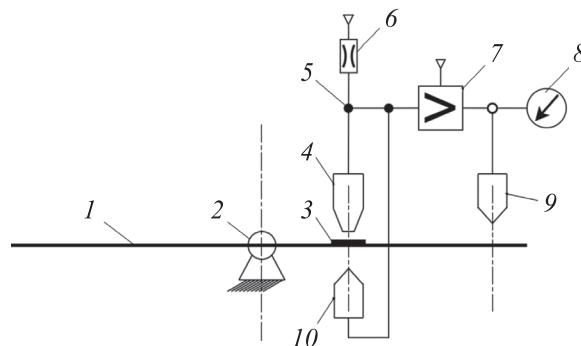


Рис. 2. Схема регенеративной ОС

колебания между дросселями, отстоящими друг от друга на таком расстоянии, чтобы ротор занимал центральное положение между ними.

Для решения второй задачи использована регенеративная обратная связь (ОС), обеспечивающая стабильное исходное положение подвижной системы пневматических регуляторов. Схема регенеративной ОС приведена на рис. 2.

Регенеративная ОС состоит из пластины 1, подвешенной на газовой опоре 2. Считывающий элемент угла поворота пластины выполнен в виде узла, содержащего считывающее сопло 4 и заслонку 3, жестко закрепленную на пластине. Между считывающим соплом и питающим дросселем 6 расположена измерительная междроссельная камера 5, связанная со входом усилителя мощности 7, коэффициент усиления по давлению которого превышает единицу.

Выходной канал усилителя (пневматический мембранный усилитель мощности) соединен со вторичным прибором (манометром 8) и соплом ОС 9. Для компенсации силового действия струи, исходящей из считывающего сопла, предусмотрено компенсационное сопло 10, связанное с междроссельной камерой.

На базе схемы чувствительного элемента и регенеративной ОС разработаны схемы управления, реализующие основные законы регулирования [15, 16].

Схема струйно-пневматического пропорционального (П) регулятора, приведенная на рис. 3, состоит из входной дифференциальной пневматической схемы и регенеративной ОС. Входная дифференциальная пневматическая схема представляет собой входные сопла 2 и 4, из которых направлены струи воздуха под давлением p_1 и p_2 .

Выходной сигнал П-регулятора определяется выражением

$$p_{\Pi} = K_y (p_1 - p_2) + p_0,$$

где p_0 — условный нулевой сигнал, подаваемый через сопло смещения нулевой точки 3 (см. рис. 3); p_1 — переменное значение; p_2 — задание; K_y — коэффициент усиления, определяемый соотношением плеч l_2 и l_1 (расстояний от газовой опоры до входных сопел 2, 4 и считывающего сопла соответственно).

Чтобы изменить чувствительность, варьируют соотношение плеч l_2 и l_1 путем вращения винта 1. Считывающее сопло с усилителем и соплом ОС образуют регенеративную ОС, которая основана на равновесии подвижной системы.

Схема струйно-пневматического пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора (рис. 4) состоит из П-регулятора и интегрального звена.

Интегральное звено, расположенное в положительной ОС П-регулятора, включает в себя переменное сопротивление 1, емкость 2, точный повторитель 3, на который подано давление питания $p_{\text{пит}}$ через постоянный дроссель 4. Выходной канал повторителя соединен с соплом 5 смещения нулевой точки.

Чтобы изменить проводимость переменного сопротивления варьируют постоянную времени интегрирования

$$T_{\text{и}} = \frac{V}{\alpha RT},$$

где V — объем емкости; α — проводимость переменного сопротивления; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Выходной сигнал ПИ-регулятора определяется выражением

$$p_{\text{ПИ}} = K_y (p_1 - p_2) + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t (p_1 - p_2) dt,$$

где t — время.

Схема струйно-пневматического блока предварения (БП) и дифференцирования (БД), приведенная на рис. 5, состоит из сопла 6 смещения нулевой точки блока, к которому подведено давление, которое зависит от закона управления. При реализации закона предварения оно равно входному давлению p_1 , а при реализации закона дифференцирования — p_2 .

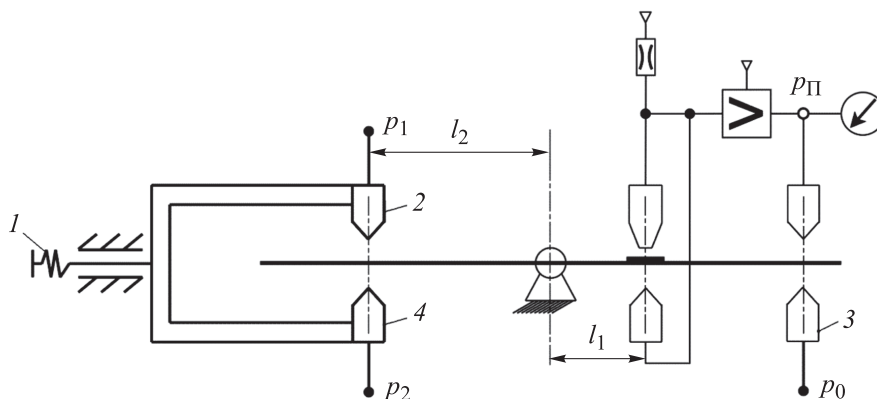


Рис. 3. Схема струйно-пневматического П-регулятора

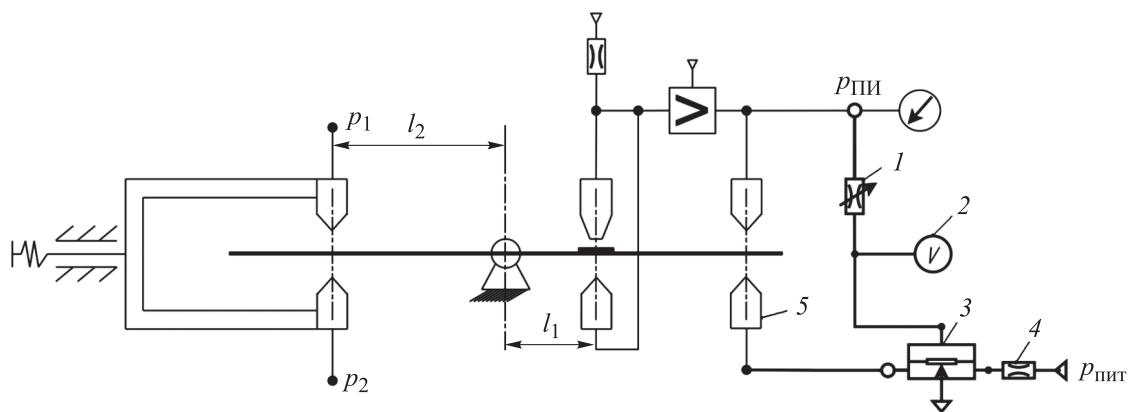


Рис. 4. Схема струйно-пневматического ПИ-регулятора

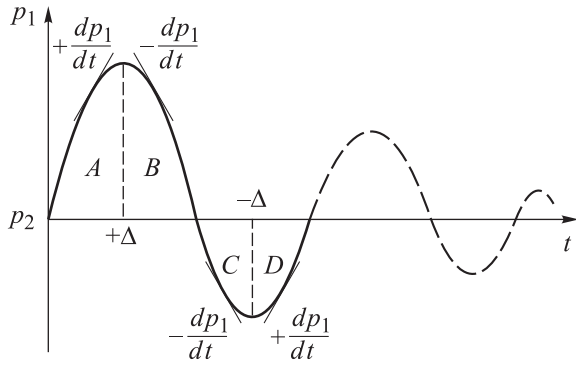


Рис. 7. Схема анализа работы полупостоянно работающего регулятора

манда о его возвращении к заданию. Постоянно работающий регулятор продолжает действовать даже при уже возвращенном к заданному значению регулируемому параметру, т. е. когда в действии регулятора уже нет необходимости.

Одним из основных законов, улучшающих динамику управления, является закон полупостоянно работающих регуляторов, которые начинают действовать, когда регулируемый параметр удаляется от заданного значения, и прекращает действие, когда параметр приближается к нему [17].

Схема анализа работы полупостоянно работающего регулятора приведена на рис. 7. В периодах A и C, когда регулируемая величина удаляется от задания, запускается процесс регулирования, а в периодах B и D, когда величина приближается к заданию, процесс регулирования останавливается.

Схема струйно-пневматического полупропорционального (ПП) регулятора (рис. 8), реализующая рассматриваемый закон управления, состоит из П-регулятора 1 и узла 3 формирования управляющей команды p_k на отключение регулятора при отклонении регулируемой величины и ее скорости от задания. Выход П-регулятора подключен к элементу 2, реализующему функцию «Запрет» и управляемому командой p_k . Выходной сигнал ПП-регулятора имеет вид

$$p_{ПП} = p_{П} \bar{p}_k.$$

Здесь и далее черта над параметром соответствует знаку инверсии (логическому отрицанию).

Узел 3 формирует управляющую команду p_k на отключение регулятора при отклонении регулируемой величины и ее скорости от задания, и состоит из двух пороговых элементов 4, 8 и одного БП 5.

Пороговый элемент ошибки 4 определяет ее знак между пороговым давлением элемента $p_{п.о}$ и выходным давлением регулятора $p_{П}$. При положительном знаке ошибки ($p_{П} > p_{п.о}$) выходной сигнал порогового элемента ошибки 4 выдает сигнал $p_{ош} = 0$, при отрицательном ($p_{П} < p_{п.о}$) — $p_{ош} = 1$.

Выходной канал БП $p_{БП}$ связан с соплом 7 порогового элемента скорости 8, на который также поступают сигнал порогового значения давления элемента скорости $p_{п.с}$ через сопло 6

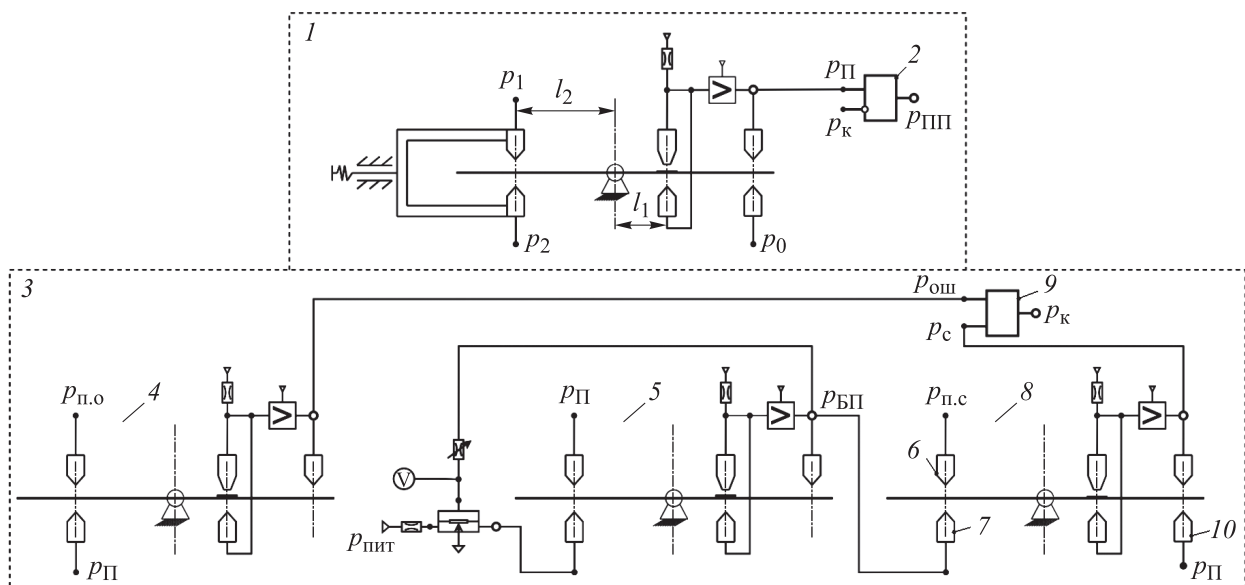


Рис. 8. Схема струйно-пневматического ПП-регулятора

и сигнал выхода регулятора $p_{\text{П}}$ для его сокращения через сопло 10.

Положительному знаку скорости соответствует выходной сигнал порогового элемента δ $p_c = 1$, отрицательному — $p_c = 0$.

Оба дискретных сигнала с двух пороговых элементов $p_{\text{ош}}$ и p_c поступают на вход элемента 9, реализующего функцию равнозначности:

$$p_k = p_{\text{ош}} \leftrightarrow p_c = p_{\text{ош}} p_c + \bar{p}_{\text{ош}} \bar{p}_c.$$

Сигнал p_k служит командой, определяющей условия отключения регулятора. При $p_k = 1$, когда знаки ошибки $\Delta = |p_1 - p_2|$ и ее скорости Δ' не совпадают, т. е. $\Delta\Delta' < 0$, регулируемая величина приближается к заданному значению.

При $p_k = 0$, когда знаки Δ и Δ' совпадают ($\Delta\Delta' > 0$), регулируемая величина удаляется от заданного значения.

Выводы

1. Рассмотрены аэростатический подшипник, являющийся опорой чувствительного элемента регуляторов, и регенеративная ОС, определяющая стабилизацию нулевого положения чувствительного элемента.

2. На основе этих схем построены пневматические регуляторы, базирующиеся на эффекте силового действия струи на преграду ограниченных размеров.

Литература

- [1] Мордасов М.М., Мордасов М.Д., Мозгова Г.В. Пневматический метод и устройство контроля плотности жидкостей. *Вестник ТГТУ*, 2019, т. 25, № 3, с. 406–411, doi: <https://doi.org/10.17277/vestnik.2019.03>, pp. 406–411.
- [2] Макаров В.А., Королев Ф.А., Макаров А.В. и др. *Пневматический датчик плотности газов*. Патент РФ 2685433. Заявл. 21.06.2018, опубл. 18.04.2019.
- [3] Stefan-Mugur S., Corneliu B. CFD study on convective heat exchange between impinging gas jets and solid surfaces. *Energy Procedia*, 2016, vol. 85, pp. 481–488, doi: <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.12.231>
- [4] Iulia R.D., Ioana L.O., Diana B. et al. Impact of Newtonian liquid jets on smooth and patterned solid walls. *Energy Procedia*, 2017, vol. 112, pp. 186–193, doi: <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.03.1081>
- [5] Makarov V.A., Korolev F.A., Tyutyayev R.E. Impulse mode of physical and technical gases parameters control based on the jet force action effect. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2021, vol. 1047, art. 12014, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1047/1/012014>
- [6] Hwang H.Y., Irons G.A. A water model study of impinging gas jets on liquid surfaces. *Metall. Mater. Trans. B*, 2012, vol. 43, no. 2, pp. 302–315, doi: <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9613-3>
- [7] Becher T., Neubert M., Rothne L. et al. Effective field theory for jet processes. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, vol. 116, no. 19, art. 192001, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.192001>
- [8] Farmer T. Structural studies of liquids and glasses using aerodynamic levitation. *Springer*, 2015. 113 p.
- [9] Макаров В.А., Королев Ф.А., Макаров А.В. и др. *Струйно-пневматический пропорциональный регулятор*. Патент РФ 2676362. Заявл. 04.05.2018, опубл. 28.12.2018.
- [10] Макаров В.А., Королев Ф.А., Макаров А.В. и др. *Струйно-пневматический пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор*. Патент РФ 2773623. Заявл. 26.07.2021, опубл. 06.06.2022.
- [11] Макаров В.А., Королев Ф.А., Макаров А.В. и др. *Струйно-пневматический пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор*. Патент РФ 2768107. Заявл. 26.07.2021, опубл. 23.03.2022.
- [12] Макаров В.А., Королев Ф.А., Макаров А.В. и др. *Струйно-пневматический полупропорциональный регулятор*. Патент РФ 2773115 Заявл. 06.08.2021, опубл. 30.05.2022.
- [13] Hari P., Rajesh K., Dharamvir D. A review on air bearing: working and advantages over traditional bearing. *IJRME*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 1–3.
- [14] Simek J., Lindovsky P. Development of aerodynamic bearing support for application in air cycle machines. *Appl. Comput. Mech.*, 2014, no. 8, pp. 101–114.
- [15] Карпов А.Г. *Теория автоматического управления*. Ч. 1. Томск, ТМЛ-Пресс, 2011. 201 с.

- [16] Усынин Ю.С. *Теория автоматического управления*. Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2010. 176 с.
- [17] Фернер В. *Пневматические приборы низкого давления*. Москва, Мир, 1964. 317 с.

References

- [1] Mordasov M.M., Mordasov M.D., Mozgova G.V. Pneumatic method and fluid density control device. *Vestnik TGTU* [Transactions TSTU], 2019, vol. 25, no. 3, pp. 406–411, doi: <https://doi.org/10.17277/vestnik.2019.03>, pp. 406–411 (in Russ.).
- [2] Makarov V.A., Korolev F.A., Makarov A.V. et al. *Pnevmaticheskiy datchik plotnosti gazov* [Pneumatic gas density sensor]. Patent RU 2685433. Appl. 21.06.2018, publ. 18.04.2019.
- [3] Stefan-Mugur S., Corneliu B. CFD study on convective heat exchange between impinging gas jets and solid surfaces. *Energy Procedia*, 2016, vol. 85, pp. 481–488, doi: <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.12.231>
- [4] Iulia R.D., Ioana L.O., Diana B. et al. Impact of Newtonian liquid jets on smooth and patterned solid walls. *Energy Procedia*, 2017, vol. 112, pp. 186–193, doi: <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.03.1081>
- [5] Makarov V.A., Korolev F.A., Tyutyayev R.E. Impulse mode of physical and technical gases parameters control based on the jet force action effect. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2021, vol. 1047, art. 12014, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1047/1/012014>
- [6] Hwang H.Y., Irons G.A. A water model study of impinging gas jets on liquid surfaces. *Metall. Mater. Trans. B*, 2012, vol. 43, no. 2, pp. 302–315, doi: <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9613-3>
- [7] Becher T., Neubert M., Rothne L. et al. Effective field theory for jet processes. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, vol. 116, no. 19, art. 192001, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.192001>
- [8] Farmer T. *Structural studies of liquids and glasses using aerodynamic levitation*. Springer, 2015. 113 p.
- [9] Makarov V.A., Korolev F.A., Makarov A.V. et al. *Struyno-pnevmaticheskiy proporsionalnyy regulyator* [Jet-pneumatic proportional regulator]. Patent RU 2676362. Appl. 04.05.2018, publ. 28.12.2018. (In Russ.).
- [10] Makarov V.A., Korolev F.A., Makarov A.V. et al. *Struyno-pnevmaticheskiy proporsionalno-integralnyy (PI) regulyator* [Jet-pneumatic proportional-integral (PI) controller]. Patent RU 2773623. Appl. 26.07.2021, publ. 06.06.2022. (In Russ.).
- [11] Makarov V.A., Korolev F.A., Makarov A.V. et al. *Struyno-pnevmaticheskiy proporsionalno-integralno-differentsialnyy (PID) regulyator* [Jet-pneumatic proportional-integral-differential (PID) regulator]. Patent RU 2768107. Appl. 26.07.2021, publ. 23.03.2022. (In Russ.).
- [12] Makarov V.A., Korolev F.A., Makarov A.V. et al. *Struyno-pnevmaticheskiy poluproportsionalnyy regulyator* [Jet-pneumatic semi-proportional regulator]. Patent RU 2773115 Appl. 06.08.2021, publ. 30.05.2022. (In Russ.).
- [13] Hari P., Rajesh K., Dharamvir D. A review on air bearing: working and advantages over traditional bearing. *IJRME*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 1–3.
- [14] Simek J., Lindovsky P. Development of aerodynamic bearing support for application in air cycle machines. *Appl. Comput. Mech.*, 2014, no. 8, pp. 101–114.
- [15] Karpov A.G. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya*. Ch. 1 [Theory of automated control. P. 1]. Tomsk, TML-Press Publ., 2011. 201 p. (In Russ.).
- [16] Usynin Yu.S. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automated control]. Chelyabinsk, Izdatelskiy tsentr YuUrGU Publ., 2010. 176 p. (In Russ.).
- [17] Ferner V. *Anschauliche Regelungstechnik*. Berlin, Technik, 1960. 380 p. (Russ. ed.: *Pnevmaticheskie pribory nizkogo davleniya*. Moscow, Mir Publ., 1964. 317 p.)

Статья поступила в редакцию 18.02.2023

Информация об авторах

МАКАРОВ Валерий Анатольевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная информатика». МИРЭА — Российский технологический университет (119454, Москва, Российская Федерация, пр. Вернадского, д. 78, e-mail: himtest@mail.ru).

КАЗАРЯН Арам Завенович — аспирант кафедры «Промышленная информатика». МИРЭА — Российский технологический университет (119454, Москва, Российская Федерация, пр. Вернадского, д. 78, e-mail: aramchik98@gmail.com).

КОРОЛЕВ Филипп Андреевич — аспирант кафедры «Промышленная информатика». МИРЭА — Российский технологический университет (119454, Москва, Российская Федерация, пр. Вернадского, д. 78, e-mail: krusnik007@mail.ru).

Information about the authors

MAKAROV Valeriy Anatolievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Industrial Informatics. MIREA — Russian Technological University (119454, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave., Bldg. 78, e-mail: himtest@mail.ru).

KAZARYAN Aram Zavenovich — Postgraduate, Department of Industrial Informatics. MIREA — Russian Technological University (119454, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave., Bldg. 78, e-mail: aramchik98@gmail.com).

KOROLEV Filipp Andreevich — Postgraduate, Department of Industrial Informatics. MIREA — Russian Technological University (119454, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave., Bldg. 78, e-mail: krusnik007@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Макаров В.А., Казарян А.З., Королев Ф.А. Пневматические регуляторы на основе эффекта силового действия струи. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 4, с. 30–37, doi: 10.18698/0536-1044-2023-4-30-37

Please cite this article in English as:

Makarov V.A., Kazaryan A.Z., Korolev F.A. Pneumatic controllers based on the jet force action effect. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 4, pp. 30–37, doi: 10.18698/0536-1044-2023-4-30-37



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям материалы XV Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России 2022. Том 1»

В сборник включены доклады, представленные на Пятнадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», которая состоялась в сентябре 2022 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Структура сборника отражает тематическую направленность конференции. В первый том сборника вошли доклады секции А.

Тексты докладов размещены в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>