

УДК 681.521.35; 621.316.7

doi: 10.18698/0536-1044-2023-5-57-63

Пневмоэлектрические регуляторы на основе эффекта силового действия струи

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

МИРЭА — Российский технологический университет

Pneumoelectric controllers based on the jet force action effect

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

MIREA — Russian Technological University

Рассмотрены вопросы разработки пневмоэлектрических регуляторов на основе компенсации механического момента силового действия струи магнитоэлектрическим моментом. Главными узлами регуляторов являются магнитоэлектрический гальванометр, чувствительный элемент (плоская пластина), пневматические, оптические и электрические устройства. Пневмоэлектрические регуляторы характеризуются высокими чувствительностью и быстродействием. Приведены схемы струйно-фотокомпенсационного пропорционального, пропорционально-интегрального, пропорционально-интегрально-дифференциального, полупропорционального регуляторов и блока предварения и дифференцирования.

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

The paper considers issues of design and development of pneumoelectric controllers based on compensation of the jet power action pneumatic moment by the magnetoelectric moment. The main controller elements include magnetoelectric galvanometer, sensitive element (flat plate), as well as pneumatic, optical and electrical circuits. Pneumoelectric controllers are characterized by high sensitivity and speed. Schemes of inkjet-photocompensation proportional, proportional-integral, proportional-integral-differential, semi-proportional controllers and of the preliminary and differentiation units are provided.

Keywords: pneumoelectric controllers, jet force action, proportional regulator, proportional-integral-differential regulator, semi-permanent proportional regulator

Пневмоэлектрические регуляторы представляют собой сочетание пневматических и магнитоэлектрических устройств, основанных на компенсации механических моментов силового действия струи на подвижную пластину, которая жестко закреплена на петле гальванометра, магнитоэлектрическим моментом, обусловленного законом Фарадея. Регуляторы [1, 2], построенные на этом принципе, обладают высокой точностью и быстродействием, присущим фотокомпенсационным гальванометрическим

приборам контроля электрических параметров [3–6].

Цель работы — анализ работы устройств пневмоэлектрических регуляторов, принцип действия которых основан на эффекте силового действия струи.

Схема струйно-фотокомпенсационного пропорционального (П) регулятора [7, 8] (рис. 1) состоит из магнитоэлектрического гальванометра 1, рамка 2 которого размещена в зазоре

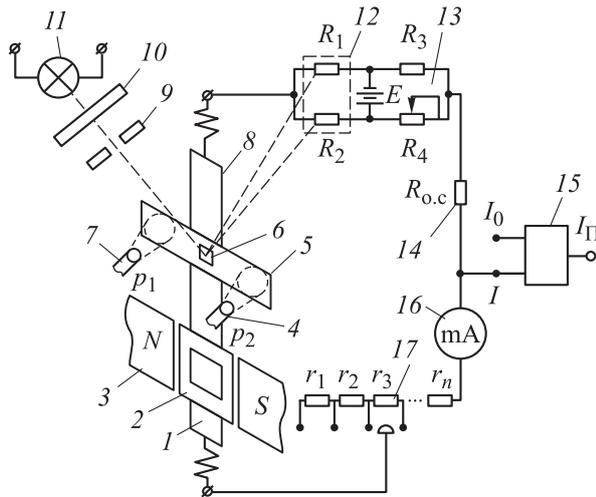


Рис. 1. Схема струйно-фотокомпенсационного П-регулятора

постоянного магнита 3. Ток к рамке поступает по токопроводам. На подвижной части гальванометра жестко закреплены пластина 5 и зеркало 6.

Нормально к поверхности пластины, жестко закрепленной на растяжках 8 гальванометра, и на некотором удалении от нее установлены представляющие собой входную пневматическую схему сопла 7 и 4, из которых направлены струи воздуха под давлением p_1 и p_2 [9–11].

Пренебрегая жесткостью упругих элементов подвижной части, запишем условие работы П-регулятора в установившемся режиме

$$M_M = M_{эл}, \quad (1)$$

где M_M — механический момент от действия струи на подвижную пластину; $M_{эл}$ — магнитоэлектрический момент.

Механический момент от действия струи на подвижную пластину

$$M_M = \Delta p S_{сл} i_{ц}, \quad (2)$$

где Δp — разность давлений перед соплами 7 и 4, $\Delta p = p_1 - p_2$; $S_{сл}$ — площадь следа струи; $i_{ц}$ — расстояние от оси симметрии площади следа струи до оси симметрии подвижной части гальванометра.

Магнитоэлектрический момент

$$M_{эл} = \psi I, \quad (3)$$

где ψ — потокосцепление; I — сила тока.

С учетом выражений (2) и (3) формула (1) принимает вид

$$\Delta p S_{сл} i_{ц} = \psi I.$$

Чувствительность к изменению давления перед соплами 4 и 7 определяется выражением

$$H_p = \frac{dI}{d\Delta p} = \frac{S_{сл} i_{ц}}{\psi}.$$

Оптическая часть гальванометра состоит из источника света 11, подающего через конденсор 10 и диафрагму 9 луч света на зеркало. Отраженный от зеркала луч света падает на дифференциальный фоторезистор 12, включенный в состав электрической дифференциальной схемы 13 [12, 13], образованной сопротивлениями $R_1 \dots R_4$, которая содержит источники напряжения E и выходного сопротивления 14 $R_{0.c}$.

Выходной ток I в цепи обратной связи подается через делитель сопротивлений 17, изменяющий коэффициент усиления K_1 при изменении положения переключателя на сопротивлениях $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$, регистрируется миллиамперметром 16 и поступает на вход элемента сложения 15, другой вход которого соединен с линией смещения нулевой точки I_0 , обеспечиваемого первоначальной настройкой подвижной части гальванометра.

Выходной сигнал П-регулятора определяется выражением

$$I_{П} = K_1 K_2 (p_1 - p_2) + I_0,$$

где K_2 — коэффициент преобразования.

При наличии разбаланса входной пневматической схемы струи газа, исходящие из сопел 7 и 4, отклоняют пластину с зеркалом. Перемещение отраженного от зеркала луча света вызывает перераспределение световых потоков на поверхностях двух половин дифференциального фоторезистора

Разбаланс электрической дифференциальной схемы приводит к появлению тока в цепи отрицательной обратной связи, состоящей из сопротивления $R_{0.c}$, миллиамперметра 16 и рамки гальванометра. Возникающий при этом магнитоэлектрический момент $M_{эл}$ компенсирует механический M_M .

Схема струйно-фотокомпенсационного пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора [14] (рис. 2) содержит П-регулятор 4 и интегральное звено 1, в состав которого входят конденсатор 2 и переменное сопротивление 3 $R_{и}$, для изменения постоянной времени интегрирования $T_{и}$.

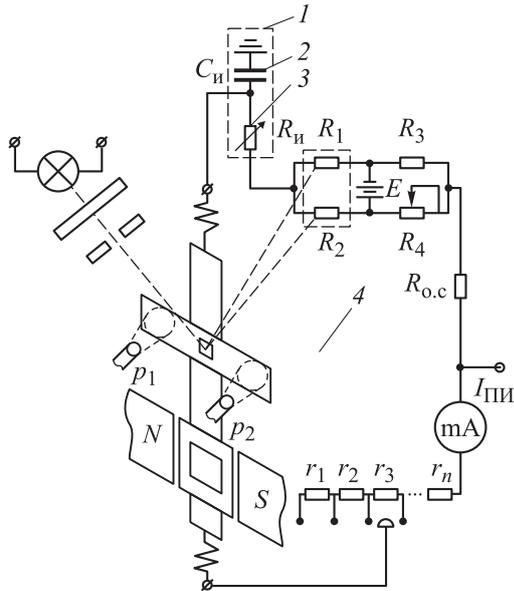


Рис. 2. Схема струйно-фотокомпенсационного ПИ-регулятора

Варьируя проводимость α переменного сопротивления, можно изменять постоянную времени интегрирования:

$$T_{и} = \frac{C_{и}}{\alpha RT},$$

где $C_{и}$ — емкость конденсатора; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Выходной сигнал ПИ-регулятора определяется выражением

$$I_{ПИ} = K_2 \left[K_1 (p_1 - p_2) + \frac{1}{T_{и}} \int_0^t (p_1 - p_2) dt \right],$$

где t — время.

Схема струйно-фотокомпенсационного блока предварения (БП) и дифференцирования (БД) [15], приведенная на рис. 3, содержит апериодическое звено, к которому приложено входное давление p_1 .

Апериодическое звено включает в себя емкость постоянного объема V , переменное сопротивление 2 , точный повторитель 4 , на который подано давление питания $p_{п}$ через постоянный дроссель 5 . Выходной канал повторителя связан с соплом 3 . Варьируя проводимость переменного сопротивления, можно изменять постоянную времени $T_{д}$.

К соплу 6 , образующему крутящий момент в том же направлении, что и от сопла 3 , присоединен источник с давлением p_1 или p_2 , предназначенный для реализации закона предва-

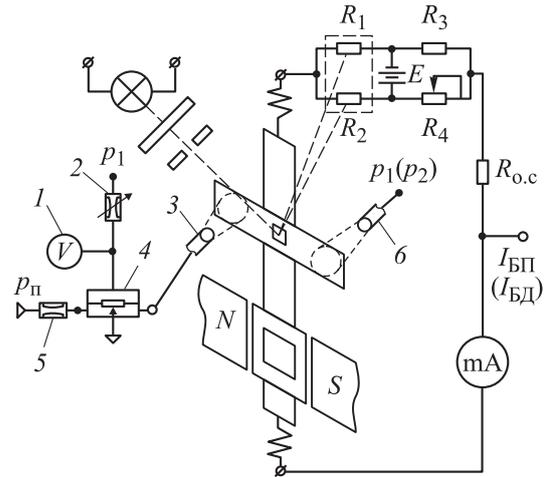


Рис. 3. Схема струйно-фотокомпенсационного блока предварения и дифференцирования

рения или дифференцирования соответственно.

Выходной сигнал блока определяется следующими выражениями:

- при реализации закона предварения

$$I_{БП} = K_2 \left[K_1 \left(p_1 + T_{д} \frac{dp_1}{dt} \right) \right];$$

- при реализации закона дифференцирования

$$I_{БД} = K_2 \left[K_1 \left(p_2 + T_{д} \frac{dp_2}{dt} \right) \right].$$

Здесь

$$T_{д} = \frac{V}{\alpha RT},$$

где V — объем емкости.

Схема струйно-фотокомпенсационного пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора [16] (рис. 4) состоит из ПИ-регулятора 1 и дифференцирующего звена 2 , в состав которого входят пневматическая емкость 3 и переменное сопротивление 4 для изменения постоянной времени дифференцирования $T_{д}$.

Чтобы получить расходный сигнал, пропорциональный производной входного давления p_1 , используют точный повторитель 6 , питание которого осуществляется через постоянный дроссель 7 . Варьируя проводимость переменного сопротивления, можно изменять постоянную времени дифференцирования.

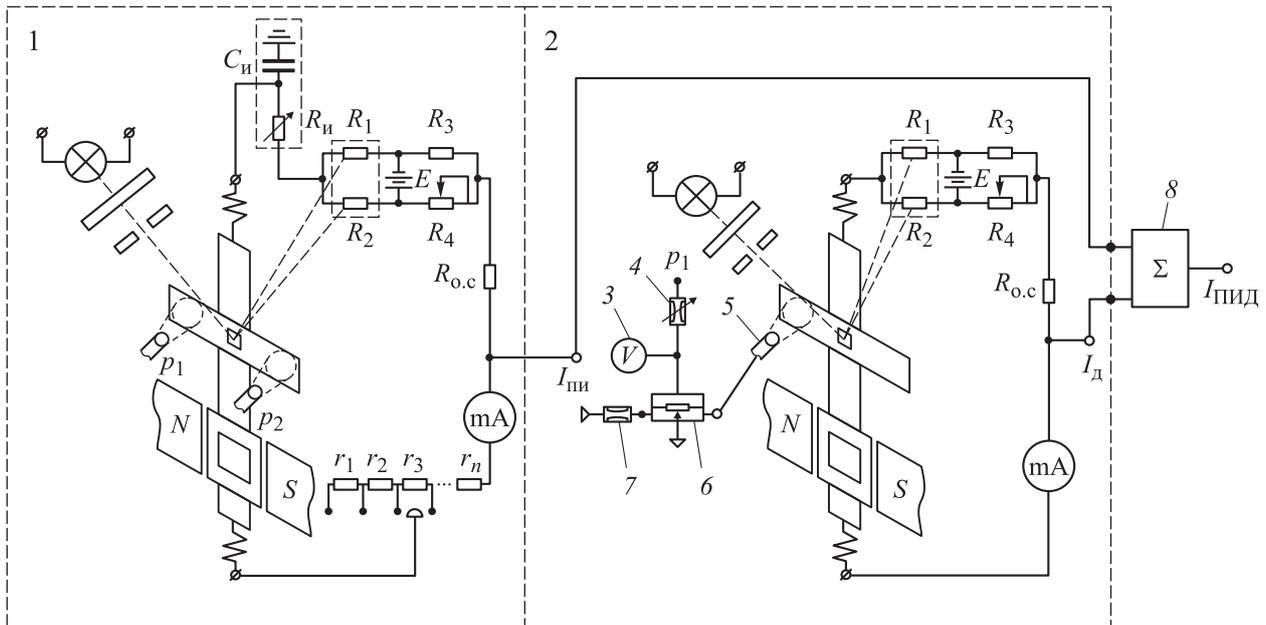


Рис. 4. Схема струйно-фотокомпенсационного ПИД-регулятора

Выходной сигнал через сопло 5 воздействует на пластину струей под давлением, которое пропорционально выражению $T_d dp_1/dt$.

Выходные каналы ПИ-регулятора $I_{ПИ}$ и дифференцирующего звена I_d связаны с сумматором 8. Выходной сигнал ПИД-регулятора определяется выражением

$$I_{ПИД} = K_2 \left[K_1 (p_1 - p_2) + \frac{1}{T_{и}} \int_0^t (p_1 - p_2) dt + T_d \frac{dp_1}{dt} \right].$$

Схема анализа функционирования полупостоянно работающего регулятора приведена на рис. 5, где p_2 и p_1 — заданное и переменное значение. В периодах А и С, когда p_1 удаляется от заданного значения, запускается процесс регулирования, а в периодах В и D, когда p_1 при-

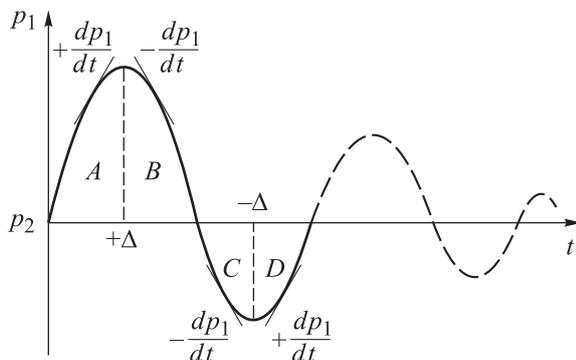


Рис. 5. Схема анализа функционирования полупостоянно работающего регулятора

ближается к p_2 , процесс регулирования останавливается.

Схема струйно-фотокомпенсационного полупропорционального (ПП) регулятора [17] (рис. 6) состоит из П-регулятора 1 и узла 4 формирования управляющей команды I_k на отключение регулятора при отклонении регулируемой величины и ее скорости от заданных значений.

Выход П-регулятора соединен с элементом 2, работающим по функции «Запрет», второй вход которого связан с запрещающим сигналом I_k .

Согласно рис. 5, сигнал управляющей команды

$$I_k = I_{ош} \leftrightarrow I_c = I_{ош} I_c + \bar{I}_{ош} \bar{I}_c,$$

где $I_{ош}$ — сигнал ошибки, $I_{ош} = p_1 - p_2$; I_c — сигнал разности производной ошибки (знака скорости), принимающий положительное или отрицательное значение в зависимости от направления касательных прямых к синусоиде изменения переменного параметра p_1 ; черта над параметром соответствует знаку инверсии (логическому отрицанию).

При положительном знаке ошибки, когда p_1 превышает пороговое значение сигнала порогового элемента ошибки (ПЭО) $p_{п.о}$, т. е. $p_1 > p_{п.о}$, ПП-регулятор выдает сигнал $I_{ош} = 0$, при отрицательном ($p_1 < p_{п.о}$) — $I_{ош} = 1$.

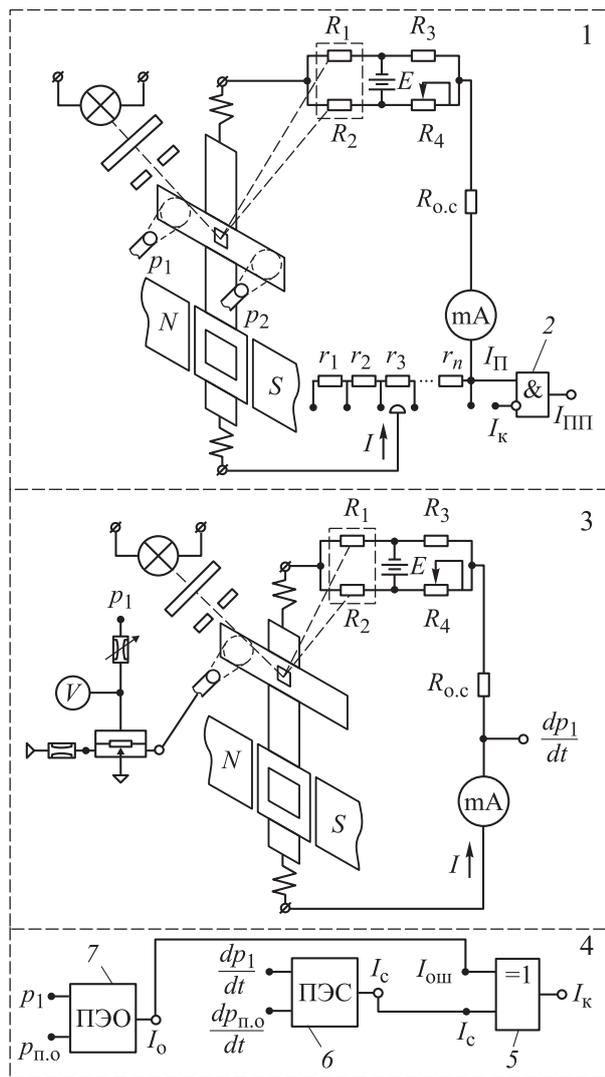


Рис. 6. Схема струйно-фотокомпенсационного ПП-регулятора

Для определения знака скорости используют струйно-фотокомпенсационный блок предварения 3, определяющий скорость изменения переменного параметра p_1 . В случае реализации закона предварения выходной сигнал этого блока равен dp_1/dt при постоянной времени $T_d = 1$.

Положительному знаку скорости соответствует выходной сигнал порогового элемента скорости (ПЭС) 6 $I_c = 1$, отрицательному — $I_c = 0$.

При сигнале управляющей команды $I_k = 1$, когда знаки ошибки $\Delta = |p_1 - p_2|$ и ее скорости Δ' не совпадают, т. е. $\Delta\Delta' < 0$, регулируемое значение приближается к заданному. При $I_k = 0$, когда знаки Δ и Δ' совпадают ($\Delta\Delta' > 0$), регулируемое значение удаляется от заданного.

Оба дискретных сигнала $I_{\text{ош}}$ и I_c с двух пороговых элементов 7 и 6 поступают на вход элемента 5, реализующего функцию равнозначности.

Выводы

1. Рассмотрены схемы струйно-фотокомпенсационных регуляторов, в которых использована линейная компенсационная схема, основанная на силовом действии струи на подвижную пластину, связанной с мостовой электрической схемой.

2. Рассмотренные регуляторы позволяют повысить точность и быстродействие регулирования.

Литература

[1] Карпов А.Г. *Теория автоматического управления*. Ч. 1. Томск, ТМЛ-Пресс, 2011. 212 с.
 [2] Усынин Ю.С. *Теория автоматического управления*. Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2010. 176 с.
 [3] Макаров В.А., Королев Ф.А., Тютяев Р.Е. и др. *Датчик регистрации пневмоимпульсов низкого давления*. Патент РФ 2713087. Заявл. 25.07.2019, опубл. 03.02.2020.
 [4] Макаров В.А., Королев Ф.А., Тютяев Р.Е. Датчики быстроизменяющегося давления на основе силового действия струи. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 1, с. 34–40, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-1-34-40>
 [5] Коробов В.Б. *Теория и практика экспертных методов*. Москва, Инфра-М, 2019. 281 с.
 [6] Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. *Теплотехнические измерения и приборы*. Москва, Изд-во МЭИ, 2005. 460 с.
 [7] Макаров В.А., Королев Ф.А., Макаров А.В. и др. *Струйно-фотокомпенсационный пропорциональный регулятор*. Патент РФ 2680614. Заявл. 04.05.2018, опубл. 25.02.2019.
 [8] White F.M. *Fluid mechanics*. McGraw-Hill, New York, 2010. 896 p.

- [9] Hwang H.Y., Irons G.A. A water model study of impinging gas jets on liquid suRUaces. *Metall. Mater. Trans. B*, 2012, vol. 43, no. 2, pp. 302–315, doi: <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9613-3>
- [10] 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>
- [11] Farmer T. *Structural studies of liquids and glasses using aerodynamic levitation*. Springer, 2015. 113 p.
- [12] Sedra A.S., Smith K.C. *Microelectronic circuits*. Oxford University Press, 2015. 1489 p.
- [13] Hacker V., Sumereder C. *Electrical engineering*. De Gruyter Oldenbourg, 2020. 240 p.
- [14] Макаров В.А., Казарян А.З. *Струйно-фотокомпенсационный пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор*. Патент РФ 2781763. Заявл. 26.07.2021, опубл. 06.06.2022.
- [15] Макаров В.А., Казарян А.З. *Струйно-фотокомпенсационный блок предварения и дифференцирования*. Патент РФ 2783485. Заявл. 07.02.2022, опубл. 14.11.2022.
- [16] Макаров В.А., Казарян А.З. *Струйно-фотокомпенсационный пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор*. Патент РФ 2781762. Заявл. 07.02.2022, опубл. 17.10.2022.
- [17] Макаров В.А., Казарян А.З. *Струйно-фотокомпенсационный полупропорциональный регулятор*. Патент РФ 2788577. Заявл. 20.05.2022, опубл. 23.01.2023.

References

- [1] Karpov A.G. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya*. Ch. 1 [Theory of automated control. P. 1]. Tomsk, TML-Press, 2011. 212 p. (In Russ.).
- [2] Usynin Yu.S. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automated control]. Chelyabinsk, Izdatelskiy tsentr YuUrGU Publ., 2010. 176 p. (In Russ.).
- [3] Makarov V.A., Korolev F.A., Tyutyayev R.E. et al. *Datchik registratsii pnevmoiimpulsov nizkogo davleniya* [Low pressure pneumatic pulse logging sensor]. Patent RU 2713087. Appl. 25.07.2019, publ. 03.02.2020. (In Russ.).
- [4] Makarov V.A., Korolev F.A., Tyutyayev R.E. Sensors of rapidly changing pressure based on jet force. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2021, no. 1, pp. 34–40, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-1-34-40> (in Russ.).
- [5] Korobov V.B. *Teoriya i praktika ekspertnykh metodov* [Theory and practice of expert methods]. Moscow, Infra-M Publ., 2019. 281 p. (In Russ.).
- [6] Ivanova G.M., Kuznetsov N.D., Chistyakov V.S. *Teplotekhnicheskie izmereniya i pribory* [Thermal engineering measurements and devices]. Moscow, Izd-vo MEI Publ., 2005. 460 p. (In Russ.).
- [7] Makarov V.A., Korolev F.A., Makarov A.V. et al. *Struyno-fotokompensatsionnyy proporsionalnyy regulyator* [Jet photocompensation proportional regulator]. Patent RU 2680614. Appl. 04.05.2018, publ. 25.02.2019. (In Russ.).
- [8] White F.M. *Fluid mechanics*. McGraw-Hill, New York, 2010. 896 p.
- [9] Hwang H.Y., Irons G.A. A water model study of impinging gas jets on liquid suRUaces. *Metall. Mater. Trans. B*, 2012, vol. 43, no. 2, pp. 302–315, doi: <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9613-3>
- [10] 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>
- [11] Farmer T. *Structural studies of liquids and glasses using aerodynamic levitation*. Springer, 2015. 113 p.
- [12] Sedra A.S., Smith K.C. *Microelectronic circuits*. Oxford University Press, 2015. 1489 p.
- [13] Hacker V., Sumereder C. *Electrical engineering*. De Gruyter Oldenbourg, 2020. 240 p.
- [14] Makarov V.A., Kazaryan A.Z. *Struyno-fotokompensatsionnyy proporsionalno-integralnyy (PI) regulyator* [Jet-pneumatic proportional-integral (PI) controller]. Patent RU 2781763. Appl. 26.07.2021, publ. 06.06.2022. (In Russ.).

- [15] Makarov V.A., Kazaryan A.Z. *Struyno-fotokompensatsionnyy blok predvareniya i differentsirovaniya* [Jet-photocompensation derivative action and differentiation unit]. Patent RU 2783485. Appl. 07.02.2022, publ. 14.11.2022. (In Russ.).
- [16] Makarov V.A., Kazaryan A.Z. *Struyno-fotokompensatsionnyy proporsionalno-integralno-differentsialnyy (PID) regulyator* [Jet-photo compensation proportional-integral-differential (PID) controller]. Patent RU 2781762. Appl. 07.02.2022, publ. 17.10.2022. (In Russ.).
- [17] Makarov V.A., Kazaryan A.Z. *Struyno-fotokompensatsionnyy poluproporsionalnyy regulyator* [Jet-photocompensated semi-proportional regulator]. Patent RU 2788577. Appl. 20.05.2022, publ. 23.01.2023. (In Russ.).

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. Пневмоэлектрические регуляторы на основе эффекта силового действия струи. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 5, с. 57–63, doi: 10.18698/0536-1044-2023-5-57-63

Please cite this article in English as:

Makarov V.A., Kazaryan A.Z., Korolev F.A. Pneumoelectric controllers based on the jet force action effect. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 5, pp. 57–63, doi: 10.18698/0536-1044-2023-5-57-63