

Научная статья
УДК 681.513.66
EDN LCOUFL
DOI 10.17150/2713-1734.2026.8(2).193-203



А.М. Забродин

*Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»,
г. Москва, Российская Федерация*

В.Е. Петров

*Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»,
г. Москва, Российская Федерация*

Адаптивный алгоритм управления газовым приводом с идентификатором и эталонной моделью

Аннотация. В статье представлен адаптивный алгоритм управления газовым приводом, с идентификатором и эталонной моделью. Актуальность исследования обусловлена широким применением газовых приводов в различных отраслях — от промышленного инструментария и арматуры до авиационной и транспортной техники. При этом традиционные методы регулирования демонстрируют низкую эффективность: они трудоёмки и не способны компенсировать изменения параметров, вызванные внешними факторами (температурой, нагрузкой, давлением газа).

Предлагается решение на основе адаптивного управления, позволяющее системе автоматически подстраиваться под изменяющиеся условия работы. Ключевая особенность подхода — использование эталонной модели, задающей желаемые характеристики поведения привода, и идентификатора, оценивающего текущие параметры системы. Важное преимущество алгоритма состоит в том, что для его работы не требуется полная и точная идентификация всех параметров модели — достаточно определить лишь часть из них.

В работе подробно описана структура адаптивной системы управления: сформулированы требования к эталонной модели, определён закон управления, представлен алгоритм идентификации параметров с применением рекуррентного метода наименьших квадратов. Особое внимание уделено механизмам фильтрации входных сигналов и вычисления невязки идентификации, обеспечивающим устойчивость и точность работы системы.

Эффективность предложенного алгоритма подтверждена посредством математического моделирования. В ходе экспериментов проводилось сравнение адаптивного регулятора с неадаптивным законом управления. Результаты моделирования продемонстрировали, что при соблюдении определённых условий система с адаптивным управлением обеспечивает практически точное следование заданным характеристикам, заданным эталонной моделью.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет существенно повысить стабильность и надёжность работы газовых приводов в условиях неопределённости и изменяющихся внешних воздействий. Предложенный подход может найти применение в различных областях, где используются газовые и пневматические приводы, включая авиационную технику, транспорт и промышленное оборудование.

Ключевые слова. Газовый привод, адаптивное управление, эталонная модель, идентификатор, математическое моделирование.

Информация о статье. Дата поступления: 1 ноября 2025 г.; дата принятия к публикации: 15 мая 2026 г.; дата онлайн-размещения: 29 июня 2026 г.

A.M. Zabrodin*Moscow State University of Technology "STANKIN",
Moscow, Russian Federation***V.E. Petrov***Moscow State University of Technology "STANKIN",
Moscow, Russian Federation*

Adaptive Gas Drive Control Algorithm with ID and Reference Model

Abstract. The article presents an adaptive gas drive control algorithm with an identifier and a reference model. The relevance of the research is due to the widespread use of gas drives in various industries, from industrial tools and fittings to aviation and transport equipment. At the same time, traditional control methods demonstrate low efficiency: they are time consuming and unable to compensate for changes in parameters caused by external factors (temperature, load, gas pressure).

A solution based on adaptive control is proposed, which allows the system to automatically adjust to changing operating conditions. The key feature of the approach is the use of a reference model that defines the desired characteristics of the drive's behavior, and an identifier that evaluates the current system parameters. An important advantage of the algorithm is that its operation does not require a complete and accurate identification of all the parameters of the model — it is enough to determine only a part of them.

The paper describes in detail the structure of the adaptive control system: the requirements for the reference model are formulated, the control law is defined, and an algorithm for identifying parameters using the recursive least squares method is presented. Special attention is paid to the mechanisms of filtering input signals and calculating the identification error, ensuring the stability and accuracy of the system.

The effectiveness of the proposed algorithm has been confirmed by mathematical modeling. During the experiments, the adaptive regulator was compared with a non adaptive control law. The simulation results demonstrated that, under certain conditions, the adaptive control system ensures almost exact adherence to the specified characteristics defined by the reference model.

Thus, the developed algorithm makes it possible to significantly increase the stability and reliability of gas drives under conditions of uncertainty and changing external influences. The proposed approach can be applied in various fields where gas and pneumatic actuators are used, including aviation equipment, transport, and industrial equipment.

Keywords. Gas drive, adaptive control, reference model, identifier, mathematical modeling.

Article info. Received 1 November, 2025; Accepted 15 May, 2026; Available online 29 June, 2026.

Введение

В настоящее время газовые приводы применяются в различных сферах: пневмоприводы используются для питания инструментов (гайковерты, отбойные молотки) и арматуры (например, мембранные приводы). Газотурбинные двигатели (турбовальные) применяются на вертолетах и турбовинтовых самолетах, а также

в качестве силовых установок на железнодорожном, автомобильном и военном транспорте. Пульсирующие воздушно-реактивные двигатели (ПуВРД) используются в авиадвигателестроении и на одноразовых беспилотниках, таких как летающие мишени и разведывательные аппараты.

В частности, газовые привода широко используются в авиационном оборудовании. У пневмоприводов имеется разброс параметров из-за технологии изготовления, поэтому для обеспечения стабильности технических характеристик применяется регулировка привода. Но такая регулировка является, во-первых, достаточно трудоемкой операцией. Во-вторых, она не устраняет нестабильности технических характеристик, вызванных внешними причинами (температура, нагрузка, давление газа).

Обеспечить стабильность технических характеристик привода можно за счет использования адаптивного управления. В качестве более рационального решения данной проблемы предлагается использовать адаптивный регулятор с идентификатором и эталонной моделью (ЭМ). Известны подходы использования адаптивных алгоритмов для управления приводами [1–3]. Например, в [2] обоснована структура электропневматического тормозного привода, обеспечивающего выполнение алгоритма адаптивного управления торможением колесной машины.

В данной работе для управления пневмоприводом применяется адаптивный алгоритм с идентификатором и эталонной моделью, основанный на упрощенных требованиях к идентификатору, которые описаны в работах [4; 5]. Для обеспечения заданной точности слежения объекта управления (ОУ) за эталонной моделью от идентификатора не обязательно требуется получение точных оценок параметров. Такой подход к адаптивному управлению впервые обоснован в [6], а в работах [5; 7; 8] получил дальнейшее развитие.

Постановка задачи

Считаем, что структура математической модели пневмопривода известна, а параметры модели привода (1) неизвестны. С помощью датчика обратной связи (ДОС) измеряется текущее положение штока y_i . Кроме текущего положения штока имеется информация об $u_{\text{зад}i}$. Заданное качество переходных процессов и частотных характеристик задается в виде эталонной модели, имеющей такую же структуру, как математическая модель привода. На основе информации об y_i и $u_{\text{зад}i}$ необходимо сформировать адаптивное управление u_i таким образом, чтобы ошибка слежения стягивалась к нулю.

Математическая модель электропривода

В качестве модели электропривода используется следующая система уравнений [9, с. 8]:

Адаптивный алгоритм управления

Требования к качеству управления ОУ формируются в виде неявной эталонной модели, имеющей аналогичную уравнению (2) структуру:

$$\dot{X}_{\text{ЭМ}}(t) = A_{\text{ЭМ}}(t)X_{\text{ЭМ}} + B_{\text{ЭМ}}(t)\varphi_{\text{зад}}, \quad (3)$$

где $X_{\text{ЭМ}}$ — вектор состояния эталонной модели, $\varphi_{\text{зад}}$ — заданное положение, $A_{\text{ЭМ}}$ и $B_{\text{ЭМ}}$ — матрицы с заданными вещественными коэффициентами. Для возможности слежения ОУ за ЭМ последняя должна удовлетворять следующим условиям [9]:

$$\overline{B}^L(A_{\text{ЭМ}} - A) = 0, \overline{B}^L B_{\text{ЭМ}} = 0, \overline{B}^L = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $\overline{B}^L$ — левый делитель нуля матрицы B (см. [11]).

Таким образом, чтобы удовлетворить условиям (4), структура эталонной модели должна иметь вид:

$$A_{\text{ЭМ}} = \begin{bmatrix} a_{11}^{\text{ЭМ}} & a_{12}^{\text{ЭМ}} \\ 1/K_{\text{ред}} & 0 \end{bmatrix}, B_{\text{ЭМ}} = \begin{bmatrix} b_1^{\text{ЭМ}} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $a_{11}^{\text{ЭМ}}, a_{12}^{\text{ЭМ}}, b_1^{\text{ЭМ}}$ — параметры ЭМ, выбором которых можно обеспечивать желаемое качество переходных процессов и частотных характеристик. Параметры первой и второй строк ЭМ должны совпадать с соответствующими параметрами ОУ для удовлетворения условий точного слежения (4).

В соответствии с [10], искомый закон управления ОУ можно описать следующим выражением:

$$\hat{u}(t) = \hat{B}(t)^+ [(A_{\text{ЭМ}} - \hat{A}(t))x(t) + B_{\text{ЭМ}}\varphi_{\text{зад}}], \quad (6)$$

где $\hat{A}(t)$ и $\hat{B}(t)$ — матрицы оценок параметров объекта управления, получаемых с помощью идентификатора, $\hat{B}(t)^+ = [\frac{1}{\hat{b}_1} \ 0]$ — псевдообратная матрица к матрице оценок параметров управления. После выполнения арифметических операций закон управления (6) принимает следующий вид:

$$\hat{u} = \frac{1}{\hat{b}_1} [(a_{11}^{\text{ЭМ}} - \hat{a}_{11})\omega + a_{12}^{\text{ЭМ}}\varphi + b_1^{\text{ЭМ}}\varphi_{\text{зад}}], \quad (7)$$

где $a_{11}^{\text{ЭМ}}, a_{12}^{\text{ЭМ}}, b_1^{\text{ЭМ}}$ — оценки параметров первой строки ОУ (2).

Важно отметить, что в данном случае для вычисления управляющего сигнала на ОУ необходимо идентифицировать только параметры третьей строки матрицы $A(t)$, а остальные параметры

должны быть известны с некоторой точностью для правильного выбора ЭМ.

В [6] доказано, что если оценка матрицы B удовлетворяет условию

$$\text{rank} [\hat{B} B] = \text{rank} \hat{B} \text{ или } \overline{B^L} B = 0, \quad (8)$$

то ошибка слежения за ЭМ $e = x - x_{\text{ЭМ}}$ описывается дифференциальным уравнением:

$$\dot{e} - A_{\text{ЭМ}} e = K \varepsilon, \quad (9)$$

где ε — невязка идентификации, речь о которой пойдет ниже; K — некоторое ограниченное положительное число. Из (8) следует из асимптотической устойчивости $A_{\text{ЭМ}}$ ограниченность ошибки слежения при $\varepsilon \neq 0$. Если же $\varepsilon \rightarrow 0$, то с течением времени $e \rightarrow 0$.

Алгоритм идентификации параметров модели пневмопривода

Для адаптируемости системы управления к неопределенностям параметрических и внешних возмущений используется идентификатор, на основе оценок которого определяется закон управления. Перед поступлением в идентификатор вектор факторов $z = [\omega, \varphi]$ пропускается через фильтр низких частот:

$$F(s) = \frac{1}{Ts + 1}.$$

Здесь $s = d/dt$ — оператор дифференцирования по времени, T — постоянная времени фильтра. Правым нижним индексом “ F ” будет обозначаться сигнал, пропущенный через фильтр $F(s)$.

В качестве алгоритма текущей идентификации используется рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания [11], который для рассматриваемого случая имеет вид:

$$\hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + \varepsilon_i z_{Fi}^T P_i, \quad (10)$$

где i — квантор времени; — строчная матрица оценок параметров; ε — невязка идентификации, вычисляемая по формуле:

$$\varepsilon = \dot{\omega}_F - \dot{\theta} z_F, \quad (11)$$

где $\dot{\omega}_F$ — сигнал скорости штока привода ω , пропущенный через фильтр $sF(s)$; P_i — положительно определенная квадратная матрица коэффициентов усиления идентификатора размером 2, вычисляемая по алгоритму [11, с. 266]:

$$P_i = P_{i-1} - (P_{i-1} z_F z_F^T P_{i-1}) / (1 + z_F^T P_{i-1} z_F) \quad (12)$$

$$P_i = P_i / \beta, \quad (13)$$

где P_0 — диагональная матрица с достаточно большими значениями, β — фактор забывания.

Сходимость к истинным значениям оценок параметров достигается при более сложных условиях, чем сходимость к нулю невязки идентификации. Из равенства $\varepsilon \approx 0$ еще не следует равенства $\hat{\theta} \approx \theta$.

Результаты моделирования

Для оценки эффективности работы синтезированного адаптивного алгоритма было проведено математическое моделирование. Были заданы номинальные параметры, определяющие динамические характеристики объекта управления, соответствующие гипотетическому приводу. Параметры ЭМ идентичны заданным номинальным для ОУ. Адаптивный закон управления сравнивался с неадаптивным пропорциональным законом управления, описываемым формулой (7), в которой вместо оценок параметров $\hat{a}_{11}$, $\hat{a}_{12}$, $\hat{b}_1$ используются их номинальные значения a_{11_0} , a_{12_0} и b_{1_0} . Использовался сигнал заданного положения в следующем виде:

$$I_y(i) = 5 * \cos(2\pi t).$$

Моделирование проводилось с помощью численного метода интегрирования Рунге-Кутты 4-го порядка с временным шагом равным 0,001 с.

Настройки алгоритма текущей идентификации (10) – (13) следующие: $P_0 = [1000, 1000]$, фактор забывания $\beta = 0,1$.

Результаты моделирования представлены на рис. 3–5.

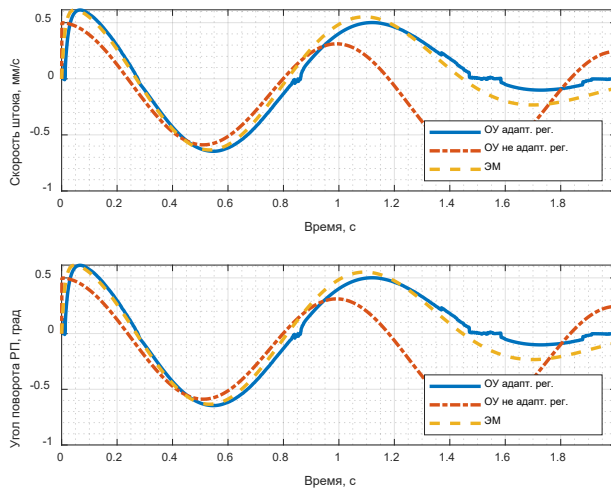


Рис. 3. Выходные параметры ОУ

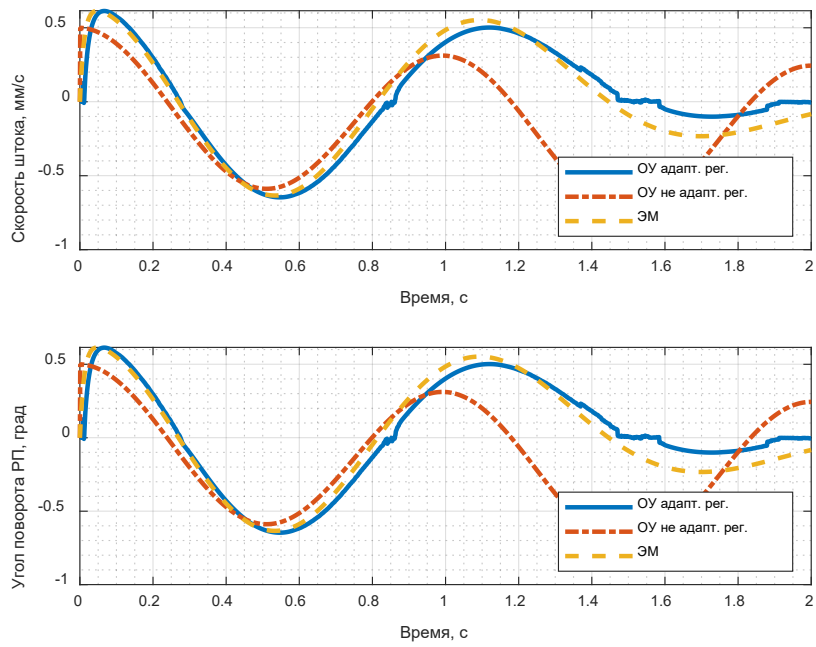


Рис. 4. Переходной процесс

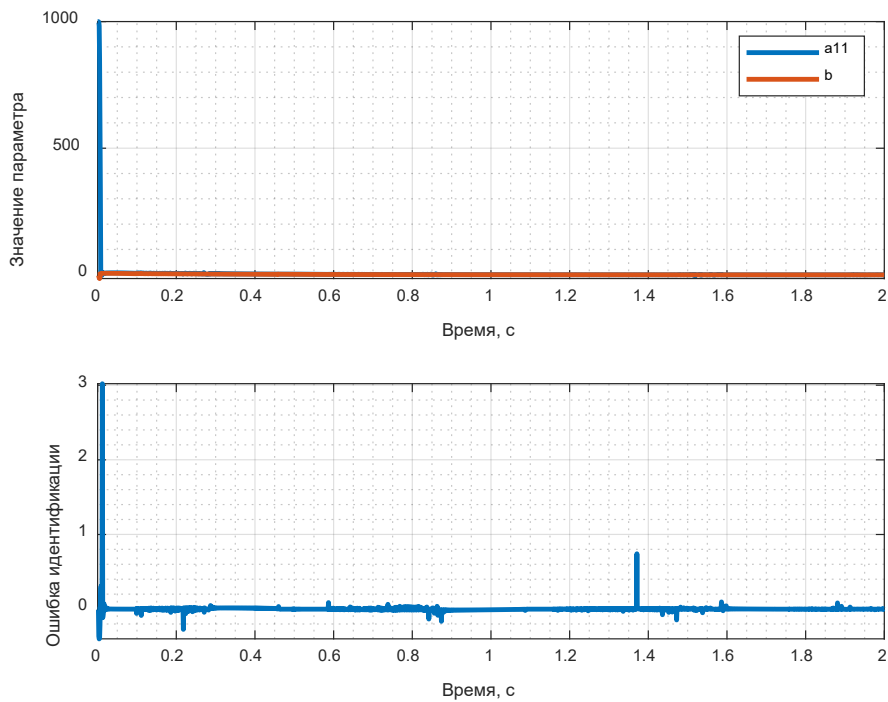


Рис. 5. Значения идентификационных параметров

Как видно из рисунков, переходной процесс угла поворота выходного звена ОУ с использованием адаптивного регулятора почти полностью совпадает с переходными процессами ЭМ, в то время как ОУ с простым пропорциональным законом управления при отклонении от номинальных параметров отрабатывает выходное воздействие более инерционно. Исходя из результатов численного моделирования работы адаптивного алгоритма можно сделать вывод, что синтезированный алгоритм обеспечивает точное слежение за эталонной моделью в условиях существенного изменения характеристик электропривода.

Заключение

Для пневмопривода, описываемого ММ (1) с помощью адаптивного закона управления (7) обеспечивается практически точное слежение за ЭМ (3), (5). Это подтверждает справедливость полученных теоретических выводов о том, что если ЭМ удовлетворяет условиям (4), оценка матрицы эффективности управления удовлетворяет условию (8), то ошибка слежения за ЭМ в замкнутом контуре описывается дифференциальным уравнением (9) и при малости невязки идентификации (11) является также малой величиной.

Список использованной литературы

1. Медведев М.Ю. Алгоритмы адаптивного управления исполнительными приводами / М.Ю. Медведев. — EDN KVECBV // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2006. — № 6. — С. 17–22.
2. Туренко А.Н. Электропневматический привод тормозов с адаптивным управлением / А.Н. Туренко, С.Н. Шуклинов, Н.Г. Михалевич. — EDN ONCMKD // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Наземные транспортные системы. — 2011. — Т. 4, № 12 (85). — С. 51–53.
3. Адаптивная цифровая система управления рулевого привода перспективного маневренного самолета / С.В. Константинов, П.Г. Редько, А.В. Кузнецов, В.Е. Кузнецов. — EDN RDEDTN // Полет. — 2013. — № 3. — С. 48–59.
4. Патент № 2108612 С1 Российская Федерация, МПК G05B 13/00, G05B 13/02, G05B 13/04. Адаптивная система управления с идентификатором и неявной эталонной моделью : № 94033714/09 : заявл. 14.09.1994 : опубл. 10.04.1998 / В.Н. Буков, С.П. Круглов. — EDN GGRPSA.
5. Буков В.Н. Адаптируемость линейной динамической системы с идентификатором и эталонной моделью / В.Н. Буков, С.П. Круглов, Е.П. Решетняк // Автоматика и телемеханика, 1994. — № 3. — С. 99–107.
6. Пшихопов В.Х. Адаптивное управление с эталонной моделью приводом постоянного тока / В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, В.А. Шевченко. — EDN TVWYFD // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2015. — № 2 (163). — С. 6–18.
7. Медведев М.Ю. Базовые алгоритмы адаптивного управления синхронным генератором с эталонной моделью / М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов, В.А. Шевченко. — EDN VNZBGN // Инженерный вестник Дона. — 2015. — № 4 (38). — С. 33.

8. Самосейко В.Ф. Адаптивный алгоритм векторного управления электроприводами с асинхронными электродвигателями / В.Ф. Самосейко. — DOI 10.21821/2309-5180-2019-11-1-156-168. — EDN UILIUX // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2019. — Т. 11, № 1. — С. 156–168.

9. Круглов С.П. Уточнение условий адаптируемости систем управления с идентификатором и эталонной моделью / С.П. Круглов. — EDN NUNFMB // Автоматика и телемеханика. — 2002. — № 12. — С. 78–91.

10. Бронников А.М. Внешняя и параметрическая инвариантность выхода адаптивной системы с идентификатором и эталонной моделью / А.М. Бронников. — EDN IJQNIZ // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2008. — Т. 6, № 2. — С. 15–23.

11. Бронников А.М. Условия точного слежения выхода линейной системы за эталонной моделью пониженного порядка / А.М. Бронников, В.Н. Буков. — EDN MVOAJX // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 3. — С. 60–69.

References

1. Medvedev M.Yu. Algorithms of Adaptive Control for Actuating Drives. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = *Mechatronics, Automation, Control*, 2006, no. 6, pp. 17–22. (In Russian). EDN: KVECBB.

2. Turenko A.N., Shuklinov S.N., Mikhalevich N.G. Electro-pneumatic brake drive with adaptive control. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nazemnye transportnye sistemy* = *Izvestiya of Volgograd State Technical University. Series: Ground Transportation Systems*, 2011, vol. 4, no. 12, pp. 51–53. (In Russian). EDN: ONCMKD.

3. Konstantinov S.V., Redko P.G., Kuznetsov A.V., Kuznetsov V.E. Adaptive Digital Control System for Future Agile Aircraft. *Polet* = *Flight*, 2013, no. 3, pp. 48–59. (In Russian). EDN: RDEDTN.

4. Bukov V.N., Kruglov S.P. Patent No. 2108612 C1 Russian Federation. *Adaptive Control System with Identifier and Implicit Reference Model*. Announced 14.09.1994; Published 10.04.1998. EDN: GGRPSA.

5. Bukov V.N., Kruglov S.P., Reshetnyak E.P. Adaptation of a Linear Dynamical System with the Identifier and the Reference Model. *Avtomatika i telemekhanika* = *Automation and Remote Control*, 1994, no. 3, pp. 99–107. (In Russian). EDN: KSXRER.

6. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Shevchenko V.A. Reference Model Adaptive Control for Dc Drive. *Izvestiia IUFU. Tekhnicheskie nauki* = *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2015, no. 2, pp. 6–18. (In Russian). EDN: TVWYFD.

7. Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Shevchenko V.A. The Basic Algorithm of Adaptive Management of the Synchronous Generator with a Reference Model. *Inzhenernyj vestnik Dona* = *Engineering journal of Don*, 2015, no. 4, pp. 33. (In Russian). EDN: VNZBGN.

8. Samosejko V.F. The Adaptive Algorithm of the Vector Control of Electrical Drives with the Induction Motors. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* = *Bulletin of the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 156–168. (In Russian). EDN: UILIUX. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-156-168.

9. Kruglov S.P. Improved Adaptability Conditions for Control Systems With an Identifier and Reference Model. *Avtomatika i telemekhanika* = *Automation and Remote Control*, 2002, no. 12, pp. 78–91. (In Russian). EDN: NUNFMB.

10. Bronnikov A.M. External and Parametrical Invariancy of the Output of an Adaptive System with the Identifier and Reference Model. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* = *Information-Measuring and Control Systems*, 2008, vol. 6, no. 2, pp. 15–23. (In Russian). EDN: IJQNIZ.

11. Bronnikov A.M., Bukov V.N. Conditions Of Exact Tracking By The Linear System Output Of The Standard Model Of A Reduced Order. *Avtomatika i telemekhanika* = *Automation and Remote Control*, 2008, no. 3, pp. 60–69. (In Russian). EDN: MVOAJX.

Информация об авторах

Забродин Анатолий Михайлович — аспирант, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», 127055, Российская Федерация, г. Москва, Вадковский пер., 3а, e-mail: tolja-zabrodin@mail.ru.

Петров Валерий Евгеньевич — кандидат технических наук, доцент кафедры управления и информатики в технических системах, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», 127055, Российская Федерация, г. Москва, Вадковский пер., 3а, e-mail: cu58@mail.ru.

Information about the Authors

Anatoly M. Zabrodin — PhD Student, Moscow State University of Technology “STANKIN”, 3a Vadkovsky Lane, Moscow, 127055, Russian Federation, e-mail: tolja-zabrodin@mail.ru.

Valery E. Petrov — PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Management and Computer Science in Technical Systems, Moscow State University of Technology “STANKIN”, 3a Vadkovsky Lane, Moscow, 127055, Russian Federation, e-mail: cu58@mail.ru.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the Authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Для цитирования

Забродин А.М. Адаптивный алгоритм управления газовым приводом с идентификатором и эталонной моделью / А.М. Забродин, В.Е. Петров. — DOI 10.17150/2713-1734.2026.8(2).193-203. — EDN LCOUFL // *System Analysis & Mathematical Modeling*. — 2026. — Т. 8, № 2. — С. 193–203.

For Citation

Zabrodin A.M., Petrov V.E. Adaptive Gas Drive Control Algorithm with ID and Reference Model. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2026, vol. 8, no. 2, pp. 193–203. (In Russian). EDN: LCOUFL. DOI: 10.17150/2713-1734.2026.8(2).193-203.