

# Энергетика и электротехника

УДК 681.584.782

## Формализованная математическая модель электромагнитного клапана

С.Ш. Рехвиашвили, Х.М. Сенюв

Институт прикладной математики и автоматизации — филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»

## Formalized mathematical model of a solenoid valve

S.Sh. Rekhviashvili, Kh.M. Senov

Institute of Applied Mathematics and Automation, Branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

Электромагнитные клапаны активно применяются в промышленности на химических и нефтеперерабатывающих предприятиях, в фильтрационных гидрорыводах, сельском хозяйстве, поливочных системах и устройствах смешения и дозирования, в системах бытового водо- и газоснабжения, в двигателях внутреннего сгорания, жидкостных ракетных двигателях и др. Оптимальное проектирование электромагнитных клапанов для тех или иных нужд должно учитывать статические (управляющие напряжение и силу тока, рабочие давление и температуру) и динамические параметры (время и скорость срабатывания). В научной литературе отсутствуют простые и универсальные математические модели электромагнитного клапана, которые можно использовать не только для наблюдения за его работой, но и на этапе проектирования изделия. Предложена математическая модель электромагнитного клапана с применением программы SimInTech. С помощью разработанной математической модели проведены численные эксперименты, которые корректно воспроизводят работу электромагнитного клапана. Показано, что переключение электромагнитного клапана определяется соотношением между внешним давлением, жесткостью удерживающей пружины, уровнем динамического демпфирования и электрофизическими характеристиками электромагнита.

EDN: IPGIMX, <https://elibrary/ipgimx>

**Ключевые слова:** электромагнитный клапан, статические и динамические параметры, формализованная математическая модель, моделирование переходных процессов

Electromagnetic valves are widely used in production at chemical and oil refineries, in filtration hydraulic pipelines, agriculture irrigation systems and mixing and dosing installations, household water and gas supply systems, internal combustion engines, liquid rocket engines, etc. Electromagnetic valves design and development for certain needs should take into account static (control voltage and current, operation pressure and temperature) and dynamic (time and response speed) parameters. Simple and universal mathematical models of a solenoid valve that could be used not only to monitor its operation, but also at the product design stage, are missing in the scientific literature. The paper proposes the solenoid valve mathematical model using the SimInTech software program. It uses the developed mathe-

mathematical model to carry out numerical experiments correctly reproducing the solenoid valve operation. The paper shows that the solenoid valve switching is determined by relationship between the external pressure, retaining spring rigidity, dynamic damping level and the electromagnet electrophysical characteristics.

EDN: IPGIMX, <https://elibrary/ipgimx>

**Keywords:** electromagnetic valve, static and dynamic parameters, formalized mathematical model, transient processes simulation

Автоматически управляемые электромагнитные клапаны (ЭМК) нашли широкое применение в различных гидравлических и пневматических системах. Устройство и особенности функционирования ЭМК в значительной степени влияют на производительность и безопасность этих систем.

К статическим параметрам ЭМК относятся управляющее напряжение и сила тока, рабочие температура и давление. В качестве динамических параметров ЭМК могут вступать время, предельная частота и скорость срабатывания. Динамические параметры важны для высокоточных и высокоскоростных пневматических систем. В целом взаимосвязь между статическими и динамическими параметрами управляемых ЭМК служит основным ориентиром для их проектирования и совершенствования.

Наиболее часто в научно-технической литературе рассматривают ЭМК для двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [1–9]. Известно, что применение электроуправляемых клапанов с улучшенными характеристиками позволяет повысить эффективность и экономичность ДВС. Чтобы обеспечить надежность и однозначность численных расчетов, математическая модель ЭМК не должна быть чрезвычайно сложной и (по возможности) включать в себя трудно определяемые параметры [1].

В статье [2] предложен высокоскоростной ЭМК с малым временем переключения для электронного управления дизельным двигателем. С помощью разработанной математической модели количественно исследовано влияние различных конструктивных особенностей на время срабатывания ЭМК.

ЭМК для дизельного двигателя также рассмотрен в работе [3], где учитывались вихревые токи, магнитный гистерезис и влияние неоднородности магнитной цепи на процесс намагничивания–размагничивания электромагнита.

Авторами публикации [4] проведены математическое моделирование и анализ управления приводами ЭМК, используемых для газообмена в ДВС. Отмечено, что такие клапаны

обладают преимуществами по производительности перед традиционными газораспределительными механизмами на основе распределительного вала. Поддержание скорости удара якоря и ЭМК является основным требованием к производительности, чтобы минимизировать акустический шум и механический износ. Для контроля этой скорости использован метод конечных элементов с целью получения данных о статическом усилии и потоке, которые были подтверждены экспериментально. Также выполнено моделирование свойств обратной связи для достижения требуемых свойств удара.

В работе [5] приведены результаты проектирования, моделирования и экспериментальных измерений характеристик нового привода ЭМК для ДВС. Устройство обладает более высокими динамическими характеристиками, чем другие конструкции, и обеспечивает гибкое регулирование фаз газораспределения и механической силы, что обеспечивает эффективную работу ДВС, включая повышение коэффициента полезного действия, снижение вредных выбросов и улучшение экономичности. Моделирование выполнено с помощью программы Simulink.

Для повышения скорости динамического срабатывания высокоскоростных ЭМК в системах электрического впрыска топлива судовых дизельных двигателей предложена имитационная модель ЭМК [6]. Моделирование и оптимизация проведены с учетом массы подвижной части и динамического демпфирования. Точность модели экспериментально проверена на испытательном стенде. В итоге получены оптимальные решения для конструкций соленоида и якоря.

В контексте вопросов и задач о ДВС следует выделить работы [7, 8], где смоделированы и проанализированы процессы открытия–закрывания дроссельных заслонок.

В известном отношении близкими по теме к ДВС являются жидкостные ракетные двигатели. ЭМК для такого двигателя рассмотрен в статье [9]. Разработаны прототип ЭМК и мате-

математическая модель с применением программ NISA, FEMM и ANSYS Maxwell.

Также можно отметить теоретические и экспериментально-теоретические работы [10–13], в которых строились и изучались различные математические модели клапанов с электромагнитным управлением. Так, в статьях [10, 11] приведены результаты исследования влияния жесткости возвратной пружины и свойств соленоида на динамические характеристики ЭМК. Для случаев постоянных параметров в аналитическом виде найдены передаточные характеристики и рассчитаны переходные процессы.

Достаточно интересная комплексная математическая модель ЭМК, учитывающая аэродинамику, электрическую и магнитную составляющие в цепи, а также механическую подвижную часть, предложена в работе [12]. С помощью моделирования в программе Simulink показано, что время срабатывания ЭМК уменьшается с увеличением давления и управляющего напряжения и повышается с ростом числа витков катушки.

Учитывать нелинейное намагничивание и характеристики магнитного насыщения магнитомягких материалов, входящих в состав ЭМК, предложено в статье [13]. Точность результатов расчета подтверждена сравнением с экспериментальными данными.

Также следует отметить, что математические модели ЭМК могут играть конструктивную роль при разработке качественно новых микро-электромеханических систем [14, 15] и различных электромеханических мехатронных модулей [16].

Цель работы — создание новой обобщенной математической модели ЭМК с применением программы динамического моделирования SimInTch [16].

**Математическая модель и ее реализация.** Рассмотрим условный ЭМК, который состоит из неподвижного электромагнита и подвижного сердечника, соединенного с пружиной. Электромагнитная сила открывает ЭМК, перемещая сердечник против силы упругости пружины и силы вязкого трения. Предполагаем, что в системе действует внешняя постоянная сила, которая в закрытом состоянии ЭМК должна уравновешиваться упругой силой пружины.

Запишем уравнение движения сердечника ЭМК

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_p + F_e - F_m - F_d, \quad (1)$$

где  $m$  и  $x$  — масса и перемещение сердечника;  $t$  — время;  $F_p$  — внешняя сила, обусловленная, например, давлением газа или жидкости;  $F_e$  — сила, создаваемая электромагнитом;  $F_m$  — упругая механическая сила;  $F_d$  — сила динамического вязкого трения (диссипативная сила).

Сила, создаваемая электромагнитом, пропорциональна силе тока  $I$  в его обмотке:

$$F_e = k_1 I, \quad (2)$$

где  $k_1$  — коэффициент, зависящий от конструкции электромагнита.

Упругая механическая сила

$$F_m = k_2 x, \quad (3)$$

где  $k_2$  — коэффициент жесткости.

Сила динамического вязкого трения

$$F_d = k_3 \frac{dx}{dt}, \quad (4)$$

где  $k_3$  — коэффициент динамического трения,  $k_3 = m/\tau$  ( $\tau$  — время релаксации).

С учетом выражений (2)–(4) уравнение (1) принимает вид

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_p + k_1 I - k_2 x - k_3 \frac{dx}{dt}. \quad (5)$$

В уравнении (5) необходимо учесть напряжение  $U$ , подаваемое на электромагнит, который можно представить в виде последовательно соединенных катушки индуктивности и резистора. Тогда, согласно второму закону Кирхгофа, запишем

$$U = L \frac{dI}{dt} + Ir, \quad (6)$$

где  $L$  и  $r$  — индуктивность и активное сопротивление обмотки электромагнита.

Чтобы использовать какую-либо компьютерную программу для динамического моделирования, систему уравнений (5), (6) удобно представить в интегральном виде. Из выражений (5), (6) получаем следующую систему уравнений:

$$v(t) = v(0) + \frac{F_p}{m} t + \frac{1}{m} \int_0^t [k_1 I(t') - k_2 x(t') - k_3 v(t')] dt'; \quad (7)$$

$$I(t) = I(0) + \frac{1}{L} \int_0^t [U(t') - I(t')r] dt'; \quad (8)$$

$$x(t) = x(0) + \int_0^t v(t') dt', \quad (9)$$

где  $v(0)$  и  $x(0)$  — начальные значения скорости движения и перемещения подвижной части ЭМК;  $I(0)$  — начальное значение силы тока в обмотке.

На практике часто проявляются нелинейные эффекты, поэтому коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  могут быть функциями перемещения  $x(t)$ . В рассматриваемом случае уравнения (7)–(9) остаются справедливыми.

Для численной реализации математической модели ЭМК использована программа динамического моделирования SimInTech [16]. С помощью этой программы проведен расчет переходных процессов. Предполагалось, что на электромагнит подается ступенчатый сигнал

$$U(t) = \begin{cases} U_0 & \text{при } t \geq t_0; \\ 0 & \text{при } t < t_0, \end{cases} \quad (10)$$

где  $U_0$  — уровень сигнала;  $t_0$  — время срабатывания ЭМК.

Блок-схема и примеры моделирования маломощного ЭМК по математической модели (7)–(10) приведены на рис. 1 и 2. Видно, что вычислительные эксперименты физически правильно описывают динамику работы ЭМК.

Наличие внешней силы  $F_p$  оказывает существенное влияние на решение задачи. В зависи-

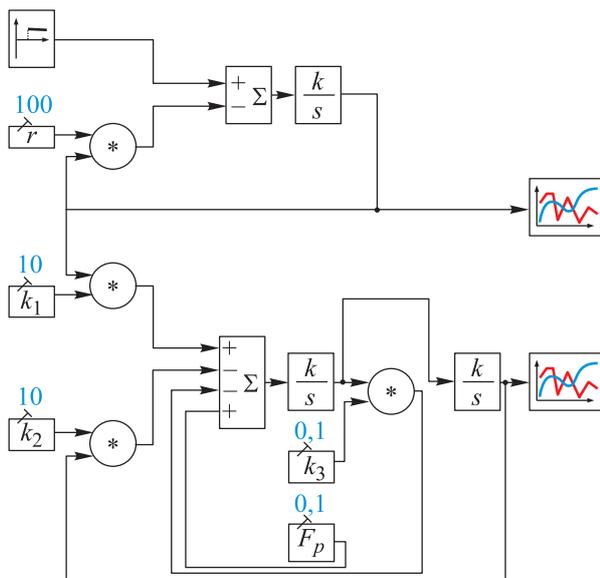


Рис. 1. Блок-схема решения системы интегральных уравнений (7)–(9) при нулевых начальных условиях

мости от соотношения между ней и силой упругости удерживающей пружины выявлены различные сценарии. Если внешняя сила  $F_p$  не слишком велика (рис. 2, б), то в начальный промежуток времени  $t < t_0$  ЭМК надежно закрыт. Появление сигнала напряжения в момент времени  $t = t_0$  инициирует открытие ЭМК и

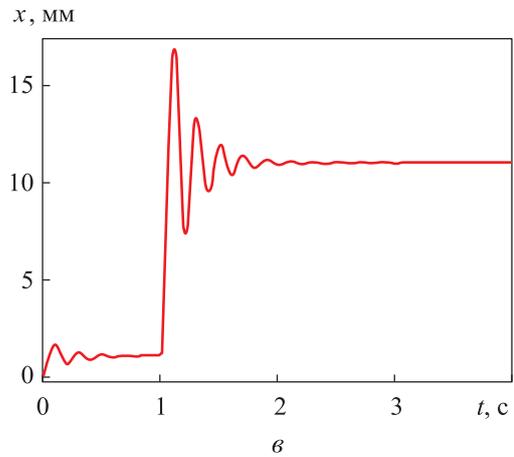
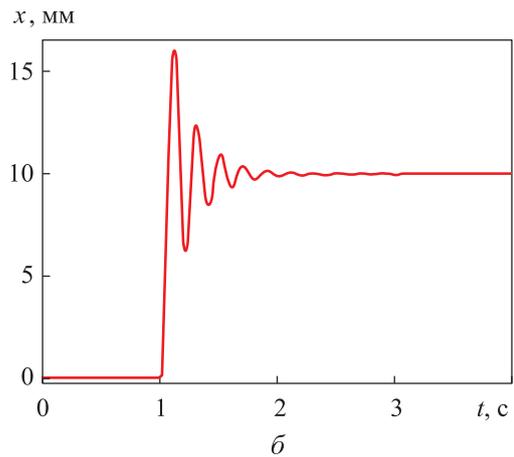
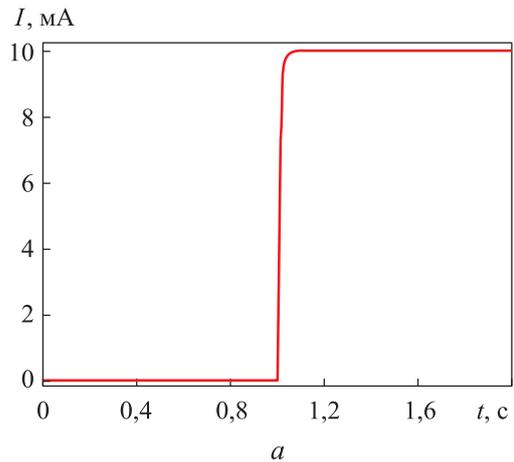


Рис. 2. Результаты моделирования переходных процессов в ЭМК:  
а — зависимость силы тока электромагнита  $I$  от времени  $t$ ;  
б, в — зависимости перемещения сердечника  $x$  от времени  $t$  при различных значениях внешней силы

переходный процесс, что сопровождается нарастанием силы тока в электромагните (рис. 2, а).

При  $t > t_0$  могут наблюдаться затухающие механические колебания подвижной части ЭМК, характер которых зависит от параметров  $k_2$  и  $k_3$ . Условие  $t \rightarrow \infty$  отвечает открытому ЭМК, т. е. его конечному состоянию.

Если же изначально внешняя сила  $F_p$  способна немного приоткрыть ЭМК (рис. 2, в), то при  $t < t_0$  могут наблюдаться нежелательные колебания сердечника, вызванные действием силы  $F_p$  при  $t = 0$ . В этом случае ЭМК фактически перестает выполнять свою функцию, так как в процессе работы не обеспечивается его полное закрытие. Дальнейшее увеличение внешней силы  $F_p$  полностью переводит ЭМК в открытое состояние независимо от напряжения на электромагните.

В самом простом случае, когда все параметры модели являются константами, к уравнениям (5), (6) применимы аналитические методы решения. Подставляя выражение (5) в формулу (6), получаем обыкновенное дифференциальное уравнение

$$a_1 \frac{d^3 x}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_3 \frac{dx}{dt} + a_4 x + a_5 = U, \quad (11)$$

где

$$a_1 = \frac{mL}{k_1}; \quad a_2 = \frac{1}{k_1}(k_3L + mr);$$

$$a_3 = \frac{1}{k_1}(k_2L + k_3r); \quad a_4 = \frac{k_2r}{k_1}; \quad a_5 = -\frac{F_p}{mk_1}.$$

При решении уравнения (11) слагаемое  $a_5$  можно включить в его правую часть. С физической точки зрения это означает, что постоянная внешняя сила эквивалентна некоторому добавочному значению напряжения на электромагните. Общее решение уравнения (11) имеет вид

$$x(t) = \sum_{i=1}^3 C_i \exp(-p_i t) + \tilde{x}(t),$$

где  $C_i$  — постоянные коэффициенты;  $p_i$  — корни характеристического уравнения;  $\tilde{x}(t)$  — частное решение неоднородного уравнения.

Другой метод основан на преобразовании Лапласа. Пусть имеется ЭМК прямого действия при внешней силе  $F_p \rightarrow 0$ . Тогда уравнения (5), (6) в операторной форме принимают вид

$$ms^2 \hat{x}(s) + k_3 s \hat{x}(s) + k_2 \hat{x}(s) = k_1 \hat{I}(s); \quad (12)$$

$$Ls \hat{I}(s) + r \hat{I}(s) = \hat{U}(s), \quad (13)$$

где  $s$  — оператор Лапласа.

Из уравнений (12) и (13) находим передаточные функции:

- для механической части ЭМК

$$W_m = \frac{\hat{x}(s)}{\hat{I}(s)} = \frac{k_1}{ms^2 + k_3s + k_2}; \quad (14)$$

- электрической части ЭМК

$$W_e = \frac{\hat{I}(s)}{\hat{U}(s)} = \frac{1}{Ls + r}. \quad (15)$$

Из уравнений (14) и (15) следует, что структурная модель управляемого ЭМК прямого действия представляет собой последовательно соединенные инерционное и колебательное звенья. Результирующая передаточная функция имеет вид

$$W = W_m W_e = \frac{\hat{x}(s)}{\hat{U}(s)} = \frac{k}{(T_1^2 s^2 + 2\beta T_1 s + 1)(T_2 s^2 + 1)},$$

где  $k$  — коэффициент передачи управляемого ЭМК,

$$k = \frac{k_1}{k_2 r}; \quad T_1 = \sqrt{\frac{m}{k_2}}; \quad T_2 = \frac{L}{r}; \quad \beta = \frac{k_3}{2\sqrt{k_2 m}}.$$

Если в рассмотренной задаче об ЭМК возникнет необходимость учитывать нелинейности в механической и электрической частях и/или нелинейную зависимость силы  $F_p$  от перемещения  $x(t)$  (например, внешнее давление может снижаться при открытии ЭМК), то возможности аналитических методов заметно уменьшатся.

## Выводы

1. Предложена новая математическая модель управляемого ЭМК, учитывающая механическую и электрическую составляющие, а также возможность функционирования ЭМК в условиях с произвольной разностью давлений.

2. С помощью программы SimInTech проведены численные эксперименты, качественно воспроизводящие работу ЭМК. Показано, что в простейшем случае математическая модель ЭМК допускает аналитические решения. Математическая модель в определенной мере является универсальной и в дальнейшем может быть усовершенствована путем учета таких нелинейных явлений, как зависимость жесткости пружины, электромагнитной силы и

внешнего давления от смещения подвижного сердечника.

3. Полученные результаты можно использовать для прогнозирования устойчивой работы

ЭМК в различных гидродинамических и пневматических системах в зависимости от условий их эксплуатации.

## Литература

- [1] Pohl J., Sethson M., Krus P. et al. Modelling and validation of a fast switching valve intended for combustion engine valve trains. *Proc. Inst. Mech. Eng. C J. Mech. Eng. Sci.*, 2002, vol. 216, no. 2, pp. 105–116, doi: <https://doi.org/10.1243/0959651021541462>
- [2] Kajima T., Kawamura Y. Development of a high-speed solenoid valve: investigation of solenoids. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 1995, vol. 42, no. 1, pp. 1–8, doi: <https://doi.org/10.1109/41.345838>
- [3] Врублевский А.Н., Григорьев А.Л., Бовда А.М. Математическая модель быстродействующего электромагнита для топливной системы ДВС. *Автомобильный транспорт*, 2006, № 19, с. 138–143.
- [4] Koch C.R., Lynch A.F., Chladny R.R. Modeling and control of solenoid valves for internal combustion engines. *IFAC Proceedings Volumes*, 2002, vol. 35, no. 2, pp. 197–202, doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)33941-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)33941-1)
- [5] Cope D., Wright A., Corcoran Ch.J. et al. Fully Flexible electromagnetic valve actuator: design, modeling, and measurements. *SAE Tech. Pap.*, 2008, № 2008-01-1350, doi: <https://doi.org/10.4271/2008-01-1350>
- [6] Fan Y., Wang H., Xie L. et al. Armature structure optimization of annular multipole solenoid valves based on electromagnetic force distribution. *Actuators*, 2023, vol. 12, no. 2, art. 54, doi: <https://doi.org/10.3390/act12020054>
- [7] Naseradinmousavi P., Nataraj C. Nonlinear mathematical modeling of butterfly valves driven by solenoid actuators. *Appl. Math. Model.*, 2011, vol. 35, no. 5, pp. 2324–2335, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.036>
- [8] Kitio Kwuimy C.A., Nataraj C. Modeling and dynamic analysis of a magnetically actuated butterfly valve. *Nonlinear Dyn.*, 2012, vol. 70, no. 1, pp. 435–451, doi: <https://doi.org/10.1007/s11071-012-0466-3>
- [9] Иголкин А.А., Чубенко Т.А., Максимов А.Д. Разработка модели электромагнитного клапана с улучшенными характеристиками для жидкостного ракетного двигателя. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2020, т. 19, № 4, с. 31–42, doi: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2020-19-4-30-42>
- [10] Kabib M., Batan M., Pramujati B. et al. Modelling and simulation analysis of solenoid valve for spring constant influence to dynamic response. *ARNP J. Eng. Appl. Sci.*, 2016, vol. 11, no. 4, pp. 2790–2793.
- [11] Badr M.F. Modelling and simulation of a controlled solenoid. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 433, art. 012082, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/433/1/012082>
- [12] Zhang X., Lu Y., Li Y. et al. Numerical calculation and experimental study on response characteristics of pneumatic solenoid valves. *Meas. Control.*, 2019, vol. 52, no. 9–10, pp. 1382–1393, doi: <https://doi.org/10.1177/0020294019866853>
- [13] Zhao J., Fan L., Liu P. et al. Show citation investigation on electromagnetic models of high-speed solenoid valve for common rail injector. *Math. Probl. Eng.*, 2017, vol. 2017, art. 9078598, doi: <https://doi.org/10.1155/2017/9078598>
- [14] Распопов В.Я. *Микромеханические приборы*. Москва, Машиностроение, 2007. 400 с.
- [15] Гуртов В.А., Беляев М.А., Бакшеева А.Г. *Микроэлектромеханические системы*. Петрозаводск, Изд-во ПетрГУ, 2016. 171 с.
- [16] Герман-Галкин С.Г., Карташов Б.А., Литвинов С.Н. *Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SiminTech*. Москва, ДМК Пресс, 2021. 494 с.

## References

- [1] Pohl J., Sethson M., Krus P. et al. Modelling and validation of a fast switching valve intended for combustion engine valve trains. *Proc. Inst. Mech. Eng. C J. Mech. Eng. Sci.*, 2002, vol. 216, no. 2, pp. 105–116, doi: <https://doi.org/10.1243/0959651021541462>
- [2] Kajima T., Kawamura Y. Development of a high-speed solenoid valve: investigation of solenoids. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 1995, vol. 42, no. 1, pp. 1–8, doi: <https://doi.org/10.1109/41.345838>
- [3] Vrublevskiy A.N., Grigoryev A.L., Bovda A.M. Mathematical model of high-speed electromagnet for ice fuel system. *Avtomobilnyy transport* [Automobile Transport], 2006, no. 19, pp. 138–143. (In Russ.).
- [4] Koch C.R., Lynch A.F., Chladny R.R. Modeling and control of solenoid valves for internal combustion engines. *IFAC Proceedings Volumes*, 2002, vol. 35, no. 2, pp. 197–202, doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)33941-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)33941-1)
- [5] Cope D., Wright A., Corcoran Ch.J. et al. Fully Flexible electromagnetic valve actuator: design, modeling, and measurements. *SAE Tech. Pap.*, 2008, no. 2008-01-1350, doi: <https://doi.org/10.4271/2008-01-1350>
- [6] Fan Y., Wang H., Xie L. et al. Armature structure optimization of annular multipole solenoid valves based on electromagnetic force distribution. *Actuators*, 2023, vol. 12, no. 2, art. 54, doi: <https://doi.org/10.3390/act12020054>
- [7] Naseradinmousavi P., Nataraj C. Nonlinear mathematical modeling of butterfly valves driven by solenoid actuators. *Appl. Math. Model.*, 2011, vol. 35, no. 5, pp. 2324–2335, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.036>
- [8] Kitio Kwuimy C.A., Nataraj C. Modeling and dynamic analysis of a magnetically actuated butterfly valve. *Nonlinear Dyn.*, 2012, vol. 70, no. 1, pp. 435–451, doi: <https://doi.org/10.1007/s11071-012-0466-3>
- [9] Igolkin A.A., Chubenko T.A., Maksimov A.D. Development of improved performance electromagnetic valve for liquid rocket engine. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering], 2020, vol. 19, no. 4, pp. 31–42, doi: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2020-19-4-30-42> (in Russ.).
- [10] Kabib M., Batan M., Pramujati B. et al. Modelling and simulation analysis of solenoid valve for spring constant influence to dynamic response. *ARN J. Eng. Appl. Sci.*, 2016, vol. 11, no. 4, pp. 2790–2793.
- [11] Badr M.F. Modelling and simulation of a controlled solenoid. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 433, art. 012082, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/433/1/012082>
- [12] Zhang X., Lu Y., Li Y. et al. Numerical calculation and experimental study on response characteristics of pneumatic solenoid valves. *Meas. Control.*, 2019, vol. 52, no. 9-10, pp. 1382–1393, doi: <https://doi.org/10.1177/0020294019866853>
- [13] Zhao J., Fan L., Liu P. et al. Show citation investigation on electromagnetic models of high-speed solenoid valve for common rail injector. *Math. Probl. Eng.*, 2017, vol. 2017, art. 9078598, doi: <https://doi.org/10.1155/2017/9078598>
- [14] Raspopov V.Ya. *Mikromekhanicheskie pribory* [Micromechanical devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 400 p. (In Russ.).
- [15] Gurtov V.A., Belyaev M.A., Baksheeva A.G. *Mikroelektromekhanicheskie sistemy* [Microelectromechanical systems]. Petrozavodsk, Izd-vo PetrGU Publ., 2016. 171 p. (In Russ.).
- [16] German-Galkin S.G., Kartashov B.A., Litvinov S.N. *Modelnoe proektirovanie elektromekhanicheskikh mekhatronnykh moduley dvizheniya v srede SiminTech* [Model design of electromechanical mechatronic motion modules in SiminTech environment]. Moscow, DMK Press Publ., 2021. 494 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 05.03.2024

## Информация об авторах

**РЕХВИАШВИЛИ Серго Шотович** — доктор физико-математических наук, заведующий отделом Теоретической и математической физики. Институт прикладной математики и автоматизации — филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук» (360000, Нальчик, Российская федерация, ул. Шортанова, д. 89А, e-mail: rsergo@mail.ru).

**СЕНОВ Хамиша Машхариевич** — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела Теоретической и математической физики. Институт прикладной математики и автоматизации — филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук» (360000, Нальчик, Российская федерация, ул. Шортанова, д. 89А, e-mail: xmsenov@mail.ru).

### Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Рехвиашвили С.Ш., Сенов Х.М. Формализованная математическая модель электромагнитного клапана. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 12, с. 80–87.

### Please cite this article in English as:

Rekhviashvili S.Sh., Senov Kh.M. Formalized mathematical model of a solenoid valve. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 12, pp. 80–87.

## Information about the authors

**REKHVIASHVILI Sergo Shotovich** — Doctor of Science (Phys.-Math.), Head of the Department of Theoretical and Mathematical Physics. Institute of Applied Mathematics and Automation, Branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (360000, Nalchik, Russian Federation, Shortanova St., Bldg. 89A, e-mail: rsergo@mail.ru).

**SENOV Khamisha Mashkharievich** — Doctor of Sciences (Phys.-Math.), Leading Researcher, Department of Theoretical and Mathematical Physics. Institute of Applied Mathematics and Automation, Branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (360000, Nalchik, Russian Federation, Shortanova St., Bldg. 89A, e-mail: xmsenov@mail.ru).



## Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие А.А. Забровской «Профессионально-ориентированный перевод. Английский язык»

Представлены материалы для лекционных и семинарских занятий, предназначенные для аудиторной и внеаудиторной работы студентов над профессионально-ориентированным английским языком в области перевода. Цель данного пособия — формирование и закрепление теоретических знаний, а также практических навыков, необходимых для выполнения профессионально-ориентированного перевода. Подобраны аутентичные англоязычные материалы по наиболее востребованным темам для будущих переводчиков в сфере профессиональной коммуникации. Каждый из трех модулей включает теоретическую часть и задания на формирование навыков перевода с английского языка на русский и обратно в англоязычном профессиональном курсе.

Для магистрантов 2-го курса, обучающихся по направлению подготовки 45.03.02 «Лингвистика» в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

### 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://press.bmstu.ru>