

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

ELECTROMECHANICS AND ELECTRICAL DEVICES

УДК 621.318.38

doi:10.21685/2307-5538-2022-2-8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА РУЛЕЙ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А. Э. Соловьев¹, А. В. Новаков²

^{1,2} Тульский государственный университет, Тула, Россия

¹ ivts.tulgu@rambler.ru, ² sanyatopor87@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является электромагнитный привод рулей малогабаритного летательного аппарата. Для проверки обеспечения необходимого качества управления рулями малогабаритного летательного аппарата в работе решена актуальная задача по составлению математической модели и моделированию электромагнитного привода рулей. *Целью работы* является получение математической модели, позволяющей определить его основные параметры на этапе эскизного проектирования. *Материалы и методы.* Описание процесса поведения электромагнитного привода базируется на методике, в основе которой лежит уравнение Лагранжа. В качестве обобщенных координат принято перемещение x и электрический заряд q . Для электромагнитно-механической системы составлен лагранжиан, с применением которого построено уравнение Лагранжа. *Результаты.* На основе предложенной методики показан принцип составления математической модели электромагнитного привода, состоящего из двух подпружиненных электромагнитов втяжного типа, связанных между собой жесткой механической связью. *Выводы.* Предлагаемая математическая модель процессов, протекающих в электромагнитном рулевом приводе, позволяет определить его основные параметры и может быть использована на этапе эскизного проектирования.

Ключевые слова: электромагнит, рулевой привод, беспилотный летательный аппарат, математическая модель

Для цитирования: Соловьев А. Э., Новаков А. В. Моделирование электромагнитного привода рулей беспилотного летательного аппарата // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 61–68. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-8

SIMULATION OF THE ELECTROMAGNETIC DRIVE OF THE RUDDERS OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

A.E. Solovlev¹, A.V. Novakov²

^{1,2} Tula State University, Tula, Russia

¹ ivts.tulgu@rambler.ru, ² sanyatopor87@gmail.com

Abstract. *Background.* The object of the study is the electromagnetic rudder drive of a small-sized aircraft. To verify the necessary quality of rudder control of a small-sized aircraft, the work solved the actual problem of compiling a mathematical model and modeling the electromagnetic rudder drive. The aim of the work is to obtain a mathematical model

to determine its main parameters at the stage of conceptual design. *Materials and methods.* The description of the electromagnetic drive behavior process is based on a technique based on the Lagrange equation. Displacement x and electric charge q are taken as generalized coordinates. For the electromagnetic-mechanical system, the Lagrangian is composed, with the application of which the Lagrange equation is constructed. *Results.* On the basis of the proposed methodology, the principle of compiling a mathematical model of an electromagnetic drive consisting of two spring-loaded electromagnets of the retractable type connected by a rigid mechanical linkage is shown. *Conclusions.* The proposed mathematical model of the processes occurring in the electromagnetic RP allows to determine its main parameters and can be used at the stage of conceptual design.

Keywords: electromagnet, steering gear, unmanned aerial vehicle, mathematical model

For citation: Solovov A.E., Novakov A.V. Simulation of the electromagnetic drive of the rudders of an unmanned aerial vehicle. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):61–68. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-8

На борту малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в качестве привода рулей часто используют электромагниты втяжного типа. В этом случае рулевой привод (РП) состоит из двух электромагнитов, обеспечивающих возвратно-поступательное движение якоря [1, 2]. Угловое перемещение аэродинамического руля обеспечивается с помощью рычага, имеющего шарнирные соединения со штоками (якорями) электромагнитов (ЭМ) и осью вращения руля. Конструктивно-компоновочная схема такого РП приведена на рис. 1.

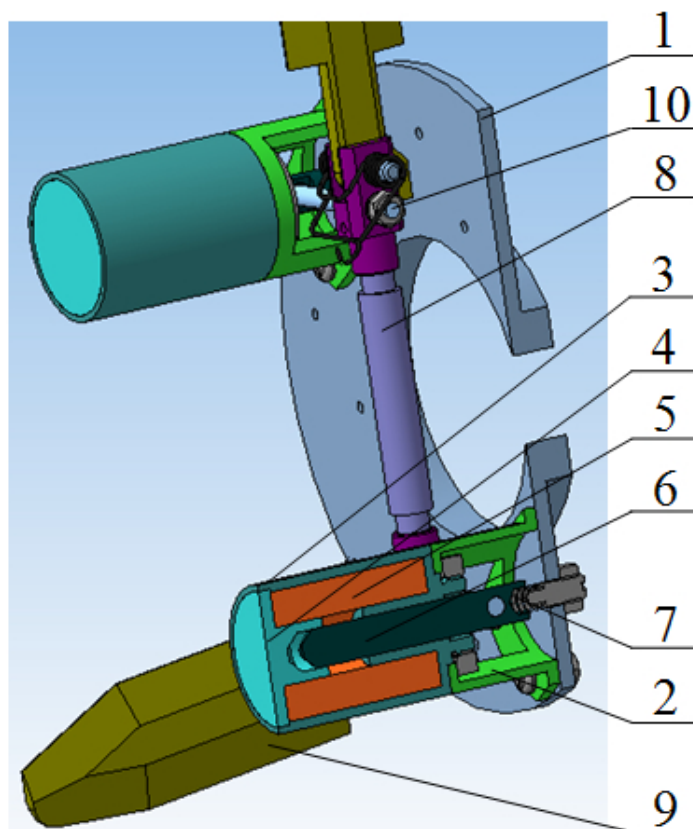


Рис. 1. Конструктивно-компоновочная схема РП: 1 – корпус БПЛА; 2 – стойка; 3 – корпус ЭМ; 4 – стоп; 5 – обмотка; 6 – якорь; 7 – пружина; 8 – ось; 9 – руль; 10 – коромысло

На корпусе БПЛА 1 с помощью стоек 2 закреплена пара ЭМ, каждый из которых состоит из корпуса 3, стопа 4, обмотки 5 и якоря 6, соединенного с возвратной пружиной 7. Ось 8 пары рулей 9 соединена с якорями 6 с помощью коромысел 10. Расчетная схема РП приведена на рис. 2.

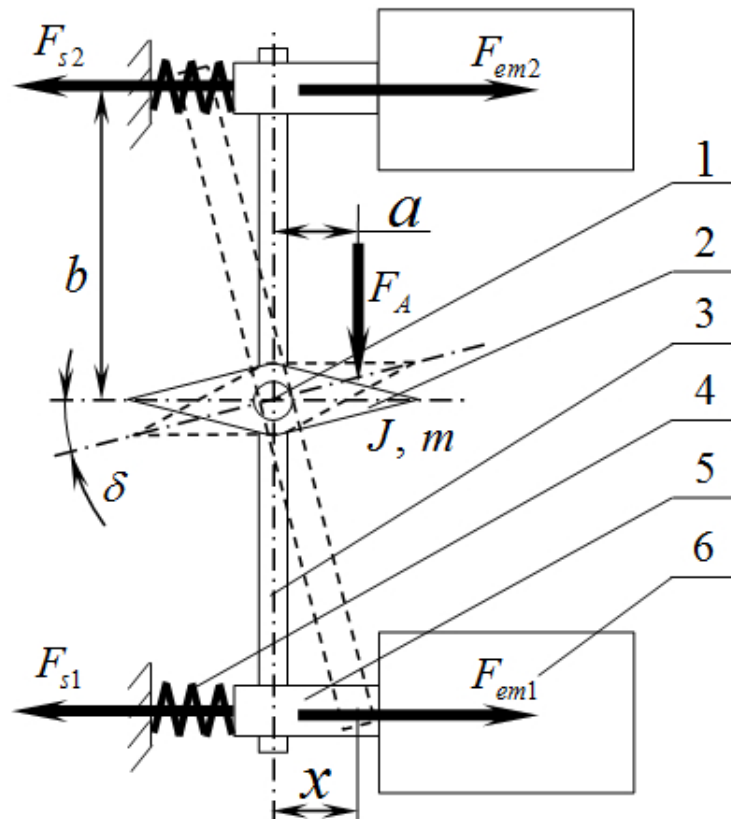


Рис. 2. Расчетная схема рулевого привода:

1 – ось руля; 2 – руль; 3 – коромысло; 4 – пружина; 5 – якорь; 6 – электромагнит

От набегающего воздушного потока на рули действует шарнирный момент, обусловленный аэродинамической силой F_A и плечом a . РП прикладывает к рулям момент, обусловленный: электромагнитной силой F_{em1} или F_{em2} одного из электромагнитов; силой упругости F_{s1} или F_{s2} одной из пружин, работающей на сжатие; и длиной коромысла b . Каждый из ЭМ обеспечивает линейное перемещение на величину x всех линейно движущихся элементов с суммарной массой m и поворот на угол δ всех вращающихся элементов с суммарным моментом инерции J . Таким образом, режимы работы ЭМ одинаковы и независимы друг от друга. Это позволяет на первом этапе ограничиться математическим описанием только одного ЭМ.

Учитывая разнородность протекающих в ЭМ физических процессов (электрических, магнитных, механических), каждый из которых описывается своей совокупностью уравнений, получение математической модели ЭМ целесообразно осуществить с помощью уравнения Лагранжа [3–7]. При этом будем считать, что геометрическая ось ЭМ совпадает с его магнитной осью и с осью приложения сил, а межвитковые емкости обмотки ЭМ пренебрежимо малы.

В этом случае в качестве обобщенных координат будут выступать перемещение x и электрический заряд g . В свою очередь лагранжиан системы Lg будет представлен в виде

$$Lg = T + W_{em} - P,$$

где $T = \frac{1}{2}(m\dot{x}^2 + J\dot{\delta}^2) = \frac{1}{2}\left(m + J\frac{1}{l^2}\right)\dot{x}^2 = \frac{1}{2}m_{pr}\dot{x}^2$ – кинетическая энергия всех подвижных частей

РП, обладающих приведенной массой m_{pr} ; $W_{em} = \frac{1}{2}(Li^2 + \Psi i)$ – электромагнитная энергия, которая запасается в обмотке ЭМ и в воздушном зазоре между якорем и стопом ЭМ (энергию, накапливаемую в прочих воздушных зазорах, будем считать пренебрежимо малой); $i = \frac{dg}{dt}$ – ток в обмотке ЭМ, являющийся, с точки зрения уравнения Лагранжа, обобщенной скоростью;

L , Ψ – индуктивность и потокосцепление обмотки ЭМ соответственно; $P = \frac{1}{2} k_s x^2$ – потенциальная энергия возвратной пружины, имеющий коэффициент упругости k_s .

С целью определения потокосцепления, величина которого меняется при изменении величины воздушного зазора x , необходимо рассмотреть картину магнитного поля, возникающего в этом зазоре. При инженерном подходе к решению указанной задачи для стопа, имеющего форму усеченного конуса (такая форма является универсальной и при необходимости легко может быть сведена к цилиндрической или конической), можно выделить четыре различных участка (рис. 3) [8].

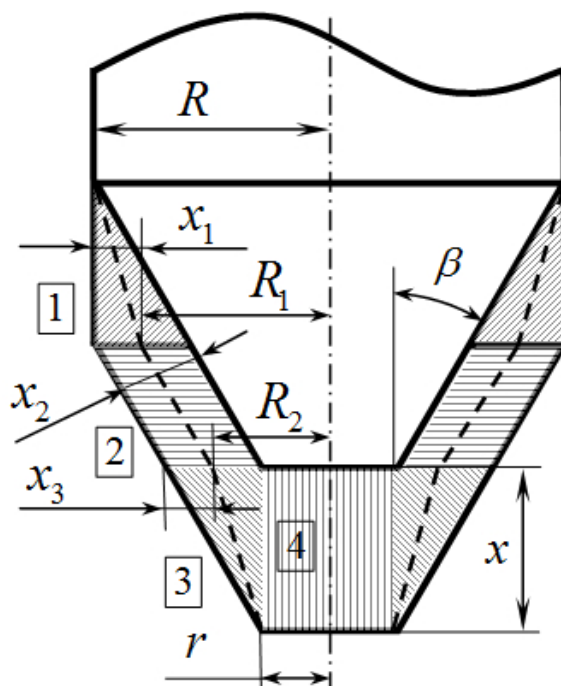


Рис. 3. Схема магнитного поля

Тогда схему замещения магнитной цепи ЭМ можно представить в виде (рис. 4), где W – количество витков обмотки ЭМ; U – напряжение на ней; l_j ($j = 1 \dots 4$) – длина средней линии j -го участка магнитопровода.

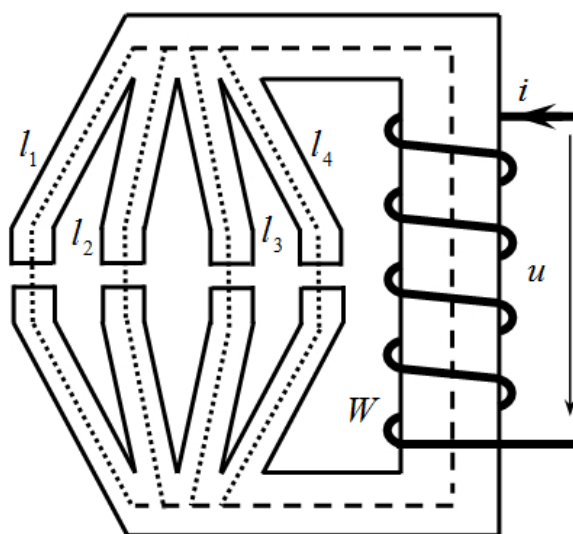


Рис. 4. Схема замещения магнитной цепи

Исходя из реальной конструкции электромагнита, длины средних линий l_j ($j=1...4$) всех для всех частей магнитопровода, определяемых различными участками магнитного поля в воздушном зазоре, будут практически одинаковы. Тогда можно получить следующую систему уравнений, описывающую магнитную цепь:

$$Hl_{mid} + H_j x_j = iW,$$

$$\sum_{j=1}^4 \Phi_j = \Phi,$$

где H – напряженность магнитного поля в магнитопроводе; l_{mid} – длина его средней линии; H_j , Φ_j , x_j ($j=1...4$) – напряженность магнитного поля, магнитный поток и длина участков воздушного зазора соответственно.

Разрешая эту систему относительно магнитного потока Φ , получим

$$\Phi = \mu_0 \left[(iW - Hl_{mid}) \sum_{j=1}^4 \left(\frac{S_j}{x_j} \right) \right],$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м магнитная проницаемость вакуума; S_j ($j=1...4$) площадь участков воздушного зазора.

С инженерной степенью точности эти площади целесообразно определять исходя из некой средней поверхности, показанной пунктиром на рис. 3. Тогда для каждого участка воздушного зазора получим

$$x_1 = \frac{1}{2} x \cdot \tan \beta, \quad S_1 = \pi \sqrt{x^2 + x_1^2} (2R - x_1);$$

$$x_2 = x \cdot \sin \beta, \quad S_2 = \pi \frac{R - r - 2x_1}{\sin \beta} (R + r);$$

$$x_3 = \frac{1}{2} x \cdot \tan \beta, \quad S_3 = \pi \sqrt{x^2 + x_3^2} (2r + x_3);$$

$$x_4 = x, \quad S_4 = \pi r^2.$$

С учетом соотношения $iW \gg Hl_{mid}$ выражение для потокосцепления запишется в виде

$$\Psi = \Phi W = \pi \mu_0 i W^2 \frac{\left[2 \sin \beta \sqrt{3 \cos^2 \beta + 1} - \tan \beta \right] x (R + r) + R^2 - r^2 \cos^2 \beta}{x \cdot \sin^2 \beta}.$$

Потери (рассеяние) механической и электрической энергий в РП можно записать в виде диссипативной функция Релея:

$$D = \frac{1}{2} (c \dot{x}^2 + R_{ob} i^2),$$

где c – коэффициент вязкого трения (демпфирования), определяемый прежде всего аэродинамическими процессами; R_{ob} – активное сопротивление обмотки ЭМ.

В качестве внешних сил Q_j , действующих на РП, будут выступать: приведенная аэродинамическая сила, зависящая от угла поворота руля, а значит, от перемещения x , и препятствующая этому перемещению – $F_{A_pr} = -F_A(x) \frac{a}{b}$; реакция опоры, т.е. воздействие со стороны стопа ЭМ на его якорь при ударе якоря о стоп:

$$F_r = \begin{cases} 0 & \text{при } x < x_{\max}, \\ k_r (|x| - x_{\max}) \operatorname{sign}(x) & \text{при } x \geq x_{\max}, \end{cases}$$

где $x_{\max}$ – заданное максимально возможное перемещение якоря; k_r – коэффициент упругости стопа, точнее – специального немагнитного материала, тонкий слой которого наклеивается (наносится) на стоп; напряжения u_j ($j=1,2$) на обмотках каждого ЭМ.

Тогда, учитывая, что нагрузка на каждый из ЭМ одинакова, но перемещают они эту нагрузку в противоположных направлениях (т.е. $x_1 = x$ и $x_2 = -x$), проведя все необходимые вычисления в соответствии с уравнением Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_g}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L_g}{\partial q_j} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_j} = Q_j,$$

получим систему уравнений, описывающих процессы, протекающие в РП:

$$m_{pr} \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + k_s x = F_r + F_{A_{pr}} - F_{em1},$$

$$m_{pr} \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} - k_s x = F_r + F_{A_{pr}} + F_{em2},$$

$$k_i \frac{di_1}{dt} + R_{ob} i_1 + k_{\dot{x}} \frac{dx}{dt} = u_1,$$

$$k_i \frac{di_2}{dt} + R_{ob} i_2 - k_{\dot{x}} \frac{dx}{dt} = u_2,$$

где $F_{emj} = \frac{1}{2} \pi \mu_0 i_j^2 W^2 \frac{r^2 \cos^2 \beta - R^2}{x^2 \cdot \sin^2 \beta}$, ($j=1,2$) – сила, развиваемая ЭМ;

$k_i = \pi \mu_0 W^2 \frac{[2 \sin \beta \sqrt{3 \cos^2 \beta + 1} - \tan \beta] x (R + r) + R^2 - r^2 \cos^2 \beta}{x \cdot \sin^2 \beta} + L$ – коэффициент, определяющий величину ЭДС в обмотке ЭМ, обусловленную изменением тока в ней;

– коэффициент, определяющий величину ЭДС в обмотке ЭМ, обусловленную скоростью движения якоря.

Результаты моделирования процессов, протекающих в РП, приведены на рис. 5. По оси ординат отложены относительные (отнесенные к максимальному значению) значения соответствующих величин.

Из результатов моделирования следует:

– электромагнитный РП является релейной системой, т.е. работающим по упорам. В момент соприкосновения якоря ЭМ с упором (немагнитной прокладкой, размещаемой на стопе) происходит удар и отскок штока, т.е. возникают биения. Биения руля (их амплитуда частота и время затухания) определяются величиной электромагнитной силы, скоростью перемещения якоря, а также материалами прокладки и якоря. Учет биений при проектировании РП необходим, так как они определяют дребезг руля, уменьшающий среднее значение угла отклонения руля при его нахождении на упоре;

– перемещение якоря «с упора на упор» сопряжено с протеканием двух процессов: первый «отлипание» якоря от первого упора – связано с нарастанием электромагнитной силы на том ЭМ, зазор которого в этот момент времени больше, чем на другом ЭМ; второй – движение руля до упора. Оба процесса обуславливают временную задержку в приводе. По результатам моделирования длительность процесса «отлипания» составляет менее 2 мс, а время переброса (движения) – 5 мс. Суммарное фазовое запаздывание на частоте функционирования (20 Гц) составит порядка 50°. Данная величина должна быть учтена в работе контура управления РП.

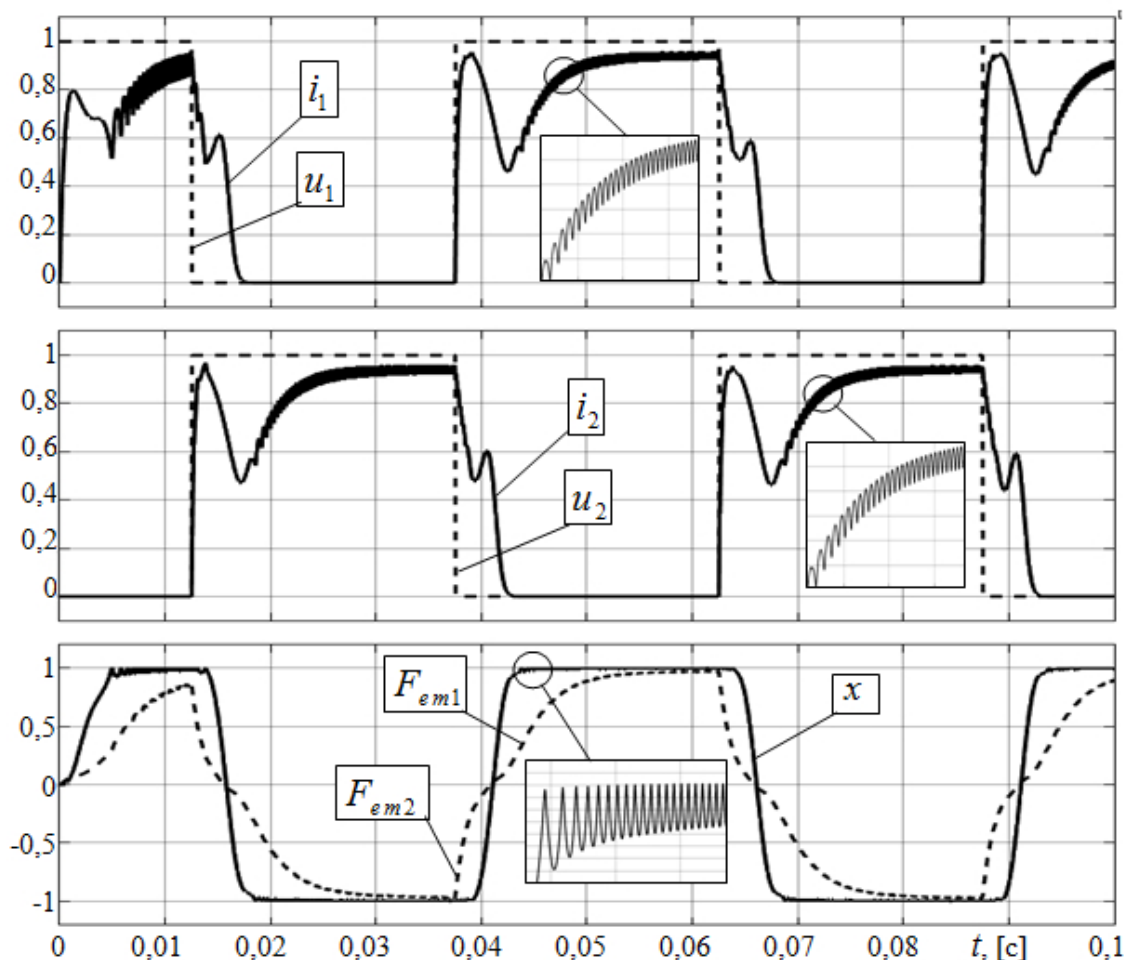


Рис. 5. Результаты моделирования процессов в РП

Таким образом, предлагаемая математическая модель процессов, протекающих в электромагнитном РП, позволяет определить его основные параметры и может быть использована на этапе эскизного проектирования.

Список литературы

1. Бушуев В. Н., Ганиев Ф. Н., Локтев Б. Е. [и др.]. Аэродинамическая компоновка и характеристики летательных аппаратов / под ред. М. Н. Ништа. М. : Машиностроение, 1991. 250 с .
2. Краснов Н. Ф. Основы прикладной аэродинамики. Т. 2. Обтекание тел вязкой жидкостью. Рулевые устройства. М. : Высш. шк., 1991. 620 с.
3. Милых А. Н., Барабанов В. А., Двойных В. В. Трехступенные электрические машины. Киев : Наукова думка, 1979. 312 с.
4. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. М. ; Л. : Энергия, 1964. 528 с.
5. Соловьев А. Э., Сухинин Б. В., Сурков В. В., Козлова Е. С. Гироскопические приводы на базе трехступенных электрических машин. Тула : Изд-во ТулГУ, 2007. 218 с.
6. Соловьев А.Э. Математические модели исполнительного двигателя с вращающимся статором // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 7, ч. 1. С. 153–162.
7. Соловьев А. Э., Теплова В. А. Особенности движения трехступенной электрической машины с радиально намагниченным ротором и дополнительными статорными обмотками // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 7, ч. 1. С. 175–183.
8. Гордон А. В., Сливинская А. Г. Электромагниты постоянного тока. М. : Госэнергоиздат, 1960. 448 с.

References

1. Bushuev V.N., Ganiev F.N., Loktev B.E. [et al.]. *Aerodinamicheskaya komponovka i kharakteristiki letatel'nykh apparatov = Aerodynamic layout and characteristics of aircraft*. Moscow: Mashinostroenie, 1991:250. (In Russ.)

2. Krasnov N.F. *Osnovy prikladnoy aerodinamiki. T. 2. Obtekanie tel vyazkoy zhidkost'yu. Rulevye ustroystva = Fundamentals of applied aerodynamics. Vol. 2. Flow of bodies with a viscous liquid. Steering devices.* Moscow: Vyssh. shk., 1991:620. (In Russ.)
3. Milyakh A.N., Barabanov V.A., Dvoynikh V.V. *Trehstepennye elektricheskie mashiny = Three-stage electric machines.* Kiev: Naukova dumka, 1979:312.
4. Uayt D., Vudson G. *Elektromekhanicheskoe preobrazovanie energii = Electromechanical energy conversion.* Moscow; Leningrad: Energiya, 1964:528. (In Russ.)
5. Solov'ev A.E., Sukhinin B.V., Surkov V.V., Kozlova E.S. *Giroskopicheskie privody na baze trekhstepennykh elektricheskikh mashin = Gyroscopic drives based on three-power electric machines.* Tula: Izd-vo TulGU, 2007:218. (In Russ.)
6. Solov'ev A.E. Mathematical models of an executive motor with a rotating stator. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = From the bulletin of Tula State University. Technical sciences.* 2016;7(pt.1):153–162. (In Russ.)
7. Solov'ev A.E., Teplova V.A. Features of the movement of a three-stage electric machine with a radially magnetized rotor and additional stator windings. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical sciences.* 2016;7(pt.1):175–183. (In Russ.)
8. Gordon A.V., Slivinskaya A.G. *Elektromagnitny postoyannogo toka = DC electromagnets.* Moscow: Gosenergoizdat, 1960:448. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Эдуардович Соловьев

доктор технических наук, доцент,
заместитель директора института,
заведующий кафедрой электротехники
и электрооборудования,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92)
E-mail: ivts.tulgu@rambler.ru

Aleksandr E. Solov'ev

Doctor of technical sciences, associate professor,
deputy director of the institute,
head of the sub-department of electrical engineering
and electrical equipment,
Tula State University
(92 Lenina avenue, Tula, Russia)

Александр Викторович Новаков

аспирант,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92)
E-mail: sanyatorpor87@gmail.com

Aleksandr V. Novakov

Postgraduate student,
Tula State University
(92 Lenina avenue, Tula, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 09.02.2022

Поступила после рецензирования / Revised 11.03.2022

Принята к публикации / Accepted 15.04.2022