

УДК 681.2.084

doi:10.21685/2072-3059-2021-2-7

Измерительная система линейных перемещений на базе электромагнитного фазовращателя

О. К. Абдирашев

Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Нур-Султан, Республика Казахстан

omeke_92@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В основу принципа действия автоматизированных систем управления и контроля положено широкое использование устройств измерения угловых и линейных перемещений. При этом основным требованием, предъявляемым к этим устройствам, является высокая надежность, безопасность и свойства выходного сигнала, удобные для дальнейшего использования. Как правило, выходной сигнал устройств измерения параметров линейных и угловых перемещений должен на современном уровне развития быть в цифровой форме. При этом актуальной задачей является обеспечение высокой точности перемещений в измерительных преобразователях и преобразование исходной величины в электрический сигнал. Именно электрическая форма выходного сигнала первичного измерительного преобразователя наиболее удобна для дальнейшей обработки и использования в последующих каскадах робототехнических систем и комплексов. Целью работы является разработка измерительных преобразователей на основе электромагнитных фазовращателей угловых перемещений на базе неоднородного магнитопровода с распределенными параметрами. *Материалы и методы.* Исследованы процессы, протекающие при работе электромагнитного преобразователя с неоднородным магнитопроводом с распределенными параметрами, реализующего функции линейного фазовращателя. *Результаты.* Разработана методика и математическая модель. Методика позволяет вычислить абсолютную погрешность от воздействия какого-либо фактора. Результирующая дисперсия от действия всех факторов будет зависеть не только от дисперсии каждого фактора, но будет являться результатом взаимодействия этих факторов. С помощью математической модели проведены исследования разработанной измерительной системы с целью получения разложения абсолютных погрешностей системы на составляющие по осям многомерного пространства. *Выводы.* Полученные результаты исследований заключаются в использовании методики проектирования измерительных систем линейных перемещений для получения допусков на изготовление отдельных элементов электромагнитной системы и формировании требований к характеристикам блоков измерительной системы на основе полученной математической модели.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, электромагнитный фазовращатель, неоднородный магнитопровод, распределенные параметры

Для цитирования: Абдирашев О. К. Измерительная система линейных перемещений на базе электромагнитного фазовращателя // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 77–86. doi:10.21685/2072-3059-2021-2-7

Linear displacement measuring system based on electromagnetic phase shifter

© Абдирашев О. К., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

O.K. Abdirashev

Eurasian National University named after L.N. Gumilyov,
Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan

omeke_92@mail.ru

Abstract. *Background.* The principle of automated control and monitoring systems' operation is based on the widespread use of devices for measuring angular and linear displacement. At the same time, the main requirement for these devices is high reliability, safety and properties of the output signal, convenient for further use. As a rule, the output signal of devices for measuring the parameters of linear and angular displacements should be in digital form at the present level of development. At the same time, the urgent task is to ensure high accuracy of movements in the measuring transducers and the conversion of the initial value into an electrical signal. Electrical form of the output signal of the primary measuring transducer is most convenient for further processing and use in subsequent stages of robotic systems and complexes. The purpose of the work is to develop measuring transducers based on electromagnetic phase shifters of angular displacements based on a non-uniform magnetic circuit with distributed parameters. *Materials and methods.* Research of the processes occurring during the operation of an electromagnetic converter with a non-uniform magnetic circuit with distributed parameters, which implements the functions of a linear phase shifter. *Results.* A methodology and mathematical model have been developed. The technique allows you to calculate the absolute error from the influence of any factor. The resulting variance from the action of all factors will depend not only on the variance of each factor, but will be the result of the interaction of these factors. With the help of a mathematical model, studies of the developed measuring system were carried out in order to obtain a decomposition of the absolute errors of the system into components along the axes of a multi-dimensional space. *Conclusions.* The obtained research results consist in the use of the methodology for the design of measuring systems of linear displacements to obtain tolerances for the manufacture of individual elements of the electromagnetic system and the formation of requirements for the characteristics of the measuring system blocks based on the obtained mathematical model.

Keywords: measuring transducer, electromagnetic phase shifter, inhomogeneous magnetic circuit, distributed parameters

For citation: Abdirashev O.K. Linear displacement measuring system based on electromagnetic phase shifter. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;2:77–86. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-2-7

Введение

Для разработки измерительных преобразователей параметров механических перемещений в электрические сигналы используются различные физические явления, среди которых самым распространенным является использование взаимного влияния обмоток через переменное электромагнитное поле. Такие измерительные преобразователи получили название электромагнитных преобразователей. Измерительные электромагнитные преобразователи параметров механических перемещений в основном используют эффект изменения взаимной электромагнитной связи при взаимном механическом смещении обмоток [1]. В качестве информационного признака выходного электрического сигнала в этом случае может быть использована амплитуда выходного сигнала, его частота или изменение начальной фазы выходного напряжения.

Наибольшее распространение получили электромагнитные измерительные преобразователи угловых перемещений. Это так называемые поворотные трансформаторы. Принцип действия поворотных трансформаторов основан на использовании изменения взаимной индуктивной связи между обмотками, расположенными на статоре и на роторе [2]. В качестве информационного признака выходного сигнала используется изменение начальной фазы выходного напряжения обмоток ротора. Измерительные поворотные трансформаторы, в качестве информационного признака выходного сигнала которых используется изменение начальной фазы выходного напряжения, получили название «электромагнитные фазовращатели» (ЭМФ).

Конструкция измерительного фазовращателя на базе неоднородного магнитопровода с распределенными параметрами

Существующие электромагнитные измерительные преобразователи, сконструированные на основе электромагнитной системы с неоднородным магнитопроводом с распределенными параметрами, не обладают устойчивостью к вибрационным воздействиям [3]. Для достижения нужных технических характеристик была разработана конструкция электромагнитного преобразователя с неоднородным магнитопроводом с распределенными параметрами, реализующего функции линейного фазовращателя.

Под электромагнитной системой с распределенными параметрами понимается совокупность магнитопровода и обмоток, электромагнитные характеристики которых зависят от распределения параметров этих элементов в пространстве.

Автором разработана конструкция электромагнитного фазовращателя линейных перемещений на базе электромагнитной системы с неоднородным магнитопроводом с распределенными параметрами. Конструкция электромагнитного преобразователя линейных перемещений представлена на рис. 1.

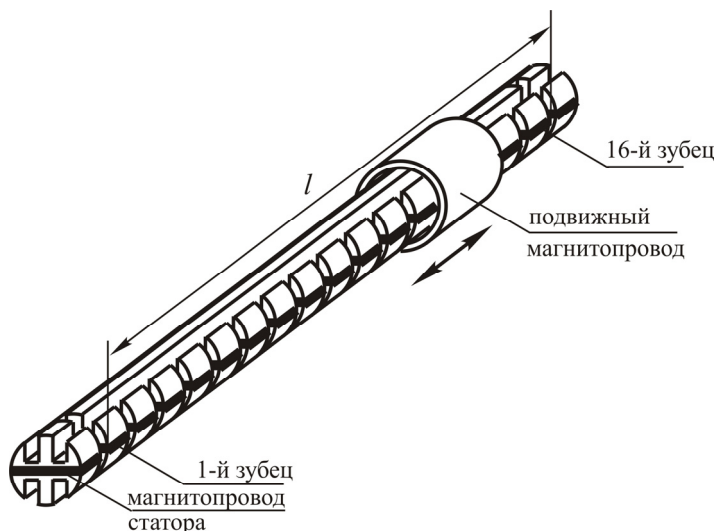


Рис. 1. Конструкция электромагнитного фазовращателя

Информационная линейка датчика имеет цилиндрическую форму и состоит из трех частей. Верхний и нижний каркасы представляют собой разре-

занный по продольной оси цилиндр, изготовленный из немагнитного материала, с пазами для размещения обмотки. Между ними располагается магнитопровод статора, который состоит из нескольких пластин электротехнической стали.

Информационная линейка помещена во внутреннюю полость сплошного кольца из ферромагнитного материала – подвижного магнитопровода. Подвижный магнитопровод перемещается по поверхности неподвижной информационной линейки. Форма магнитопровода статора представлена на рис. 2



Рис. 2. Информационная линейка

В верхний и нижний пазы каркаса фазовращателя слева уложена обмотка, количество витков которой W_p одинаково по всей длине информационной линейки. Эта обмотка получила название «равномерная». В правые пазы статора уложены «синусная» и «косинусная» обмотки.

Число витков «синусной» обмотки в зависимости от номера участка или зубца статора определяется по следующей формуле:

$$W_{sk} = W_m \sin\left(\frac{2\pi}{n}(k - 0,5)\right),$$

где W_{sk} – количество витков синусной обмотки на участке k ; n – количество активных участков информационной линейки; W_m – максимальное количество витков обмотки, которое зависит от размеров паза и диаметра провода; k – номер участка.

Аналогичным образом определяется число витков «косинусной» обмотки в зависимости от номера участка или зубца статора:

$$W_{ck} = W_m \sin\left(\frac{2\pi}{n}(k - 0,5)\right),$$

где W_{ck} – количество витков косинусной обмотки на участке k .

Ранее уже рассматривалась конструкция электромагнитной системы с неоднородным магнитопроводом с распределенными параметрами. Принцип действия фазовращателя основан на изменении электромагнитного взаимодействия обмоток при изменении положения элемента, вносящего неоднородность удельного магнитного сопротивления распределенного магнитопровода. В качестве элемента, вносящего неоднородность, используется кольцевой магнитопровод.

Измерительная система линейных перемещений на базе электромагнитного фазовращателя

Как и классический фазовращатель, рассматриваемый электромагнитный преобразователь может работать в двух режимах. В первом случае для питания обмоток преобразователя необходим источник двухфазного переменного тока, выходные токи которого равны по величине и сдвинуты по фазе на 90° . Токи источника осуществляют в этом случае питание синусной и

косинусной обмоток. В электромагнитном преобразователе образуется бегущее магнитное поле. На зажимах равномерно распределенной обмотки получим напряжение с постоянной амплитудой и начальной фазой, изменяющейся пропорционально расстоянию от начала информационной линейки до середины подвижного магнитопровода. Однако разработка двухфазного источника тока с высокостабильными характеристиками довольно сложна, поэтому для питания измерительного преобразователя используется обычный источник переменного напряжения. Такой режим работы измерительного преобразователя называют однофазным режимом.

В однофазном режиме работы измерительного преобразователя магнитное поле датчика является пульсирующим. Пульсирующее магнитное поле наведет в синусной и косинусной обмотках электродвижущие силы с амплитудами, зависящими от положения подвижного магнитопровода на информационной линейке. Структурная схема измерительной системы линейных перемещений с электромагнитным преобразователем, работающим в однофазном режиме, представлена на рис. 3.

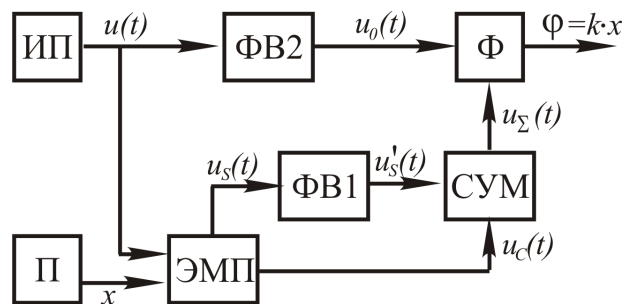


Рис. 3. Структурная схема измерительной системы линейных перемещений с электромагнитным преобразователем

Измерительная система состоит из источника питания ИП, электромагнитного измерительного преобразователя ЭМП, электронного фазовращателя ФВ1, сумматора двух напряжений СУМ, электронного фазовращателя опорного напряжения ФВ2 и фазометра. Положение подвижного магнитопровода на информационной линейке представлено блоком П.

Методы разработки измерительной системы, обладающей заданными метрологическими характеристиками

Один из возможных методов разработки для формирования требований к свойствам каждого элемента измерительной системы, обладающей заданными метрологическими характеристиками, заключается в анализе статистических данных [4], полученных путем изучения свойств элементов готовых изделий. Для статистического анализа необходимо иметь большое количество готовых изделий. Это требует больших материальных затрат.

Второй возможный путь получения рекомендаций по проектированию измерительных систем линейных перемещений лежит в анализе функции преобразования. Однако функция преобразования не учитывает влияние ряда факторов на погрешность измерительной системы. Это обусловлено тем, что функция преобразования получена путем теоретического анализа измери-

тельной системы с идеализированным электромагнитным преобразователем, в котором не учитывается дискретное распределение магнитных свойств измерительной линейки, дискретное распределение числа витков обмотки и других влияющих факторов.

Лучшее решение поставленной задачи заключается в использовании компьютерной математической модели для полного анализа метрологических характеристик системы. Использование компьютерной модели позволяет провести исследование метрологических свойств системы как при воздействии на нее отдельных факторов, так при одновременном воздействии на нее совокупности факторов. Компьютерная модель составлена не по формулам, полученным теоретическим путем идеализации конструкции электромагнитного преобразователя и характеристик других блоков устройства. Компьютерное моделирование дает возможность учесть воздействие на характеристику измерительной системы абсолютного большинства факторов.

Результаты исследования измерительной системы, представленные ранее, показали, что в большинстве случаев абсолютные погрешности однофакторных воздействий изменяются в функции измеряемого перемещения по периодическому закону. Воздействие некоторых факторов приводит к появлению абсолютных погрешностей, изменяющихся по линейному закону в функции перемещения. Окно значений погрешности ограничено значениями перемещений от нуля до предела измерений. В этом случае и линейное изменение погрешности в функции измеряемого перемещения можно рассматривать как периодический закон с периодом, равным пределу измерения. Это обстоятельство положено в основу последующих исследований.

Цель последующих исследований заключается в использовании методики проектирования измерительных систем линейных перемещений для получения допусков на изготовление отдельных элементов электромагнитной системы и формировании требований к характеристикам блоков измерительной системы. Речь идет о требованиях к точности изготовления информационной линейки, о выборе максимального расчетного количества витков обмоток, о точности изготовления подвижного магнитопровода. Важной стороной проектирования является формирование требований к характеристикам отдельных блоков измерительной системы. К ним относятся неравенство максимальных значений напряжений синусной и косинусной обмотках на входе сумматора, погрешность фазовращателя, стабильность частоты генератора измерительной системы и отсутствие балансировки электрических параметров цепей синусной и косинусной обмоток.

Многомерное пространство и взаимодействие факторов

Из курса математики известно, что система функций, состоящая из бесконечного числа членов следующего вида:

$$\frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}}, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \cos x, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \sin(x), \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \cos(2 \cdot x),$$

$$\frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \sin(2 \cdot x), \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \cos(3 \cdot x), \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \sin(3 \cdot x), \dots,$$

является полной ортонормированной системой. Отсюда следует, что при приближении функции тригонометрическим многочленом

$$s_n(x) = \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{k=1}^n (\alpha_k \cdot \cos(k \cdot x) + \beta_k \cdot \sin(k \cdot x))$$

среднеквадратичная погрешность $\delta^2 = \int_{-\pi}^{\pi} (f(x) - s_n(x))^2 \cdot dx$ минимальна

тогда и только тогда, когда в качестве α_k и β_k выбраны так называемые коэффициенты Фурье, которые определяются следующим образом:

$$\alpha_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} (f(x) \cdot \cos(kx)) \cdot dx \quad \text{и} \quad \beta_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} (f(x) \cdot \sin(kx)) \cdot dx,$$

где $k = 1, 2, 3, 4, \dots$

Эту ортонормированную систему предлагается использовать для анализа систематической погрешности измерительной системы. В общем случае разложение функции в ряд Фурье записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} f(x) = & A_0 + A'_{1m} \cos(kx) + A''_{1m} \sin(kx) + A'_{2m} \cos(2kx) + \\ & + A''_{2m} \sin(2kx) + A'_{3m} \cos(3kx) + A''_{3m} \sin(3kx) + A'_{4m} \cos(4kx) + \\ & + A''_{4m} \sin(4kx) + A'_{5m} \cos(5kx) + A''_{5m} \sin(5kx) + \dots \end{aligned}$$

Обозначим: $A_1 = \frac{A'_{1m}}{\sqrt{2}}$ – действующее значение косинусной составляющей основной гармоники функции; $A_2 = \frac{A''_{1m}}{\sqrt{2}}$ – действующее значение синусной составляющей основной гармоники функции; $A_3 = \frac{A'_{2m}}{\sqrt{2}}$ – действующее значение косинусной составляющей второй гармоники функции; $A_4 = \frac{A''_{2m}}{\sqrt{2}}$ – действующее значение синусной составляющей второй гармоники функции; $A_5 = \frac{A'_{3m}}{\sqrt{2}}$ – действующее значение косинусной составляющей третьей гармоники функции; $A_6 = \frac{A''_{3m}}{\sqrt{2}}$ – действующее значение синусной составляющей третьей гармоники функции и т.д.

Квадрат действующего значения функции равен сумме квадратов действующих значений слагаемых, поэтому

$$A^2 = A_0^2 + A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + A_5^2 + A_6^2 + A_7^2 + A_8^2 + \dots$$

При определении погрешности измерений используют среднеквадратическое отклонение значений от прямой линии, уравнение которой записывается следующим образом:

$$y(x) = cx + d,$$

где c – постоянная величина, определяющая угол наклона прямой к оси x ; d – аддитивная составляющая погрешности.

Следовательно, дисперсия функции определяется полностью только составляющими $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, \dots$ или

$$D = A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + A_5^2 + A_6^2 + A_7^2 + A_8^2 + \dots$$

Составляющие $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, \dots$ можно считать координатами по осям многомерного пространства с номерами $1, 2, 3, \dots, n$.

Таким образом, абсолютную погрешность, которая является результатом воздействия какого-либо фактора, предлагается разложить по осям многомерного пространства. Результирующая дисперсия от действия всех факторов будет зависеть не только от дисперсии каждого фактора, но будет являться результатом взаимодействия этих факторов.

Таким образом, для анализа погрешности достаточно получить коэффициенты Фурье.

С помощью математической модели проведены исследования разработанной измерительной системы с целью получения разложения абсолютных погрешностей системы на составляющие по осям многомерного пространства. По вертикальной оси откладываются амплитуды составляющих, по горизонтальной оси представлены номера осей синусной или косинусной составляющей.

На рис. 4 и 5 представлены координаты разложения абсолютной погрешности, обусловленной неравенством максимальных напряжений на входе сумматора. Условно такая погрешность называется амплитудной погрешностью. Общее количество осей выбрано равным 160: 80 осей для синусных составляющих разложения с целью получения коэффициентов Фурье и 80 осей для косинусных составляющих.

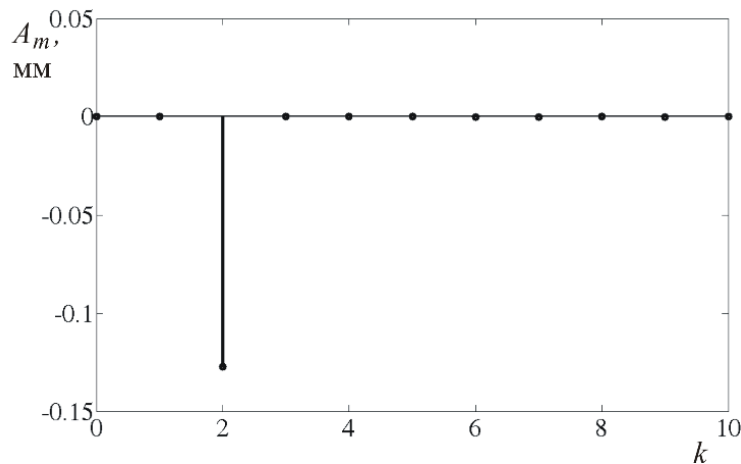


Рис. 4. Координаты разложения абсолютной погрешности

Из рис. 4 и 5 следует, что синусная составляющая имеет амплитуду, не равную нулю только по второй оси. Косинусная составляющая указывает на то, что амплитудная погрешность имеет постоянную составляющую величиной 0,01 мм.

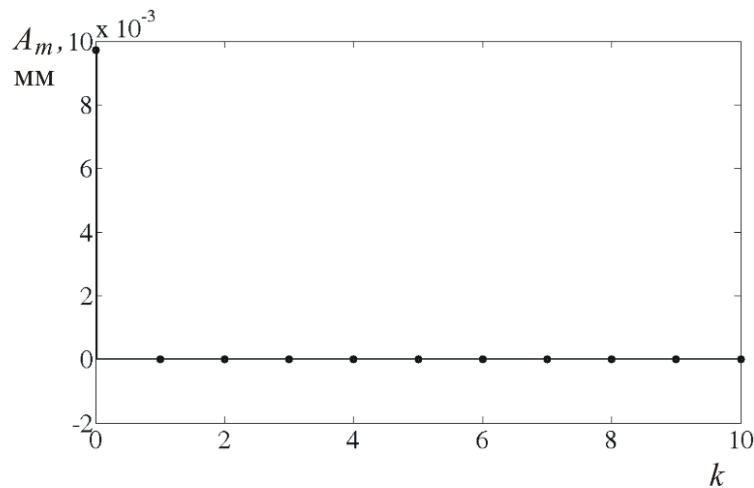


Рис. 5. Координаты разложения абсолютной погрешности

Погрешность измерительной системы зависит и от характеристик генератора. Одним из его параметров является стабильность частоты. Изменение частоты приводит к изменению сопротивлений частотозависимых элементов. К таким элементам относится электромагнитный преобразователь и фазовращатели.

Список литературы

1. Добровольский И. Г. Анализ точности измерений значений информационно-измерительных систем // Контроль. Диагностика. 2002. № 5. С. 41–44.
2. Горячев В. Я., Шатова Ю. А. Основы теории и способы анализа распределенных магнитных линий с плоскопараллельным бегущим магнитным полем // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : материалы Междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2007. С. 79–82.
3. Зарипов М. Ф. Индуктивные преобразователи больших линейных перемещений с распределенными параметрами магнитных цепей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1963.
4. Горячев В. Я. Физические основы возникновения погрешностей датчиков с бегущим магнитным полем // Актуальные проблемы науки и образования : тр. Междунар. юбилейного симпозиума. Пенза, 2003. Т. 2. С. 238–240.

References

1. Dobrovolskiy I.G. Analysis of the measurement accuracy of the values of information-measuring systems. *Kontrol'. Diagnostika = Control. Diagnostics*. 2002;5:41–44. (In Russ.)
2. Goryachev V.Ya., Shatova Yu.A. Analysis' fundamentals of the theory and methods of distributed magnetic lines with a plane-parallel traveling magnetic field. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Automation and control issues in technical systems: proceedings of International scientific and engineering conference*. Penza, 2007:79–82. (In Russ.)
3. Zaripov M.F. *Induktivnye preobrazovateli bol'shikh lineynykh peremeshcheniy s raspredelennymi parametrami magnitnykh tsepey: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk = Inductive transducers of large linear displacements with distributed parameters of magnetic circuits: author's abstract of dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences*. Moscow, 1963. (In Russ.)

4. Goryachev V.Ya. Physical foundations of errors of sensors with a traveling magnetic field. *Aktual'nye problemy nauki i obrazovaniya: tr. Mezhdunar. yubileynogo simpoziuma = Actual issues of science and education: proceedings of International anniversary symposium*. Penza, 2003;2:238–240. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Омирзак Коптилеулы Абдирашев

старший преподаватель кафедры
космической техники и технологий,
Евразийский национальный
университет имени Л. Н. Гумилева
(Республика Казахстан, г. Нур-Султан,
ул. Сатпаева, 2)

E-mail: omeke_92@mail.ru

Omirezak K. Abdirashev

Senior lecturer of the sub-department
of space engineering and technology,
Eurasian National University named
after L. N. Gumilyov (2 Satpaeva street,
Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan)

Поступила в редакцию / Received 26.04.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 10.05.2021

Принята к публикации / Accepted 25.05.2021