

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК: 658.52011

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-4-27-33

Оригинальная статья / Original Paper

**Частотное разделение сигнала датчика
по контролируемым и мешающим параметрам**

Т.Г. Гасанов, Э.З. Батманов, М.Р. Гусейнов

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является возможность получения импеданса по контролируемому и мешающему параметрам на примере конденсаторного датчика. **Метод.** Исследование основано на определении аналитической связи между изменением импеданса датчика и частотой тока, в которой возбуждается емкость конденсатора. **Результат.** Определив сопротивление отдельных элементов цепи можно найти импеданс эквивалентной схемы на любой фиксированной частоте. Получено уравнение импеданса датчика, отражающее зависимость выходного сигнала от изменения, как контролируемой влажности, так и мешающего параметра – диэлектрической проницаемости нефти на любой частоте в исследуемом диапазоне. Доказано существование частотного параметра разделения информации, содержащейся в выходном сигнале измерительной схемы. **Вывод.** При возможности параметрического разделения сигнала в выходную величину датчика можно автоматически вводить коррекцию на изменение диэлектрической проницаемости «сухой» нефти, и осуществлять непрерывное измерение контролируемой влажности.

Ключевые слова: датчик, пластина, нефть, емкость конденсатора, многопараметровый принцип, влагомер, чувствительность

Для цитирования: Т. Г. Гасанов, Э. З. Батманов, М. Р. Гусейнов. Частотное разделение сигнала датчика по контролируемым и мешающим параметрам. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (4): 27-33. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-27-33

Frequency division sensor signal by controlled and interfering parameters

T.G. Hasanov, E.Z. Batmanov, M.R. Guseinov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is the possibility of obtaining the impedance of the controlled and interfering parameters using the example of a capacitor sensor. **Method.** The study is based on the determination of the analytical relationship between the change in the impedance of the sensor and the frequency of the current in which the capacitance of the capacitor is excited. **Result.** Having determined the resistance of individual circuit elements, you can find the impedance of the equivalent circuit at any fixed frequency. An equation for the impedance of the sensor is obtained, reflecting the dependence of the output signal on the change in both the controlled humidity and the interfering parameter - the dielectric constant of oil at any frequency in the studied range. The existence of the frequency parameter for the separation of information contained in the output signal of the measuring circuit has been proved. **Conclusion.** If the parametric separation of the signal is possible, the output value of the sensor can be automatically corrected for the change in the dielectric constant of the "dry" oil, and continuous measurement of the controlled moisture can be carried out.

Keywords: sensor, plate, oil, capacitor capacity, multi-parameter principle, moisture meter, sensitivity

For citation: T.G. Hasanov, E.Z. Batmanov, M.R. Guseinov. Frequency division sensor signal by controlled and interfering parameters. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2021; 48 (4): 27-33. DOI: 10.21822 / 2073-6185-2021-48-4-27-33

Введение. В последние годы быстро совершенствуются и внедряются в производство приборы автоматического контроля состава и структуры материалов, основанные на многопараметровом принципе. Сущность этого принципа заключается в непрерывном измерении одного или нескольких параметров материала в условиях их изменения, путем электрической отстройки от влияния других переменных параметров, повышающих погрешность контроля, в связи с чем, эффективность применения и широкого использования многопараметровых приборов заметно повышается [1-12]. При оптимальном регулировании автоматическое устройство не только поддерживает заданное значение регулируемой величины, но и одновременно определяет каким оно должно быть, чтобы регулируемый процесс протекал, как наилучший (оптимальный) для обеспечения данного технологического процесса. К примеру, в Ростовской государственной академии сельскохозяйственного машиностроения ранее проводились работы по созданию двухчастотного влагомера нефти [1-12].

Постановка задачи. Учитывая, что теоретическое исследование данного вопроса представляет научный интерес не только во влагометрии, но и в других отраслях знаний, занимающихся контролем состава диэлектрических жидкостей, в работе приведена возможность частотного исследования.

Методы исследования. Известно, что большой практический интерес представляет аналитическая связь между изменением импеданса датчика и частотой тока, в которой возбуждается емкость конденсатора с исследуемым образцом обводненной нефти.

Зависимость между электропроводимостью материала и его влажностью может быть представлена формулой (1)

$$\lg R = a - \epsilon w \quad (1)$$

где R – активное сопротивление пары измерительных электродов, между которыми находится проба вещества; a и ϵ – постоянные, зависящие от измерительного устройства, условий измерения и свойств исследуемого материала; w – влажность образца.

Для практических целей формула (1) неудобна, так как требует предварительного определения величин « a » и « ϵ ».

Приведем выполненный анализ импеданса датчика, который отличается наглядностью расчета. Как известно из курса электротехники, электрическая емкость плоского конденсатора выражается формулой:

$$C = 0,089 \frac{\epsilon S}{\delta} \quad (2)$$

C – электрическая емкость, ϕ ; S – площадь взаимного перекрытия пластин конденсатора, см^2 ; ϵ – диэлектрическая проницаемость среды (относительная); δ – расстояние между пластинами, см .

В наиболее распространенных типах емкостных датчиков используется зависимость электрической емкости от расстояния между пластинами.

На рис.1 приведена схема емкостного датчика перемещения (а) и его характеристика (б), представляющая собой зависимость емкости датчика от расстояния между пластинами. В схеме с емкостным датчиком происходит преобразование перемещения подвижной части датчика, осуществляющего под действием силы P , в электрическую выходную величину (частоту, ток, напряжение), зависящую от входной величины.

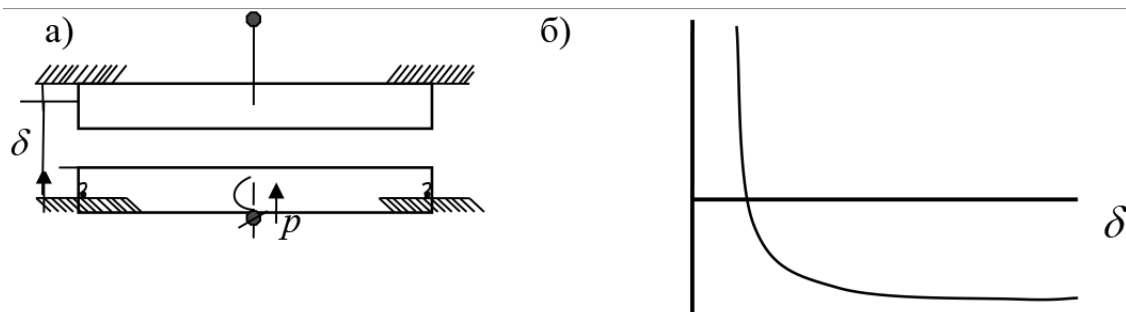


Рис.1. Емкостный датчик перемещения с переменным зазором:

а) схема датчика; б) характеристика датчика

Fig.1. Variable gap capacitive displacement sensor:

а) sensor circuit; б) sensor characteristic

На рис. 2 приведена схема использования емкостного датчика, изображенного на рис. 1. Здесь при перемещении пластины датчика изменяется его емкость, ток, проходящий через него, а, следовательно, меняется и напряжение U_n нагрузки R_n (это напряжение U_n является выходной величиной). Такая схема зависит от напряжения и частоты источника питания или усилителя.

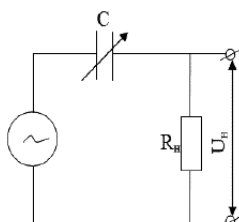


Рис. 2. Электрическая схема включения емкостного датчика перемещения

Fig. 2. Wiring diagram for connecting a capacitive displacement sensor

Устанавливая исследуемый образец между пластинами, мы переводим его как бы в состояние емкостного дифференциального датчика (рис. 3), обладающего большой чувствительностью. Дифференциальный датчик конструктивно представляет собой конденсатор с подвижной средней пластиной.

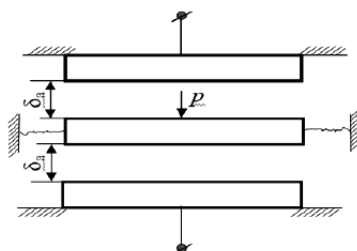


Рис. 3. Схема емкостного дифференциального датчика перемещения с переменным зазором

Fig. 3. Schematic of a capacitive differential displacement transducer with variable gap

Чувствительность такого датчика удваивается, так как при перемещении средней пластины под действием некоторой силы P емкость одной половины датчика возрастает, а емкость другой половины падает.

Емкостные датчики обладают большой величиной реактивного сопротивления. Действительно, емкость датчика составляет в среднем 10-100 пф ($1 \text{ нф} = 10^{-12} \text{ ф}$).

Реактивное сопротивление такого датчика (для $C=100$ пф при частоте $f=50$ Гц).

$$x_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = \frac{10^{12}}{3,14 \cdot 10^4} = 30 \cdot 10^6 \text{ ом}$$

Емкостные датчики включаются в мостовую схему, или резонансную схему с усилителями. Достоинствами емкостных датчиков является потребность очень малых усилий для перемещения подвижной части (ротора) емкостного датчика, высокая чувствительность, относительно малые габариты и вес, а также малая величина сил притяжения между пластинами.

Обсуждение результатов. Основные области применения емкостных датчиков: преобразование в электрический параметр быстро меняющихся величин – давлений, вибраций, ускорений, измерение перемещений, размеров деталей [10-20]. Предположим, что в измерительный конденсаторный датчик загружена исследуемая проба обводненной нефти с известным процентным содержанием воды. Надо образно всю воду, равномерно распределенную в нефти по всему объему конденсатора, собрать к одной обкладке. Это будет равносильно сближению обкладок конденсатора и росту его емкости. Такой метод расчета ε показывает хорошее совпадение значений диэлектрической проницаемости полученных аналитически с экспериментальными значениями.

Таким образом, использование зависимости вида $Z=f(c)$ оказывается более удобным при расчете импеданса датчика, чем зависимость $Z=f(\varepsilon)$, при которой диэлектрическая проницаемость рассматриваемой дисперсной системы пришлось бы представлять в виде суммы двух составляющих, чтобы не терялась физика явления.

При этом, зная толщину выделенной воды W и толщину слоя «обезвоженной нефти» $1-W$, можно построить эквивалентную электрическую схему датчика, которую при высоких частотах можно представить в виде зависимости со следующими показателями, где R – активное сопротивление слоя воды, Ом; x_{c1} – реактивное сопротивление воды, Ом; x_{c2} – реактивное сопротивление слоя нефти, Ом.

Активное сопротивление толщины воды в датчике можно вычислить по формуле:

$$R = \rho \frac{Wl}{S} \quad (3)$$

где ρ – удельное сопротивление воды, в ом/см; W – влажность нефти, в %; l – расстояние между обкладками конденсатора, см.; S – площадь обкладки конденсатора, см².

Емкость измерительного конденсатора, когда между его обкладками расположена вода, выражается формулой:

$$C_1 = 0,089 \frac{\varepsilon_1 \delta}{Wl} \quad (4)$$

где ε_1 – диэлектрическая проницаемость воды; C_1 – емкость конденсатора, пф.

Определив емкость измерительного конденсатора, нетрудно найти его реактивное сопротивление, которое можно представить в виде:

$$x_{c1} = \frac{Wl}{0,176nf\varepsilon_1\delta} \quad (5)$$

где f – частота входного сигнала, Гц.

Аналогичным же образом можно написать выражения емкости и реактивного сопротивления для случая, когда между обкладками конденсатора расположена «сухая» нефть:

$$C_2 = 0,089 \frac{\varepsilon_2 \delta}{(1-W)l} \quad (6)$$

где ε_2 – диэлектрическая проницаемость нефти.

$$x_{c2} = \frac{(1-W)l}{0,176nf\varepsilon_2\delta} \quad (7)$$

Таким образом, определив сопротивление отдельных элементов цепи по известным формулам электротехники, можно найти импеданс эквивалентной схемы на любой фиксированной частоте

$$Z = \sqrt{\frac{\rho^2 W^2 l^2}{S^2} + \frac{l^2}{0,176^2 n^2 f^2 S^2} \left(\frac{W}{\varepsilon_1} - \frac{(1-W)}{\varepsilon_2} \right)^2} \quad (8)$$

Учитывая общеизвестную линейную зависимость между плотностью нефти и ее диэлектрической проницаемостью, в уравнении (8) эти величины взаимно заменены, т.е. вместо плотности нефти написана ее диэлектрическая проницаемость.

Как видно из последнего уравнения, импеданс датчика с обводненной нефтью является сложной функцией, зависящей не только от частоты подаваемого на вход датчика сигнала, но так же и от параметров внутреннего порядка: влагосодержания и диэлектрической проницаемости. На основании уравнения (8) построены характеристики импеданса датчика на частотах (0,5-16 МГц). Представленные характеристики наглядно иллюстрируют зависимость импеданса датчика, как от частоты сигнала, так и от влажности нефти. В уравнении (8) параметрами состояния, подлежащим частотному разделению, являются обводненность нефти W_1 , которую в дальнейшем будем называть контролируемым параметром и ее диэлектрическая проницаемость ϵ , которую будем называть мешающим параметром.

Для выяснения существования частотного разделения сигнала датчика по контролируемому и мешающему параметрам определим частные производные частотных характеристик импеданса по переменным параметрам материала.

Упростим выражение импеданса, обозначив через

$$\mu = \frac{\rho^2 l^2}{S^2} \quad (9)$$

$$\text{и } Z = \frac{l^2}{0,176^2 n^2 f^2 S^2}$$

Тогда уравнение (8) принимает вид

$$Z = \sqrt{\mu W^2 + Z \left(\frac{W}{\epsilon_1} - \frac{(1-W)}{\epsilon_2} \right)^2} \quad (10)$$

Определим частные производные частотных характеристик импеданса датчика, назовем их передаточными коэффициентами и обозначим через a_i и ϵ_i

$$a_i = \frac{\partial Z}{\partial W} = \frac{\mu W + Z \left(\frac{W}{\epsilon_1} - \frac{(1-W)}{\epsilon_2} \right) \left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \right)}{\sqrt{\mu W^2 + Z \left(\frac{W}{\epsilon_1} - \frac{(1-W)}{\epsilon_2} \right)^2}} \text{ при } f = f_i \text{ и } \epsilon_2 = \text{const} \quad (11)$$

$$\epsilon_i = \frac{\partial Z}{\partial \epsilon_2} = \frac{Z \left(\frac{W}{\epsilon_1} - \frac{(1-W)}{\epsilon_2} \right) \frac{(1-W)}{\epsilon_2^2}}{\sqrt{\mu W^2 + Z \left(\frac{W}{\epsilon_1} - \frac{(1-W)}{\epsilon_2} \right)^2}} \text{ при } f = f_i \text{ и } W = \text{const} \quad (12)$$

Эти коэффициенты являются показателями чувствительности выходного сигнала к изменению состояния переменных параметров W и ϵ_2 .

Коэффициенты передачи зависят от частоты входного сигнала датчика. Большая величина передаточного коэффициента говорит о большом влиянии данного параметра на выходной сигнал датчика, а меньшая величина – о малом влиянии.

Вычисляя на всем исследуемом диапазоне частот значения передаточных коэффициентов можно получить их частотные характеристики. При этом необходимым и обязательным условием возможности частотного разделения сигнала по переменным компонентам материала является отсутствие пропорциональности передаточных коэффициентов на одноименных частотах. Иначе говоря, при увеличении частоты сигнала от 0 до бесконечности законы изменения передаточных коэффициентов должны быть не едины.

$$\text{При } f \rightarrow 0, a_i \rightarrow \sqrt{\mu}, \epsilon_i \rightarrow 0 \quad (13)$$

Эти выражения доказывают, что сигнал датчика с обводненной нефтью может быть разделен по влажности и по диэлектрической проницаемости «сухой» нефти частотным способом. Наряду с изложенным, определение возможности существования параметрического разделения

сигнала можно производить и другим способом. Для этого необходимо разделить значения передаточных коэффициентов на одноименных частотах. Если полученное при этом выражение зависит от частоты, то это является достаточным свидетельством возможности разделения сигнала по переменным компонентам материала.

$$\frac{a_i}{\varepsilon_i} = \frac{\mu W}{Z \left(\frac{W}{\varepsilon_1} - \frac{(1-W)}{\varepsilon_2} \right) \frac{(1-W)}{\varepsilon_2^2}} + \frac{\varepsilon_2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{\varepsilon_1(1-W)} \text{ при } f = f_i \quad (14)$$

Таким образом, зависимость последнего выражения от частоты сигнала очевидна, так как является функцией частоты.

Вывод. На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Получено уравнение импеданса датчика, отражающее зависимость выходного сигнала от изменения, как контролируемой влажности, так и мешающего параметра – диэлектрической проницаемости нефти на любой частоте в исследуемом диапазоне.

2. Доказано существование частотного параметра разделения информации, содержащейся в выходном сигнале измерительной схемы, исходя из аналитических частотных характеристик.

3. Если при производстве автоматического контроля влагосодержания нефти диэлектрическим способом большое время тратится на то, чтобы настроить прибор на новую партию нефти, то на основании полученных результатов данной работы можно считать, что при возможности параметрического разделения сигнала в выходную величину датчика можно автоматически вводить коррекцию на изменение диэлектрической проницаемости «сухой» нефти, и осуществлять непрерывное измерение контролируемой влажности.

Библиографический список:

1. M. Kretschmar and S. Welsby. Capacitive and Inductive Displacement Sensors, in Sensor Technology Handbook, J. Wilson editor, Newnes: Burlington. MA. 2005.
2. C. A. Grimes, E. C. Dickey, and M. V. Pishko, Encyclopedia of Sensors (10-Volume Set), American Scientific Publishers. ISBN 1-58883-056-X Sensors — Open access journal of MDPI. 2006.
3. M. Pohanka, O. Pavlis, and P. Skladal. Rapid Characterization of Monoclonal Antibodies using the Piezoelectric Immunosensor. *Sensors* 2007; 7: 341—353.
4. Clifford K. Ho, Alex Robinson, David R. Miller and Mary J. Davis. Overview of Sensors and Needs for Environmental Monitoring. *Sensors* 2005; 5: 4-37.
5. Абдулханова М. Технологии производства материалов и изделий и автоматизация технологических процессов на предприятиях дорожного строительства: Учебное пособие// М. Абдулханова, В.А. Воробьев. М.: Солон-пресс, 2014. 564 с.
6. Волосухин В.А. Автоматизация расчетов стержневых систем гидротехнического строительства: Учебное пособие / В.А. Волосухин, А.З. Зарифьян, С.И. Евтушенко и др. М.: АСВ, 2007. 160 с.
7. Виноградов, В.М. Автоматизация технологических процессов и производств. Введение в специальность: Учебное пособие / В.М. Виноградов, А.А. Черепашин. М.: Форум, 2018. 305 с.
8. Еремеев С.В. Автоматизация технологических процессов и производств в нефтегазовой отрасли: Учебное пособие / С.В. Еремеев. СПб.: Лань, 2018. 136 с.
9. В. Люкк. Методы измерения влажности, ОНТИ, Ленинград, 1962.
10. Ш.М. Таукин. Датчики и схемы влагомеров и уровнемеров для нефтехимической промышленности. Издательство «Ишим», 1965.
11. Клепиков В.В. Автоматизация производственных процессов: Учебное пособие / В.В. Клепиков, А.Г. Схиртладзе, Н.М. Султан-заде. М.: Инфра-М, 2019. 351 с.
12. Мясковский И.Г. Основы автоматизации производства. М., Высшая школа, 1968.
13. Ермоленко, А.Д. Автоматизация процессов нефтепереработки /А.Д. Ермоленко, О.Н. Кашин, Н.В. Лисицын и др. Вологда: Инфра-Инженерия, 2012. 304 с.
14. Ермоленко, А.Д. Автоматизация процессов нефтепереработки /А.Д. Ермоленко. М.: Профессия, 2012. 304 с.
15. Ермоленко, А.Д. Автоматизация процессов нефтепереработки / А.Д. Ермоленко. М.: Профессия, 2015. 304 с.
16. Бармин А.В. Радарные системы контроля уровня//Современные технологии автоматизации. № 4, 2002.
17. Зубарев Ю.М. Автоматизация координатных измерений в машиностроении: Учебное пособие / Ю.М. Зубарев, С.В. Косаревский. СПб.: Лань, 2016. 160 с.
18. Иванов А.А. Автоматизация технологических процессов и производств. Учебное пособие /А.А. Иванов. - М.: Форум, 2012. 224 с.
19. Иванов А.А. Автоматизация технол. проц. и произв. Учебное пособие /А.А. Иванов. М.: Форум, 2018. 272 с.
20. Литвак В.И. Фотоэлектрические датчики в системах контроля, управления и регулирования. М.: Наука, 1966. 410 с.

References:

1. M. Kretschmar and S. Welsby. Capacitive and Inductive Displacement Sensors, in Sensor Technology Handbook, J. Wilson editor, Newnes: Burlington, MA. 2005.
2. C. A. Grimes, E. C. Dickey, and M. V. Pishko, Encyclopedia of Sensors (10-Volume Set), American Scientific Publishers. ISBN 1-58883-056-X *Sensors - Open access journal of MDPI*. 2006.
3. M. Pohanka, O. Pavlis, and P. Skladal. Rapid Characterization of Monoclonal Antibodies using the Piezoelectric Immunosensor. *Sensors* 2007; 7: 341-353.
4. Clifford K. Ho, Alex Robinson, David R. Miller and Mary J. Davis. Overview of Sensors and Needs for Environmental Monitoring. *Sensors* 2005; 5: 4-37.
5. Abdulkhanova M. Technologies for the production of materials and products and automation of technological processes at road construction enterprises: Textbook . M. Abdulkhanova, V.A. Vorobiev. M.: Solon-press, 2014; 564.
6. Volosukhin V.A. Automation of calculations of rod systems in hydraulic engineering: Textbook . V.A. Volosukhin, A.Z. Zari-fyan, S.I. Evtushenko et al. ASV. 2007;160.
7. Vinogradov, V.M. Automation of technological processes and production. Introduction to the specialty: Textbook / V.M. Vinogradov, A.A. Cherepakhin. M.: Forum, 2018; 305.
8. Ereemeev S.V. Automation of technological processes and production in the oil and gas industry: Textbook / S.V. Ereemeev. SPb.: Lan, 2018; 136.
9. V. Lukk. Moisture measurement methods, ONTI, Leningrad, 1962.
10. Sh.M. Taukin. Sensors and circuits of moisture meters and level meters for the petrochemical industry. Ishim Publishing House, 1965.
11. Klepikov V.V. Automation of production processes: Textbook . V.V. Klepikov, A.G. Skhirtladze, N.M. Sultan-zade. Infra-M, 2019; 351.
12. Myaskovsky I.G. Basics of production automation. [Vysshaya shkola] High School, 1968.
13. Ermolenko A. D. Automation of oil refining processes. A.D. Ermolenko, O. N. Kashin, N.V. Lisitsyn et al. Vologda: [Infra-Inzheneriya] Infra-Engineering, 2012; 304.
14. Ermolenko A.D. Automation of oil refining processes. A.D. Ermolenko. [Professiya] Profession. 2012; 304.
15. Ermolenko A. D. Automation of oil refining processes. A.D. Ermolenko. [Professiya] Profession., 2015; 304.
16. Barmin A.V. Radar level control systems. [Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii] Modern automation technologies. 2002; 4.
17. Zubarev Yu.M. Automation of coordinate measurements in mechanical engineering: Textbook. Yu.M. Zubarev, S.V. Kosarev-sky. SPb.: Lan, 2016; 160.
18. Ivanov A.A. Automation of technological processes and production: Textbook. A.A. Ivanov. M.: Forum. 2012; 224.
19. Ivanov A.A. Technological automation percent and production textbook. A.A. Ivanov. M.: Forum. 2018; 272.
20. Litvak V.I. Photoelectric sensors in monitoring, control and regulation systems. M.: [Nauka] Science, 1966; 410.

Сведения об авторах.

Гасанов Тельман Гамзатович, кандидат технических наук, доцент кафедры организации и безопасности движения, batmanov.1978@mail.ru.

Батманов Эдвард Загидинович, кандидат технических наук, доцент, декан факультета права и управления на транспорте, batmanov.1978@mail.ru.

Гусейнов Марат Рамизович, старший преподаватель кафедры транспортных сооружений и строительных материалов, Maratdgtu@mail.ru

Information about authors:

Telman G. Gasanov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Organization and Traffic Safety, batmanov.1978@mail.ru.

Edward Z. Batmanov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Dean of the Faculty of Law and Transport Management, batmanov.1978@mail.ru.

Marat R. Guseynov, Senior Lecturer, Department of Transport Structures and Building Materials, Maratdgtu@mail.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 30.10.2021.

Одобрена после рецензирования / Reviced 18.11.2021.

Принята в печать /Accepted for publication 19.11.2021.