

**ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕКТА ПО ЕГО АКУСТИЧЕСКОМУ СИГНАЛУ**

Е.Ю. Трошина

Troshina.bmstu@gmail.com

SPIN-код: 7436-3988

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

**Аннотация**

Проанализированы принципы построения акустических систем для определения положения объекта на плоскости. Представлен разработанный алгоритм для определения положения источника звука на плоскости по данным четырех акустических пеленгаторов. Для повышения точности получения оценок предлагается применять метод минимальной суммы нормалей, основанный на методе наименьших квадратов. Описана разработанная математическая модель входного сигнала пеленгатора и функционирования всей системы в целом. Выполнена оценка точности определения положения объекта по ранее приведенному алгоритму.

**Ключевые слова**

Акустический пеленгатор, корреляционная функция, определение положения, математическая модель, источник звука, малогабаритные микрофоны, широкополосный сигнал, задержка сигнала

Поступила в редакцию 15.05.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

**Введение.** В последние годы применение акустических датчиков для локализации источников сигналов становится все более актуальной областью исследования [1–5]. Подобные системы являются пассивными, не требуют мощного источника питания и могут быть реализованы в виде автономных блоков. Современные малогабаритные микрофоны, построенные на основе микроэлектромеханических систем, позволяют существенно уменьшить габариты подобных систем. Области применения подобных устройств достаточно разнообразны и востребованы: системы безопасности, мониторинг животного мира, телеконференции, автоматизированный захват мультимедиа, смарт-залов и аудиторий и т. п.

Цель данной работы — построение математической модели устройства для определения положения источника звука на плоскости по данным акустических пеленгаторов.

**Принцип построения и алгоритм работы системы пеленгаторов.** Для определения положения источника звука используются четыре акустических пеленгатора, в состав которых входят по два микрофона [6, 7]. Каждый из них расположен в углах квадрата размером 50×50 м (рис. 1).

На выходе каждого из пеленгаторов формируется оценка углового положения источника звука относительно базы пеленгатора. Формирование оценки осуществляется фазовым методом. Суть метода заключается в измерении разности фаз входного сигнала с двух каналов. Поскольку используется широкополосный сигнал, вместо разности фаз целесообразно использовать задержку:

$$\tau = \frac{R}{v_{зв}}$$

где  $\tau$  — задержка сигнала;  $R$  — расстояние от источника излучения до микрофонов М1 и М2;  $v_{зв}$  — скорость распространения звука.

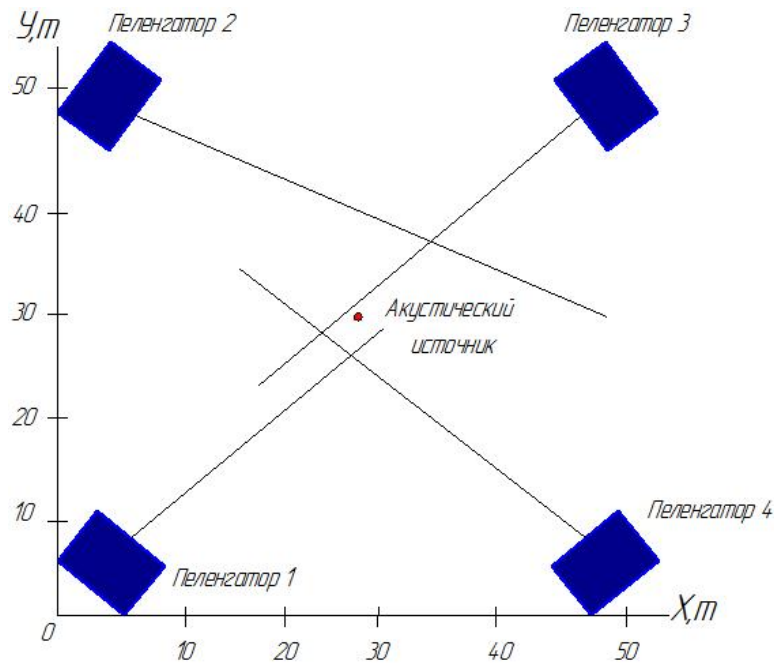


Рис. 1. Схема расположения акустических пеленгаторов

Учитывая, что сигнал приходит под углом к пеленгатору и что расстояние между микрофонами  $d$  известно, получаем следующее равенство:

$$\tau = \frac{d}{v_{зв}} \sin \alpha.$$

Зная расстояние  $d$  и задержку  $\tau$ , можно определить угловое положение источника излучения [8]:

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{\tau v_{зв}}{d} \right).$$

Определение местоположения объекта в двумерном пространстве реализуется с помощью геометрических методов на основе данных четырех пеленгаторов.

При использовании наиболее простого алгоритма оценка положения представляет собой среднее арифметическое точек пересечения линий пеленга от всех пеленгаторов. Однако такой метод может приводить к существенным погрешностям, особенно когда линии пеленгов близки к параллельным. Пример такой ситуации показан на рис. 2.

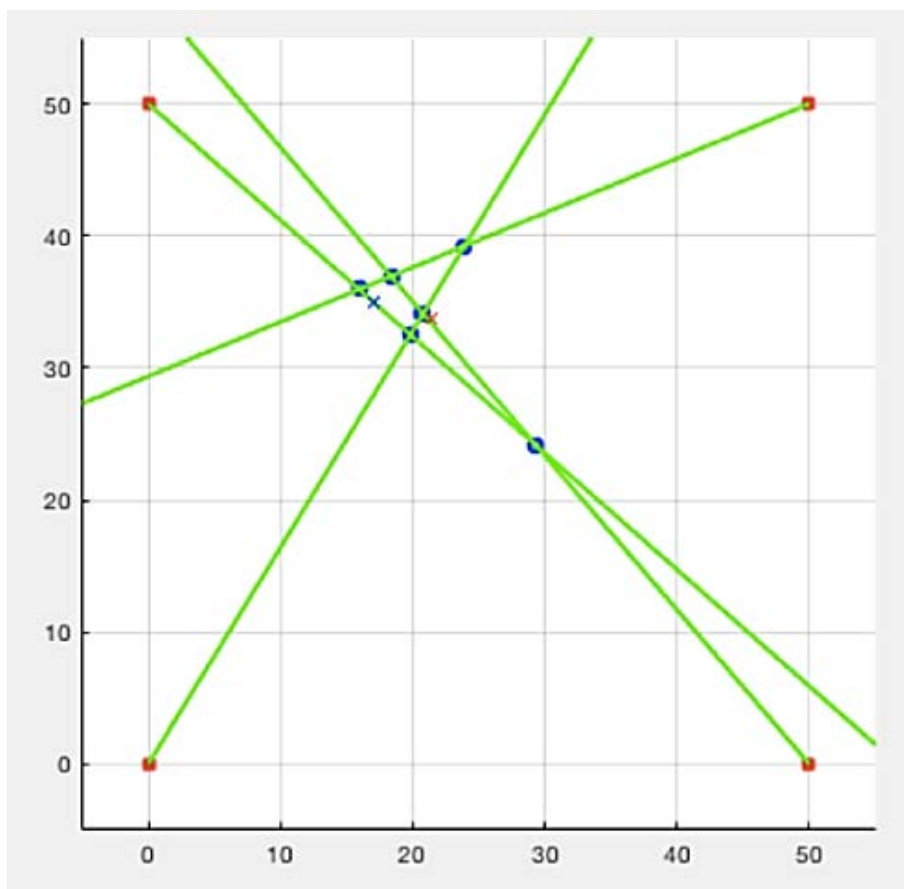


Рис. 2. Оценка положения объекта как среднего арифметического точек пересечения линий пеленга

Более точную оценку можно получить с помощью метода минимальной суммы нормалей, который основан на методе наименьших квадратов (МНК), используемом для суммы длины перпендикуляров к линиям пеленга, построенных из одной точки. С помощью МНК по экспериментальным данным можно подобрать наиболее точно аппроксимирующую их аналитическую функцию. Таким образом, функция двух переменных  $f(x, y)$  должна быть расстоянием, причем минимальным:

$$\sum f(x, y) \rightarrow \min.$$

Расстояние между пересечениями определяется следующим образом:

$$f(x, y) = d = \begin{vmatrix} x \\ y \\ 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ x & y & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \end{vmatrix} = |\mathbf{k}(x \sin \alpha - y \cos \alpha)| = x \sin \alpha - y \cos \alpha.$$

Для получения оценки местоположения источника звука необходимо минимизировать следующую функцию:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n d_i^2(x, y) \rightarrow \min.$$

Подставим в последнюю формулу найденное расстояние, найдем частные производные и приравняем их к нулю:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n (x \sin \alpha_i - y \cos \alpha_i)^2;$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \sum_{i=1}^n [2x \sin \alpha_i - 2y \cos \alpha_i \sin \alpha_i];$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = \sum_{i=1}^n [-2x \sin \alpha_i \cos \alpha_i + 2y \cos \alpha_i];$$

После расчета производных вычислим значения  $(x, y)$ , подставив полученные значения углов в систему уравнений

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n 2x \sin \alpha_i - 2y \cos \alpha_i \sin \alpha_i = 0; \\ \sum_{i=1}^n (-2x \sin \alpha_i \cos \alpha_i + 2y \cos \alpha_i) = 0. \end{cases}$$

**Математическое моделирование.** Математическое моделирование было выполнено в пакете Matlab [9]. Источник акустического сигнала моделируется с помощью полосового белого шума в интервале 100...1000 Гц. Положение пеленгаторов относительно микрофонов задается путем введения в сигнал соответствующих задержек. Взаимная корреляционная функция (ВКФ) между входными сигналами двух каналов определяется следующим образом:

$$C_n(\tau) = \frac{M[S_1 \cdot S_2(t + \tau)]}{M[S_1^2(t)]},$$

где  $C_n$  — нормированная взаимокорреляционная функция;  $S_1, S_2$  — сигналы с выходов микрофонов;  $\tau$  — задержка распространения шума между каналами.

Оценку положения источника можно получить с помощью ВКФ, для этого необходимо найти максимальное значение функции.

Схема математической модели, состоящей из восьми микрофонов (по два на каждый пеленгатор), обозначенных как М1–М8, показана на рис. 3. Этот источник может менять свое расположение в пределах всей площади квадрата.

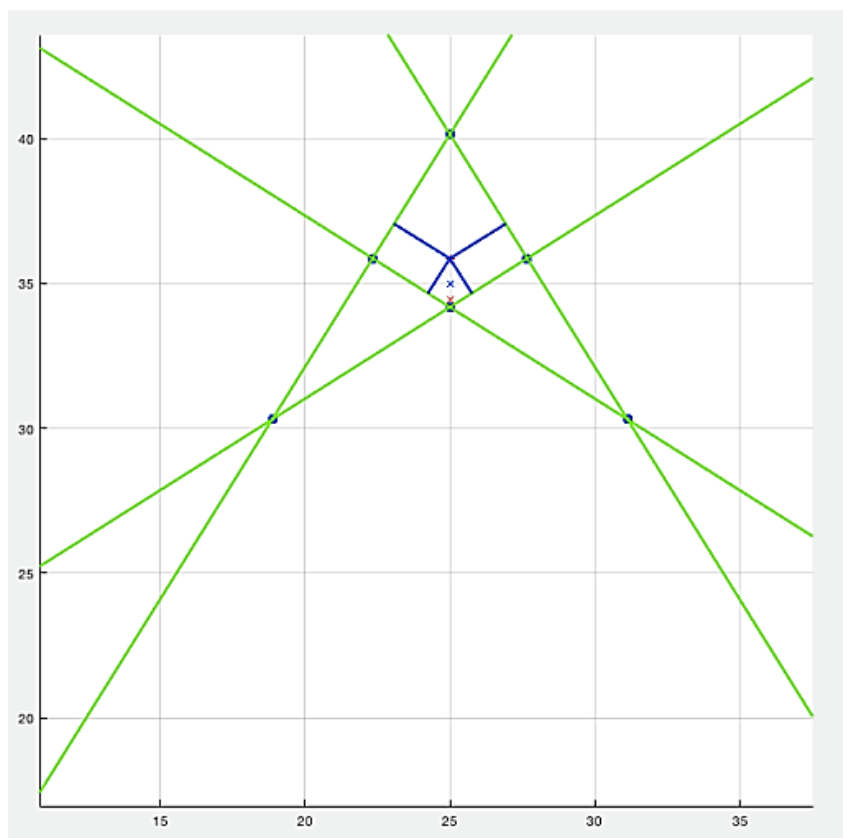


Рис. 3. Схема определения источника шума с помощью МНК

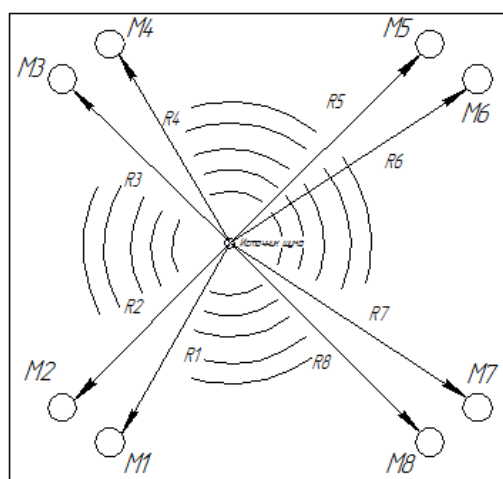


Рис. 4. Схема расположения микрофонов при моделировании

Точность оценки положения объекта зависит от его реального положения [10, 11]. Исследования показали, что погрешность положения минимальна при расположении объекта в центре и увеличивается при его удалении к углам

квадрата (рис. 5). Таким образом, наименьшую погрешность, а значит, и самую точную оценку положения источника получают в точке, равноудаленной от всех микрофонов, и в близлежащей к ней области.

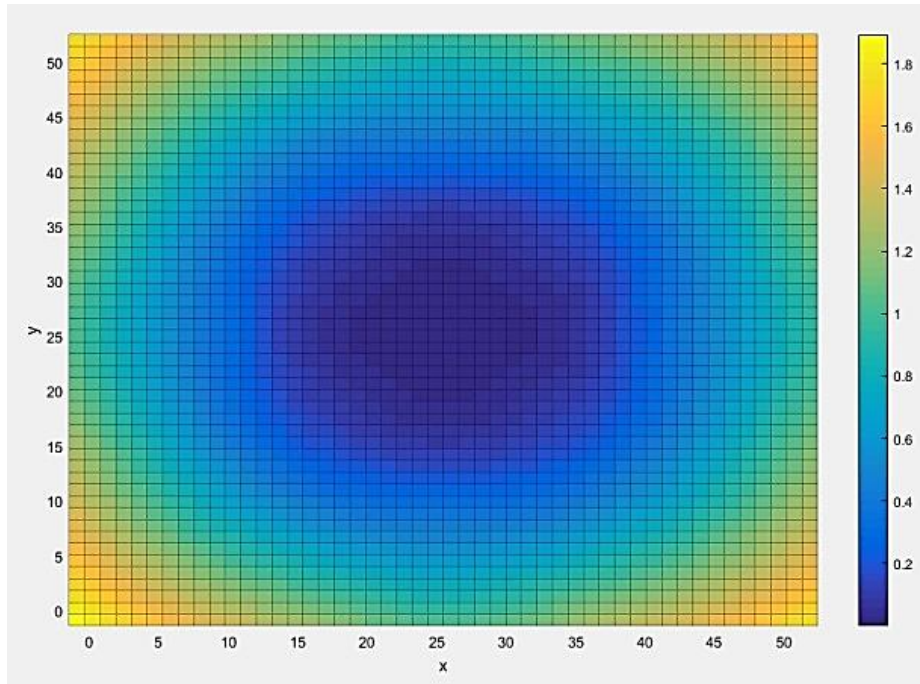


Рис. 5. Распределение погрешностей положения источника по всему полю исследования

**Математическое моделирование.** Математическое моделирование было выполнено в пакете Matlab [9]. Источник акустического сигнала моделируется с помощью полосового белого шума в интервале 100...1000 Гц. Положение пеленгаторов относительно микрофонов задается путем введения в сигнал соответствующих задержек. Взаимная корреляционная функция (ВКФ) между входными сигналами двух каналов определяется следующим образом:

$$C_n(\tau) = \frac{M[S_1 \cdot S_2(t + \tau)]}{M[S_1^2(t)]},$$

где  $C_n$  — нормированная взаимокорреляционная функция;  $S_1, S_2$  — сигналы с выходов микрофонов;  $\tau$  — задержка распространения шума между каналами.

Оценку положения источника можно получить с помощью ВКФ, для этого необходимо найти максимальное значение функции.

Схема математической модели, состоящей из восьми микрофонов (по два на каждый пеленгатор), обозначенных как М1–М8, показана на рис. 3. Этот источник может менять свое расположение в пределах всей площади квадрата.

Согласно проведенным испытаниям, минимальная погрешность положения составляет 0,2 м, а максимальная — 1,8 м.

**Выводы.** В ходе проведенного исследования разработан алгоритм определения местоположения источника звука на плоскости по данным четырех акустических пеленгаторов, расположенных в углах контролируемой области. Построена математическая модель входного сигнала пеленгатора и всей системы в целом. По результатам математического моделирования получена зависимость точности оценки положения объекта от его координаты в поле исследования. Анализ показал, что минимальная погрешность положения источника составит 0,2 м, а максимальная — 1,8 м.

## Литература

- [1] Лихоеденко К.П., Хохлов В.К. Дискриминационные характеристики акустических пеленгаторов локализованных источников широкополосных излучений с временным способом обработки сигналов. *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2014, т. 19, № 6, с. 47–53.
- [2] Хохлов В.К., Коршикова Ж.С. Пеленгация локализованного источника акустических излучений на основе знакового корреляционного метода. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2008, № 3, с. 66–74.
- [3] Глазков В.В., Муратов И.В. Использование дифференциальных решеток микрофонов для подавления акустического шума. *Вестник СибГУТИ*, 2016, № 3(35), с. 215–222.
- [4] Молчанов С.А., Хохлов В.К., Константинов Н.А. Выбор информативных признаков акустических сигналов вертолета и самолета в адаптивных автономных информационных системах распознавания. *Машиностроение и компьютерные технологии*, 2017, № 5. URL: <http://technomagelpub.elpub.ru/jour/article/view/1165>.
- [5] Хохлов В.К. Обработка огибающих реализаций сигналов в реальном времени в автономных информационных системах. *Машиностроение и компьютерные технологии*, 2012, № 3. URL: <http://engineering-science.ru/doc/342346.html>.
- [6] Griffin A., Mouchtaris A. Localizing multiple audio sources from DOA estimates in a wireless acoustic sensor network. *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*. IEEE, 2013, pp. 1–4.
- [7] Mohammad M.F., Amir H.R., Ensieh I., Real-time ML based algorithm for localizing acoustic source in WSN. *The 22nd Iranian Conf. on Electrical Engineering*. IEEE, 2014, pp. 62–66.
- [8] Хохлов В.К. *Обнаружение, распознавание и пеленгация объектов в ближайшей локалии*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, 336 с.
- [9] Сергиенко А.Б. *Цифровая обработка сигналов*. Санкт-Петербург, Питер, 2002, 608 с.
- [10] Сайбель А.Г. *Основы теории точности радиотехнических методов местопределения*. Москва, Оборонгиз, 1958, 56 с.
- [11] Илюхин С.Н., Топорков А.Г., Корянов В.В., Аюпов Р.Э., Павлов Н.Г. Актуальные аспекты разработки системы управления перспективными беспилотными летательными аппаратами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, № 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/adb/1450.html>.

**Трошина Евгения Юрьевна** — студентка кафедры «Автономные информационные и управляющие системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Глазков Виталий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автономные информационные и управляющие системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.



## LOCALIZATION OF THE OBJECT BY MEANS OF ITS ACOUSTIC SIGNAL

E.Yu. Troshina

Troshina.bmstu@gmail.com

SPIN-code: 7436-3988

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

The article analyzes the principles of constructing the acoustic systems for the determination of the object's position on a plane. The authors introduce a developed algorithm for identifying the position of the sound source on a plane according to the data from four acoustic direction finders. In order to increase the accuracy of estimation we suggest using a method of minimal sum of normals based on the least squares method. The work describes a developed mathematical model of the position finder input signal and the entire system's functioning. We estimate the accuracy of determining the object's position according to the above mentioned algorithm.

### Keywords

Acoustic direction finder, correction function, identifying the position, mathematical model, sound source, miniature microphones, broadband signal, signal delay

Received 15.05.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

---

### References

- [1] Likhoedenko K.P., Khokhlov V.K. Discriminatory features acoustic running fixes localized objects of broadband radiation with a temporary method of processing of signals. *Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems], 2014, vol. 19, no. 6, pp. 47–53.
- [2] Khokhlov V.K., Korshikova Zh.S. Direction-finding for localized source of acoustic emission based on sign correlation method. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2008, no. 3, pp. 66–74.
- [3] Glazkov V.V., Muratov I.V. Application of differential microphone arrays to reduce acoustic noise. *Vestnik SibGUTI*, 2016, no. 3(35), pp. 215–222.
- [4] Molchanov S.A., Khokhlov V.K., Konstantinov N.A. Selecting informative features of the helicopter and aircraft acoustic signals in the adaptive autonomous information systems for recognition. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii* [Mechanical Engineering and Computer Science], 2017, no. 5. Available at: <http://technomagelpub.elpub.ru/jour/article/view/1165>.
- [5] Khokhlov V.K. Real-time waveform envelope processing in autonomous information systems. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii* [Mechanical Engineering and Computer Science], 2012, no. 3. Available at: <http://engineering-science.ru/doc/342346.html>.
- [6] Griffin A., Mouchtaris A. Localizing multiple audio sources from DOA estimates in a wireless acoustic sensor network. *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*. IEEE, 2013, pp. 1–4.
- [7] Mohammad M.F., Amir H.R., Ensieh I., Real-time ML based algorithm for localizing acoustic source in WSN. *The 22nd Iranian Conf. on Electrical Engineering*. IEEE, 2014, pp. 62–66.
- [8] Khokhlov V.K. Obnaruzhenie, raspoznavanie i pelengatsiya ob"ektov v blizhayshey lokatsii [Detection, recognition and positioning of the target in the nearest location]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2005, 336 p.

- [9] Sergienko A.B. Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]. Sankt-Petersburg, Piter publ., 2002, 608 p.
- [10] Saybel' A.G. Osnovy teorii tochnosti radiotekhnicheskikh metodov mestoopredeleniya [Theory fundamentals of radio-technical positioning methods accuracy]. Moscow, Oborongiz publ., 1958, 56 p.
- [11] Ilyukhin S.N., Toporkov A.G., Koryanov V.V., Ayupov R.E., Pavlov N.G. Actual aspects of control system development for advanced unmanned aerial vehicles. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2015, no. 9. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/arise/adb/1450.html>.

**Troshina E.Yu.** — student, Department of Autonomous Data Processing and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — V.V. Glazkov, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Autonomous Data Processing and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.