

УДК 623.593; 681.31; 004.021  
DOI 10.22213/2410-9304-2018-2-62-68

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ В ПЛОСКОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ МИШЕНИ

С. Ф. Егоров, кандидат технических наук, доцент, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Приведены результаты оптимизации количества и расположения акустических датчиков в плоскости регистрации электронных сверхзвуковых акустических мишеней для стрелкового оружия по критерию невырождаемости математических моделей. Электронные акустические мишени широко используются для испытания и диагностики стрелкового и артиллерийского оружия на предприятиях ОПК. Разработанное программное обеспечение позволяет исследовать пересечения «особых прямых» от каждой пары датчиков в плоскости мишени (где возможно вырождение математической модели) и находить оптимальную конструкцию, пытаясь вывести «особые точки» за пределы зоны регистрации. Исследованы рамы мишени типа прямоугольник, параллелограмм, «корона», полукруг и полуэллипс.

Сделан вывод, что оптимизация расположения датчиков на полукруглой раме на непропорциональных расстояниях друг от друга позволяет обеспечить невырождаемость математической модели при использовании всего лишь одного дополнительного акустического датчика. Хотя такая конструкция и снижает технологичность изготовления и монтажа мишени, но повышает ее помехозащищенность.

**Ключевые слова:** акустическая мишень, акустический датчик, вырождение, система уравнений, измерительная система, математическая модель.

Электронные акустические мишени применяются на предприятиях ОПК для определения параметров кучности и точности стрелкового оружия и состоят из размещенных в углах прямоугольной металлической рамы мишени акустических датчиков (рис. 1). Датчики реагируют на звукобаллистическую волну (конус Маха) от пролетающего выше скорости звука объекта, и по временам прихода волны до датчиков ( $D_i$ ,  $D_s$  – является стартовым и используется исключительно для запуска электронных схем мишени) определяются координаты попадания в мишень решением системы уравнений [1–5]:

$$\sqrt{(y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} = \frac{vc(t_i - t_0)}{\sqrt{v^2 - c^2}}, \quad (1)$$

где  $y_0, z_0$  – координаты точки попадания;  $y_i, z_i$  – координаты  $i$ -го датчика  $D$  в плоскости мишени,  $i = 1, \dots, 4$ ;  $v$  – скорость пули в зоне срабатывания датчиков;  $c$  – скорость звука;  $t_0$  – момент времени начала отсчета (т. е. время пролета через переднюю плоскость мишени);  $t_i$  – момент времени фиксации [6] сигнала на  $i$ -м датчике  $D$ .

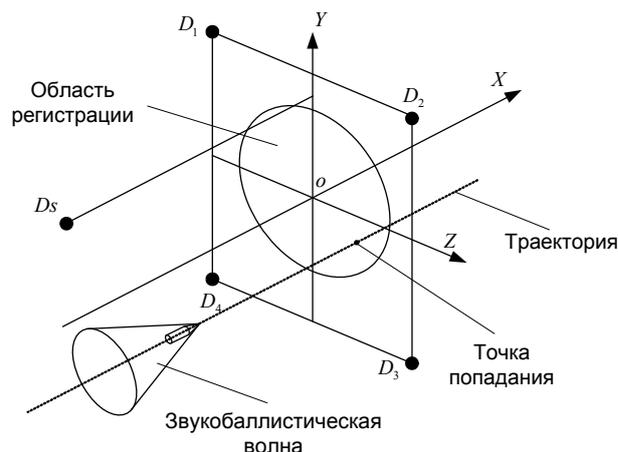


Рис. 1. Конструкция акустической мишени

Для математически корректного решения системы уравнений (1) количество акустических датчиков конструкции мишени должно быть обязательно не меньше количества неизвестных, а такими считаются  $y_0, z_0, t_0, \zeta$  ( $\zeta = \frac{vc}{\sqrt{v^2 - c^2}}$ ), значит, число датчиков должно быть не менее четырех.

При определении неизвестной точки попадания ( $y_0, z_0$ ) решением системы уравнений модели (1) обнаружилась проблема вырождаемости [7] в случае расположения

всех датчиков симметрично в углах прямоугольника на одной плоскости с мишенью. Оси симметрии любой пары датчиков являются «особыми прямыми», на которых уравнения этой пары датчиков являются следствием друг друга (4 датчика дают 6 «особых прямых», 5 – 10, 6 – 15,7 – 21, 8 – 28). Пересечения «особых прямых» в «особых точках» (на рис. 2, *a* все «особые прямые» пересекаются в центре мишени, а ортогональные совпадают) делает зависимыми уже несколько датчиков (по количеству пересекающихся прямых – степень «особой точки»), что приводит к побочным решениям и низкой помехоустойчивости в окрестности этих «особых точек». Замена конст-

рукции мишени с прямоугольной на параллелограмм улучшает ситуацию, но не принципиально (рис. 2, *б* и *в*), так на рис. 2, *в* много «особых точек» 3-й степени, и в этих местах 6 датчиков уже не хватает [8]. В любом случае для решения проблемы вырожденности системы уравнений требуется вводить в конструкцию мишени дополнительные датчики, но если попытаться вывести все «особые точки» датчиков за пределы активной зоны регистрации, которая занимает примерно внутреннюю половину площади рамы мишени, то можно ограничиться только одним дополнительным акустическим датчиком.

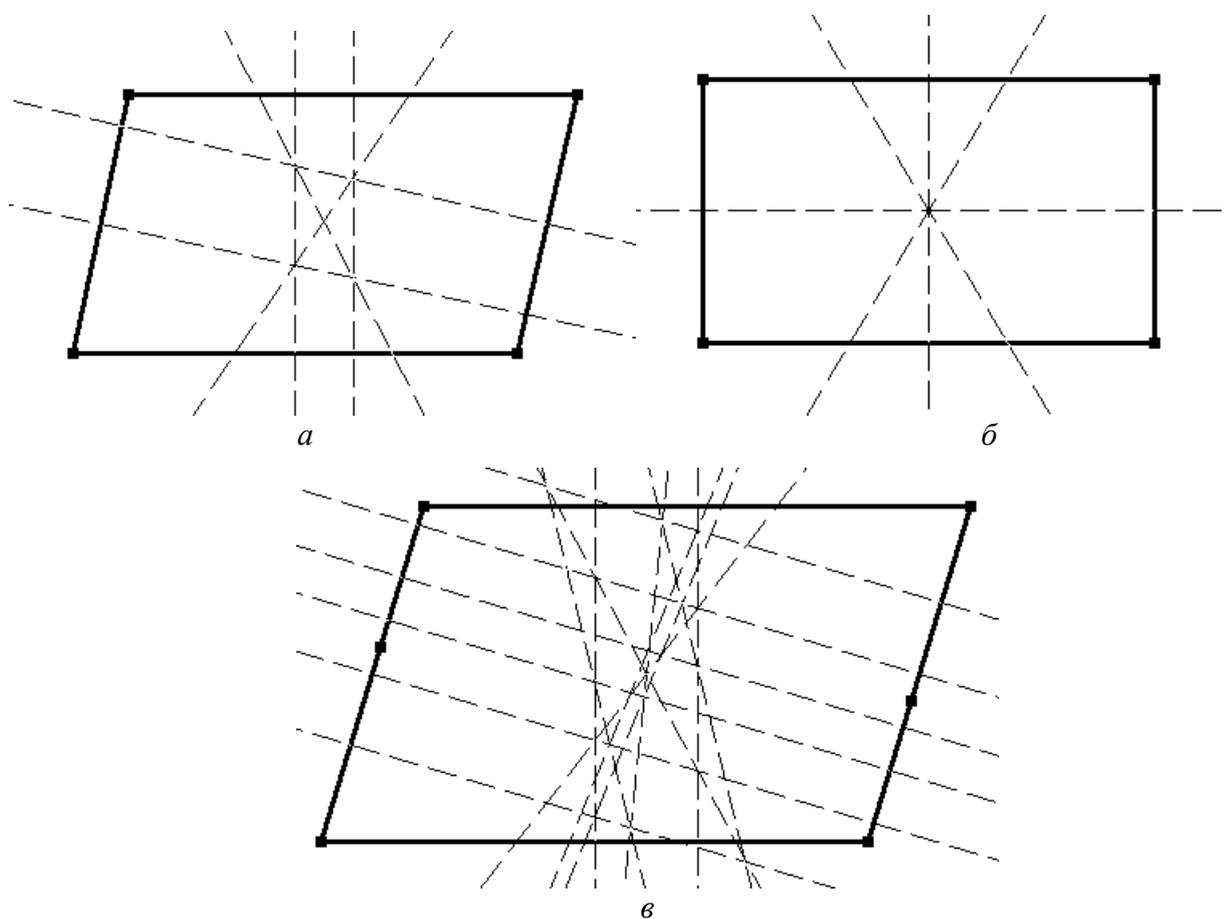


Рис. 2. Конструкции акустической мишени: *a* – прямоугольник 4 датчика; *б* – параллелограмм 4 датчика; *в* – параллелограмм 6 датчиков с «особыми прямыми» и «особыми точками»

Таким образом, задача проводимой оптимизации конструкции мишени и размещения на ней датчиков заключается в обеспечении невырожденности математической модели при меньшем количестве акустических датчиков, что повышает помехозащи-

щенность и снижает погрешность измерения координат.

Было разработано программное обеспечение, позволяющее в интерактивном режиме проверять размещение акустических датчиков на раме (в том числе и на криво-

линейной) и визуально контролировать «особые прямые» и «особые точки». «Особые прямые» строятся по формуле

$$\frac{x - (x_1 + x_2)/2}{(y_2 - y_1)} = -\frac{y - (y_1 + y_2)/2}{(x_2 - x_1)},$$

где  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  – координаты пары датчиков.

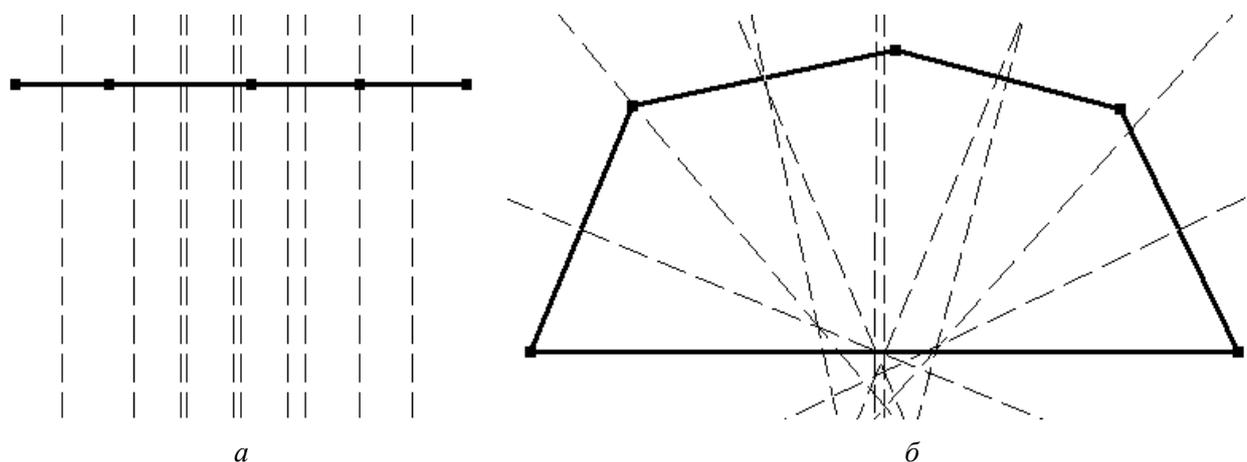


Рис. 3. Размещение 5 датчиков: а – вдоль прямой; б – на раме «корона»

В варианте с расположением всех датчиков вдоль одной стороны рамы (рис. 3, а) «особые прямые» вообще не пересекаются (т. е. не дают «особых точек»), но на погрешности начинают влиять факторы измерительной базы и низкий уровень сигналов на крайних датчиках (что приводит к повышению погрешности определения моментов времени).

Рама в виде «короны» (рис. 3, б) дает практически идеальный результат по расположению «особых точек» и подводит к универсальному решению по оптимальному размещению акустических датчиков – на дугообразной раме (полукруге или полуэллипсе).

Таким образом, общим решением является размещение датчиков по полукругу, такое решение является менее технологичным в плане изготовления рамы, но гарантирует отсутствие «особых точек» в активной зоне регистрации (рис. 4, а). При этом размещение датчиков на раме должно быть несимметричным (под разными углами), чтобы «особые прямые» не совмещались. Пример углов 7 датчиков от средней вертикальной

Эксперименты сразу же выявили два простых решения для 5 датчиков – размещать датчики несимметрично только вдоль одной стороны рамы на прямой или использовать раму типа «корона» (рис. 3).

линии:  $-86^\circ, -59^\circ, -31^\circ, 2^\circ, 36^\circ, 56^\circ, 86^\circ$ . Правда, при дугообразной раме активная зона регистрации становится с неодинаковыми защитными зазорами до датчиков, но эту проблему можно решить организационно-техническими мероприятиями при проведении испытаний.

На полукруглой раме все «особые прямые» пересекаются в одной «особой точке» – центре круга, поэтому конструкция чуть меньше половины круга гарантированно соответствует критерию оптимальности, надо лишь проследить чтобы «особые прямые» не совпадали. На раме в виде полуэллипса (рис. 4, б и в) «особые прямые» пересекаются в разных «особых точках», некоторые даже могут попадать в потенциальную зону регистрации, и требуется тщательный интерактивный подбор размещения датчиков по такой раме. Но эллиптическая рама позволяет варьировать габаритами мишени под конкретные нужды, а текущий радиус конструкции вычисляется по формуле эллипса:

$$r = \frac{ab}{\sqrt{b^2 \cos^2 \varphi + a^2 \sin^2 \varphi}}, \text{ где } a \text{ и } b \text{ явля-$$

ются большой и малой полуосью эллипса (являются основанием рамы при разных ориентациях);  $\varphi$  – угол между радиусом и большой полуосью. При этом у рамы, лежащей на большой полуоси, можно вынести

«особые точки» за пределы конструкции, у рамы же на малой полуоси это сделать невозможно, но можно вынести их за границы зоны регистрации (рис. 4).

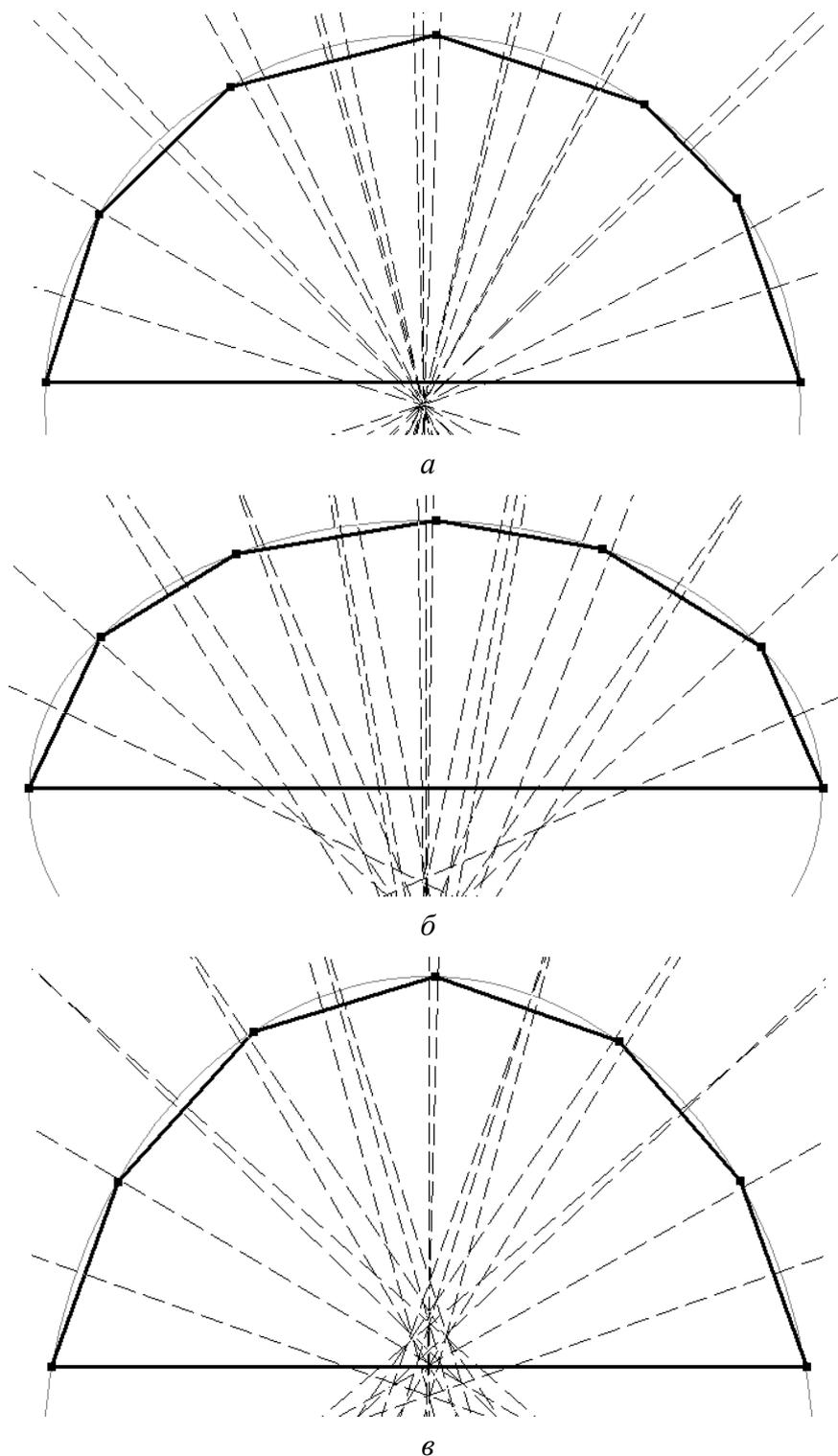


Рис. 4. Дуговые конструкции мишеней с «особыми прямыми» 7 датчиков: *a* – полукруговая; *б* – на большой полуоси эллипса; *в* – на малой полуоси эллипса

При применении рассмотренного подхода с оптимизацией размещения датчиков, например, для инвариантной мишени [9] с 6 неизвестными в математической модели, ее конструкция будет выглядеть, как на рис. 5, и использовать только 7 датчиков вместо 8. «Особые прямые» и «особые точки» старой и новой конструкции представлены на рис. 6. Анализ показал, что старая конструк-

ция рамы при несимметричном расположении датчиков обеспечивает невырождаемость математической модели слева и справа от ее центра, т. е. если ввести организационные ограничения на размещение точки прицеливания при испытаниях, то и старая конструкция мишени не будет вносить дополнительных погрешностей.

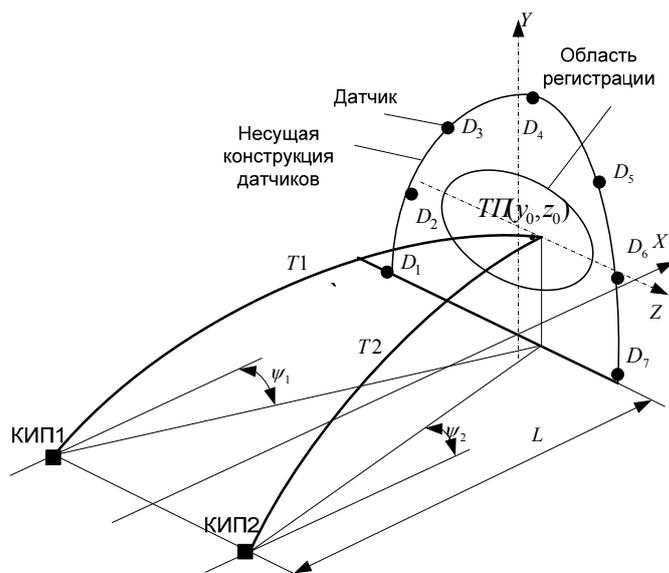


Рис. 5. Оптимизированная конструкция инвариантной акустической мишени

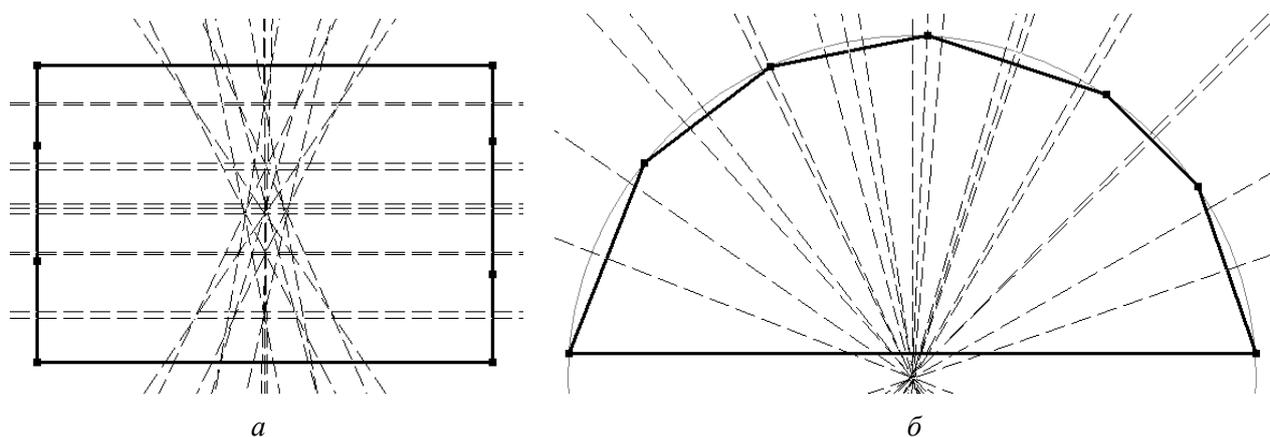


Рис. 6. «Особые прямые»: а – восьмидатчиковой стандартной рамы; б – семидатчиковой оптимизированной полукруглой рамы

Таким образом, оптимизация расположения акустических датчиков по полукруглой (или полуэллиптической) раме электронной мишени на несимметричных расстояниях позволяет использовать всего на один датчик больше, чем требует математическая модель для обеспечения невырождения сис-

темы уравнений и упрощает контроль за погрешностью измерений. Но при этом мы получаем менее технологичную в изготовлении и более габаритную конструкцию мишени, а также некоторое ослабление сигналов на самых удаленных от активной области регистрации акустических датчиков и

неравномерность защитной зоны вокруг, как правило, прямоугольной зоны регистрации. Дальнейшее совершенствование математических моделей акустических мишеней и увеличение количества неизвестных в них [10, 11] делает данную оптимизацию расположения датчиков актуальной для гарантированного сохранения обусловленности математической модели и повышения помехоустойчивости мишени.

### Библиографические ссылки

1. Эволюция электронных акустических мишеней: исследование сверхзвуковых математических моделей / С. Ф. Егоров, В. С. Казаков, В. А. Афанасьев, И. Г. Корнилов, И. В. Коробейникова // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2017. Т. 15. № 2. С. 86–93.

2. Эволюция электронных акустических мишеней: информационно-измерительные системы для стрелкового оружия / С. Ф. Егоров, В. С. Казаков, В. А. Афанасьев, И. Г. Корнилов, И. В. Коробейникова // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2016. № 4 (31). С. 104–110.

3. Егоров С. Ф., Коробейников В. В., Казаков В. С. Информационно-измерительные системы оборонного назначения: стрелковые тренажеры и электронные мишени // *Механика и физико-химия гетерогенных сред, наносистем и новых материалов: материалы научных исследований*. Ижевск, 2015. С. 328–349.

4. Пат. 2392577 Российская Федерация, МПК F41 J 5/06. Устройство определения внешнебаллистических параметров на основе акустических датчиков / Афанасьева Н. Ю., Афанасьев В. А., Веркиенко Ю. В., Коробейников В. В.; заявитель и патентообладатель Институт прикладной механики УРО РАН. - № 2008129855/02; заявл. 18.07.2008; опубл. 20.06.2010. Бюл. № 17-ил.

5. Коробейников В. В., Казаков В. С. Акустическая мишень с выносным датчиком // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2013. № 1 (21). С. 127–129.

6. Егоров С. Ф., Коробейникова И. В. Повышение точности акустической мишени за счет использования взвешенных моментов времени // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2014. № 2 (24). С. 105–108.

7. Коробейников В. В. Информационно-измерительные системы на основе акустических мишеней: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 1999.

8. Эволюция электронных акустических мишеней: исследование сверхзвуковых математических моделей / С. Ф. Егоров, В. С. Казаков, В. А. Афанасьев, И. Г. Корнилов, И. В. Коробейникова // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2017. Т. 15. № 2. С. 86–93.

9. Егоров С. Ф., Коробейникова И. В., Коробейников А. В. Исследование влияния на точность акустической мишени, инвариантной к рабочей позиции математической модели // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2015. № 3 (27). С. 45–49.

10. Там же.

11. Коробейников В. В., Коробейникова И. В. Математическая модель универсальной сверхзвуковой акустической мишени // *Вестник ИжГТУ*. 2012. № 3 (55). С. 101–103.

### References

1. Egorov S. F., Kazakov V. S., Afanasyev V. A., Kornilov I. G., Korobeynikova I. V. (2017). *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], vol. 15, no. 4, pp. 86–93 (in Russ.).

2. Egorov S. F., Kazakov V. S., Afanasyev V. A., Kornilov I. G., Korobeynikova I. V. (2016). *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], no. 4(31), pp. 104–110 (in Russ.).

3. Egorov S. F., Korobeynikov V. V., & Kazakov V. S. (2015). *Informatsionno-izmeritel'nye sistemy oboronogo naznacheniya: strelkovye trenazhery i elektronnye misheni* [Information and measuring systems of defensive appointment: shooting exercise machines and electronic targets]. Proceedings of the *Mekhanika i fiziko-khimiya geterogennykh sred, nanosistem i novykh materialov*. Izhevsk, pp. 328–349 (in Russ.).

4. Afanasyev V. A., Afanasyeva N. Yu., Verkienko Yu. V., Korobeynikov V. V. (2010). The device of determination of externally ballistic parameters on the basis of acoustic sensors. *Ru Patent No. 2392577* (in Russ.).

5. Korobeynikov V. V., Kazakov V. S. (2013). *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], no. 1 (21), pp. 127–129 (in Russ.).

6. Egorov S. F., Korobeynikova I. V. (2014). *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], no. 2 (24), pp. 105–108 (in Russ.).

7. Korobeynikov V. V. (1999). *Informatsionno-izmeritel'nye sistemy na osnove akusticheskikh mishenei* [Information and measuring systems on the basis of acoustic targets]. Cand. Sci. Dissertation. IzGTU, Izhevsk, Russia (in Russ.).

8. Egorov S. F., Kazakov V. S., Afanasyev V. A., Kornilov I. G., Korobeynikova I. V. (2017). *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], vol. 15, no. 4, pp. 86-93 (in Russ.).
9. Egorov S. F., Korobeynikova I. V., & Korobeynikov V. V. (2015). *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], no. 3 (27), pp. 45-49 (in Russ.).
10. Ibid.
11. Korobeynikov V. V., Korobeynikova I. V. (2012). *Vestnik IzhGTU* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], no. 3 (55), pp. 101-103 (in Russ.).

\*\*\*

#### **Optimization of the Arrangement of acoustic Sensors in the Plane of the Electronic Target**

*S. F. Egorov*, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Udmurt Federal Research Center (Institute of Mechanics) UB RAS, Izhevsk, Russia

*Results of optimization of quantity and layout of acoustic sensors are given in the plane of registration of electronic hyperacoustic acoustic targets for small arms by criterion of not degeneracy of mathematical models. Electronic acoustic targets are widely used for test and diagnostics of small and artillery arms on defense industry enterprises. The developed software allows to research intersections of "special straight lines" from each pair of sensors in the target plane (where degeneration of a mathematical model is possible) and to find optimum construction trying to remove "special points" out of borders of the check-in area. Target frames like rectangle, a parallelogram, "crown", a semicircle and a semi-ellipse are probed.*

*The conclusion is drawn that optimization of layout of sensors on a semicircular frame at disproportionate distances from each other allows to provide not degeneracy of a mathematical model when using only one additional acoustic sensor. Though such construction also reduces technological effectiveness of manufacture and mounting of a target, but increases its interference free feature.*

**Keywords:** acoustic target, acoustic transducer, degeneration, system of the equations, measuring system, mathematical model.

Получено: 03.05.18