

УДК 004.942, 623.522

В. Г. Суфиянов, кандидат физико-математических наук
С. А. Королев, кандидат физико-математических наук
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

МОДЕЛИРОВАНИЕ УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО МЕХАНИЗМА ИЗМЕРИТЕЛЬНО-РЕГИСТРИРУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ ПРИ СЛЕЖЕНИИ ЗА ДВИЖЕНИЕМ СНАРЯДА ПО ВНЕШНЕБАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ТРАЕКТОРИИ

В статье представлена модель функционирования опорно-поворотного механизма измерительно-регистрирующего устройства при слежении за движением снаряда на внешнебаллистической траектории. Рассматривается задача расстановки измерительно-регистрирующих устройств на испытательном полигоне с учетом технических ограничений.

Ключевые слова: опорно-поворотный механизм, измерительно-регистрирующее устройство, моделирование угловых характеристик, траектория снаряда, испытательный полигон.

В ходе полигонных испытаний снарядов требуется решать множество задач, одна из которых – оптическое сопровождение и фиксация на видеокамеру движения снаряда на различных участках траектории. В этой связи актуальной задачей является обеспечение адекватного функционирования измерительно-регистрирующей аппаратуры, что позволяет сократить материальные и временные затраты при проведении испытаний на полигоне [1].

Рассмотрим моделирование опорно-поворотного механизма в земной системе координат в соответствии с ГОСТ 20058–80 [2]: начало системы координат $Ox_3y_3z_3$ выбирается в произвольной точке полигона, где ось Ox_3 направлена на север, ось Oy_3 направлена вверх по местной вертикали, которая совпадает с направлением силы тяжести в точке O [3], ось Oz_3 образует правую тройку векторов (рис. 1).

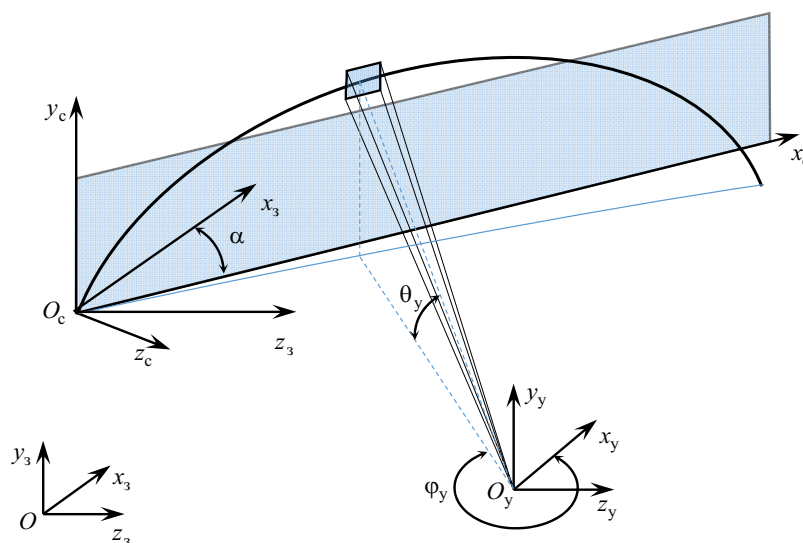


Рис. 1. Схема расположения измерительно-регистрирующего устройства и траектории снаряда

В системе координат $Ox_3y_3z_3$ рассматриваются две точки. Точка старта снаряда $O_c = (x_0, y_0, z_0)$ и точка расположения измерительно-регистрирующего устройства $O_y = (x_y, y_y, z_y)$, которая совпадает с пересечением осей поворота опорно-вращательного механизма в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Траектория движения снаряда $(x_c(t), y_c(t), z_c(t))$ представлена в стартовой системе координат $O_cx_cy_cz_c$, где ось O_cx_c соответствует дальности, O_cy_c – высоте снаряда, O_cz_c – боковому отклонению от плоскости стрельбы. Дирекци-

онный угол стрельбы α определяет направление между плоскостью стрельбы $O_cx_cy_c$ и плоскостью Ox_3y_3 (см. рис. 1).

Преобразуем координаты траектории снаряда из стартовой системы координат $(x_c(t), y_c(t), z_c(t))$ в земную систему $(x_3(t), y_3(t), z_3(t))$:

$$\begin{cases} x_3(t) = x_0 + x_c(t)\cos(\alpha) - z_c(t)\sin(\alpha), \\ y_3(t) = y_0 + y_c(t), \\ z_3(t) = z_0 + x_c(t)\sin(\alpha) + z_c(t)\cos(\alpha), \end{cases} \quad (1)$$

Слежение за снарядом осуществляется с помощью опорно-поворотного механизма. Расчет вращения опорно-поворотного механизма осуществляется по следующим формулам:

$$\begin{cases} \phi_y(t) = \text{azimuth}(z_3(t) - z_y, x_3(t) - x_y), \\ \theta_y(t) = \arctan \left(\frac{y_3(t) - y_y}{\sqrt{(x_3(t) - x_y)^2 + (z_3(t) - z_y)^2}} \right), \\ D_y(t) = \sqrt{(x_3(t) - x_y)^2 + (y_3(t) - y_y)^2 + (z_3(t) - z_y)^2}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\phi_y(t)$ – азимут измерительно-регистрающего устройства, град.; функция

$$\begin{aligned} \text{azimuth}(x, y) &= \\ &= \begin{cases} \text{atan2}(y, x), & \text{при } \text{atan2}(y, x) \geq 0, \\ 360 + \text{atan2}(y, x), & \text{при } \text{atan2}(y, x) < 0 \end{cases} \end{aligned}$$

возвращает значение азимута, град.; $\text{atan2}(x, y)$ – функция [4] возвращает угол (в град.), образованный между осью Ox и вектором, начинающимся в точке $(0, 0)$ и заканчивающимся в точке (x, y) ; $\theta_y(t)$ – угол места измерительно-регистрающего устройства, град.; $D_y(t)$ – дальность от измерительно-регистрающего устройства до снаряда, м.

Угловые скорости и ускорения опорно-поворотного механизма вычисляются по формулам

$$\begin{cases} \dot{\phi}_y(t) = \frac{d\phi_y(t)}{dt}, & \ddot{\phi}_y(t) = \frac{d\dot{\phi}_y(t)}{dt}, \\ \dot{\theta}_y(t) = \frac{d\theta_y(t)}{dt}, & \ddot{\theta}_y(t) = \frac{d\dot{\theta}_y(t)}{dt}. \end{cases} \quad (3)$$

где $\dot{\phi}_y(t)$, $\dot{\theta}_y(t)$ – угловые скорости по азимуту и углу места; $\ddot{\phi}_y(t)$, $\ddot{\theta}_y(t)$ – угловые ускорения по азимуту и углу места.

Рассмотрим моделирование опорно-поворотного механизма малогабаритной оптико-электронной станции «Вереск» (МОЭС «Вереск»), которая позволяет определять дальность до исследуемых объектов и регистрировать видеoinформацию. Основные тех-

нические ограничения [5], накладываемые на опорно-поворотный механизм МОЭС «Вереск», запишем в виде неравенств

$$\begin{cases} -10 \leq \theta_y(t) \leq 185 \text{ град.}, \\ |\dot{\phi}_y(t)| < 100 \text{ град./с}, & |\dot{\theta}_y(t)| < 30 \text{ град./с}, \\ |\ddot{\phi}_y(t)| < 120 \text{ град./с}^2, & |\ddot{\theta}_y(t)| < 30 \text{ град./с}^2. \end{cases} \quad (4)$$

По результатам моделирования вычисляются углы наведения, угловые скорости и ускорения опорно-поворотного механизма. Невыполнение неравенств (4) означает необходимость изменения расположения приборов, либо замены на другой более быстродействующий прибор.

Рассмотрим моделирование функционирования измерительно-регистрающих устройств на полигоне при выстреле из артиллерийского орудия. Траектория движения артиллерийского снаряда рассчитывалась в программном комплексе [6]. Схема расположения на карте полигона артиллерийского орудия, измерительно-регистрающих устройств и траектории снаряда представлена на рис. 3.

Пунктирной линией обозначена траектория снаряда. В результате проведенных расчетов были построены графики зависимости параметров функционирования от времени для трех устройств МОЭС «Вереск-М», которые расположены в начале траектории (1), в середине траектории (2) и в конце траектории снаряда (3).

На рис. 4 представлена зависимость угла поворота по азимуту и угла места от времени для рассматриваемых МОЭС «Вереск-М».

Опорно-поворотные устройства МОЭС «Вереск-М» не ограничены в углах поворота по азимуту, поэтому все три устройства функционируют в штатных режимах. Значения $\theta_y(t)$ также укладываются в рассматриваемые границы (4).

На рис. 5 представлена зависимость от времени расстояний $D_y(t)$ между измерительными устройствами МОЭС «Вереск-М» и снарядом. Данный график (см. рис. 5) можно использовать для определения времени функционирования каждого из МОЭС «Вереск-М» по минимальному расстоянию до снаряда, которое достигается для 1-го устройства с 0,00 по 8,25 с, для 2-го – с 8,25 по 31,35 с и для 3-го – с 31,35 по 42 с.

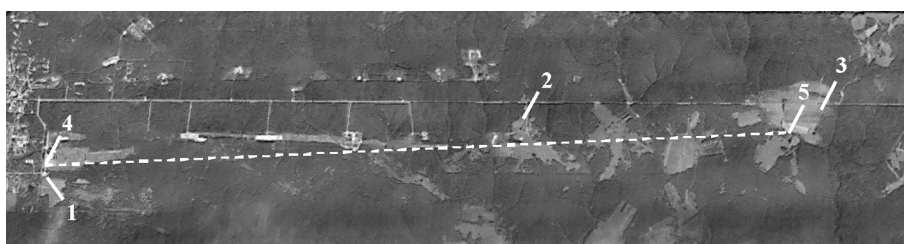


Рис. 3. Проекция траектории на карту полигона (пунктирная линия) и схема размещения объектов на карте: 1, 2, 3 – МОЭС «Вереск-М»; 4 – артиллерийское орудие; 5 – точка падения снаряда

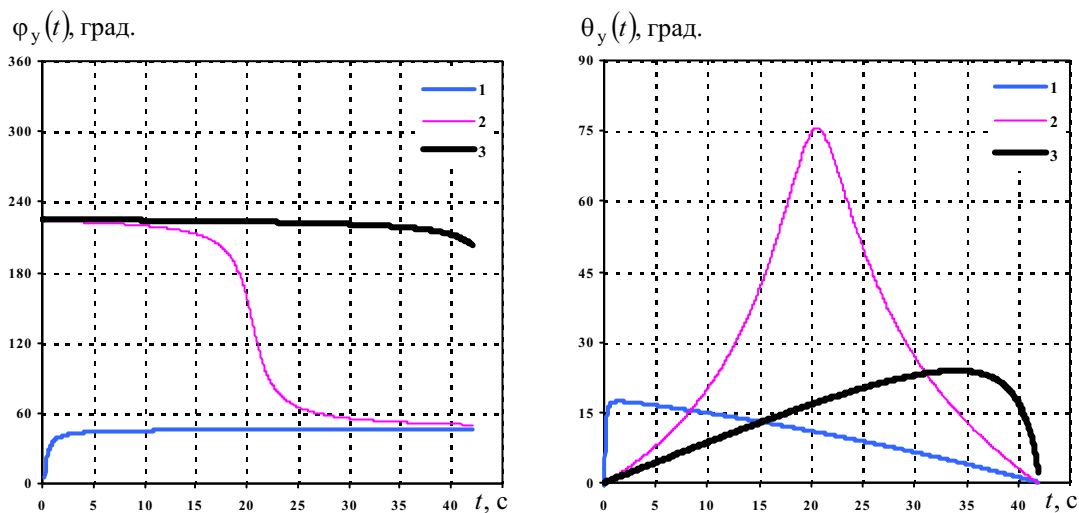


Рис. 4. Углы поворота по азимуту и углы места МОЭС «Вереск-М», расположенные в трех точках: 1 – начало траектории; 2 – середина траектории; 3 – конец траектории

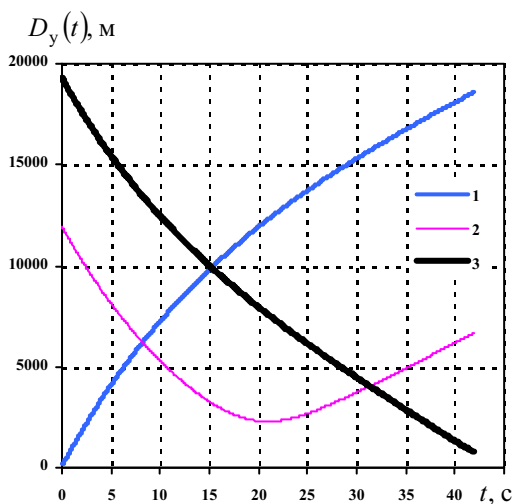


Рис. 5. Расстояние до снаряда для МОЭС «Вереск-М», расположенных в трех точках: 1 – начало траектории; 2 – середина траектории; 3 – конец траектории

На рис. 6 и 7 представлены зависимости от времени угловых скоростей и ускорений для МОЭС «Вереск-М».

Из представленных на рис. 4–7 графиков следует, что функционирование первого из МОЭС «Вереск-М» не удовлетворяет ограничениям по угловому ускорению азимута при $t < 0,55$ с и угла места при $t < 0,50$ с. Все остальные устройства могут работать в штатном режиме. Таким образом, при данной расстановке, с учетом вышеприведенных ограничений, можно рекомендовать следующие условия функционирования:

- 1-е устройство фиксирует снаряд в пределах $0,55 \leq t \leq 8,25$ с;
- 2-е устройство фиксирует снаряд в пределах $8,25 < t \leq 31,35$ с;
- 3-е устройство фиксирует снаряд в пределах $31,35 < t \leq 42,00$ с.

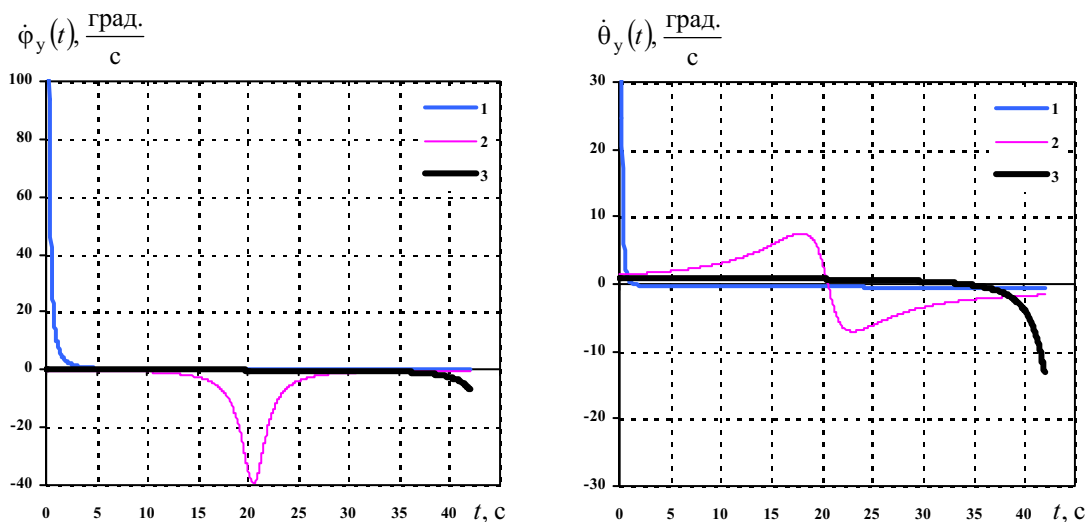


Рис. 6. Скорости по азимуту и углу места для МОЭС «Вереск-М», расположенных в трех точках: 1 – начало траектории; 2 – середина траектории; 3 – конец траектории

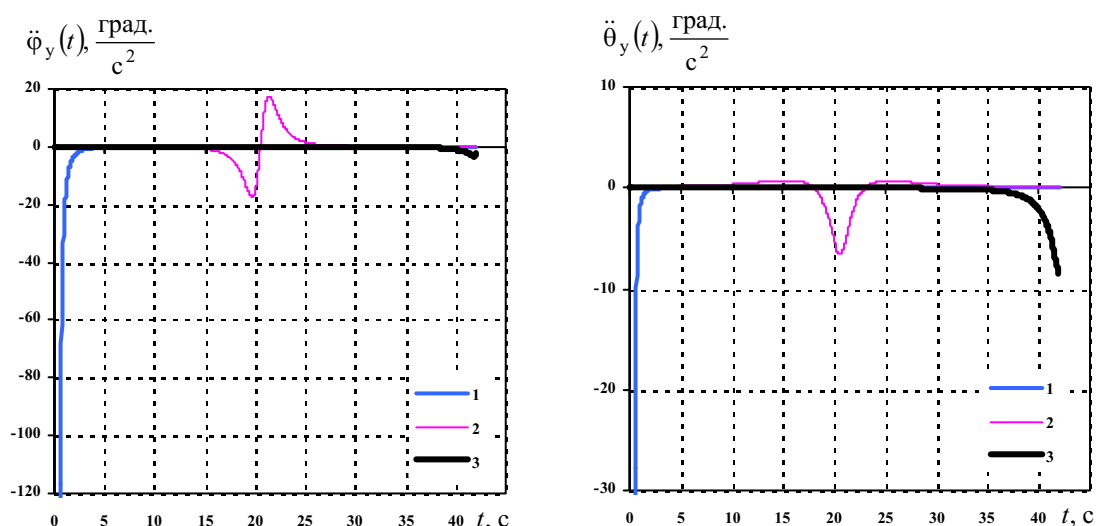


Рис. 7. Ускорения по азимуту и углу места для МОЭС «Вереск-М», расположенных в трех точках: 1 – начало траектории; 2 – середина траектории; 3 – конец траектории

Выводы

Моделирование угловых характеристик опорно-поворотного механизма позволяет определить критические условия их функционирования, время работы и возможность фиксации снарядов на внешнебаллистической траектории с помощью измерительно-регистрирующих устройств.

Результаты моделирования функционирования устройств на расчетной траектории движения снаряда показали, что на начальном участке траектории его фиксация не всегда возможна по техническим причинам. В связи с этим необходимо решать задачу расположения измерительно-регистрирующих устройств на подготовительном этапе проведения полигонных испытаний.

Библиографические ссылки

1. Баранов В. Л., Чванов А. Е., Чупахин А. П. Моделирование движения следящей системы в ходе полигонных испытаний изделий // Вопросы оборонной техники. Сер. 14. Вып. 2. – М.: НТЦ «Информтехника», 2015. – С. 171–174.
2. ГОСТ 20058–80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 52 с.
3. Там же.
4. NET Framework. Метод Math.Atan2 // Microsoft Developer Network. [Электронный ресурс]. – URL: [https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/system.math.atan2\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/system.math.atan2(v=vs.110).aspx) (дата обращения: 16.06.2016).
5. Малогабаритная ОПС. ТПК «ЛИНКОС». [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.linkos-tcp.ru> (дата обращения: 16.06.2016).
6. Rusyak I., Sufiyarov V., Korolev S., Ermolaev M. Software complex for simulation of internal and external ballistics of artillery shot. – 5th International Conference on Military Technologies, ICMT 2015. V. Krivanek (eds). 19–21 May 2015. Brno. Czech Republic. University of Defense. P. 9–17.

V. G. Sufiyarov, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Kalashnikov ISTU
S. A. Korolev, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Kalashnikov ISTU

Modeling of Angular Characteristics of Slewing Mechanism for Measuring and Recording Equipment when Tracking a Projectile Motion by External Ballistic Trajectory

The article presents a model of the functioning of slewing mechanism for measuring and recording device in tracking the movement of the projectile on external ballistic trajectory. The problem of placement of measuring and recording devices at the test ground with account of technical constraints is considered.

Keywords: Slewing mechanism, measuring and recording device, modeling angular characteristics, projectile trajectory, test ground.

Получено: 26.10.16