

И.И. Забеньков, д.т.н., профессор, С.С. Солонович, магистрант

## ЭФФЕКТ АВТОКОРРЕКЦИИ ВЫСОТЫ СРАБАТЫВАНИЯ НЕКОНТАКТНОГО ДАТЧИКА ИНИЦИАЛИЗАЦИИ ДЕТОНАТОРА РЕАКТИВНОГО СНАРЯДА С ПИКИРУЮЩЕЙ ТРАЕКТОРИЕЙ

*В статье рассмотрены принципы построения неконтактных датчиков на основе радиовысотомеров с линейно-частотной модуляцией. Рассмотрены различные виды структурных схем радиовысотомеров. Предложен критерий инициализации детонатора реактивного снаряда, имеющего задержку срабатывания, основанный на сравнении доплеровского сдвига частоты несущей и сдвига частоты ЛЧМ радиосигнала в радиовысотомере. Приведены расчетные графики, показывающие техническую реализуемость предложенного критерия.*

### Постановка задачи

Разработать способ инициализации детонатора реактивного снаряда, имеющего пикирующую траекторию полета и осевое вращение, на заданной высоте над подстилающей поверхностью.

Особенностью такого детонатора является многорежимный способ подрыва боевого заряда. Многорежимный неконтактный взрыватель должен обеспечивать следующие режимы работы: неконтактный режим с мгновенным воздушным подрывом боевого заряда на заданной высоте; неконтактный режим со срабатыванием детонатора, имеющего заданную задержку в пределах (0,01-0,1) секунд; контактный режим с мгновенным срабатыванием боевого заряда при ударе о поверхность; контактный режим с задержкой срабатывания детонатора боевого заряда на (0,01-0,1) секунды при ударе о поверхность [1].

Отдельным требованием является расширение нормативов пуска реактивного снаряда по скорости полета носителя, углу и высоте пуска реактивного снаряда.

Объектом исследования являются реактивные снаряды воздушного подрыва на расчетной высоте, имеющие детонатор с задержкой срабатывания в пределах (0,01-0,1) сек. Реактивный снаряд типа “воздух-поверхность” выпускается с борта авиационного носителя, оператор которого должен соблюдать допустимые нормативы пуска по высоте над поверхностью, по скорости носителя, по углу пуска.

### Основная часть

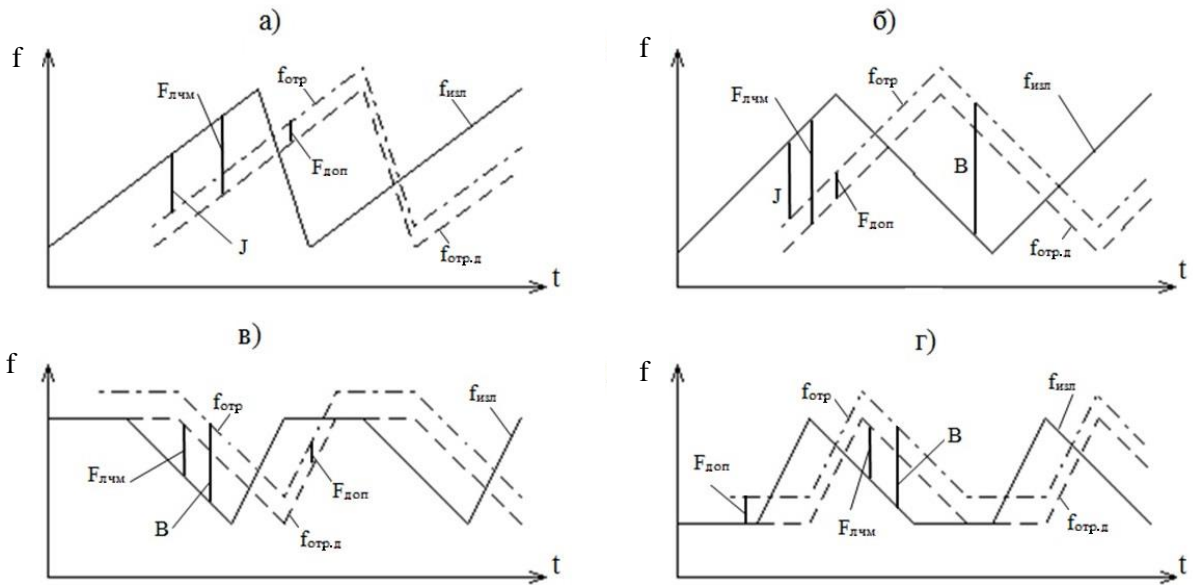
В качестве неконтактного датчика наиболее часто применяется автоматический радиовысотомер малых высот, радиосигнал которого использует линейную частотную модуляцию (ЛЧМ). Рассмотрим виды модулирующих сигналов, которые возможны для использования в радиовысотомерах, производящих непрерывный контроль высоты реактивного снаряда. Из наиболее применимых сигналов модуляции остановимся на сигналах со следующей формой:

- сигнал с пилообразной формой;
- сигнал с треугольной формой;
- сигнал с формой неравнобедренной трапеции;
- импульсный сигнал пилообразной формы со скважностью  $Q=2$ .

Частотно-временные зависимости ЛЧМ излучаемых и отраженных сигналов с указанными видами модулирующих сигналов приведены на рисунке 1.

Особенностью отраженного от подстилающей поверхности ЛЧМ сигнала радиовысотомера является наличие в нем составляющей  $F_{\text{лчм}}$  разностной частоты, обусловленной временной задержкой сигнала при прохождении двойного расстояния до поверхности (на рисунке 1 показана штриховой линией), а также  $F_{\text{доп}}$  доплеровского сдвига

частоты излучаемого сигнала, обусловленного величиной радиальной скорости снижения реактивного снаряда (на рисунке 1 показана штрих-пунктирной линией).



————— временная зависимость частоты излучаемого ЛЧМ сигнала;  
 - - - - - временная зависимость частоты отраженного сигнала без учета доплеровского сдвига несущей;  
 — . — . — временная зависимость полного отраженного сигнала .

а) пилообразная форма модулирующего сигнала; б) треугольная форма; в) сигнал с формой неравнобедренной трапеции ; г) пилообразная форма с  $Q=2$ ;  $f_{изл}$  — частота ЛЧМ сигнала, излучаемого передатчиком;  $f_{отр}$  — частота отраженного ЛЧМ сигнала с учетом эффекта Доплера;  $f_{отр.д}$  — частота отраженного ЛЧМ сигнала без учета эффекта Доплера;  $F_{лчм}$  — сдвиг частот излучаемого и принимаемого сигналов без учета эффекта Доплера;  $F_{доп}$  — сдвиг частот пропорциональный Доплеровскому; В — сдвиг частот излучаемого и принимаемого сигналов на нисходящем участке ЛЧМ сигнала; J — сдвиг частот излучаемого и принимаемого сигналов на восходящем участке ЛЧМ сигнала.

Рис.1 — Виды линейно-модулированных сигналов

Анализируя возможные формы модулирующих сигналов для ЛЧМ радиовысотомера можно отметить следующее:

а) модулирующий сигнал пилообразной формы (рис.1а), широко используемый в радиодальномерах, не может быть использован в всем частотном диапазоне из-за трудности разделения парциальных сдвигов разностной частоты  $F_{лчм}$  и  $F_{доп}$ . Такое разделение необходимо для раздельного измерения высоты полета и скорости снижения реактивного снаряда. Далее будет показана необходимость такого требования для расширения нормативных характеристик пуска.

б) модулирующий сигнал треугольной формы (рис. 1б) имеет хорошие предпосылки для разделения парциальных сдвигов  $F_{лчм}$  и  $F_{доп}$ . Это можно показать из видимых линейных соотношений:

$$\begin{aligned}
 B &= F_{лчм} + F_{доп}; \\
 J &= F_{лчм} - F_{доп}.
 \end{aligned}$$

Если измерить с помощью радиовысотомера полный разностный ЛЧМ сигнал на двух участках (восходящем и нисходящем) сформированного ЛЧМ сигнала, то можно видеть, что (рис.1б):

$$\begin{aligned}
 B &= F_{лчм} + F_{доп}; \\
 J &= F_{лчм} - F_{доп}.
 \end{aligned}$$

Дополнив вторичную обработку отраженного ЛЧМ сигнала преобразователем частота-напряжение, суммирующим и вычитающим устройствами, получим:

$$B + A = F_{\text{лчм}} + F_{\text{доп}} + F_{\text{лчм}} - F_{\text{доп}} = 2F_{\text{лчм}};$$

$$B - A = F_{\text{лчм}} + F_{\text{доп}} - F_{\text{лчм}} + F_{\text{доп}} = 2F_{\text{доп}};$$

и соответственно:

$$F_{\text{лчм}} = \frac{B + A}{2};$$

$$F_{\text{доп}} = \frac{B - A}{2}.$$

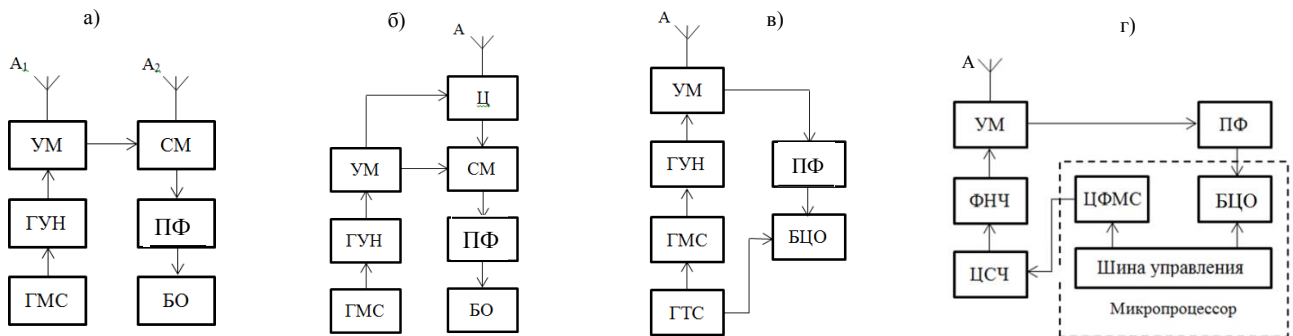
Последние два выражения показывают возможность вычисления парциальных составляющих разности излучаемого и отраженного радиосигналов.

в) модулирующий сигнал (рис.1в) вида неравнобедренной трапеции позволяет на участке с постоянной излучаемой частотой измерить только частотный сдвиг Доплера  $\Delta f_{\text{доп}}$ , а на участке с линейно-падающей частотой измерять  $F_{\text{лчм}} + F_{\text{доп}} = B$ . Преобразовав частотные сдвиги в пропорциональное высоте и скорости снижения напряжения, можно вычислить  $F_{\text{лчм}}$  и высоту в течение одного периода модуляции.

г) Наиболее оптимальной с точки зрения определения высоты и скорости снижения снаряда является пилообразная форма с заданной скважностью  $Q = \frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{длит}}}$ , где  $t_{\text{пер}}$  и  $t_{\text{длит}}$  — период и длительность импульса модулирующего сигнала,  $Q=N$  ( $N$ -любое число не равное 0).

Применяемый для измерения высоты и скорости снижения радиовысотомер с ЛЧМ сигналом относится к устройствам ближней радиолокации и построен по принципу излучения радиосигнала, приема отраженного от поверхности радиосигнала и обработки сигнала разности частот между излучаемым и задержанным радиосигналами за время распространения до и от поверхности.

Классические структуры такого радиолокатора представлены на рисунке 2а,б,в.



ГМС — генератор модулирующего сигнала; ГУН — генератор управляемый напряжением;  $A_1, A_2$  — передающая и приемные антенны; СМ — смеситель; ПФ — полосовой фильтр; БО — блок обработки; ГТС — генератор тактового сигнала; БЦО — блок цифровой обработки; ЦСЧ — цифровой синтезатор частоты; Ц — циркулятор.

Рис. 2 — Структурные схемы радиовысотомеров.

Структура, показанная на рис.2а, содержит передающую и приемную антенны, генератор СВЧ сигнала управляемый напряжением, усилитель мощности, генератор модулирующего сигнала, смеситель приемного канала, полосовой фильтр, выделяющий разностную частоту излучаемого и принимаемого радиосигналов, блок обработки, выделяющий напряжение пропорциональное сдвигу ЛЧМ сигнала и сдвигу сигнала доплеровской частоты. Порог срабатывания неконтактного датчика на заданной высоте с

учетом задержки детонатора (или без таковой) определяется расчетной частотой полосового фильтра.

Недостатками этой структуры являются конструктивная возможность просачивания СВЧ радиосигнала из передающей антенны в приемную, а также наличие двух антенн. Этих недостатки нет на структуре рис. 2б, где излучаемый и отраженный сигналы совмещаются в одной антенне, но разделяются в циркуляторе Ц по трактам передачи и приема радиосигнала. В этой структуре только одна антенна, но появился дорогостоящий циркулятор.

Учитывая необходимость минимальной стоимости радиовысотомера как устройства разового пользования в радиовзрывателе реактивного снаряда, наиболее оптимальной является так называемая автодинная структура радиовысотомера, показанная на рис 2в [2,3]. Это наиболее экономичная структура содержит СВЧ-генератор ЛЧМ-радиосигнала, совмещенный с преобразователем частот прямого и отраженного сигналов. Сигнал разностной частоты, обусловленный нелинейностью характеристик усилителя мощности выделяется полосовым фильтром и обрабатывается в блоке цифровой обработки, который синхронизируется во времени с генератором модулирующего сигнала, имеющего форму пилообразного импульса с  $Q=2$  (рис. 1г), посредством тактового генератора.

Учитывая достоинства современных методов цифровой обработки сигналов предлагаем следующую структуру неконтактного датчика радиовзрывателя, представленную на рис 2г. Она содержит микропроцессор, на базе которого выполнены блок цифровой обработки и формирователь модулирующего сигнала, что дает ему преимущество ввиду меньших габаритов и большей универсальности ввиду наличия возможности упрощенной настройки, как формы сигнала, так и критерия срабатывания, а также возможность программного выбора различных способов обработки.

Структуры, использующие форму модулирующего сигнала вида, показанного на рис 2в и г, позволяют измерять поочередно в один тактовый период частоту временного сдвига излучаемого и отраженного радиосигналов и частоту доплеровского сдвига. При этом парциальная частота временного сдвига ЛЧМ определяется разностью  $F_{лчм} = V - F_{доп}$ .

Таким образом, имеем два информативных параметра  $F_{лчм}$  и  $F_{доп}$ , соответственно пропорциональных высоте над поверхностью и скорости снижения реактивного снаряда. Появляется возможность предложить новый критерий воздушного подрыва боевого заряда на заданной высоте. Таким критерием может быть равенство или заданная пропорция парциального сдвига частот, обусловленного только временным сдвигом частоты ЛЧМ сигнала и доплеровского частотного сдвига:

$$F_{доп} = \frac{F_{лчм}}{N},$$

где  $N=1,2,3\dots$

Рассмотрим случай, когда в качестве критерия инициации детонатора снаряда на заданной высоте используется равенство доплеровского сдвига частот и парциального сдвига частот, обусловленного только временным сдвигом ЛЧМ радиосигнала  $F_{доп}=F_{лчм}$  ( $N=1$ ).

Для определения технических параметров такого критерия необходимо измерять радиовысотомером парциальную частоту доплеровского сдвига и полную разностную частоту излучаемого и отраженного ЛЧМ радиосигнала. Отметим, что на временной точке отсчета (рис.1) разностных частот при заданных условиях пуска и частоте радиосигнала доплеровский сдвиг частот не может быть подвержен управлению, в то же время как временным сдвигом частот ЛЧМ радиосигнала можно управлять путем изменения его крутизны.

Поэтому предварительно расчетным путем необходимо найти величину крутизны на возрастающем участке модулированного ЛЧМ сигнала при эффективной дальности пуска снаряда. Примем  $L_{эф}=2000$ м. Расчет произведем по известному соотношению [4]:

$$F_{доп} = \frac{2V_{сп} \cdot f_0}{c},$$

где  $V_{сп}$  — скорость снижения снаряда;  $f_0$  — рабочая частота радиовысотомера ( $f_0=3$  ГГц);  $c$  — скорость света ( $c=300000$  км/с).

$$F_{доп} = \frac{2 \cdot 227,093 \cdot 3 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8} = 4,54 \text{ (кГц)}$$

Рассчитаем крутизну управления ЛЧМ сигнала для выполнения равенства:

$$F_{доп} = F_{ЛЧМ} = 4,54 \text{ (кГц)}.$$

Время прихода отраженного от поверхности ЛЧМ радиосигнала определяется как:

$$t_{Эхл} = \frac{2H_{п0}}{c} = \frac{2 \cdot 14}{3 \cdot 10^8} = 9,33 \cdot 10^{-8} \text{ (с)},$$

где  $H_{сп}$  — расчетная величина высоты инициализации детонатора (например,  $H_{сп}=14$  м).

Откуда крутизна управления ЛЧМ сигналом должна быть равна:

$$g_{\alpha\delta} = \frac{F_{Эхл}}{t_{Эхл}} = \frac{4,54 \cdot 10^3}{9,33 \cdot 10^{-8}} = 4,86 \cdot 10^{10} \text{ (Гц/с)}$$

Расчет показывает возможность технической реализации радиовысотомера с такими параметрами.

Основанием для выбора такого критерия является обнаруженный нами эффект автокоррекции высоты подрыва при изменении скорости полета снаряда в приповерхностной области из-за трудности выполнения нормативных значений угла и высоты пуска, скорости носителя и т.п. Покажем сущность этого эффекта. При увеличении угла падения реактивного снаряда скорость снижения на конечном участке его траектории увеличится (при сохранении других параметров пуска). Это приведет к автоматическому увеличению высоты подрыва для выполнения критерия равенства высоты и скорости снижения снаряда.

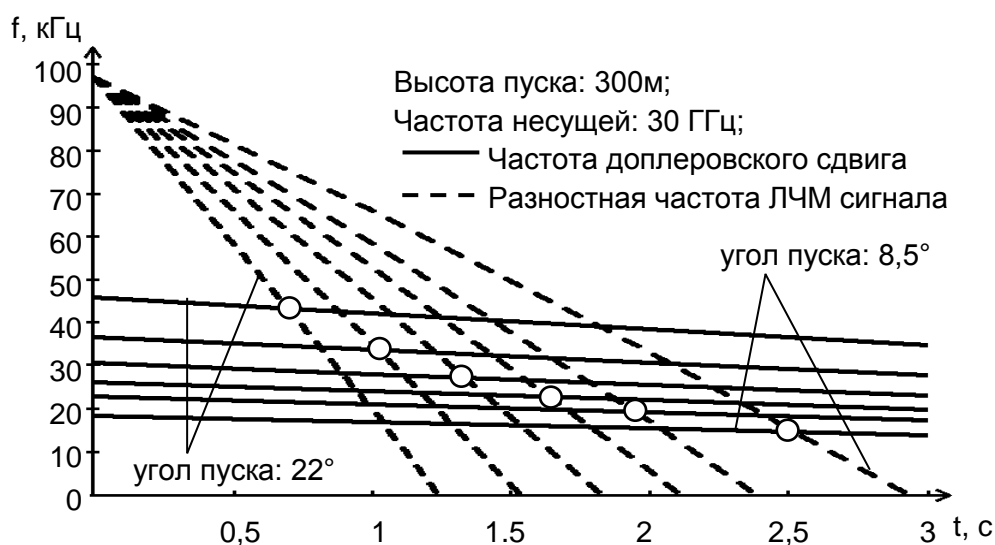


Рисунок 3. Графики расчетных зависимостей Доплеровского сдвига частоты и временного сдвига частоты, пропорционального разностной частоте ЛЧМ сигнала.

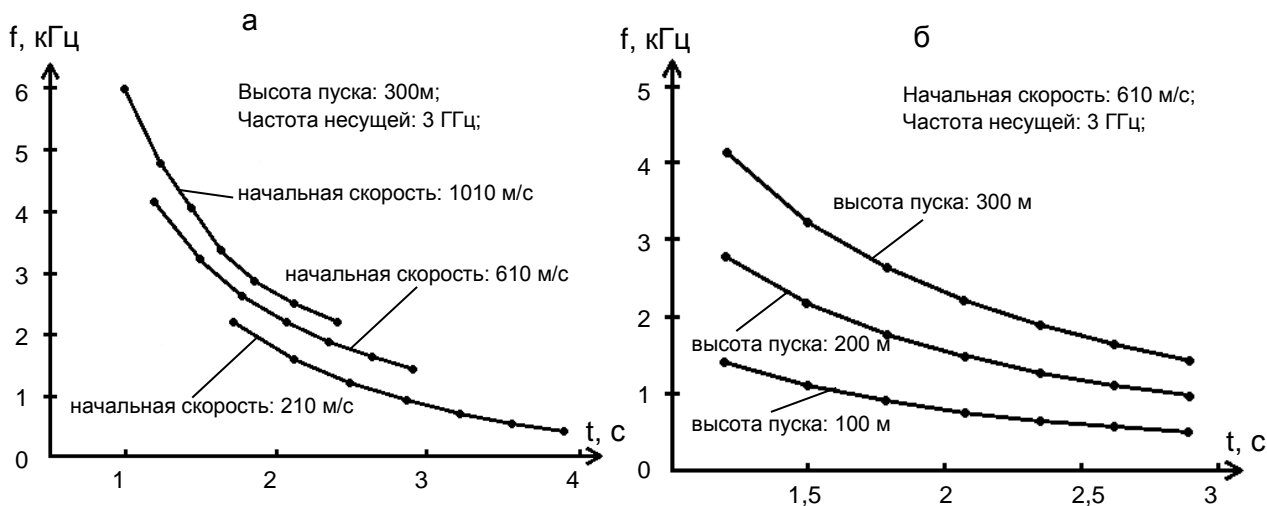


Рисунок 4. Графики расчетных зависимостей выполнения критерия  $F_{\text{доп}} = F_{\text{лчм}}$ : а) для различных начальных скоростей пуска реактивного снаряда; б) для различных высот пуска.

Этот факт можно подтвердить расчетными графиками зависимости частотных сдвигов частоты Доплера и временного сдвига частот отраженного и излучаемого радиосигналов, обусловленного только парциальным сдвигом частоты ЛЧМ радиосигнала. На рис.3 приведены графики расчетов парциальных сдвигов частот при рабочей частоте радиовысотомера  $f_c = 30 \text{ ГГц}$ . Точками пересечения показано условия выполнения критерия  $F_{\text{доп}} = F_{\text{лчм}}$ . Из графиков видно, что при увеличении угла пикирования скорость снижения снаряда в приповерхностной области увеличивается и увеличивается высота инициализации детонатора.

На графиках рис.4а,б показаны зависимости критерия  $F_{\text{доп}} = F_{\text{лчм}}$  для различных начальных скоростей пуска и для различных высот пуска, которые подтверждают наличие эффекта автокоррекции высоты инициализации детонатора реактивного снаряда для его подрыва на заданной высоте.

Приведенная методика и пример расчета технических параметров радиосигнала для выполнения заданного критерия позволяют рассчитать значения сдвигов частоты Доплера и отраженного ЛЧМ сигналов для вновь разрабатываемых малокалиберных снарядов различного вида и определить возможность их технической реализации.

### Заключение

Рассмотрены формы ЛЧМ сигналов и структурные схемы радиовысотомеров. Предложен критерий инициализации детонатора реактивного снаряда, имеющего задержку срабатывания, основанный на сравнении доплеровского сдвига частоты несущей и временного сдвига частоты ЛЧМ радиосигнала в радиовысотомере. Обоснованием использования такого критерия является появление эффекта автокоррекции высоты воздушного подрыва при расширении нормативов пуска реактивного снаряда. Показана методика расчета технических параметров радиовысотомера для реализации предложенного критерия. Приведены графики расчетных зависимостей доплеровского и временного сдвигов частоты для выполнения условия  $F_{\text{доп}} = F_{\text{лчм}}$ .

#### Список использованных источников

1. «Принципы действия радиовзрывателя. Возможные способы его согласования с боевой частью» [[https://studopedia.ru/3\\_161936\\_principi-deystvia-radiovzrivatelya](https://studopedia.ru/3_161936_principi-deystvia-radiovzrivatelya)].
2. Вотропин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч.1. //Успехи современной радиоэлектроники. 2009, № 3. С. 3-50.
3. Комаров И.В., Смольский С.М. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний. М.: Горячая линия. Телеком. 2010.
4. Забеньков И.И., Солонович С.С., Исакович Н.Н., Забеньков А.И. Расчет и обоснование критерия инициализации на заданной высоте неконтактного датчика летательного аппарата с задержкой срабатывания. Вестник Военной Академии РБ (в печати).