

## **Измерительный комплекс для исследования рабочего процесса наземных пусковых устройств**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*

Приведена классификация основных методов испытаний наземных пусковых устройств с помощью контактных и бесконтактных датчиков. Сделан вывод о перспективности использования бесконтактных методов определения динамических характеристик на начальных стадиях испытаний. Рассмотрены оптические датчики положения: баллистическая трасса в составе оптопар, триангуляционный лазерный дальномер и датчик с прерыванием оптического канала. Проанализирован состав виртуального измерительного комплекса, включающего в себя датчик измеряемой физической величины, электронную вычислительную машину (ЭВМ), устройство сопряжения датчика с ЭВМ и программное обеспечение. Представлен облик спроектированного и изготовленного измерительного комплекса для исследования рабочего процесса наземной катапульты в составе бесконтактного датчика положения.

**Ключевые слова:** наземное пусковое устройство, беспилотный летательный аппарат, контактные и бесконтактные датчики, измерительный комплекс.

### **Введение**

На начальных стадиях испытаний вновь разрабатываемого наземного пускового устройства (НПУ, катапульты) критичным вопросом является определение стартовой перегрузки, действующей на запускаемый беспилотный летательный аппарат (БЛА). Измерение мгновенных динамических характеристик НПУ (скорости, ускорения) в одной точке направляющей (например, в момент схода БЛА) может дать неверное представление о динамике разгона БЛА. Такие неполные сведения могут фатальным образом отразиться на дальнейшем продолжении всей программы по разработке беспилотного авиационного комплекса (БАК). Таким образом, актуальной является задача получения закона распределения тягового усилия (перегрузки) по всей длине направляющей или в установленных реперных точках с определенным шагом.

Установка бортового самописца на запускаемый при испытаниях груз-макет (эквивалентный по массе БЛА) нецелесообразна с экономической точки зрения, так как при этом необходимо полностью воссоздавать дорогостоящую авионику [1], которая может выйти из строя в результате бросковых испытаний. Таким образом, речь идет об автономном измерительном комплексе, ориентированном на выполнение ряда узкоспециализированных задач – измерения динамических характеристик на участке направляющей.

В данной статье впервые представлен теоретически и экспериментально обоснованный подход к определению динамических характеристик при старте БЛА с поверхности на основе бесконтактного определения положения объекта на направляющей НПУ оптическими методами, а также приведен облик спроектированного и разработанного измерительного комплекса.

### **Характеристики объекта исследования**

Существует широчайшее многообразие систем ввода в полет БЛА наземного, авиационного и морского базирования, однако все они имеют сходные конструктивные узлы: направляющую, привод, трансмиссию, источник энергии и

тележку с БЛА. Конструктивные узлы изображены (на примере пневматического НПУ Р12П с БЛА РМ130У на стартовой позиции) в виде структурной схемы на рис. 1. В свою очередь, каждый конструктивный узел может иметь различное устройство в зависимости от физического принципа создания тяги, но коренным образом их назначение не меняется. На рис. 2 показана классификация НПУ по признаку создания тягового усилия.



Рис. 1. Структура НПУ на примере катапульты Р12П с БЛА РМ130У

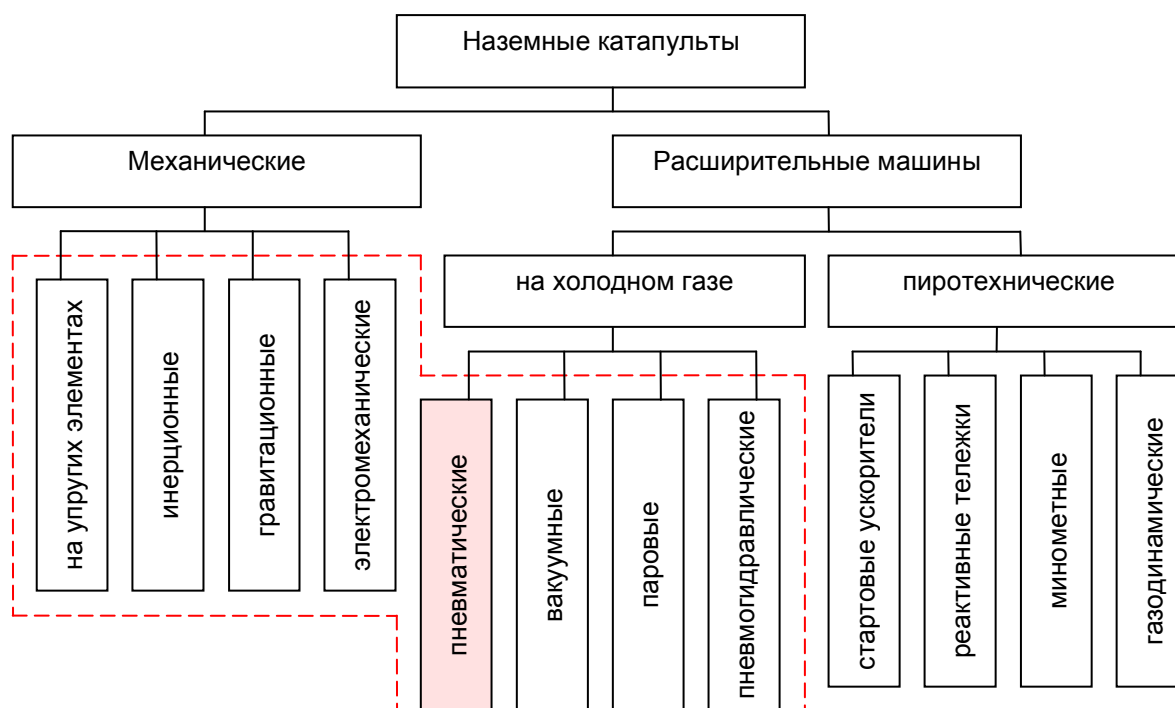


Рис. 2. Классификация НПУ

При использовании НПУ для ввода в полет БЛА в широком диапазоне стартовых масс (от 25 до 250 кг) необходимо применять приводы различной мощности на различном рабочем теле (холодном или горячем), которые имеют разительные отличия в характерных параметрах динамики старта. Поэтому первичными сведениями для формирования облика измерительного комплекса являются присущие объекту исследования динамические характеристики (таблица).

Так, механические приводы и расширительные машины на холодном рабочем теле в основном отличаются незначительной напряженностью рабочего процесса, характерной для гражданских транспортных систем (нижний предел диапазона), в то время как пиротехнические НПУ обладают имманентно

присущими свойствами артиллерийских систем (верхний предел диапазона) и, кроме всего прочего, могут создавать значительное температурное поле и задымленность.

Катапультам с двух- или трехсекционной раскладной направляющей (например, ADLR-021 – «Adcom», MC2555LR – «Robonic», КГМ-9С, КГМ-6С, КП-3С – «Взлет») присущи сильные изгибы балки направляющей под действием сжимающего усилия, передающегося посредством гибкой трансмиссии (полиспастового механизма). Кроме того, в случае пиротехнического старта БЛА наблюдаются интенсивные колебания тонкостенной оболочки – транспортно-пускового контейнера. Высокая скорость вращения роликов стартовой тележки (за исключением динамического старта, где используют бугели) по металлической поверхности направляющей вызывает вибрации всей конструкции.

Предварительный эксперимент с  $n=12$  измерениями временных интервалов  $\tau_i$  позволил определить среднеквадратичное отклонение  $\sigma=0,14$ . В соответствии с поставленной задачей требуемую точность измерений назначим  $\Delta=0,07$  с. При установленном значении доверительной вероятности  $P=0,9109$  гарантийный коэффициент составит  $t=1,7$ . Отсюда минимальное число измерений (количество датчиков на направляющей) получим  $n_{\min}=12,27$ .

#### Диапазон изменения характерных параметров НПУ известных типов

Характеристики НПУ и единицы измерения	Численное значение
Длина направляющей, м	3...20
Средняя перегрузка, ед.	4...10
Скорость схода БЛА, м/с	15...50
Время процесса, с	0,2...0,4
Температура в расширительной машине, К	300...3000
Концентрация продуктов неполного сгорания, %	0...100
Негативные факторы рабочего процесса: изгиб балки направляющей, вибрация	

В связи с описанными особенностями НПУ вытекает ряд требований к датчикам для измерения динамических характеристик: инвариантность к изгибу направляющей, вибрации балки, температурному полю и задымленности. По причине низкой вариативности законов изменения тягового усилия НПУ вдоль направляющей (прогрессивного, регрессивного и постоянного) и отсутствии рывковых режимов работы (с изменением направления движения тележки), характер распределения усилия представляется возможным определить на основании 12 отсчетов измеряемого параметра.

На рис. 2 пунктирной линией выделен класс объектов, к которым могут быть применены бесконтактные методы измерения динамических характеристик – это все типы НПУ за исключением систем пиротехнического старта (из-за значительной задымленности стартовой позиции). В частности, разработанный измерительный комплекс применяли на НПУ с пневматическим приводом (область выделена цветом на рис. 2).

#### Классификация датчиков

Принципиальная возможность измерения характеристик движения БЛА по направляющей не ограничивается традиционно ассоциированными с НПУ

датчиками ускорения [2]. Эти характеристики могут быть получены любыми другими датчиками положения или скорости с последующим интегрированием либо дифференцированием измеренного параметра. В настоящее время существует широкое многообразие всевозможных датчиков с различными физическими принципами измерения. Работа датчиков основана на фиксации физического поля определенного спектра излучения (оптического, электромагнитного, акустического), изменение которого вызвано перемещением объекта в пространстве. Однако в рамках данной статьи основным классификационным признаком следует считать наличие механического контакта между датчиком и внешним подвижным объектом (рис. 3).

Контактными методами измерения динамических характеристик НПУ называются методы, в которых чувствительный элемент связан с подвижным объектом. При этом устройство сопряжения датчика и ЭВМ (аналого-цифровой преобразователь – АЦП), а также модуль регистрации сигнала (твердый Flash Drive накопитель) могут размещаться на борту или быть стационарными. Основой бесконтактных методов является стационарный датчик, располагаемый отдельно от объекта измерения, что позволяет использовать неподвижную систему приема и обработки сигнала [3].

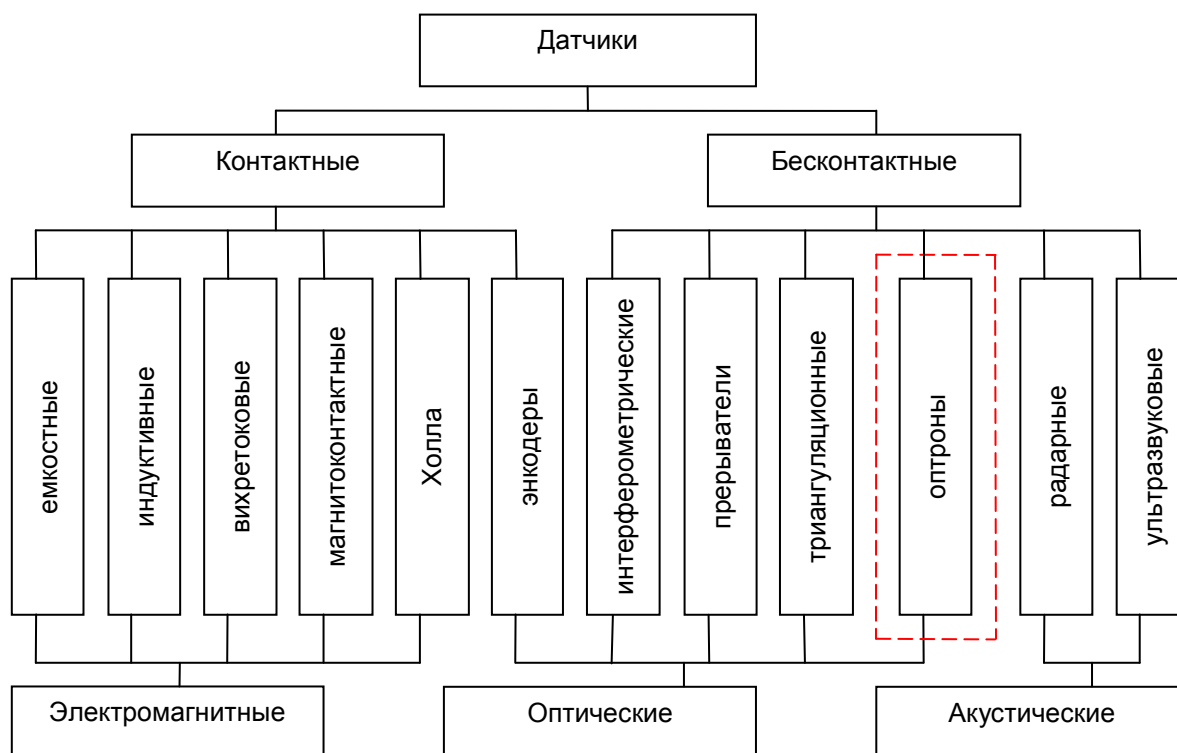


Рис. 3. Типы датчиков для измерения динамических характеристик НПУ

### Обоснование выбора способа измерения

Контактный датчик вместе с системой регистрации размещается на запускаемом грузе и после схода БЛА с направляющей продолжает свой полет до момента падения. Необходимость спасения оборудования и полученной информации требует специального усиленного корпуса и системы демпфирования, что делает его более тяжелым и вносит погрешности в измерения, особенно при запуске легких БЛА (до 25 кг).

Кроме того, существует способ передачи данных с контактного датчика (например, пьезоэлектрического акселерометра) стационарному АЦП посредством кабеля. В этом случае независимо от длины направляющей необходимо использовать механизм подтягивания кабеля. Однако при высоких скоростях перемещения в пространстве кабель работает как линейный двигатель, что вызывает несовместимые с допустимой точностью эксперимента наводки. Экранирование кабеля делает его тяжелым и также вносит погрешность в эксперимент, особенно при незначительной массе запускаемого груза.

Несмотря на возможность измерения положения объекта с высокой точностью в широких диапазонах перемещения, контактные датчики очень чувствительны к вибрации и порой не позволяют выделить то отклонение параметра, которое возникло в результате смещения объекта, а не вибрации. В связи с тем, что исследуемая катапульта не является пиротехнической, но обладает значительной мощностью, предлагается использовать бесконтактные оптические методы измерения. Область научного интереса данной статьи сводится к изучению датчиков, выделенных на рис. 3 пунктирной линией.

Увеличение количества отсчетов по данной методике достигается размещением дополнительных датчиков на дистанции. Подобные системы широко и успешно применяются в области трасологии и криминалистики [5], например, баллистическая трасса, лазерный дальномер и т. д.

### **Бесконтактные оптические датчики положения**

В основе рассматриваемого в статье бесконтактного оптического датчика лежит принцип определения положения стартовой тележки с БЛА в конкретной точке направляющей путем вычисления времени между размыканием электрической цепи, которое происходит в момент прохождения между блокирующими устройствами движущегося объекта. Таким образом, речь идет о дискретном методе определения характеристик (см. рис. 4, 5), в которых количество отсчетов измерений равно числу фотоэлементов.

Широко применяемая в трасологии «баллистическая трасса» (рис. 4) состоит из ряда оптических прерывателей (оптронов, оптопар), расположенных вдоль направляющей. Расстояние между блокирующими устройствами заранее известно, что позволяет, зная момент размыкания цепи, определить скорость движения объекта. Недостаток системы заключается в размещении множества оптопар вдоль направляющей, что создает трудности, связанные с монтажом датчиков и приемников.

Фильтрация лишних шумов осуществляется применением фотоэлементов (светодиодов, лазерных диодов и фототранзисторов), работающих в инфракрасном спектре излучения с длиной волны 940 нм. Непосредственная подача сигналов от фотоэлементов на вход измерительного комплекса недопустима из-за многократного и неконтролируемого замыкания цепи, поэтому в состав датчиков должен входить формирователь импульсов нормированной длины.

Оптические прерыватели баллистической трассы состоят из ИК-излучателей (светодиодов) и ИК-приемников (фототранзисторов), выполненные в виде отдельных элементов для удобства настройки на различную ширину направляющей (рис. 5). Датчики соединяются между собой с помощью зажимных клеммников в «гирлянду», количество которых в цепи может варьироваться в зависимости от требований к числу отсчетов измерений.

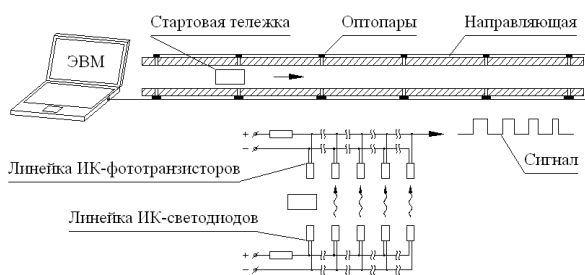


Рис. 4. Принципиальная схема работы баллистической трассы в составе оптопар

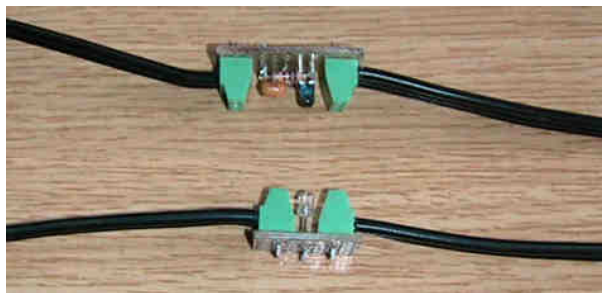


Рис. 5. Опытный образец датчиков баллистической трассы на основе оптопар

### Измерительный комплекс

Проведение измерений динамических характеристик НПУ по описанной выше методике упрощает вид системы регистрации сигналов: отпадает потребность в АЦП в связи с необходимостью регистрации импульсных сигналов заданной формы без необходимости определения их амплитуды.

По этой причине аппаратная часть комплекса построена на основе хост-контроллера DC'97 звуковой карты Realtek AC'97 [7] и предназначена для использования совместно с ЭВМ класса Pentium. Для работы с командами кодека используются API-функции стандартной библиотеки обработки звука mmSystem в среде операционной системы Microsoft Windows. Подобный подход вполне правомочен и широко используется для проведения стендовых исследований различных установок [8].

В процессе исследования комплекса в среде алгоритмического языка Delphi был разработан авторский программный продукт, обеспечивающий: наблюдение на экране виртуального осциллографа поведения измеряемых величин в виде отсчетов; получение в размерном виде значений измеряемых величин с привязкой по времени; сохранение в реальном масштабе времени отсчетов измеряемых величин. На рис. 6 показана функциональная схема измерительного комплекса.

На рис. 7 изображена копия экрана программы с результатами измерений временных интервалов при прохождении объектом фиксированных линейных участков на направляющей. На диаграмме видны всплески при разрядке и последующей зарядке конденсатора в момент затенения ИК-фотоэлементов. Временной интервал определяется между первыми пиками, имеющими отрицательное значение амплитуды, второй положительный пик не учитывается. Максимальное опорное напряжение и напряжение питания цепи датчиков составило 0,5 и 5 В соответственно.

### Натурные испытания

Комплекс использовался для измерений динамических характеристик при бросковых испытаниях груза-макета с помощью катапульты Р12П производства НПФ «Ротор» (г. Тольятти) на начальных стадиях разработки, которые проходили под руководством директора предприятия К. В. Мигалина. В дальнейшем результаты измерений сопоставлялись с показаниями штатного бортового самописца БЛА РМ130У при пробных полетах.

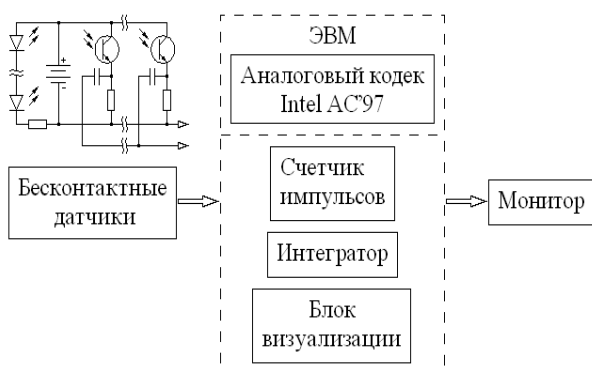


Рис. 6. Функциональная схема измерительного комплекса

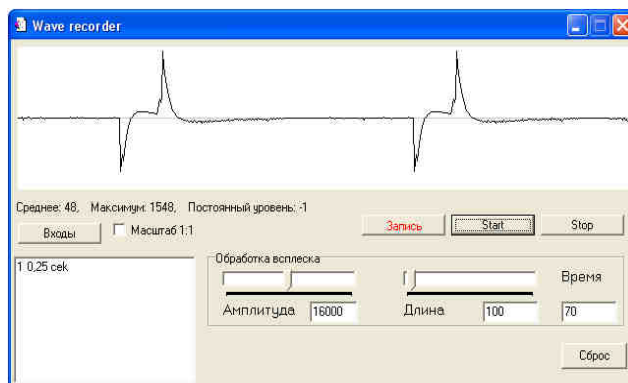


Рис. 7. Диалоговое окно программного продукта для обработки сигналов бесконтактных датчиков

Пневматическое НПУ Р12П (рис. 1) имеет направляющую длиной 12 м и обеспечивает разгон БЛА массой 120 кг до скорости 50 м/с с перегрузкой 11 g. В связи со значительной силовой нагрузкой на конструкцию (усилие привода – около 5 т) и, как следствие, изгибом направляющей для измерений использовали баллистическую трассу в составе оптопар.

Датчики на направляющей размещали с регулярным шагом 1 м. С помощью оптопар были определены значения времени нахождения груза-макета в различных точках направляющей  $\tau_i$ . На основе на этой информации, при известных значениях шага расположения датчиков были рассчитаны значения скорости  $V_i$ , а по ним установлен закон действующего на аппарат ускорения  $a_i$ . Результатом испытаний стали циклограммы перегрузки и скорости БЛА вдоль направляющей (рис. 8 и 9), состоящие из 12 значений (по числу датчиков  $i = 1...12$ ).

Применяемый на поздних стадиях испытаний бортовой самописец БЛА, позволяющий сделать 15 отсчетов перегрузки (пунктирная линия на рис. 8 и 9), незначительно улучшает представление о динамике разгона, но заметно усложняет измерительный комплекс и увеличивает его стоимость на порядок.

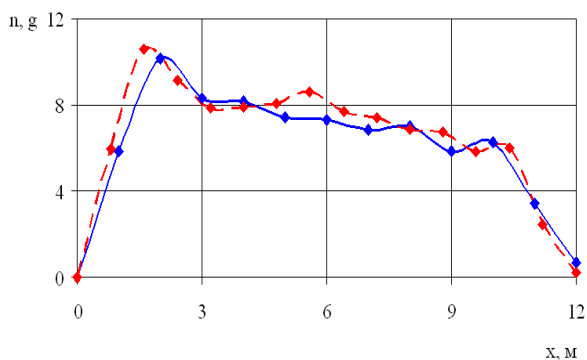


Рис. 8. Изменение стартовой перегрузки при разгоне

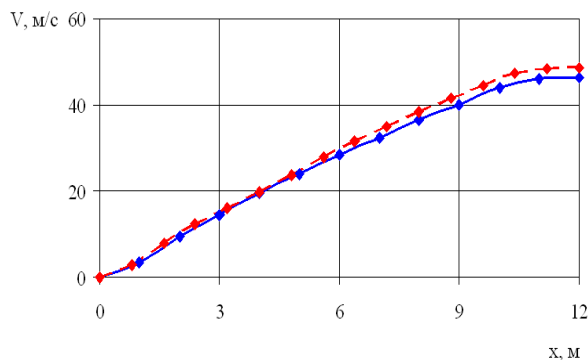


Рис. 9. Динамика набора скорости БЛА на направляющей

### Заключение

Бесконтактные методы определения динамических характеристик оказываются предпочтительнее в связи с простотой технологической реализации. Кроме того, стоимость регистрирующих фотоэлементов на порядок меньше стоимости контактных акселерометров и датчиков скорости.

В связи с тем, что количество оптических датчиков ограничено, бесконтактные методы относятся к дискретным методам определения динамических характеристик, поэтому могут применяться только на начальных этапах испытаний как альтернатива затратным контактным методам измерения.

Выражаясь терминами баллистики, бесконтактные методы испытаний НПУ позволяют определять динамические характеристики БЛА только на внутрибаллистическом участке траектории (при движении по направляющей, где установлены оптопары), что ограничивает их широкое использование.

### Список литературы

1. Корнилов, А. В. Система ориентации летательного аппарата на интегральных датчиках [Текст] / А. В. Корнилов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева, 2010. – № 4 (83). – С. 327-332.

2. Конюхов, С. Н. Минометный старт межконтинентальных баллистических ракет [Текст] / П. П. Логачев, С. Н. Конюхов. – Дп.: НАН, НКАУ, Ин-т техн. механ., 1997. – 212 с.

3. Литвин, А. М. Бесконтактные датчики положения: емкостные, индуктивные, оптические [Текст] / А. М. Литвин // ПиКАД, 2004. – № 1. – С. 18-23.

4. Коломийцев, А. В. Метод расчетного и экспериментального определения облика снаряда специального назначения с заданными аэродинамическими свойствами: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.01; защ. 05.06.05; утв. 14.12.05 / Коломийцев Александр Викторович. – Х., 2005. – 234 с.

5. Патент Украины на полезную модель № 87062, МКП G01B 11/00. Бесконтактный лазерный датчик положения стартового візка наземної катапульти / автор патента: Серета В. А.; заяв. и патентовлад.: Нац. аэрокосм. ун-т Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – У 2013 07273; под.: 10.06.2013; утв.: 27.01.2014. Бюл. № 2. – 3 с.: ил.

6. Бирюков, С. А. Цифровые устройства на МОП-интегральных микросхемах [Текст] / С. А. Бирюков. – М.: Радио и связь, 1990. – Вып. 1132. – 129 с.

7. Realtek ALC655. Six Channel AC'97 2.3 Audio Codec. Data Sheet [Text] / Realtek Semiconductor Corp. – Rev. 1.10. 14 March 2005. – P. 41.

8. Амброжевич, А. В. Аппаратно-программный инструментарий исследования рабочих процессов пульсирующих воздушно-реактивных двигателей [Текст] / А. В. Амброжевич, И. П. Бойчук, В. Ю. Силевич // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 2 (49). – С. 55-59.

Поступила в редакцию 28.10.2015



## **Вимірювальний комплекс для дослідження робочого процесу наземних пускових пристроїв**

Наведено класифікацію основних методів випробувань наземних пускових пристроїв за допомогою контактних й безконтактних датчиків. Зроблено висновок про перспективність використання безконтактних методів визначення динамічних характеристик на початкових стадіях випробувань. Розглянуто оптичні датчики положення: балістичну трасу у складі оптопар, триангуляційний лазерний далекомір і датчик з перериванням оптичного каналу. Проаналізовано склад віртуального вимірювального комплексу, що містить у собі датчик вимірюваної фізичної величини, електронну обчислювальну машину (ЕОМ), пристрій сполучення датчика з ЕОМ і програмне забезпечення. Подано вигляд спроектованого і виготовленого вимірювального комплексу для дослідження робочого процесу наземної катапульти у складі безконтактного датчика положення.

**Ключові слова:** наземний пусковий пристрій, безпілотний літальний апарат, контактні та безконтактні датчики, вимірювальний комплекс.

## **Measuring Complex for Research Workflow Ground Launching Devices**

The classification of the main methods of testing ground launching devices using contact and non-contact sensors. It is concluded that the prospects of using contactless methods for determining the dynamic characteristics of the initial stages of testing. The optical encoders: ballistic track composed optocouplers, triangulation laser range sensor and interrupt the optical channel. Analyzed the virtual measuring complex includes sensors measured physical quantities, electronic computer (PC), the sensor interface device with a computer and software. Submitted appearance designed and manufactured for measuring complex working process comprising ground catapult contactless position sensor.

**Keywords:** ground launching device, unmanned aerial vehicle, proximity detector, ballistic trace, triangulation laser rangefinder.