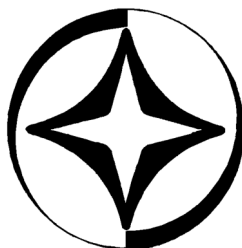


# XXIX САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИНТЕГРИРОВАННЫМ НАВИГАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ



30 мая – 1 июня 2022

---

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, РОССИЯ

**ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:**

- МЕЖДУНАРОДНОЙ ОБЩЕСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ «АКАДЕМИЯ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ» (АНУД)
- НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИТМО, РОССИЯ
- ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРОВ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ – ОБЩЕСТВА АЭРОКОСМИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ (IEEE – AESS)
- ФРАНЦУЗСКОГО ИНСТИТУТА НАВИГАЦИИ (IFN)
- НЕМЕЦКОГО ИНСТИТУТА НАВИГАЦИИ (DGON)
- КИТАЙСКОГО ОБЩЕСТВА ИНЕРЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ (CSIT)
- ЖУРНАЛА «ГИРОСКОПИЯ И НАВИГАЦИЯ», РОССИЯ

# Разработка системы автоматизированного управления парашютной грузовой платформой на базе инерциального модуля ГКВ-6

А.А. Галкин  
ООО Лаборатория Микроприборов  
г. Москва, Россия  
alexgalkin.jr@gmail.com

А.С. Тимошенков  
ООО Лаборатория Микроприборов  
г. Москва, Россия  
at@mp-lab.ru

П.В. Еркин  
Национальный исследовательский университет МИЭТ  
г. Москва, Россия  
pashaerkin@yandex.ru

В.П. Захаров  
Национальный исследовательский университет МИЭТ  
г. Москва, Россия  
valerazahal@yandex.ru

Н.А. Соломкина  
ООО Лаборатория Микроприборов  
г. Москва, Россия  
nsolomkina@mp-lab.ru

Е.С. Кочурина  
ООО Лаборатория Микроприборов  
г. Москва, Россия  
ekochurina@mp-lab.ru

**Аннотация**—Статья посвящена разработке системы автоматического управления планирующей парашютно-грузовой платформой (САУ ПГП). Разработана конструкция модуля грузоподъемностью до 240 кг, а также программно-математическое обеспечение, позволяющее осуществлять автоматическое наведение системы для посадки в заданной точке по комплексированным данным инерциального модуля ГКВ-6 и ГНСС. Предусмотрена также дублирующая система дистанционного управления. Изготовлен образец САУ ПГП и проведены его лётные испытания.

**Ключевые слова**—МЭМС, ГНСС, система автоматического управления, парашютно-грузовая платформа, инерциальная навигационная система, фильтр Калмана.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из применений инерциальных навигационных систем (ИНС) на МЭМС-датчиках является использование в системах автоматического управления беспилотными модулями, обеспечивающих точную доставку груза, сбрасываемого с парашютом, в заданную точку. ООО «Лаборатория микроприборов» совместно с институтом НМСТ Национального Исследовательского Университета МИЭТ и ООО «ПараАвис» в настоящий момент занимаются инициативной разработкой управляемой планирующей парашютно-грузовой системы (УППГС), автоматическое управление которой осуществляется по комплексированным данным ИНС ГКВ-6 и приемника сигнала ГНСС.

## II. Задача доставки груза в условиях сложного рельефа

В условиях сложного рельефа местности зачастую необходимо точное наведение десантируемого груза в заданные координаты. Однако в процессе снижения груз подвергается непредсказуемым внешним воздействиям, главным образом, ветра. Для наведения груза в заданную точку могут быть использованы различные подходы: дистанционное радиоуправление, использование радиомаяка в точке посадки или обозначение точки посадки световым сигналом. Кроме того возможно применение более высокотехнологичных методов: использование системы ГНСС или построение карты местности при помощи распознавания изображения камерой, установленной на десантируемом блоке.

Каждый из данных подходов имеет свои недостатки: одни требуют специальной подготовки места посадки, другие невозможно использовать в определенных условиях (невозможность работы в условиях плохой видимости для светового сигнала и системы распознавания изображения, невозможность работы в условиях высокого уровня помех для систем под управлением ГНСС).

## III. ИСТОРИЯ СИСТЕМ ПРЕЦИЗИОННОГО ПАРАШЮТИРОВАНИЯ

Практические исследования в области прецизионного парашютирования ведутся с 1980-х годов.

В Советском Союзе велись разработки дистанционно радиоуправляемых парашютно-грузовых систем, были разработаны и испытаны системы УПГС-500 (рис. 1) и УПГС-2000 [1].

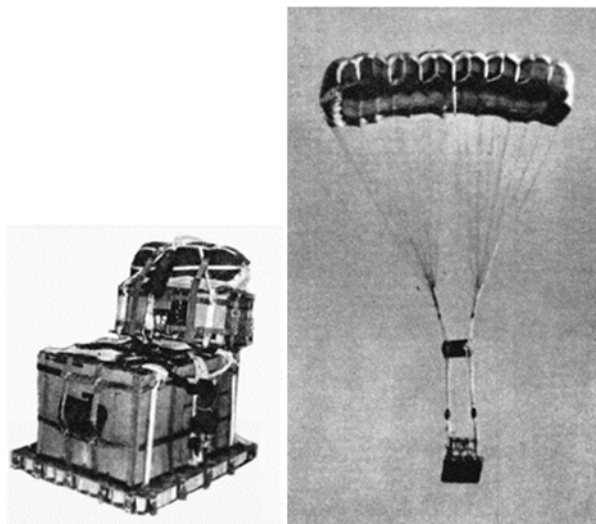


Рис. 1. УПГС-500 в уложенном виде и в полёте [1]

Первые серийные изделия, работающие в автоматическом режиме, относятся к середине двухтысячных, когда на рынке появились первые изделия американского проекта Joint-Precision-Airdrop-System (JPADS) [2] (рис. 2). В качестве системы наведения в данной серии была использована ГНСС, в качестве дополнительного источника данных использовалась карта ветров, построенная бортовым компьютером самолета [3].

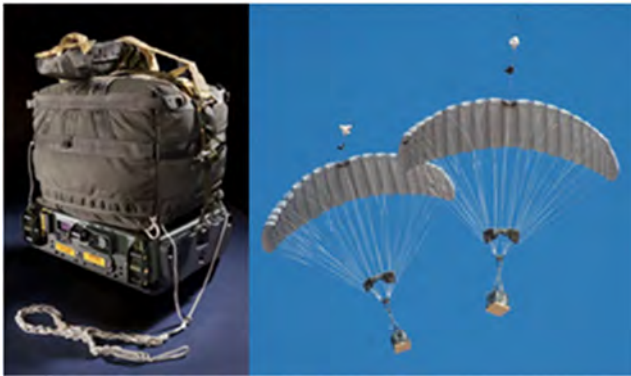


Рис. 2 Многоэтажная система серии JPADS в уложенном виде [2] и в полете [4]

В двухтысячных годах в США велась разработка нового поколения JPADS, которая не использовала ГНСС, а наводилась по визуальным ориентирам [4].

#### IV. СУЩЕСТВУЮЩИЕ НА РЫНКЕ СИСТЕМЫ АВТОПАРАШЮТИРОВАНИЯ

Несмотря на востребованность подобных систем, при анализе российского рынка было обнаружено лишь одно изделие такого типа ГОРИЗОНТАЛЬ-4000 [5]. Данная система находится на стадии испытаний и предназначена для доставки грузов массой от 3 до 4 тонн [6].

На мировом рынке существует ряд изделий различной грузоподъемности: Sherpa канадской компании MMIST, упомянутая серия JPADS от Airoborne Systems, а также немецкая SLG Sys (рис. 3). Однако все эти изделия не предназначены для гражданского сектора, поэтому не продаются свободно. Кроме того, стоимость образца такой системы составляет порядка 30-40 тыс. \$ [2].



Рис. 3. УППГС SLG Sys [2]

#### V. ЗАДАЧА РАЗРАБОТКИ НЕДОРОГОГО ИЗДЕЛИЯ, СПОСОБНОГО ВЫПОЛНЯТЬ ПОСТАВЛЕННУЮ ЦЕЛЬ

Исходя из вышеперечисленных факторов задача разработки недорогой системы, позволяющей в автоматическом режиме осуществлять доставку грузов по заданным координатам, является актуальной. Поэтому в 3-м квартале 2020-го года ООО «Лаборатория микроприборов», специализирующаяся в области инерциальных навигационных систем на базе сенсоров, изготовленных по технологии МЭМС, совместно с ООО «ПараАвис» и институтом НМСТ Национального Исследовательского Университета МИЭТ в инициативном порядке приступила к разработке прототипа системы автоматического управления парашютно-грузовой платформой (САУ ПГП) (рис. 4).

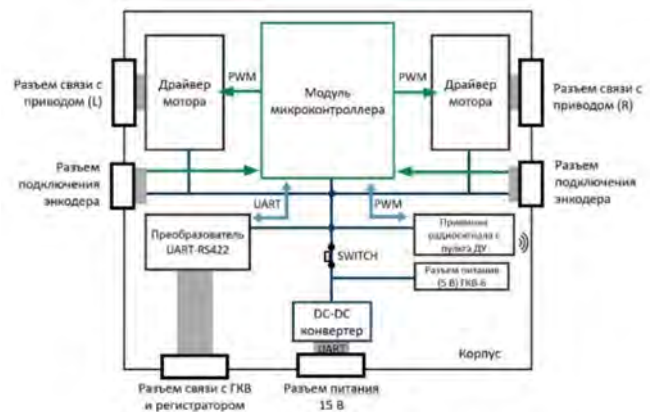


Рис. 4. Функциональная схема САУ ПГП

#### VI. ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ УППГС

Наиболее простым вариантом автоматического наведения УППГС на заданные координаты является применение ГНСС. При использовании данного метода система управления имеет на входе текущие координаты парашютной системы, координаты цели и путевой угол, определяемый по траектории движения УППГС. Однако вследствие воздействия ветра на планирующую платформу путевой угол может значительно отличаться от истинного курса, что затрудняет определение необходимых управляющих воздействий для приземления груза в заданной точке.

В качестве дополнительного источника данных может быть использована карта ветров или комплексированные данные от двух ГНСС-приемников, что позволяет определять истинный курс. Однако наиболее эффективным является комплексирование данных ГНСС с ИНС, что позволяет на стартовом парашютном вираже в движении получить полное навигационное решение, то есть не только координаты, но также скорость и ориентацию.

#### VII. АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ДАННЫХ ГНСС

В целом алгоритм комплексирования данных ИНС и ГНСС представляет собой расширенный фильтр Калмана, вектор состояния которого содержит оценку:

- кватерниона ориентации;
- координат системы (широта, долгота, высота) по модели wgs84;
- линейных скоростей в данных координатах;
- смещений нулевого сигнала датчиков угловой скорости;
- смещений нулевого сигнала акселерометров.

Схема обработки входных данных представлена на рис. 5.

Вычисление динамических параметров системы происходит с частотой 100 Гц с использованием линеаризованной модели отклонений. Вычисленные отклонения определяют обновленные значения параметров вектора состояния. С частотой 10 Гц происходит корректировка вектора состояния с обновленными данными ГНСС.

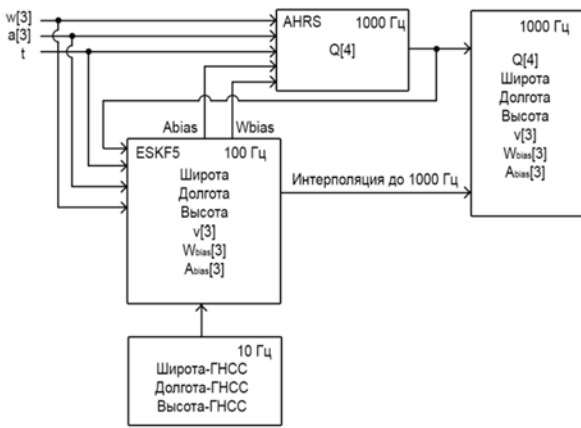


Рис. 5 Схема алгоритма комплексирования данных ИНС и ГНСС, где  $w$  – вектор показаний датчиков угловой скорости (ДУС),  $a$  – вектор показаний акселерометров,  $Q$  – кватернион ориентации,  $v$  – вектор линейной скорости,  $W_{bias}$  – вектор смещения нулевого сигнала ДУС,  $A_{bias}$  – вектор смещения нулевого сигнала акселерометров,  $t$  – показания датчика температуры

### VIII. КОНСТРУКЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО ПРОТОТИПА

Компоновка разработанного ООО «Лаборатория микроприборов» прототипа представлена на рис. 6.

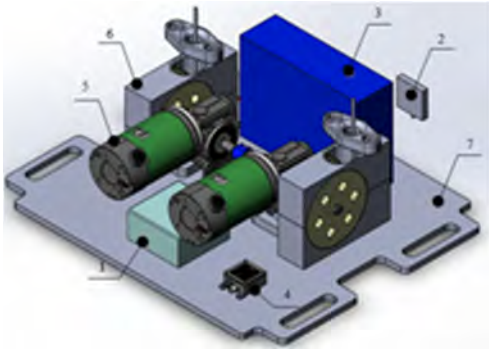


Рис. 6. Визуализация компоновки САУ ПГП. 1 – блок управления; 2 – навигационная антенна; 3 – блок питания; 4 – инерциальный модуль; 5 – сервоприводы; 6 – барабан; 7 – корпус

Конструкция изделия включает:

- ИНС ГКВ-6, состоящую из трех осей МЭМС-датчиков угловой скорости, трех осей МЭМС-акселерометров, трехосного МЭМС-магнитометра, барометра, приемника спутникового сигнала ГНСС, а также вычислителя, способного на основе данных перечисленных сенсоров построить полное навигационное решение;
- два мотор-редуктора с барабанами для намотки строп управления с обратной связью по энкодерам;
- приёмник радиосигнала для дистанционного управления (ДУ);
- блок управляющей электроники;
- регистратор показаний всех систем устройства в процессе полёта (черный ящик);
- кнопка сигнала раскрытия парашюта;
- аккумулятор.

Образец разработанной системы представлен на рисунке 7.

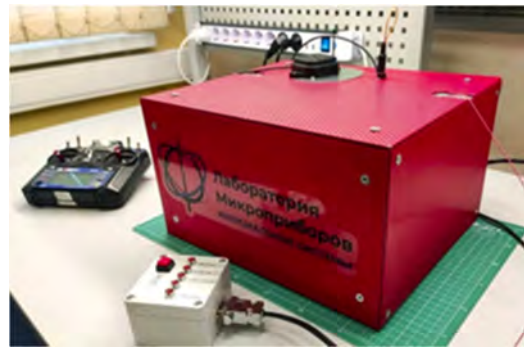


Рис. 7. Внешний вид прототипа САУ ПГП

### IX. ОБЩИЙ АЛГОРИТМ РАБОТЫ СИСТЕМЫ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Система имеет следующие режимы работы (рис. 8).

#### A. Режим ожидания

Приводы зафиксированы, система ожидает сигнала раскрытия парашюта.

#### B. Режим расчеховки строп

После раскрытия парашюта стропы вытравливаются до положения расчеховки.

#### C. Режим дистанционного управления

При наличии сигнала от пульта ДУ положение строп управления задаётся оператором вручную.

#### D. Режим автоматического управления

Если ГКВ-6 сигнализирует о нахождении навигационного решения, управляющие воздействия формируются на основании заданных координат цели, текущих координат парашюта, а также ориентации блока.

#### E. Режим «без управления»

Левая стропа управления устанавливается в положение 20% от диапазона, после чего идет снижение парашюта по спиральной траектории.



Рис. 8. Общая схема алгоритма работы САУ ПГП



## Х. СХЕМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ В ПОЛЕТЕ

Схема работы системы при выбросе из самолёта представлена на рис. 9.

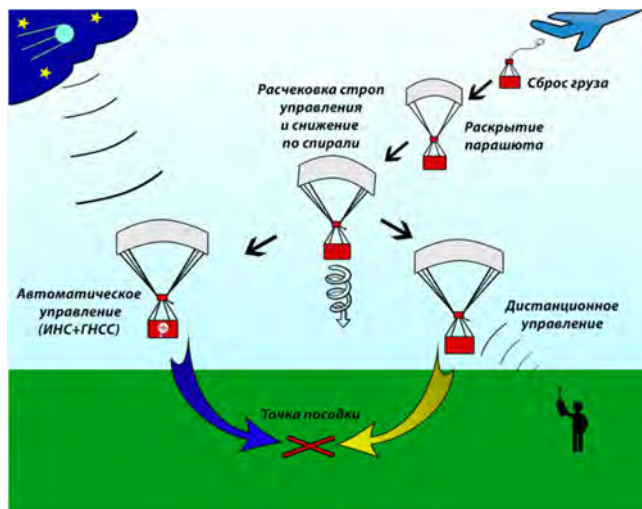


Рис. 9. Схема снижения САУ ПГП после выброса из самолета

После выброса из самолета и раскрытия парашюта система переходит в режим расчеховки строп управления. По завершении расчеховки происходит переход в режим «без управления» с ожиданием сигнала о нахождении навигационного решения ГКВ.

В процессе виража внутренний вычислитель ГКВ-6 находит навигационное решение, выдаёт соответствующий сигнал, после чего система переходит в режим автоматического управления. При этом координаты устройства и цели переводятся из формата LLA (в радианах) в формат NED (в метрах).

Из вычисленного направления и расстояния происходит наведение УПГС на цель. При радиусе до цели менее 30 м система переходит в режим «без управления» и снижается по спирали.

## ХИ. ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ПК ДЛЯ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ БЛОКА

Для удобства настройки параметров устройства (координат цели, длины строп парашюта и параметров ПИД-регуляторов приводов) было разработано GUI приложение для ПК, позволяющее настраивать эти параметры.

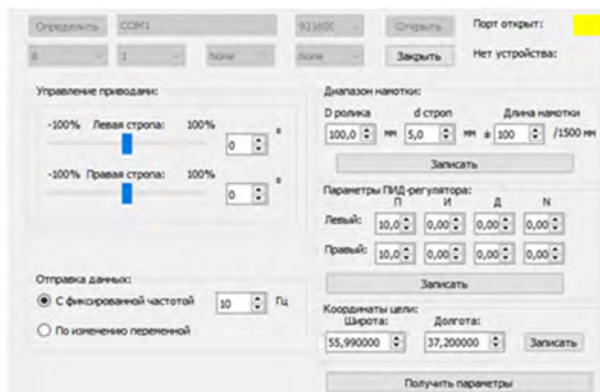


Рис. 10. Интерфейс приложения для настройки параметров САУ ПГП

Блок управляющей электроники подключается к ПК с помощью того же разъема DB-9, которым подключается к устройству ИНС ГКВ-6.

## ХИИ. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОТОТИПА В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

В августе 2021 года было проведено предварительное полевое тестирование прототипа на аэродроме Ватулино совместно с ООО «ПараАвис» (рис. 11–12).



Рис. 11. Сброс прототипа с самолета

Тестирование заключалось в проверке работы системы дистанционного управления и работы нахождения навигационного решения в процессе спуска на парашюте. Было проведено 6 выбросов с высоты 600 м, 4 из которых производились в режиме дистанционного управления, два – в режиме автоматического управления.

В результате испытаний четыре спуска в режиме дистанционного управления прошли в штатном режиме.



Рис. 12. Посадка прототипа в заданной точке

Во время обоих спусков в режиме автоматического управления возникли внештатные ситуации. В первом случае система взяла неверный курс, была переведена в режим ручного управления, после чего осуществлен спуск в ручном режиме. Во втором случае система взяла неверный курс, попытка перевести её в режим ручного управления была неудачна, поскольку система вылетела за границу дистанции управления и приземлилась на расстоянии 600 м от заданной точки посадки (рис. 13).



Рис. 13. Заданная точка посадки и точки фактического приземления САУ ПГП

### ХIII. ВЫВОДЫ ПО ПРОВЕДЕННЫМ ИСПЫТАНИЯМ

В результате анализа данных регистратора было выявлено, что во всех шести случаях спуска алгоритм комплексирования данных ИНС и ГНСС успешно находит навигационное решение и ГКВ-6 выдаёт корректные навигационные данные. В таблице 1 указано время и высота нахождения навигационного решения с момента раскрытия парашюта.

ТАБЛИЦА 1.

| Номер выброса  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|--|------|------|------|------|------|------|
| Время с момента раскрытия парашюта до нахождения навигационного решения ГКВ-6, сек | 22,7 | 30,4 | 28,5 | 20,4 | 25,2 | 23,6 |
| Высота точки нахождения навигационного решения (барометрический альтиметр), м      | 252  | 211  | 223  | 264  | 231  | 256  |

Выявлено также, что ошибка работы системы в режиме автоматического управления вызвана сбоем модуля Flash-памяти в блоке управляющей электроники, в результате чего координаты цели были сброшены на значения по умолчанию.

По результатам тестирования был заменен модуль дистанционного управления и принято решение об установке резервного модуля памяти в блоке управляющей электроники САУ ПП.

Доработанную версию прототипа планируется протестировать повторно во втором квартале 2022-го года для проверки работы системы в автоматическом режиме.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пономаренко В. Грузы – с высокой точностью // Крылья Родины. 1989. №3. С. 9-10.
- [2] Прокофьев С. Зарубежные системы для десантирования грузов. Режим доступа: <https://invoen.ru/vvt/zarubezhnie-parashutnie-sistemi-desantirovanie-gruzov/> (дата обращения 10.01.2022).
- [3] Алехеев А. Точная выброска с воздуха. Режим доступа: <https://topwar.ru/43327-tochnaya-vybroska-s-vozduha.html> (дата обращения 10.01.2022).
- [4] Hsy, J., Military Tests Robo-Parachute Delivery Needing No GPS, URL: <https://spectrum.ieee.org/military-tests-roboparachute-delivery-needing-no-gps/> (дата обращения 10.01.2022).
- [5] Найманбаева К., Технодинамика создаст управляемую парашютно-грузовую систему для ИЛ-76. Режим доступа: <https://www.aviaport.ru/news/2021/07/09/681139.html> (дата обращения 10.01.2022).
- [6] Сомов К. Технодинамика представила новейшие разработки на Дне ВДВ. Режим доступа: <https://rostec.ru/news/tekhnodinamika-predstavila-noveyshie-razrabotki-na-dne-vedv/> (дата обращения 10.01.2022).