

УТВЕРЖДАЮ

Директор

АО «Петрозаводскмаш»

_____ / _____

« » _____ 2025 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор

АО ЦПР «ЭФЭР»

_____ / _____

« » _____ 2025 г.

АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА БАЗЕ БПЛА (АСМПБ «ЭФЭР-ГАРДИАН»)

ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Версия 1.0.0

ЛИСТ УТВЕРЖДЕНИЯ

СОГЛАСОВАНО

Начальник ОИТ-Главный инженер

_____ Беспилотный А.А.

« » _____ 2025 г.

РАЗРАБОТЧИКИ

_____ Дронов В.В.

_____ Летучий К.К.

« » _____ 2025 г.

2025

**АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА
ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА БАЗЕ БПЛА
(АСМПБ «ЭФЭР-ГАРДИАН»)**

ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Версия 1.0.0

Листов [16]

АННОТАЦИЯ

Настоящая программа и методика испытаний (ПМИ) распространяется на программное обеспечение «Автономная система мониторинга пожарной безопасности на базе БПЛА (АСМПБ «ЭФЭР-ГАРДИАН»)» версии 1.0.0.

ПМИ определяет объект, цели, объем, порядок проведения, а также методы и критерии приемочных испытаний программного комплекса. Документ предназначен для организации и контроля работ по проверке соответствия ПО требованиям Технического задания и сопутствующей документации. Результаты испытаний, проведенных в соответствии с настоящей ПМИ, служат основанием для принятия решения о внедрении системы.

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ	3
СОДЕРЖАНИЕ	4
1. ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ	5
2. ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ	5
3. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОГРАММЕ	5
4. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОГРАММНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ	6
5. СРЕДСТВА И ПОРЯДОК ИСПЫТАНИЙ	7
5.1. Технические средства:	7
5.2. Программные средства:	8
5.3. Порядок проведения испытаний:	8
6. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ	9

1. ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

Наименование: Автономная система мониторинга пожарной безопасности на базе БПЛА (АСМПБ «ЭФЭР-ГАРДИАН»).

Область применения: Программный комплекс предназначен для обеспечения автономной работы роя БПЛА по непрерывному круглосуточному мониторингу пожарной безопасности в крупногабаритных помещениях (аングарах) с применением компьютерного зрения для детекции очагов возгорания (пламени, дыма).

Обозначение: FR-ASFMS-SW-1.0.0.

2. ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ

Целью проведения приемочных испытаний является всесторонняя проверка соответствия программного комплекса АСМПБ «ЭФЭР-ГАРДИАН» требованиям, установленным в Техническом задании и Описании программы. Испытания направлены на подтверждение работоспособности, функциональной полноты, надежности, производительности и отказоустойчивости системы в условиях, моделирующих эксплуатационные, для принятия решения о её внедрении на объектах заказчика.

3. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОГРАММЕ

Требования, подлежащие проверке в ходе испытаний, определены в Техническом задании и Описании программы. Ключевые проверяемые параметры включают:

1. **Функциональность:** Корректная работа всех заявленных режимов (ожидание, взлет, патрулирование, обнаружение пожара, возврат на базу, зарядка, обработка fail-safe сценариев).
2. **Точность и надежность детекции:** Детекция классов «пламя» и «дым» с вероятностью (Precision) > 98% при пороге уверенности модели > 0.55.
3. **Производительность:** Средняя частота обработки кадров нейросетью (с использованием Edge TPU) \geq 15 FPS. Время от визуальной детекции до передачи тревожного сигнала во внешнюю систему \leq 2 с. Время отклика на команды оператора \leq 1 с.
4. **Навигация и SLAM:** Устойчивое автономное движение по заданному маршруту, построение и актуализация карты, надежный обход статических и динамических препятствий.
5. **Отказоустойчивость и безопасность:** Корректное выполнение заданных сценариев при потере связи, отказе датчиков, низком заряде батареи. Безусловный наивысший приоритет команд ручного управления с RC-пульта.
6. **Интеграция:** Стабильная передача видеопотока, телеметрии и событий по каналам Wi-Fi (в пожарную сеть предприятия) и радиосвязи (на наземную станцию управления). Корректная обработка входящих команд от внешних систем.
7. **Автономность:** Успешное и повторяемое выполнение полного цикла «патрулирование – возврат по низкому заряду – точная посадка – зарядка».

4. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОГРАММНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

На испытания предъявляется следующий комплект программной документации в актуальных редакциях. Документы проверяются на соответствие указанным нормативным документам и непротиворечивость друг другу:

1. Техническое задание (ТЗ) – основа для формирования требований.
2. Описание программы – на соответствие ГОСТ 19.402-78 или СТО предприятия.

3. Руководство оператора – на соответствие ГОСТ 19.505-79 или СТО предприятия.
4. Альбом инструкций для оператора на реагирование при “Fail-safe” – как часть Руководства оператора.
5. Документация на API (форматы JSON/MQTT) – на соответствие требованиям ТЗ и отраслевым практикам (OpenAPI).
6. Схемы взаимодействия компонентов – на наглядность и полноту отображения связей, указанных в Описании программы.
7. Инструкция по компиляции и обновлению моделей ИИ – на четкость и воспроизводимость описанных процедур.

5. СРЕДСТВА И ПОРЯДОК ИСПЫТАНИЙ

5.1. Технические средства:

- **Испытываемый образец БПЛА:** Квадрокоптер с рамой 450-550 мм, укомплектованный:
 - Бортовой вычислитель: Raspberry Pi 5, 8 ГБ ОЗУ.
 - Полетный контроллер: Pixhawk 6C (или аналог) с прошивкой ArduPilot.
 - Сенсоры: Лидар 2D RPLIDAR A3; комбинированный модуль камеры (FLIR Boson 640 + дневная камера); инерциальный модуль, барометр, дальномеры.
 - Аппаратный ускоритель: Google Coral USB Accelerator.
 - Коммуникации: Радиомодем 915 МГц (Holybro Sik Telemetry Radio V3); Wi-Fi модуль 802.11ac; RC-приемник TBS Crossfire (протокол CRSF).
 - Полезная нагрузка: Сервопривод гимбала, проблесковый маячок, звуковой излучатель.
- **Инфраструктура наземного контроля:**
 - Наземная станция управления (GCS): Ноутбук с ОС Windows 10/11, ПО Mission Planner версии 1.3.80, наземный радиомодем 915 МГц.
 - Резервный канал управления: Пульт TBS Tango 2.
 - FPV-аппаратура: Очки DJI Goggles 2.
- **Имитационно-испытательный комплекс:**

- Тестовая пожарная сеть: Сервер на Ubuntu Server 22.04 LTS с развернутым RTSP-сервером (Mediamtx), REST API (Python/Flask), точкой доступа Wi-Fi 6.
- Полигон: Закрытое помещение-макет ангаря (~20x20x10 м) со статическими препятствиями и автоматической зарядной станцией.
- Имитаторы угроз: Генератор театрального дыма, электрический нагревательный элемент в защитном кожухе.

5.2. Программные средства:

- **Испытываемая система:** ПО АСМПБ «ЭФЭР-ГАРДИАН», версия 1.0.0.
- **Базовое ПО бортового компьютера:** ОС Ubuntu 22.04.3 LTS; среда ROS 2 Humble Hawksbill; прошивка ArduPilot Copter 4.4.x; шлюз MAVROS 2.5.0; среда выполнения TensorFlow Lite 2.14.0; библиотеки OpenCV 4.8.0, PCL; драйверы устройств.
- **Средства симуляции и анализа:** Среда Gazebo Fortress с плагином для ArduPilot; инструменты записи и анализа ros2 bag, Mission Planner Log Analyzer.

5.3. Порядок проведения испытаний:

Испытания проводятся последовательно в три этапа. Переход к следующему этапу допускается только после успешного завершения всех тестов предыдущего.

1. **Стендовые испытания:** Проверка ПО на аппаратном стенде без полета. Включает верификацию запуска всех ROS 2 нод, тестирование алгоритмов детекции на заранее подготовленных видеозаписях, проверку работоспособности REST API и MAVLink-интерфейсов, имитацию отказов.
2. **Испытания в симуляторе:** Отработка и проверка алгоритмов навигации (SLAM, планирование пути), логики конечного автомата системы и всех fail-safe сценариев в виртуальной среде Gazebo.

3. Летные испытания:

- **Этап 1 (Безопасный полигон):** Проверка базовой функциональности полетной платформы: ручное и автоматическое управление, взлет/посадка, удержание позиции на открытой площадке.
- **Этап 2 (Имитация ангара):** Полнofункциональные испытания в условиях, приближенных к эксплуатационным. Проверка циклического патрулирования, детекции имитаторов огня и дыма в реальном времени, интеграции с тестовой пожарной сетью, отработки сценариев отказа и полного цикла автономной зарядки в макете ангаря.

6. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

№ п/п	Объект проверки	Проверяем ый параметр	Последовательность действий для прохождения проверки	Критерий успеха
6.1.	Документ ация	Полнота и соответствии е	1. Визуально проверить наличие всех документов по списку п.4 ПМИ. 2. Проверить соответствие документов ГОСТам. 3. Провести выборочное сопоставление разделов «Описание программы», «Руководство оператора» и «ТЗ» на предмет противоречий в ключевых	Представлен полный комплект документов. Описания функциональности, интерфейсов и характеристик системы во всех документах согласованы и не противоречат друг другу. Документы соответствуют ГОСТам.

параметрах (время
реакции, FPS, пороги
срабатывания).

6.2.	Установка и запуск	Корректнос- ть запуска системы	1. Развернуть ПО на RPi 5 по прилагаемой инструкции. 2. Подать питание на стендовый комплекс. Через SSH убедиться в запуске ROS 2 демона и основных нод (<code>ros2 node list</code>). 3. Проверить наличие телеметрии в GCS и получение статусного сообщения от БПЛА на тестовом сервере.	В списке нод присутствуют <code>mission_manager</code> , <code>cv_detection</code> , <code>slam_node</code> и др. GCS отображает живую телеметрию (например, значение <code>ATTITUDE</code>). Сервер получил JSON: <code>{"event": "status", "state": "STANDBY"}</code> .
------	-----------------------	--------------------------------------	--	---

6.3.	Режимы работы (FMS)	Корректнос- ть переходов	1. С GCS отправить команду взлета. 2. Загрузить и активировать маршрут из 3-5 точек. 3. Через параметр <code>SIM_BATT_VOLTAGE</code> сымитировать напряжение низкого заряда. 4. Дать команду на посадку с GCS.	Логи <code>mission_manager</code> (<code>rosbag2</code>) фиксируют последовательность: <code>STANDBY -> TAKEOFF</code> <code>-> PATROL -> RTL -></code> <code>LANDING</code> . Поведение БПЛА (взлет, движение по точкам, возврат) соответствует каждому состоянию.
------	---------------------------	--------------------------------	---	---

6.4.	Детекция (CV)	Точность (Precision)	<p>1. Подать на вход ноды <code>cv_detection_node</code> эталонный видеофайл, содержащий 50 размеченных кадров с пламенем и 50 с дымом.</p> <p>2. Сравнить выходы модели (логи в топике <code>/cv/detections</code>) с эталонной разметкой, подсчитав True Positive (TP) и False Positive (FP).</p> <p>3. Вычислить Precision = TP / (TP + FP) для каждого класса.</p>	Для каждого класса («пламя», «дым») значение Precision составляет не менее 0.98 (98%).
6.5.	Детекция (CV)	Производительность (FPS)	<p>1. В ходе летных испытаний в макете ангара запустить мониторинг частоты публикаций топика <code>ros2 topic hz /cv/detections</code>.</p> <p>2. Записать среднее значение частоты за 5 минут полета.</p>	Средняя частота публикации сообщений детекции составляет не менее 15 Гц.

6.6.	Реакция на пожар	Время и полнота реакции	<p>1. Во время патрулирования активировать имитатор пламени.</p> <p>Синхронизированно зафиксировать время: T1 (активация), T2 (первая детекция в логах CV), T3 (переход в FIRE_DETECTED в логах FMS), T4 (получение тревоги на сервере).</p> <p>2. Наблюдать за поведением БПЛА.</p>	<p>Разница T4 - T1 ≤ 2 с.</p> <p>БПЛА переходит в режим FIRE_DETECTED, прекращает патрулирование и начинает сближение с целью. Тревожное JSON-сообщение содержит корректные координаты и уверенность.</p>
6.7.	Навигация и SLAM	Точность следования маршруту	<p>1. Загрузить маршрут, образующий замкнутый контур.</p> <p>Запустить автономное патрулирование.</p> <p>2. Сравнить заданные координаты точек с фактической траекторией из полетного лога (.bin).</p>	<p>БПЛА пролетает в радиусе 0.5 м от каждой заданной точки.</p> <p>Среднеквадратичное отклонение от линии заданного маршрута между точками не превышает 1.0 м.</p>

6.8.	Навигация и SLAM	Обход препятствий	<p>1. Во время движения по маршруту внести на его путь крупное подвижное препятствие (макет на тележке).</p> <p>2. Наблюдать за реакцией БПЛА по данным телеметрии и FPV-видео.</p>	<p>БПЛА останавливает движение по глобальному плану, изменяет локальную траекторию (данные лидара <code>/scan</code> показывают объект) и безопасно обходит препятствие.</p> <p>Столкновения не происходит.</p>
6.9.	Связь (Wi-Fi)	Передача данных в пожарную сеть и обратно команд.	<p>1. Убедиться в наличии RTSP-потока с наклоненными bbox на сервере.</p> <p>2. Имитировать пожар, дождаться тревоги.</p> <p>3. Отправить с сервера команду отбоя <code>FIRE_ALARM_CANCEL</code>.</p> <p>4. Отправить с сервера команду переключения камеры <code>SWITCH_CAMERA_MODE</code>. Форматы JSON-сообщений приведены в Приложении Б ТЗ.</p>	<p>RTSP-поток стабилен. Сервер получает валидное сообщение <code>FIRE_DETECTED</code>. БПЛА корректно реагирует на команду отбоя, возвращаясь в <code>PATROL</code>. БПЛА корректно реагирует на команду переключения камеры, видеопоток меняется в течение 1 секунды. Задержка видео ≤ 300 мс.</p>

6.10.	Связь (Радиоканал)	Работа с GCS	1. Проверить полноту и актуальность телеметрии в GCS (координаты, высота, скорость, режим, заряд).	Телеметрия в GCS обновляется без задержек > 1 с. В ответ на команду в логах <code>payload_manager</code> фиксируется событие, а видеопоток меняется в течение 1 секунды.
6.11.	Отказоустойчивость	Приоритет RC-пульта	1. В режиме <code>PATROL</code> переключить тумблер на RC-пульте в режим <code>STABILIZE</code> . 2. Попытаться отправить с GCS команду «Сменить точку маршрута».	Полетный контроллер немедленно переходит в <code>STABILIZE</code> . Телеметрия в GCS отображает соответствующий режим полета. Автономные команды от GCS игнорируются. Управление возможно только с RC-пульта.
6.12.	Отказоустойчивость	Сценарий потери связи Wi-Fi	1. Во время патрулирования физически отключить питание точки доступа Wi-Fi тестовой сети. 2. Наблюдать за поведением БПЛА по телеметрии в GCS.	По истечении таймаута <code>FIRE_NETWORK_TIMEOUT</code> (10 с) БПЛА выходит из <code>PATROL</code> и переходит в <code>RTL</code> . На GCS приходит сообщение <code>STATUSTEXT</code> с уведомлением о потере Wi-Fi.

6.13.	Отказоуст ойчивость	Сценарий потери вычислител я	1. Во время полета выполнить на RPi 5 команду <code>sudo pkill -9 mission_manag</code> для аварийной остановки основной ноды. 2. Наблюдать за поведением БПЛА.	Полетный контроллер, потеряв MAVLink-связь с RPi, переходит в STABILIZE . Через OPERATOR_CMD_TIME OUT (30 с) без команд с пульта начинает контролируемое снижение с включенными маячком и сиреной.
6.14.	Автономн ость	Цикл зарядки	1. Установить порог низкого заряда (например, 25%). Запустить БПЛА. 2. Выполнить патрулирование до срабатывания RTL. Зафиксировать процесс возврата, посадки и начало зарядки. 3. Повторить цикл 5 раз.	В 5 из 5 циклов БПЛА корректно определяет низкий заряд, выполняет посадку на контакты станции (подтверждается её датчиком). Телеметрия показывает начало зарядки (рост напряжения АКБ).
6.15.	Логирован ие	Полнота записи	1. После летных испытаний собрать все логи: <code>.bin</code> (автопилот), <code>*.db3</code> (rosbag2), логи сервера. 2. Автоматизированно проверить по	Логи за весь период испытаний непрерывны. Для каждого тестируемого сценария в соответствующих логах присутствуют

временным меткам записи, позволяющие
наличие записей для однозначно
ключевых событий из восстановить ход
пп. 6.3-6.14. событий.
