

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.

**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 БПЛА по непрерывному круглосуточному мониторингу пожарной безопасности в крупногабаритных помещениях (ангарах) 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) ≥ 15 FPS. Время от визуальной детекции до передачи тревожного сигнала во внешнюю систему ≤ 2 с. Время отклика на команды оператора ≤ 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, датчики.
 - 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 гimbала, 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 ангара (~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):** Полнофункциональные 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 ангара.

6. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

№ п/п	Объект проверки	Проверяем ый параметр	Последовательность действий для прохождения проверки	Критерий успеха
6.1.	Документация	Полнота и соответствие	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	Корректность запуска системы	<p>1. Развернуть ПО на RPi 5 по прилагаемой инструкции.</p> <p>2. Подать питание на стендовый комплекс. Через SSH убедиться в запуске ROS 2 демона и основных нод (<code>ros2 node list</code>).</p> <p>3. Проверить наличие телеметрии в GCS и получение статусного сообщения от БПЛА на тестовом сервере.</p>	<p>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>.</p>
6.3.	Режимы работы (FMS)	Корректность переходов	<p>1. С GCS отправить команду взлета.</p> <p>2. Загрузить и активировать маршрут из 3-5 точек.</p> <p>3. Через параметр <code>SIM_BATT_VOLTAGE</code> симитировать напряжение низкого заряда.</p> <p>4. Дать команду на посадку с GCS.</p>	<p>Логи <code>mission_manager</code> (rosbag2) фиксируют последовательность: <code>STANDBY -> TAKEOFF -> PATROL -> RTL -> LANDING</code>. Поведение БПЛА (взлет, движение по точкам, возврат) соответствует каждому состоянию.</p>

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>	<p>Для каждого класса («пламя», «дым») значение Precision составляет не менее 0.98 (98%).</p>
6.5.	Детекция (CV)	Производительность (FPS)	<p>1. В ходе летных испытаний в макете ангара запустить мониторинг частоты публикаций топика результатов детекции: <code>ros2 topic hz /cv/detections</code>.</p> <p>2. Записать среднее значение частоты за 5 минут полета.</p>	<p>Средняя частота публикации сообщений детекции составляет не менее 15 Гц.</p>

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 $T4 - T1 \leq 2$ 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. 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 препятстви й	<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. 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 наложенными 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>.</p> <p><i>Форматы JSON-сообщений приведены в Приложении Б ТЗ.</i></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.	Отказоустойчивость	Сценарий потери вычислителя	<p>1. Во время полета выполнить на RPi 5 команду <code>sudo pkill -9 mission_manag</code> для аварийной остановки основной ноды.</p> <p>2. Наблюдать за поведением БПЛА.</p>	<p>Полетный контроллер, потеряв MAVLink-связь с RPi, переходит в <code>STABILIZE</code>. Через <code>OPERATOR_CMD_TIME_OUT</code> (30 с) без команд с пульта начинает контролировать снижение с включенными маячком и сиреной.</p>
6.14.	Автономность	Цикл зарядки	<p>1. Установить порог низкого заряда (например, 25%). Запустить БПЛА.</p> <p>2. Выполнить патрулирование до срабатывания RTL. Зафиксировать процесс возврата, посадки и начало зарядки.</p> <p>3. Повторить цикл 5 раз.</p>	<p>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).</p>
6.15.	Логирование	Полнота записи	<p>1. После летных испытаний собрать все логи: <code>.bin</code> (автопилот), <code>*.db3</code> (rosbag2), логи сервера.</p> <p>2. Автоматизированно проверить по</p>	<p>Логи за весь период испытаний непрерывны. Для каждого тестируемого сценария в соответствующих логах присутствуют</p>

временным меткам
наличие записей для
ключевых событий из
пп. 6.3-6.14.

записи, позволяющие
однозначно
восстановить ход
событий.