

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕСТИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2024

- А. В. Кириллов** кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации авиационной техники; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; aleksey.v.kirillov@ssau.ru
- В. В. Ситников** аспирант; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; freiker007@gmail.com
- А. Л. Тучин** начальник бригады испытаний, отдел стендового оборудования; АО «Кронштадт», Москва; a.l.tuchin@ya.ru

Изложен опыт применения методологии модельно-ориентированной системной инженерии (Model-Based Systems Engineering – MBSE) при организации наземных испытаний бортового комплекса оборудования беспилотных летательных аппаратов в АО «Кронштадт». Эта методология успешно используется при разработке различных сложных систем управления, таких как встраиваемые системы управления, цифровая обработка сигналов, компьютерное зрение, радиолокация и связь. Выполнен анализ процесса тестирования бортового оборудования с применением действующего наземного испытательного стенда, предложен способ автоматизации его работы. Выполнен расчёт экономической эффективности.

Беспилотный летательный аппарат; наземные испытания; комплекс бортового оборудования; цифровая модель; имитатор

Цитирование: Кириллов А.В., Ситников В.В., Тучин А.Л. Автоматизация процесса тестирования бортовых систем беспилотных летательных аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 2. С. 14-27. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-14-27

Введение

На беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) самолётного типа последних поколений устанавливаются бортовые встроенные системы реального времени (ВСРВ), представляющие собой многомашинные вычислительные комплексы [1]. Количество каналов связи между изделиями в составе ВСРВ достигает нескольких десятков. На этапе испытаний ВСРВ возникает ряд задач, требующих инструментальной поддержки, в том числе:

- проверка соответствия изделий ВСРВ требованиям технического задания, в том числе в части приёма и передачи данных по внешним интерфейсам;
- отработка взаимодействия между изделиями ВСРВ по бортовым каналам передачи данных;
- комплексное тестирование и отладка программного обеспечения (ПО) ВСРВ, в том числе ПО, выполняемого распределённо на различных изделиях;
- оценка надёжности архитектуры ВСРВ, оценка наличия резерва пропускной способности каналов передачи данных, устойчивости аппаратно-программных средств ВСРВ к сбоям при передаче данных, надёжность отдельных компонентов системы;
- построение расписаний обмена данными по бортовым каналам, а также проверка правильности отработки этого расписания изделиями в составе ВСРВ.

Разработка изделий, входящих в состав ВСПВ в большинстве случаев выполняется различными организациями. Готовность различных изделий к испытаниям наступает в разные моменты времени. Для соблюдения сроков изготовления готового изделия возникает необходимость проводить предварительные испытания с неполным комплектом оборудования. В данной работе описан программно-аппаратный комплекс – стенд полунатурного моделирования (ПНМ) бортовых ВСПВ, позволяющий осуществлять комплексирование ВСПВ и решать перечисленные выше задачи поэтапно, проводя работы на математических моделях, расширяя состав стыкуемых изделий по мере их готовности в виде натуральных образцов [1].

Данный стенд может включать в себя как цифровые модели приборов (имитаторы), так и натурные образцы готовых изделий ВСПВ. В зависимости от степени проработки имитаторов и готовности приборов, моделирование может быть более или менее детальным: от интервальных моделей до полностью функциональных моделей, эквивалентных реальным изделиям. При этом математическая модель БПЛА выполнена по модульному принципу, что позволяет производить постепенную замену компонентов цифровой модели реальными компонентами системы [2].

Описание стенда

Структурная схема стенда ПНМ представлена на рис. 1.

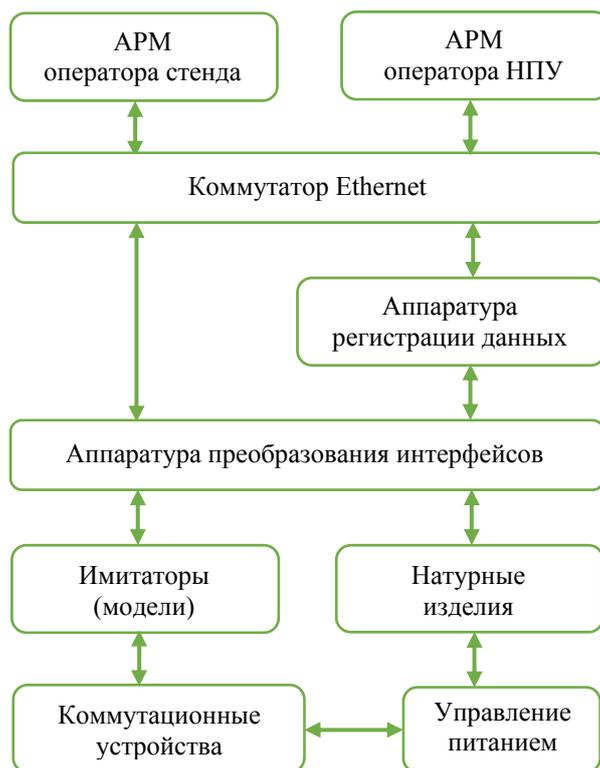


Рис. 1. Структурная схема стенда полунатурного моделирования

В состав стенда входят следующие элементы:

Автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора наземного пункта управления (НПУ) включает персональный компьютер с установленной операционной системой AstraLinux версий 1.7 и обеспечивает ход отработок штатными средствами комплекса БПЛА.

Автоматизированное рабочее место оператора стенда обеспечивает решение следующих задач:

- настройка сценариев автоматизированных проверок, выбор моделей и натуральных образцов;
- задание регистрируемых параметров;
- оперативное наблюдение за ходом эксперимента, включая отображение значений параметров моделей и отображение результатов эксперимента;
- анализ результатов эксперимента, в том числе трасс значений параметров моделей, трасс событий в моделях и каналах.

Аппаратура регистрации данных считывает данные с аппаратуры преобразования интерфейсов по протоколам TCP (Transmission Control Protocol – протокол управления передачей) и UDP (User Datagram Protocol – протокол пользовательских датаграмм).

Аппаратура преобразования интерфейсов представляет собой промышленный компьютер с установленными контроллерами каналов обмена информацией. Они обеспечивают преобразование сигналов интерфейса компьютера в имитируемые параметры информационных систем бортовой аппаратуры и обратно, а также передачу выходных сигналов из бортовой аппаратуры в моделирующие программы. Основные используемые интерфейсы: МКИО, ARINC-429, разовые команды, ARINC-646, ARINC-818.

Имитаторы (машины с частными моделями) поставляются разработчиками изделий ВСПВ и могут быть представлены двумя основными вариантами: блок-макет реального изделия ВСПВ с оригинальным интерфейсом обмена данными, либо персональный компьютер со специальным ПО (цифровой моделью изделия ВСПВ) и необходимые контроллеры каналов обмена информацией.

Коммутационные устройства служат для сопряжения комбинаций натуральных блоков и моделей. Они управляются с помощью АРМ оператора стенда. Высокая степень автоматизации обеспечивается наличием двух режимов работы: ручном, где оператор выбирает каналы связи, и автоматическом, где загружается файл с преднастроенным сценарием.

Внешний вид стенда представлен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид стенда полунатурного моделирования

Комплексование бортового оборудования на стенде ПНМ проходит в два этапа:

- 1) комплексование с использованием преимущественно моделей;
- 2) комплексование с использованием преимущественно натуральных изделий.

На первом этапе проводится основное количество проектных работ. На втором этапе максимально пополняется состав натуральных устройств на стенде. Этот подход минимизирует количество ошибок, выявляемых на этапах натуральных испытаний. Таким образом возможно проведение комплексного тестирования и отработки взаимодействия на любом сочетании натуральных и моделируемых устройств.

Методика тестирования

Тестирование комплекса бортового оборудования БПЛА на стенде ПНМ происходит по следующей схеме (рис. 3). После поступления изделий бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) на предприятие и проведения внешнего осмотра на предмет наличия механических повреждений, соответствия изделия сопроводительной документации специалистами отдела технического контроля (ОТК) изделия передаются на стенд. В зависимости от количества готовых изделий из комплекта БРЭО БПЛА происходит комплексирование и настройка стенда. Запуск стенда включает в себя загрузку персональных компьютеров, специального ПО, ручное включение источника питания аппаратной части стенда. С помощью ПО осуществляется запуск требуемых моделей путём открытия конфигурационного файла, а так же выбор источника данных (имитатор/прибор). На этом предварительная настройка завершена и начинается процедура тестирования.

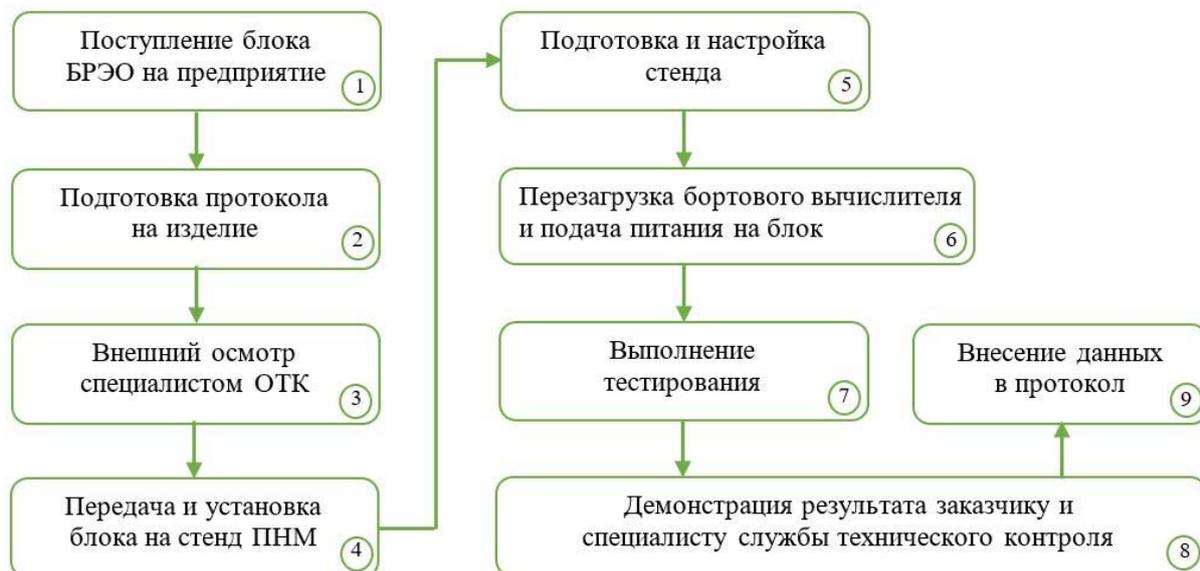


Рис. 3. Схема тестирования

Тестирование проходит по инструкции, число шагов одной проверки может достигать до тридцати. После завершения тестирования выполняется обработка результатов и представление их заказчику и специалисту службы технического контроля. Далее результаты вносятся в технический нормативный документ предприятия (протокол) без использования вычислительной техники. Питание стенда отключается, проверяемые изделия демонтируются со стенда.

Постановка и решение задачи автоматизации работы стенда полунатурного моделирования

Подобный алгоритм действий в целом можно назвать «классическим» [3]. И для мелкосерийного производства такая схема может быть вполне работоспособна. Однако опыт применения подобного стенда в АО «Кронштадт» выявил наличие следующих недостатков.

Во-первых, в связи с увеличением выпускаемой продукции и запуска серийного производства на предприятии количество проверок изделий существенно возросло. Чаще всего оборудование поступает на проверку от разных производителей постепенно, то есть комплексование стенда осуществляется преимущественно за счёт моделей. В результате стенд, предназначенный для комплексных испытаний, выполняет работу по входному контролю покупных изделий, что функционально избыточно. При этом часто выполняемые операции (5) и (7) (рис. 3) являются наиболее трудоёмкими.

Во-вторых, при достаточно высокой степени применения цифровой техники в составе стенда документооборот по испытаниям ведётся на бумажных носителях, что также увеличивает трудоёмкость работ и создаёт вероятность ошибок при заполнении протоколов.

Для решения представленных задач в статье изложена идея автоматизации процесса тестирования бортовых систем с применением существующего стенда. Так, процессы (6), (7), (9) (рис. 3) предлагается автоматизировать за счёт применения дополнительных технических и программных средств.

В качестве технических средств автоматизации предлагается:

- применение автоматических органов управления питанием;
- применение автоматизированного коммутационного оборудования.

В качестве программных средств автоматизации предлагается разработка интеллектуальной системы, которая позволит структурировать данные, обеспечить быстрый и удобный доступ к информации и ускорить процесс тестирования.

Так как доработка стенда техническими средствами автоматизации представляет собой типовую инженерную задачу, в данной статье основное внимание уделено предлагаемой информационной системе. Такая система должна использовать инструменты обработки данных, такие как MySQL, развёрнутую на выделенном сервере, подключенном к локальной сети предприятия. Система также должна содержать информацию о бортовом оборудовании (версия ПО блоков, дата обновления, версия программно-информационного взаимодействия, тестовые значения, возможно добавление параметров на этапе разработки). Обновление базы данных системы будет осуществляться сотрудниками отделов радиоэлектронного оборудования. АРМ стенда должно обеспечивать возможность выполнения тестирования в автоматическом режиме с применением составленных сценариев, а также автоматическое формирование отчётной документации с указанием заводского номера проверяемого блока, даты и времени проверки.

Одним из ключевых элементов качественной разработки информационной системы является функциональная модель процессов [4]. Функциональная модель – это описание функций системы и способов, которыми они выполняются, представленных с помощью специализированных диаграмм. При выполнении данной работы такая модель построена с помощью инструментов UML (Unified Modeling Language). Этот язык моделирования позволяет описать бизнес-процессы и функциональные требования к системе.

Разработанная UML диаграмма «вариантов использования» (Use Case Diagram) представлена на рис. 4. На этой диаграмме показаны все возможные варианты использования системы и их последствия. А именно: представлен функционал различных служб предприятия (группа главного конструктора, стендовый отдел, программист, отделы БРЭО, системный администратор), задействованных в проведении тестирования бортового оборудования, а также результаты влияния их работы.

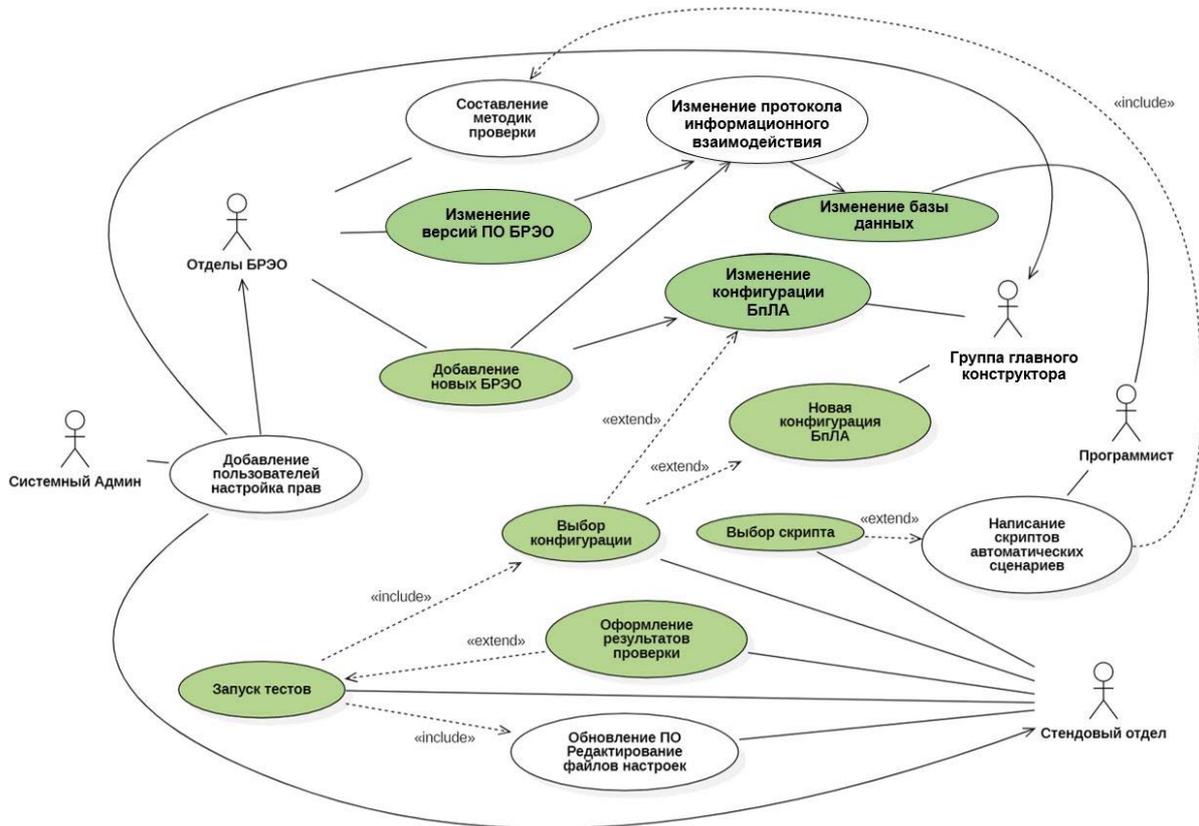


Рис. 4. UML-диаграмма «вариантов использования»

Следующий шаг в разработке информационной системы – это проектирование архитектуры программного обеспечения (АПО) – этап разработки программных систем, в котором создается общая концепция и дизайн программы [5]. АПО является ключевым элементом при создании высококачественных программных изделий, решает вопросы их безопасности и сопровождения, определяет структуру программного кода, а также технологии, необходимые для реализации программы.

Существует множество подходов к проектированию архитектуры, такие как: модульный, слоевой, клиент-серверный и микросервисный. Каждый подход имеет свои преимущества и недостатки, и выбор конкретного подхода зависит от требований к конкретному программному продукту. Для решения поставленной задачи рекомендуется модульный подход. Модульный подход при проектировании АПО позволяет выполнить разделение ответственности (Separation of Concerns): программа состоит из набора независимых компонентов, каждый из которых выполняет свою задачу. Это позволяет легко изменять и расширять программное обеспечение, не затрагивая другие его части. Структурная схема, поясняющая состав и взаимосвязь модулей АПО, представлена на рис. 5.

Выбор инструментов программирования должен быть основан на применении свободно распространяемого ПО с открытым исходным кодом. В целом предпочтительно использовать ПО, внесённое в реестр Российского программного обеспечения <https://reestr.digital.gov.ru/>. При этом выбираемые инструменты программирования должны взаимодействовать с существующим стендом и функционирующим программным обеспечением.

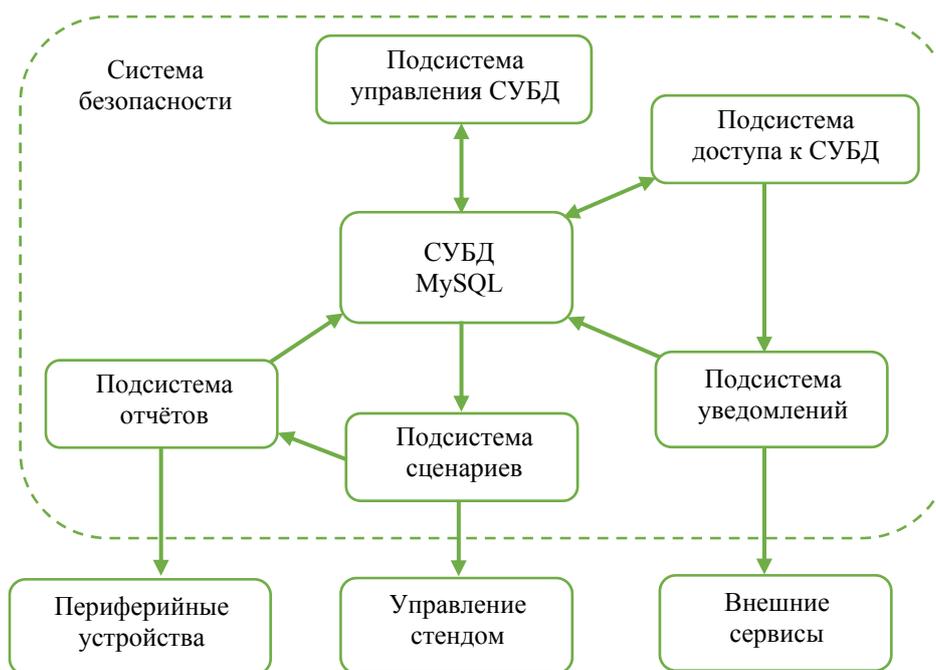


Рис. 5. Структурная схема архитектуры программного обеспечения

В качестве системы управления базой данных (СУБД) выбрана MySQL – самая популярная в мире база данных с открытым исходным кодом, которая широко применяется в веб-разработке и программировании [6]. Она проста в использовании, легковесна и имеет большое сообщество разработчиков. Управление базой данных можно выполнить в веб-интерфейсе. Браузер установлен на подавляющем большинстве персональных компьютеров и абсолютно не требователен к производительности. При этом отсутствуют требования к конкретизации операционной системы.

Для работы с базой данных все пользователи разделены на несколько групп (рис. 4):

1. Администраторы СУБД. Они обладают правами супер-пользователя, имеют права на выполнение всех операций. Основные задачи:

- обновление ПО СУБД;
- добавление, удаление пользователей, настройка прав доступа;
- создание резервных копий, точек восстановления;
- поддержание инструментов безопасности;
- ведение документации по администрированию;
- восстановление данных.

2. Группа главного конструктора. Основная задача: добавление и изменение конфигураций беспилотных летательных аппаратов в базе данных.

3. Отделы БРЭО. Основные задачи: добавление изделий БРЭО, изменение версии ПО БРЭО, добавление электронных версий протоколов информационного взаимодействия.

4. Пользователи (включая отдел стендового оборудования) – имеют доступ только на чтение.

Фрагмент структуры построенной базы данных MySQL представлен на рис. 6.

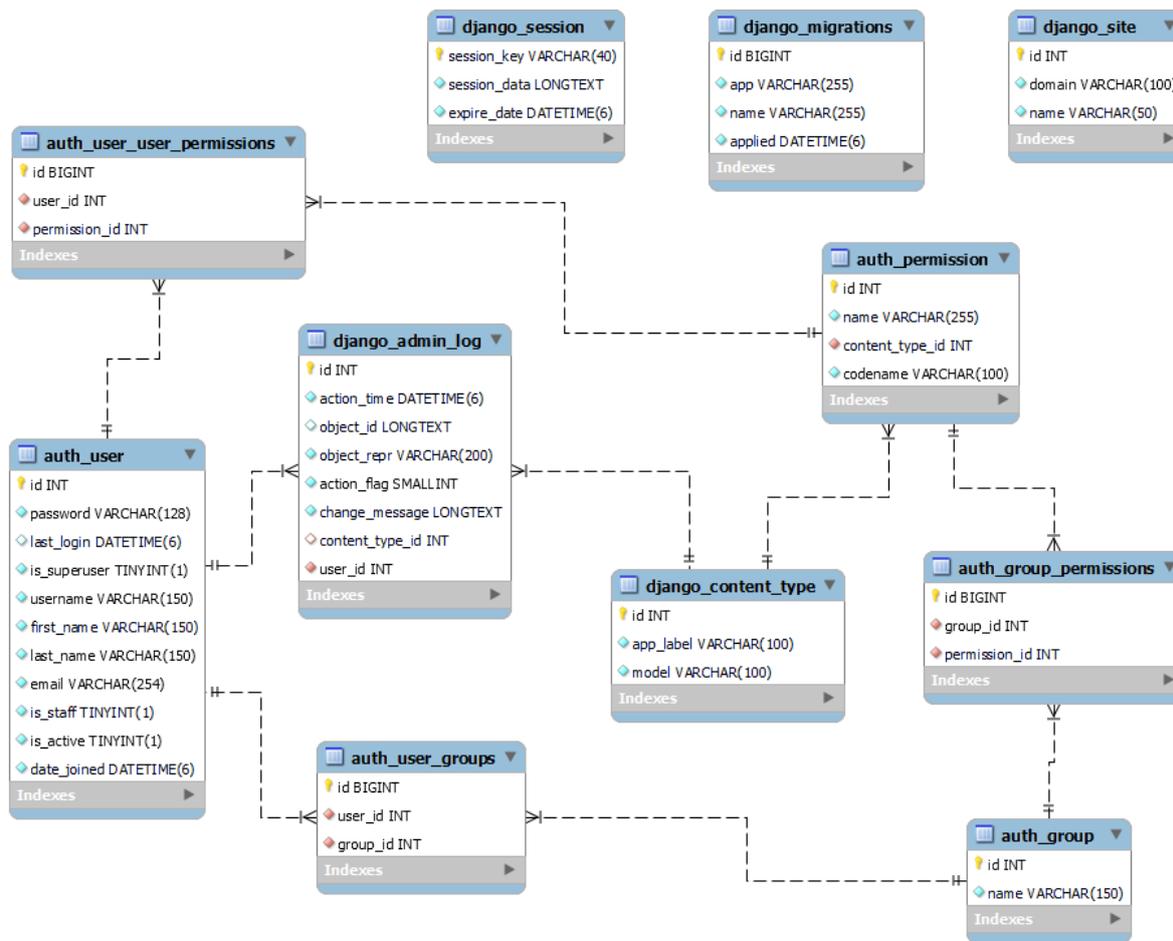


Рис. 6. Фрагмент структуры системы управления базой данных MySQL

Интерфейс управления реализован на языке Python с использованием Фреймворка Django в связке с инструментом Bootstrap для стилизации [7; 8].

Подсистема уведомлений (рис. 5) предназначена для рассылки по электронной почте сведений об изменении данных в СУБД. Подсистема функционирует на Фреймворке Django, модуль `django.core.mail`. Он обладает такими функциями, как:

- отправка электронных писем с указанием адресата, темы и сообщения;
- отправка массовых (групповых) сообщений;
- отправка вложений;
- отслеживание и обработка ошибок, связанных с неправильной отправкой сообщения;
- поддержка TLS и SSL-шифрования.

Модуль обладает всеми необходимыми настройками, включая работу с заголовками, имеет хорошую документацию, что делает его достаточно удобным для решения поставленной в исследовании задачи.

Подсистема сценариев (рис. 5) должна интегрироваться в действующее программное обеспечение «Имитаторы (модели)» (рис. 1), в которое входят: большинство математических моделей бортового оборудования БПЛА, модуль регистрации данных и графическая оболочка для ручного запуска исполняемых файлов. Соответственно, необходимо использовать тот же язык программирования, что и в действующем ПО: язык высокого уровня C++ и Фреймворк Qt [9; 10]. Разработка подсистемы сценариев один из наиболее трудоёмких этапов работы. Для написания сценариев необходима

разработка методик испытаний. Данная подсистема должна реализовывать следующие функции:

- загрузка значений из базы данных в память (ICD-сообщения, конфигурации, сценарии);
- автоматизированный запуск модулей из пакета ПО «Имитаторы (Модели)»;
- управление коммутационной автоматикой;
- чтение выходных параметров и сравнение их с эталонными;
- регистрация данных проверяемого оборудования.

Разработанная подсистема сценариев имеет два режима работы (рис. 7):

1. Проверка отдельных блоков. Режим предполагает короткую проверку работоспособности отдельного изделия БРЭО. Основное применение – входной контроль изделия при поступлении в АО «Кронштадт» от поставщиков.

2. Проверка систем. Режим предполагает создание индивидуального сценария проверки, применяется для нахождения ошибок логики взаимодействия системы в комплексе.

Данные конфигурации и блоков должны считываться из базы данных, для этого используются драйвера Qt QMYSQL, слой SQL API [9].

Подсистема отчётов (рис. 5) предназначена для генерации отчётов с помощью библиотеки LimeReport. Подсистема должна создавать отчёты по данным проверки. Отчёт должен включать:

- дата проверки;
- наименование проверяемого изделия;
- заводской номер;
- результат проверка (успешный либо неуспешный).

Выходной документ (отчёт) должен отправляться на принтер для печати и на файловый сервер предприятия.

Система безопасности (рис. 5) предназначена для защиты конфиденциальной информации, хранящейся в базе данных разрабатываемой функциональной системы и её подсистемах [11]. При разработке системы безопасности необходимы следующие механизмы защиты:

- аутентификация и авторизация;
- уровни доступа к базе данных для пользователей;
- шифрование данных;
- резервное копирование.

При обмене информации клиент-сервер рекомендуется применять промежуточное программное обеспечение для защиты от CSRF-атак (Cross-Site Request Forgery). Это вид вредоносной активности, при которой злоумышленник выполняет действия от имени прошедшего проверку пользователя. В применённом Фреймворке Django активируется промежуточное ПО «CSRF» в MIDDLEWARE строкой «'django.middleware.csrf.CsrfViewMiddleware'». MIDDLEWARE – это низкоуровневая система плагинов для глобального изменения входных или выходных данных Django [7].

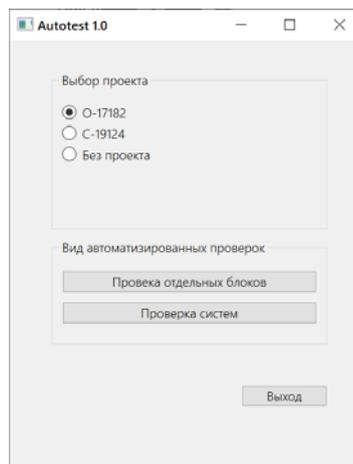


Рис. 7. Главное окно подсистемы выполнения сценариев

Оценка экономической эффективности

В работе была выполнена оценка экономической эффективности по методике [12] при создании и внедрении предлагаемой информационной системы (ИС) для стенда ПНМ на АО «Кронштадт». Исходные данные к расчёту представлены в таблице.

Таблица. Исходные данные

Наименование показателей	Условные обозначения	Единицы измерения	Значения показателей	
			без ИС	при ИС
1. Количество типовых проверок	N_p	шт./год	2400	2400
2. Трудоёмкость на одну проверку оператором стенда	t_p	чел.-ч./шт.	0,32	0,15
3. Трудоёмкость на подготовку документов сотрудником ОТК	t_d	чел.-ч./шт.	0,3	0,1
4. Количество сотрудников КБ	$N_{\text{чел}}$	человек	120	120
5. Число запросов сотрудником КБ текущей конфигурации БПЛА	$N_{\text{конф}}$	шт./год	18	18
6. Трудоёмкость на один запрос конфигурации	$t_{\text{конф}}$	чел.-ч./шт.	0,25	0,05
7. Оплата труда сотруднику стендового отдела	C_{std}	р./час	600	600
8. Оплата труда сотруднику ОТК	$C_{\text{отк}}$	р./час	600	600
9. Оплата труда сотруднику КБ	$C_{\text{кб}}$	р./час	800	800
10. Эксплуатация стенда	Z_{std}	р./час	400	400
11. Затраты на проектирование	$K_{\text{пр}}$	тыс. р.	0	100,8
12. Затраты на программирование	$K_{\text{по}}$	тыс. р.	0	630
13. Затраты на подготовку ИС	$K_{\text{ис}}$	тыс. р.	0	226,8
14. Затраты на отладку и ввод в эксплуатацию	$K_{\text{ив}}$	тыс. р.	0	277,2
15. Капитальные затраты (включая дооснащение стенда)	K_k	тыс. р.	0	480
16. Трудозатраты, связанные с эксплуатацией системы	$t_{\text{сис}}$	чел.-ч./мес.	0	720
17. Оплата труда сотруднику технической поддержки	$C_{\text{сис}}$	р./час	600	600

Выделим следующие показатели экономической эффективности:

- экономия, получаемая от эксплуатации за 1 год – P (тыс. р./год);
- экономический эффект от эксплуатации в течении года – \mathcal{E} (тыс. р./год);
- срок окупаемости – T (годы).

Экономия, получаемая от эксплуатации за 1 год, вычисляется по формуле:

$$P = P_{\text{std}} + P_{\text{отк}} + P_{\text{кб}} + P_{\text{эс}},$$

где: P_{std} – экономия отдела стендового оборудования за год, (тыс. р./год); $P_{\text{отк}}$ – экономия отдела технического контроля за год, (тыс. р./год); $P_{\text{кб}}$ – экономия отделов конструкторского бюро за год, (тыс. р./год); $P_{\text{эс}}$ – экономия от снижения времени эксплуатации стенда за год, (тыс. р./год).

Выполним расчёт (см. табл.):

$$P_{\text{std}} = (t_{\text{п0}} - t_{\text{п1}}) N_{\text{п}} C_{\text{std}} = 244,8 \text{ тыс.р./год};$$

$$P_{\text{отк}} = (t_{\text{д0}} - t_{\text{д1}}) N_{\text{п}} C_{\text{отк}} = 288 \text{ тыс.р./год};$$

$$P_{\text{кб}} = (t_{\text{конф0}} - t_{\text{конф1}}) N_{\text{конф}} N_{\text{чел}} C_{\text{кб}} = 345,6 \text{ тыс.р./год};$$

$$P_{\text{эс}} = (t_{\text{п0}} - t_{\text{п1}}) N_{\text{п}} Z_{\text{std}} = 163,2 \text{ тыс.р./год}.$$

Суммарная экономия, получаемая от эксплуатации за 1 год, равна:

$$P = 244,8 + 288 + 345,6 + 163,2 = 1041,6 \text{ тыс.руб./год}.$$

Экономический эффект от эксплуатации в течение года вычисляется по формуле:

$$\mathcal{E} = P - Z,$$

где Z – эксплуатационные затраты на техническую поддержку работы информационной системы:

$$Z = t_{\text{сис}} C_{\text{сис}} = 432 \text{ тыс.р./год}.$$

Тогда экономический эффект составит:

$$\mathcal{E} = 1041,6 - 432 = 609,6 \text{ тыс. р./год}$$

Период окупаемости вычисляется по формуле:

$$T = \frac{K_{\text{е}} + K_{\text{к}}}{\mathcal{E}},$$

где: $K_{\text{е}}$ – единовременные затраты на разработку информационной системы; $K_{\text{к}}$ – единовременные затраты на дооснащение стенда.

Выполним вычисления (см. табл.):

$$K_{\text{е}} = K_{\text{пр}} + K_{\text{по}} + K_{\text{ию}} + K_{\text{пв}} = 100,8 + 630 + 226,8 + 277,2 = 1234,8 \text{ тыс. р.}$$

$$T = \frac{1234,8 + 480}{609,6} = 2,81 \text{ года}.$$

Приняв для наглядности условную прибыль от применения испытательного стенда ПНМ равной 3 млн. р./год, построим сравнительные графики прибыли до и после внедрения информационной системы (рис. 8).

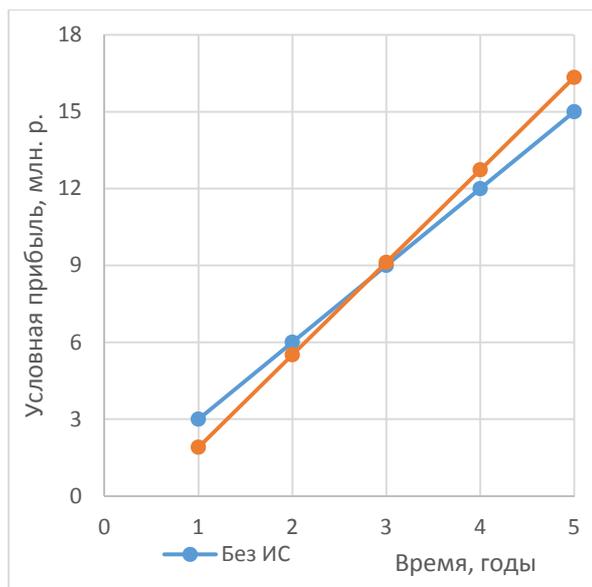


Рис. 8. График условной прибыли

Заключение

Подводя итоги проведённой работы, можно сделать некоторые выводы.

Очевидно, что рынок БПЛА в последующие годы будет только расти, соответственно увеличатся объёмы их производства. Поэтому организациям-производителям уже сегодня нужно задуматься о методах снижения трудоёмкости и времени изготовления БПЛА.

Тестирование и испытания БПЛА являются неотъемлемой частью как процессов их изготовления, так и модернизации. От качества организации испытаний, от достоверности полученных результатов зависит надёжность и технологичность создаваемых БПЛА.

В результате анализа применяемой в АО «Кронштадт» методики тестирования бортового оборудования БПЛА на стенде ПНМ выявлены недостатки, степень влияния которых будет расти с увеличением объёмов выпускаемой продукции.

Для устранения отмеченных недостатков предлагается решение двух задач:

1. Техническая доработка стенда средствами автоматизации элементов управления питанием и коммутационного оборудования. По предварительным оценкам такая доработка позволит сократить время типового тестирования одного комплекта БРЭО не менее чем на 15% от общего времени тестирования за счёт сокращения числа ручных операций, что при росте объёмов производства даст значительную экономию времени.

2. Внедрить на предприятии информационную систему планирования и проведения испытаний, которая позволит систематизировать работу как самого стенда ПНМ, так и в целом отдела испытаний в АО «Кронштадт». Решение такой более значительной задачи позволит повысить качество выполняемых работ по тестированию оборудования БПЛА.

Проведённый анализ экономической эффективности при внедрении предлагаемых решений показал, что инвестиции, затраченные на проект, окупятся в течение достаточно быстрого времени (2,81 года) и в дальнейшем будут приносить прибыль за счёт экономии при эксплуатации стенда до 609,6 тыс. р./год. Таким образом, предложенные в работе решения могут считаться эффективными и рекомендуемыми к внедрению. Кроме того, такой положительный результат может служить дополнительной мотивацией для сотрудников и инвесторов, что создаст благоприятную атмосферу в компании.

Библиографический список

1. Балашов В.В., Бахмуров А.Г., Волканов Д.Ю., Смелянский Р.Л., Чистилинов М.В., Ющенко Н.В. Стенд полунатурного моделирования для разработки встроенных вычислительных систем реального времени // Труды Третьей Всероссийской научной конференции «Методы и средства обработки информации» (6-8 октября 2009 г., Москва). М.: МАКС Пресс, 2009. С. 16-25.
2. Касьянов И.Ю., Дрягин Д.М., Гулевич С.П. Концептуальные подходы к построению стендовых комплексов интеграции бортового оборудования беспилотных летательных аппаратов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 11, ч. 3. С. 99-109.
3. Коптев А.Н., Прилепский В.А. Теория и практика контроля и диагностики систем авиационной техники: электронное учебное пособие. Самара: СГАУ, 2010. 219 с.
4. Арлоу Д., Нейштадт А. UML 2 и Унифицированный процесс. Практический объектно-ориентированный анализ и проектирование. СПб: Символ-Плюс, 2007. 624 с.
5. Назаров С.В., Киселев С.К., Макаров Н.Н., Кузнецов О.И., Сорокин М.Ю. Архитектура стенда полунатурного моделирования комплексов бортового оборудования вертолётов // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19, № 1-2. С. 357-363.
6. Дюбуа П. MySQL. Сборник рецептов. СПб: Символ-Плюс, 2006. 1056 с.
7. Дронов В.А. Django 2.1. Практика создания веб-сайтов на Python. СПб: БХВ-Петербург, 2019. 672 с.
8. Документация по фреймворку и библиотекам Django. <https://django.fun/ru/>
9. Documentation Qt. <https://doc.qt.io/qt-6/>
10. Шлее М. Qt 5.10. Профессиональное программирование на C++. СПб: БХВ-Петербург, 2018. 1072 с.
11. Белевская Ю.А., Фисун А.П., Минаев В.А., Зернов В.А., Еременко В.Т., Константинов И.С., Коськин А.В., Дворянкин С.В. Правовые основы информационной безопасности: учебник в 2-х кн. Кн. 1. Орел: ГУ-УНПК: ОГУ, 2011. 200 с.
12. Рыжко А.Л., Лобанова Н.М., Рыжко Н.А., Кучинская Е.О. Экономика информационных систем: учебное пособие. М.: Финансовый университет, 2014. 204 с.

AUTOMATION OF THE PROCESS OF TESTING ON-BOARD SYSTEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

© 2024

- | | |
|-----------------------|--|
| A. V. Kirillov | Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Aircraft Maintenance;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
aleksey.v.kirillov@ssau.ru |
| V. V. Sitnikov | Postgraduate Student;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
freiker007@gmail.com |
| A. L. Tuchin | Head of the Testing Team, Department of Test-Bench Equipment;
Kronshtadt JSC, Moscow, Russian Federation;
a.l.tuchin@ya.ru |

The article describes the experience of applying the methodology of Model-Based Systems Engineering (MBSE) in the organization of ground tests of the on-board equipment complex of unmanned aerial vehicles at Kronshtadt JSC. This methodology was successfully used in the development of various complex control systems such as embedded control systems, digital signal processing, computer vision, radar and communications. The analysis of the on-board equipment testing process using an existing ground test bench was performed, and a method for automating its operation has been proposed. The calculation of economic efficiency was performed.

Unmanned aerial vehicle; ground tests; avionics complex; digital model; simulator

Citation: Kirillov A.V., Sitnikov V.V., Tuchin A.L. Automation of the process of testing on-board systems of unmanned aerial vehicles. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 2. P. 14-27. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-14-27

References

1. Balashov V.V., Bakhmurov A.G., Volkanov D.Yu., Smelyanskiy R.L., Chistolinov M.V., Yushchenko N.V. Stend polunaturnogo modelirovaniya dlya razrabotki vstroennykh vychislitel'nykh sistem real'nogo vremeni. *Trudy Tret'ey Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Metody i Sredstva Obrabotki Informatsii» (October, 6-8, 2009, Moscow)*. Moscow: MAKS Press Publ., 2009. P. 16-25. (In Russ.)
2. Kasyanov I.Yu., Dryagin D.M., Gulevich S.P. Conceptual approach to construction of test facilities integration in on-board equipment of unmanned aircraft. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2017. No. 11, part 3. P. 99-109. (In Russ.)
3. Koptev A.N., Prilepskiy V.A. *Teoriya i praktika kontrolya i diagnostiki sistem aviatsionnoy tekhniki: elektronnoe uchebnoe posobie* [Theory and practice of control and diagnostics of aviation equipment systems. Electronic training manual]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2010. 219 p.
4. Arlow D., Neustadt I. UML 2 and the Unified Process. Practical object-oriented analysis and design. Addison-Wesley, 2005. 592 p.
5. Nazarov S.V., Kiselyov S.K., Makarov N.N., Kuznetsov O.I., Sorokin M.Yu. Architecture of the hil-simulation stand for modeling complexes of helicopters onboard avionics. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2017. V. 19, no. 1-2. P. 357-363. (In Russ.)
6. DuBois P. MySQL. Cookbook. O'Reilly, 2004. 1000 p.
7. Dronov V.A. *Django 2.1. Praktika sozdaniya veb-saytov na Python* [Django 2.1. The practice of creating websites in Python]. St. Petersburg: BHV-Petersburg Publ., 2019. 672 p.
8. *Dokumentatsiya po freymvorku i bibliotekam Django* [Documentation on the Django framework and libraries]. Available at: <https://django.fun/ru/>
9. Documentation Qt. Available at: <https://doc.qt.io/qt-6/>
10. Shlee M. *Qt 5.10. Professional'noe programirovanie na C++* [Qt 5.10. Professional programming in C++]. St. Petersburg: BHV-Petersburg Publ., 2018. 1072 p.
11. Belevskaya Yu.A., Fisun A.P., Minaev V.A., Zernov V.A., Eremenko V.T., Konstantinov I.S., Kos'kin A.V., Dvoryankin S.V. *Pravovye osnovy informatsionnoy bezopasnosti: uchebnik v 2-kh kn. Kn. 1* [Legal foundations of information security: textbook. In 2 books]. Orel: GU-UNPK: OSU Publ., 2011. 200 p.
12. Ryzhko A.L., Lobanova N.M., Ryzhko N.A., Kuchinskaya E.O. *Ekonomika informatsionnykh sistem: uchebnoe posobie* [Economics of information systems: textbook]. Moscow: Financial University Publ., 2014. 204 p.