

УДК 681.518.5

Г. С. РАНЧЕНКО, В. В. НЕРУБАССКИЙ, Д. С. БУРУНОВ

АО «Элемент», Одесса, Украина

ПОДХОДЫ К РЕАЛИЗАЦИИ БАЗОВОЙ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЙ ПЛАТФОРМЫ ЭЛЕКТРОННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ СЕМЕЙСТВА ТУРБОВАЛЬНЫХ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Дается описание предлагаемой концепции базовой аппаратно-программной платформы для построения электронных регуляторов типа FADEC, предназначенных для семейства авиационных ГТД. Приводятся основные принципы построения такой платформы. Описываются подходы к проектированию и исполнению корпуса блока САУ, аппаратной части, встроенного программного обеспечения, а также средств, облегчающих поддержку САУ на всех стадиях ее жизненного цикла. Особое внимание уделяется процессу проектирования программного обеспечения в соответствии с уровнем критичности, а также применению математического и имитационного моделирования при отладке, доводке и серийном производстве САУ.

Ключевые слова: аппаратно-программная платформа, , стенд-имитатор, программный симулятор.

Введение

Разработка современной цифровой САУ для авиационного ГТД является неординарной задачей, связанной с большими затратами как временных, так и финансовых ресурсов. Известно, что основным для создания САУ двигателя является техническое задание (ТЗ), которое формирует разработчик ГТД, ориентируясь на конкретный объект применения. Исполняя ТЗ, разработчик САУ скован спецификой этого объекта (габаритные и посадочные размеры блока САУ, тип и количество каналов ввода-вывода, особенности и количество принятых законов регулирования и т.д.).

АО «Элемент» на основании опыта создания, доводки, сертификации и серийного производства цифрового регулятора РДЦ-450М для ТВ ГТД АИ-450М, выполнив анализ требований к САУ еще ряда авиационных двигателей, предложило концепцию унифицированного цифрового регулятора для семейства авиационных ТВД и ТВ ГТД мощностью от 400 до 2800 л.с. (в перспективе до 12000 л.с.).

При этом учитывалось, что унифицированная САУ может использоваться как для модернизации существующих серийных двигателей, так и при разработке новых двигателей, а также в качестве альтернативной при импортозамещении (таблица 1).

Предлагаемая статья является описанием возможного подхода к реализации вышеуказанной концепции по отношению к существующим, модернизированным, модифицированным и перспективным двигателям разработки и производства ГП «Ивченко-Прогресс» и АО «Мотор Сич».

1. Основы концепции базовой САУ ГТД

Концепция базовой аппаратно-программной платформы базируется на следующих основных принципах:

1. Использование общей конструктивно-компоновочной схемы блока САУ.

2. Применение современных универсальных схемотехнических решений и разумной избыточности по модулям.

3. Использование общей электронной базы (микропроцессоры и др.).

4. Модульный подход к разработке программного обеспечения (ПО).

5. Широкое использование математического и имитационного моделирования.

2. Конструктивное исполнение

Конструктивно корпус блока представляет собой литую оребренную конструкцию из алюминиевого сплава, внутри которой расположены платы с электронными компонентами (рис. 1). На одной или двух из четырех боковых поверхностей размещаются внешние разъемы, причем входные и выходные разъемы могут быть расположены на противоположных гранях.

Конструкция блока допускает его размещение как в мотоотсеке, так и внутри планера

Применены демпферы для гашения вибраций и клапан для выравнивания давления воздуха снаружи и внутри блока.

Таблица 1

Сравнительная таблица двигателей и систем управления

Двигатель	Д-36	Д-436Т1/ТП	Д-436-148	Д-18Т 3-й серии	Д-136	ТВЗ-117	ТВЗ-117 ВМА-СБМ1	МС-14	АИ-450М (*)
Тип	ТРДД	ТРДД	ТРДД	ТРДД	ТВаД	ТВаД	ТВД	ТВД	ТВаД
Прототип	-	Д-36/436	Д-436Т1	-	Д-36		ТВЗ-117	ВК-1500	-
Класс тяги/ мощности	6500 кгс	7500 кгс	7500 кгс	23800 кгс	11500 л.с.	2200 л.с.	2800 л.с.	1500 л.с.	465 л.с.
Применение	самолетное			вертолетное		самолетное		вертолет- ное/самолетное	
ЛА	Як-42, Ан-72/74	Ту-334, Бе-200	Ан-148/ 158/178	Ан-124, Ан-225	Ми-26	Ми-8МТ, Ми-17, Ми-8МСБ	Ан-140	Ан-2-100	Ми-2М, МСБ-2 DA 50-JP7 DART 450
Тип САУ	гидромех. с электрон. корр.	гидромех. с электрон. корр.	FADEC	гидромех. с электрон. корр.	гидромех. с электрон. корр.	гидромех. с электрон. корр.	FADEC	FADEC	FADEC
Регулятор	935МА	935Т	НР4212	4015Т	4018/4019	НР-3	НР-2000	НР-14	НР-450М
Тип канала управ. насос- дозатором						аналоговый ± 35 мА			аналоговый ± 1 А
Электронный блок	ЭСУ-2-1, ЭСУ-2-3Т	ЭРРД-436	ЭСУ-436	ЭСУ-18-1	БПР-2	ЭРД-3В	РЭД-2000	РДЦ-1400	РДЦ-450М
Режимный па- раметр	$\pi \kappa \Sigma$	$\pi \kappa \Sigma$	$\pi \kappa \Sigma$ (п в – резерв.)	$\pi \kappa \Sigma$	$\pi \kappa \Sigma$, п ст	Р*к, п ст	Р*к, п ст	п тк, п ст	п гг, п ст
Ограничители	п в, п вд, t*тнд	-"-	п в, п нд, п вд, t*тнд	-"-	п нд, п вд, п ст, t*тнд, Мкр	п тк, п ст, t*тнд Мкр	п тк, п ст, t*тнд, Мкр	п тк, п ст, t*тнд, Мкр	п гг, п ст, t*тнд, Мкр, N
Устройства	КПВ КНД, КПВ КВД	-"-	-"-	КПВ КНД, КПВ КВД, ВНА	КПВ КНД, КПВ КВД,	ВНА, НА, КПВ	НА, КПВ	НА, КПВ	-
Дополнитель- ные функции	-	реверс. уст-во	-"-	-"-	синхрониза- ция 2-х двиг.	-"-	управление ВВ СВ-34	реверс тяги ВВ	синхронизация 2-х двиг.
		контроль вибрации							

*) Примечание. Существует вариант ТВаД АИ-450М – ТВД АИ-450С, оснащенный САУ РДЦ-450М-С с характеристиками, подобными РДЦ-450М

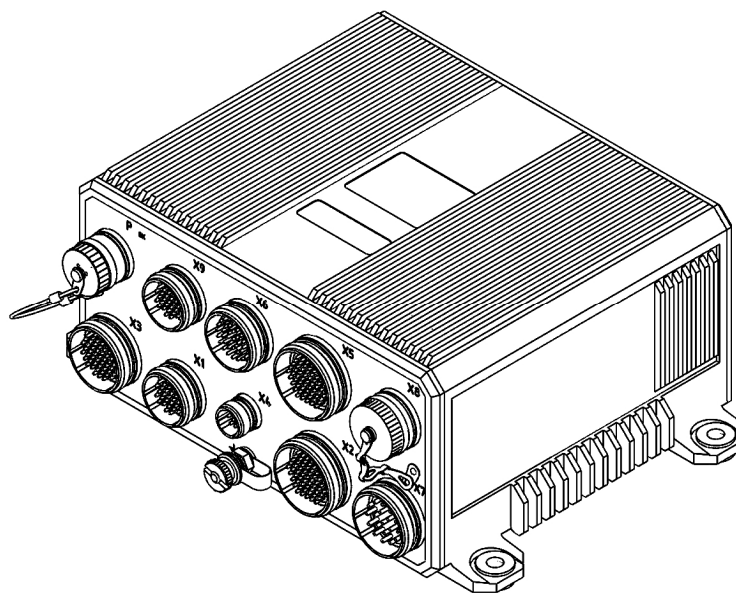


Рис. 1. Пример конструктивного исполнения блока базового варианта САУ

Корпус: двухплатный кросс, цилиндрические и прямоугольные разъемы, пыле- и влагозащищенный, устойчив к воздействию ЭМИБ HIRF, молниестоек, допускает работу при температуре окружающей среды от -40 до $+55^{\circ}\text{C}$,

3. Аппаратная платформа

Регулятор – типа FADEC, двухканальный с дублированием функций. Электронная часть выполнена в виде набора универсальных модулей, количество которых зависит от потребностей того или иного двигателя. Базовый набор состоит из восьми модулей:

1. Модуль центрального процессорного устройства - ЦПУ (по одному на каждый канал).
2. Модуль аналого-цифрового преобразователя - АЦП (по одному на каждый канал).
3. Модуль дискретных выходов - ДВ (по одному на каждый канал).
4. Модуль ДБСКТ и частотомеров - ДБЧ (по одному на каждый канал).
5. Модуль канала роторных вибраций - КРВ (общий для двух каналов).
6. Модуль термостружкосигнализатора - ТСС и индукции(общий для двух каналов).
7. Модуль автомата защиты свободной турбины - АЗСТ (по одному на каждый канал).
8. Модуль блока питания -БП выполняет фильтрацию и преобразование входного напряжения

При необходимости могут быть введены дополнительные модули: модуль регулируемого направляющего аппарата – РНА и др.

Модули – взаимозаменяемые, многофункциональные, имеют запас по количеству каналов ввода/вывода и обеспечивают реализацию полного набора алгоритмов управления и контроля двигателя. Используется реконфигурируемая структура измерительных каналов. Предусмотрена самодиагностика. Имеется возможность расширения перспективными функциями – управление по вычисляемым параметрам, восстановление сигналов отказавших датчиков, диагностический и трендовый анализ и др. Предусмотрено использование “умных” датчиков и исполнительных механизмов для облегчения перехода к распределенной архитектуре САУ.

Применен ряд перспективных технических и технологических решений: соединители мезонинного типа, кросс-платы, способ размещения тепловыделяющих элементов.

В модуле ЦПУ используется современный микропроцессор семейства ARM 32-bit Cortex-M4, обеспечивающий достаточный запас вычислительной мощности для выполнения основных и перспективных функций. В периферийных модулях применяются микропроцессоры с аналогичной архитектурой.

4. Встроенное ПО

ПО выполняет функции управления работой агрегатов системы запуска, управления подачей топлива, выполнение защитных функций, контроль работы самого блока, передачу информации в бортовые системы объекта по каналам информационного обмена (ARINC-429). Основные функции выполняются в неизменяемой последовательности с тактом цикла 10 мс.

В ПО используется отлаженный механизм минимаксной селекции законов управления и программный ПИД-регулятор, индивидуально настраиваемый для каждого контура управления.

Кроме основных функций управления и защиты двигателя, выполняемых регулятором, ПО реализует ряд вспомогательных функций: регистратор параметров работы двигателя и регистратор отказов. Обеспечивается запись и хранение в энергонезависимой памяти количества запусков, наработок двигателя по режимам, суммарной наработки двигателя, усредненных значений параметров работы.

ПО разделено на уровни, причем ПО нижнего и среднего уровня выполняет сбор и предварительную обработку информации, которая затем поступает на средний и верхний уровень и используется для анализа (сравнения с заданными допусками, уставками и т.д.) и для последующей выработки «решений» в виде сигналов (команд), выдаваемых на исполнительные механизмы.

Процедуры ПО выполнены максимально независимо друг от друга, оттестированы, прошли процесс верификации.

Разработка ПО проводится в строгом соответствии с квалификационными требованиями КТ-178В, а в перспективе - RTCA/DO-178С и EUROCAE. Уровень критичности каждой из процедур определяется исходя из уровня критичности функций САУ, в результате чего для резидентной программы и загружаемой конфигурации ПЛИС центрального процессора установлен наивысший уровень критичности – А.

5. Вспомогательные средства при создании регуляторов

На всех стадиях жизненного цикла САУ применяются средства, облегчающие и ускоряющие процесс создания, отработки, испытаний и сертификации блока: стенд-имитатор (СИ) для проверки и испытаний регулятора и программный симулятор (ПС) режимов работы регулятора в составе силовой установки.

Основу аппаратной части СИ [2] составляют модули, обеспечивающие:

- имитацию всех аналоговых, дискретных и цифровых сигналов, поступающих к регулятору от датчиков, агрегатов и систем двигателя;
- прием управляющих сигналов (команд) от регулятора;
- имитацию отказов датчиков и их линий связи;
- передачу параметров двигателя по стандарту Ethernet (протокол TCP/IP).

ПО СИ включает в себя всережимную динамическую математическую модель двигателя, математические модели внешних устройств силовой установки (насоса-дозатора, редуктора, несущего винта и др.).

Часть функций СИ реализована аппаратно, а часть – программно. Вычислительной платформой для ПО СИ служит промышленное шасси Micro PC.

Для этапов предварительного проектирования САУ, когда ее аппаратная часть еще не готова, разработан программный симулятор (ПС) [3]. Функционально ПС аналогичен СИ, но не имеет аппаратной части.

В ПС имеется модуль управления информационными потоками, который обеспечивает имитацию физических каналов связи и позволяет имитировать нарушение обмена между каналами модуля САУ и нештатные ситуации работы ГТД.

Отличительной особенностью созданных СИ и ПС является возможность проверки нештатных и аварийных режимов работы ГТД, что значительно сокращает объем и сроки испытаний ГТД на моторных стендах и в составе ЛА, а также существенно уменьшает время, необходимое для настройки, градуировки и испытаний САУ и сдачи готовой продукции.

Заключение

Все вышеуказанные принципы построения унифицированного цифрового регулятора прошли отработку при создании РДЦ-450М,С, а также при создании варианта САУ РДЦ-1400 для ТВД МС-14 модернизированного многоцелевого самолета Ан-2-100. Следует отметить, что на разработку САУ от момента выдачи ТЗ до первого запуска двигателя было потрачено всего четыре месяца.

Продолжает развиваться семейство САУ РДЦ-450М: проходит летные и сертификационные испытания на самолетах Diamond DA-50JP7 и DART-450 вариант РДЦ-450М-С для ТВД АИ-450С.

Исследуется возможность применения базового регулятора для ТВД МС-14ВП, ТВ3-117ВМА-СБМ1В, МС-500, Д-136-2. Поступили предложения по разработке САУ для ТРДД Д-436-148 самолетов Ан-158/178, ТРДД Д-18Т серии 4 для самолетов Ан-124 и Ан-225 и др.

Литература

1. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей [Текст] : монография / С. В. Епифанов, В. И. Кузнецов, И. И. Богаченко [и др.]. – К. : Техника, 1998. – 312 с.
2. Буряченко, А. Г. Стенд-имитатор турбовального двигателя АИ-450М для испытаний регулятора двигателя. Метрологическое обеспечение и аттестация стенда [Текст] / А. Г. Буряченко,

В. М. Грудинкин, Д. С. Бурунов // *Вестник двигателестроения*. – 2015. – № 2. – С. 95-101.

3. Волков, Д. И. *Разработка и моделирование перспективных электронных систем управления авиационными ГТД с использованием программного симулятора [Текст] / Д. И. Волков, В. П. Комаров, В. В. Нерубаский // Вестник двигателестроения*. – 2015. – № 2. – С. 92-94.

References

1. Epifanov, S. V., Kuznecov, I. I., Bogaenko B. I. *Sintez sistem upravlenija i diagnostirovanija gazoturbinnih dvigatelej* [Synthesis of control and diagnostic

system for gas turbine engine]. Kiev, Tehnika Publ., 1998. 312 p.

2. Burjachenko, A. G. Grudinkin, V. M., Burunov, D. S. *Stend-imitator turboval'nogo dvigatelja AI-450M dlja ispytanij reguljatora dvigatelja. Metrologicheskoe obespechenie i attestacija stenda* [Stand-simulator of turboshaft engine AI-450M for engine unit test]. *Bulletin of propulsion engineering*, 2015, no. 2, pp. 95-101.

3. Volkov, D. I., Komarov, V. P., Nerubasskij, V. V. *Razrabotka i modelirovanie perspektivnyh jelektronnyh sistem upravlenija aviacionnymi GTD s ispol'zovanijem programmnoho simuljatora* [Development and modeling of perspective electronic control systems for aircraft GT with program simulator applicatio]. *Bulletin of propulsion engineering*, 2015, no. 2, pp. 92-94.

Поступила в редакцию 5.05.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник И. М. Гвоздева, АО «Элемент», Одесса.

ПІДХОДИ ДО РЕАЛІЗАЦІЇ БАЗОВОЇ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОЇ ПЛАТФОРМИ ЕЛЕКТРОННИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ СІМЕЙСТВА ТУРБОВАЛЬНИХ АВІАЦІЙНИХ ГТД

Г. С. Ранченко, В. В. Нерубаский, Д. С. Бурунов

Дається опис запропонованої концепції базової апаратно-програмної платформи для побудови електронних регуляторів типу FADEC, призначених для сімейства авіаційних ГТД. Наводяться основні принципи побудови такої платформи. Описуються підходи до проектування і виконання корпусу блоку САК, апаратної частини, програмно-апаратних засобів, а також засобів, що полегшують підтримку САК на всіх стадіях її життєвого циклу. Особливу увагу приділено процесу проектування програмного забезпечення відповідно до рівня критичності, а також застосування математичного та імітаційного моделювання під час налагодження, відпрацювання та серійного виробництва САК.

Ключові слова: апаратно-програмна платформа, стенд-імітатор, програмний симулятор.

APPROACHES TO THE IMPLEMENTATION OF A BASE HARDWARE/SOFTWARE PLATFORM OF ELECTRONIC CONTROL UNIT FOR THE FAMILY OF AVIATION TURBOSHAFT ENGINES

G. S. Ranchenko, V. V. Nerubaskiy, D. S. Buronov

A description of the proposed unified hardware/software platform concept for the electronic controls developing, intended for a family of gas turbine engines is provided. The basic principles of such a platform are declared. It is described approaches to the design and manufacturing of control unit package, hardware, embedded software and tools to facilitate the support of the control unit at all stages of its life cycle. Particular attention attends to the process of the software design in accordance with the level of severity, as well as the application of mathematical and simulation modeling during debugging, development and production of control unit.

Key words: hardware and software platform, stand-simulator, a software simulator.

Ранченко Геннадий Степанович – канд. техн. наук, Директор-главный конструктор, АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua.

Нерубаский Вадим Владимирович – науч. сотр., начальник бюро разработки программного обеспечения, АО «Элемент, Одесса, Украина, e-mail: vnerubaskiy@yandex.ru.

Бурунов Дмитрий Сергеевич – ведущий инженер БРАС АО «Элемент, Одесса, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua.

Ranchenko Gennadii Stepanovich – Ph.D., Director and Chief Designer, Ph.D, JSC “Element”, Odessa, Ukraine, e-mail: odessa@element.od.ua.

Nerubassky Vadim Vladimirovych -Chief of software development bureau JSC “Element” Odessa, Ukraine, e-mail: vnerubaskiy@yandex.ru.

Buronov Dmitriy Sergeevich – lead engineer JSC«Element»,Odessa, Ukraine, e-mail: odessa@element.od.ua.