УДК 621.452.3.03:681.518.54

doi: 10.32620/aktt.2021.4.10

А. Г. БУРЯЧЕНКО, Д. С. БУРУНОВ, О. В. НЕМЧЕНКО

АО «Элемент», Одесса, Украина

КОМПАКТНЫЙ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ САУ ГТД В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Проанализирована актуальность создания компактного аппаратно-программного комплекса с целью обеспечения полноценной проверки работоспособности электронных регуляторов газотурбинных двигателей, в частности двигателя AI-35, разрабатываемого ГП «Ивченко-Прогресс». В статье приведено описание состава и функциональных возможностей разработанного АО «Элемент» устройства, получившего название «Комплекс программно-технических средств имитации исполнительных механизмов и датчиков двигателя». Рассматриваемый комплекс предназначен как для автономного использования, так и для работы в составе автоматизированного рабочего места (АРМ), которое в свою очередь является частью стенда полунатурного моделирования двигателя AI-35. Особенностью комплекса является то, что он содержит встроенные математические модели двигателя, электроприводного насоса-регулятора топлива, а также датчиков, устанавливаемых на двигателе. По результатам обработки цифровых сигналов, поступающих от АРМ или сенсорного дисплея, комплекс формирует выходные аналоговые и частотные сигналы – частота вращения ротора, давление на выходе из компрессора, температура на входе в компрессор, температура газов на выходе из турбины. Также комплекс формирует сигналы управления имитацией воспламенительных пиросвечей и топливного пироклапана, в частности обеспечивает имитацию их «сгорания» за счет разрыва цепи. Встроенный сенсорный дисплей упрощает оператору, проводящему испытания регулятора и двигателя, использование комплекса по назначению. С помощью дисплея, без использования ПЭВМ, оператор имеет возможность вручную управлять процессом имитации выдачи команды на запуск двигателя, изменяя значения частоты вращения ротора, формировать различные режимы работы двигателя, устанавливая соответствующие параметры, имитировать помпаж двигателя и др. Функционал разработанного комплекса обеспечивает отладку алгоритмов управления ГТД и проведение последующих испытаний регулятора.

Ключевые слова: бортовая аппаратура; регулятор двигателя; стенд-имитатор; математическая модель, метрологические характеристики.

Введение

Создание аппаратно-программных стендов-имитаторов является современным способом обеспечения испытаний бортовой аппаратуры на соответствие требованиям к выполнению основных функций по назначению. Во многих случаях такие портативные стенды, имитирующие объект как взаимодействующую с испытываемым изделием систему посредством выдачи и приема аналоговых, цифровых и дискретных сигналов, вполне успешно заменяют громоздкие полунатурные стенды.

Будучи сертифицированным разработчиком и изготовителем комплектующих изделий авиационной техники АО «Элемент» уделяет значительное внимание оснащению как собственной испытательной базы, так и предприятий-заказчиков специализированными средствами испытаний и диагностики, в числе которых основное место занимают стенды-имитаторы – от имитаторов датчиков до стендов с

встроенной математической моделью авиадвигателя или стартера-генератора, обеспечивающих полноценную проверку изделий, включая такие сложные и многофункциональные изделия, как семейство электронных блоков системы управления и контроля двигателя (регуляторов) РДЦ-450М [1 – 3].

1. Постановка задачи

В рамках разработки регулятора ECU-35 двигателя AI-35, выполняемой по техническому заданию ГП «Ивченко-Прогресс», была поставлена задача разработать и изготовить комплекс программно-технических средств имитации исполнительных механизмов и датчиков двигателя, который должен также имитировать системы летательного аппарата и насос-регулятор, и должен обеспечить:

– выполнение автономной проверки функционирования регулятора ECU-35 в условиях хранения и эксплуатации, включая проверку метрологических

характеристик измерительных каналов и работы противопомпажной системы;

– работу в составе автоматизированного рабочего места специализированного стенда ГП «Ивченко–Прогресс» для полунатурного моделирования двигателя AI-35 и его модификаций.

Кроме того, ставилась задача минимизации массо-габаритных характеристик комплекса.

2. Результаты

К настоящему времени разработан и изготовлен первый образец комплекса – рисунок 1, представляющий собой компактный блок (220x213x85 мм) весом 2 кг с сенсорным дисплеем, предоставляющим оператору возможность управлять процессом автономной проверки функционирования регулятора.

Рис. 1. Комплекс программно-технических средств имитации исполнительных механизмов и датчиков двигателя AI-35

Встроенное программное обеспечение комплекса содержит математические модели двигателя, насоса-регулятора и датчиков, благодаря чему комплекс при взаимодействии с регулятором ECU-35 имитирует двигатель AI-35 посредством приема и выдачи дискретных, аналоговых, частотных и цифровых сигналов. Математические модели двигателя AI-35 и насоса-регулятора предоставлены Заказчиком – ГП «Ивченко–прогресс» и адаптированы разработчиками АО «Элемент» для работы в составе комплекса.

Структурная схема комплекса показана на рисунке 2. В состав комплекса входят имитаторы устройств, с которыми должен взаимодействовать регулятор ECU-35:

– датчиков, преобразующих перечисленные в таблице 1 параметры, характеризующие работу дви-

гателя, в аналоговые и частотные сигналы в соответствии с заданными функциями преобразования (математическими моделями) и пределами допускаемой погрешности имитации (воспроизведения);

– топливного пироклапана и воспламенительных пиросвечей (резистивные нагрузки, ток через которые контролируется встроенными измерителями комплекса, причем по достижении заданного порога на уровне 2... 5 А обеспечивается имитация «сгорания» пиросвечи или пироклапана – разрыв цепи);

– источников цифровых сигналов RS485 и CAN (системы летательного аппарата, блок управления насосом-регулятором);

– автономной стендовой системы (дискретный сигнал).

Взаимодействие комплекса с автоматизированным рабочим местом обеспечивает оператору возможность управления процессом испытаний не только с дисплея комплекса, но и с ПЭВМ.

Для пояснения работы с комплексом ниже приводим порядок выполнения основных операций по проверке функционирования регулятора ECU-35. Примеры вида рабочих экранов комплекса показаны на рисунке 3. Оператор, переключая вкладки (клавиши в нижней части экрана – «Exchange», «Models», «OPT&VERS&FMP», «Imitators»), получает доступ к любому из четырех экранов.

После подключения комплекса к регулятору ECU-35 и подачи питания в начале работы по умолчанию на имитаторах комплекса устанавливаются параметры неработающего двигателя, которые ECU-35 измеряет и передает в системы летательного аппарата. Эти измеренные параметры отображаются на рабочем экране вкладки «Exchange» – рисунок 3 слева. Для начала проверки оператор задает имитацию выдачи от систем летательного аппарата в ECU-35 команды на запуск двигателя, а именно:

– в поле *n_task* указывает значение заданной скорости вращения ротора (информация, передаваемая в ECU-35 и имитирующая сигналы от систем летательного аппарата);

– нажимает клавиши «prepulse» и «start», после чего ECU-35 в автоматическом режиме должен выполнить запуск – на экране отобразятся соответствующие параметры двигателя.

Далее оператор, изменяя значение в поле *n_task*, т.е. имитируя соответствующие сигналы от систем летательного аппарата, может тем самым выдавать задание ECU-35 поддерживать различные режимы работы двигателя, а встроенные математические модели двигателя и насоса-регулятора будут обеспечивать соответствующие штатным режимам изменения сопутствующих параметров.

Рис. 2. Структурная схема комплекса программно-технических средств имитации исполнительных механизмов и датчиков двигателя AI-35:

АРМ – автоматизированное рабочее место; АСС – автономная стендовая система;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БУ – блок управления;

ВП – воспламенительная пиросвеча; НРЭ – насос-регулятор электрический; ПИР – топливный пироклапан;

ЦПУ – центральный процессор управления

Таблица 1

Аналоговые и частотные сигналы

Параметр	Функция преобразования (математическая модель)	Допускаемая погрешность имитации, % от ИЗ
1 Частота вращения ротора ANC_E (два канала)	$f_{en} = 4 \cdot ANC_E / 60$ [Гц]	$\pm 0,05$
2 Давление на выходе из компрессора PCF_E	$Udd_{en} = k_p \cdot PCF_E + 0,5$ [В] где k_p – коэффициент преобразования [В/кПа]	$\pm 0,1$
3 Температура на входе в компрессор TINB_E	если $-200 \leq t < 0$, то: $Rt_{en} = 100 \cdot (1 + Ar \cdot t + Br \cdot t^2 + Cr \cdot (t - 100) \cdot t^3)$ [Ом] если $t \geq 0$, то: $Rt_{en} = 100 \cdot (1 + Ar \cdot t + Br \cdot t^2)$ [Ом] где $t \equiv t1_E = TINB_E - 273,15$ Ar, Br, Cr – коэффициенты аппроксимации	$\pm 0,5$
4 Температура газов на выходе из турбины THF_E	$E_{en} = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3 + a_4 \cdot t^4$ [мВ] где $t \equiv t5_E = THF_E - 273,15$ $a_0, a_1 \dots a_4$ – коэффициенты аппроксимации, значения которых зависят от поддиапазона	$\pm 0,1$

Рис. 3. Примеры рабочих экранов (окон) комплекса

Оператор может вмешиваться в штатное протекание процесса посредством указания нужных параметров в полях «Engine Model Parameters» на экране вкладки «Models» – рисунок 3 справа. Обозначения параметров на вкладке идентичны указанным в таблице 1, а предшествующее «d» означает приращение. Так, введение некоторого числа в поле dTHF_E, вызовет имитацию соответствующего приращения температуры газов на выходе из турбины. Используя этот инструмент можно изменять протекание процесса – например, имитировать превышение в процессе работы двигателя заданных значений контролируемых параметров с тем, чтобы проверить выполнение регулятором ECU-35 функций по их ограничению.

Поля «PompAmp» и «PompFreq» предназначены для задания амплитуды и частоты синусоидального изменения давления воздуха на выходе из компрессора, что позволяет имитировать помпажные явления при работе двигателя и проверить функционирование противопомпажной системы блока ECU-35.

Клавиши «MM_Eng_off» и «MM_FMP_off» предоставляют оператору возможность отключить работу встроенной математической модели двигателя и (или) насоса-регулятора и устанавливать значения всех параметров непосредственно с клавиатуры, например, для проверки метрологических характеристик измерительных каналов ECU-35.

С экрана вкладки «Imitators» можно имитировать отказы датчиков и исполнительных механизмов (включая пироклапан, пиросвечи, блок управления насоса-регулятора), например, для проверки функционирования встроенной системы контроля регулятора ECU-35.

Комплекс работает при питании от источника постоянного тока напряжением от 18 до 32 В, что позволяет обеспечить его работу от бортовой сети, при этом проверяемый регулятор ECU-35 запитыва-

ется от комплекса. Таким образом, малогабаритный портативный комплекс обеспечивает возможность выполнить все необходимые проверки параметров регулятора ECU-35 непосредственно на месте его хранения или эксплуатации.

Кроме того, комплекс, будучи фактически имитатором двигателя AI-35, обеспечивает все необходимые настройки и проверки регулятора ECU-35 разработчика-изготовителя как на стадии рабочего проектирования, так и при серийном производстве.

Еще одно применение описываемого комплекса – работа в составе автоматизированного рабочего места, которое, в свою очередь, является частью стенда полунатурного моделирования двигателя AI-35, разрабатываемого ГП «Ивченко–Прогресс», который повысит уровень автоматизации испытаний и обеспечит, в числе прочего, отработку алгоритмов управления двигателем.

Периодическая проверка характеристик комплекса, включая погрешность имитации сигналов датчиков (см. табл. 1) доступна с помощью стандартных средств измерительной техники.

Заключение

1. В АО «Элемент» в рамках обеспечения разработки и серийного выпуска регулятора двигателя AI-35 создан переносной малогабаритный аппаратно-программный комплекс средств имитации датчиков и исполнительных механизмов, в программное обеспечение которого интегрированы математические модели двигателя и насоса-регулятора, предоставленные ГП «Ивченко–прогресс» и адаптированные специалистами АО «Элемент».

2. Комплекс, работающий при питании от источника постоянного тока напряжением от 18 до 32 В (т.е. возможно питание от бортовой сети), обеспечивает все необходимые проверки параметров регулятора ECU-35 (включая проверку метроло-

гических характеристик измерительных каналов и работы противопомпажной системы) непосредственно на месте его хранения или эксплуатации, а также проверку и отладку регулятора на производстве, его предварительные, межведомственные, квалификационные, приемо-сдаточные, периодические и типовые испытания.

3. Разработанный комплекс предоставляет оператору (испытателю) возможность управлять испытаниями регулятора ECU-35 как непосредственно с встроенного сенсорного экрана комплекса, так и с компьютера автоматизированного рабочего места. Одно из назначений комплекса – работа в составе стенда полунатурного моделирования двигателя AI-35, разрабатываемого ГП «Ивченко-Прогресс».

Литература

1. Буряченко, А. Г. Стенд-имитатор турбовального двигателя AI-450M 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.

2. Буряченко, А. Г. Метрологическое обеспечение испытаний электронных регуляторов ГТД – стенд-имитатор двигательных датчиков [Текст] / А. Г. Буряченко, И. К. Лопатченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – №7 (151) – С. 101-106.

3. Буряченко, А. Г. Стенд-имитатор стартер-генератора с функцией имитации работы двух стартер-генераторов на общую бортовую сеть [Текст] / А. Г. Буряченко, Г. Ф. Цалимов, А. А. Царев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – №8 (152). – С. 123-127.

References

1. Burjachenko, A. G., Grudinkin, V. M., Burunov, D.S. *Stend-imitator turbovalnogo dvigatelja AI-450M dlya ispytaniy reguljatora dvigatelya. Metrologicheskoe obespechenie i attestacija stenda* [Test bench-imitator of engine AI-450M for engine regulator testing. Metrological security and test bench verification]. *Vestnik dvigatelestroenija – Engine building messenger*, 2015, no. 2, pp. 95-101.

2. Burjachenko, A. G., Lopaschenko, I. K. *Metrologicheskoe obespechenie ispytaniy elektronnyh reguljatorov GTD – stend-imitator dvigatelnyh datchikov* [Metrological supply of electronic regulators for GTE – stand-imitator of engine sensors]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2018, no.7 (151), pp. 101-106.

3. Burjachenko, A. G., Tsalmov, G. F., Tsarev, A. A. *Stend-imitator starter-generatora s funktsiej imitatsii raboti dvuh starter-generatorov na obshchuju bortset'* [On-board starter-generator control unit tests providing]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2018, no.8 (152), pp. 123-127.

Поступила в редакцию 10.06.2021, рассмотрена на редколлегии 09.08.2021

КОМПАКТНИЙ АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОННИХ РЕГУЛЯТОРІВ САУ ГТД В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

А. Г. Буряченко, Д. С. Бурунов, О. В. Нємченко

Проаналізовано актуальність створення компактного апаратно-програмного комплексу з метою забезпечення повноцінної перевірки працездатності електронних регуляторів газотурбінних двигунів, зокрема двигуна AI-35, що розробляється ДП «Івченко-Прогрес». У статті приведено опис складу і функціональних можливостей розробленого АТ «Елемент» пристрою, що отримав назву «Комплекс програмно-технічних засобів імітації виконавчих механізмів і датчиків двигуна». Розглянутий комплекс призначений як для автономного використання, так і для роботи в складі автоматизованого робочого місця (АРМ), яке в свою чергу є частиною стенда напівнатурного моделювання двигуна AI-35. Особливістю комплексу є те, що він містить вбудовані математичні моделі двигуна, електроприводного насоса-регулятора палива, а також датчиків, що встановлюються на двигуні. За результатами обробки цифрових сигналів, що надходять від АРМ або сенсорного дисплея, комплекс формує вихідні аналогові і частотні сигнали – частота обертання ротора, тиск на виході з компресора, температура на вході в компресор, температура газів на виході з турбіни. Також комплекс формує сигнали управління імітацією запалювальних піросвіч і паливного піроклапана, зокрема забезпечує імітацію їх «згоряння» за рахунок розриву ланцюга. Вбудований сенсорний дисплей спрощує оператору, який проводить випробування регулятора і двигуна, використання комплексу за призначенням. За допомогою дисплея, без використання ПЕОМ, оператор має можливість вручну управляти процесом імітації видачі команди на запуск двигуна, змінюючи значення частоти обертання ротора, формувати різні режими роботи двигуна, встановлюючи відповідні параметри, імітувати помпаж двигуна та ін. Функціонал

розробленого комплексу забезпечує налагодження алгоритмів управління ГТД і проведення подальших випробувань регулятора.

Ключові слова: бортова апаратура; регулятор двигуна; стенд-імітатор; математична модель, метрологічні характеристики.

COMPACT HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR DIAGNOSTICS OF ELECTRONIC REGULATORS OF GTE ACS IN OPERATION

A. Buryachenko, D. Burunov, O. Niemchenko

The relevance of creating a compact hardware and software complex is analyzed to ensure a full check of the operability of electronic regulators of gas turbine engines, in particular, the AI-35 engine, developed by SE "Ivchenko-Progress". The article describes the composition and functionality of the device developed by Element JSC, which was named "Complex of software and hardware for imitation of actuators and engine sensors". The complex under consideration is intended both for autonomous use and for work as part of an automated workstation (AWS), which in turn is a part of the AI-35 engine semi-natural simulation stand. A feature of the complex is that it contains built-in mathematical models of the engine, electric drive pump-fuel regulator, as well as sensors installed on the engine. Based on the results of processing digital signals from an automated workstation or a touchscreen display, the complex generates output analog and frequency signals – rotor speed, pressure at the compressor outlet, the temperature at the compressor inlet, temperature of gases at the outlet of the turbine. The complex also generates control signals for the imitation of igniting pyro plugs and a fuel pyrovalve, in particular, it provides an imitation of their "combustion" by breaking the circuit. The built-in touchscreen display makes it easy for the operator conducting the governor and engine tests to use the complex as intended. With the help of the display, without using a PC, the operator can manually control the process of simulating the issuance of a command to start the engine by changing the values of the rotor speed, form various modes of engine operation, setting the appropriate parameters, simulate engine surge, etc. The functionality of the developed complex provides debugging of GTE control algorithms and subsequent tests of the regulator.

Keywords: onboard equipment; engine regulator; simulator stand; mathematical model, metrological characteristics.

Буряченко Анна Григорьевна – главный метролог АО «Элемент», Одесса, Украина.

Бурунов Дмитрий Сергеевич – начальник бюро АО «Элемент», Одесса, Украина.

Немченко Ольга Владимировна – инженер-метролог 1 категории, АО «Элемент», Одесса, Украина.

Anna Buryachenko – Chief Metrologist of JSC "Element", Odessa, Ukraine,
e-mail: annaodessa55@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4480-6965.

Dmitriy Burunov – head of department of JSC "Element", Odessa, Ukraine,
e-mail: odessa@element.od.ua, ORCID: 0000-0003-2864-2681.

Olha Niemchenko – first category engineer with metrology, JSC Element, Odesa, Ukraine,
e-mail: olha121n@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5557-1837.