

УДК 621.452.3.03:006.91:620.17-52

doi: 10.32620/akt.2023.4.08

А. Г. БУРЯЧЕНКО, Д. С. БУРУНОВ, С. Р. ВЯЛОВ

АТ «Елемент», Одеса, Україна

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИПРОБУВАНЬ РЕГУЛЯТОРА МАЛОРОЗМІРНОГО ГАЗОТУРБІННОГО АВІАДВИГУНА

Предмет досліджень – можливість створення контрольно-перевірочної апаратури (КПА) для забезпечення повномасштабних автономних випробувань розробленого на підприємстві регулятора малорозмірного газотурбінного авіадвигуна. **Метою роботи** було на базі інформації про характеристики авіадвигуна, включаючи уточнення його математичної моделі за експериментальними даними, розробити КПА, що представляє собою сучасний малогабаритний апаратно-програмний комплекс, який дозволяє автоматизувати процес перевірки працездатності, що проводиться як у технологічному циклі при виробництві регулятора, так і в експлуатації. **Завдання**, що стояли перед розробниками, полягали у визначенні оптимального набору функцій апаратури, який би забезпечив достатні дані для достовірної оцінки працездатності регулятора за результатами перевірки при мінімізації витрат часу і ймовірності помилок, та реалізація функції автоматизованого виконання комплектного градування (калібрування) вимірювальних каналів регулятора, зокрема каналу вимірювання тиску (спільно з датчиком тиску) та каналу вимірювання витрати палива (з датчиком кута повороту дозуючого елемента дозатора палива). **Методи**, що були застосовані: на першому етапі проектування – аналіз наявних даних щодо процесів, які треба автоматизувати, після чого був застосований метод експериментального дослідження характеристик першого зразка та його взаємодії з авіадвигуном на випробувальній базі розробника (АТ «Елемент») та на випробувальних двигунних стендах АТ «Мотор Січ», а потім – метод статистичної обробки даних, включаючи уточнення математичної моделі авіадвигуна. **Результати**. Розроблена КПА складається з апаратної частини, конструктивно оформленої у вигляді блоку КПА вагою 1,7 кг з вбудованим програмним забезпеченням, і програмного виробу, що встановлюється на персональний комп'ютер. Інтегрована у вбудоване програмне забезпечення математична модель авіадвигуна дозволяє виконати повноцінну перевірку функціонування регулятора, зокрема, на запуску двигуна, на підтримці заданого режиму роботи, при забезпеченні захисту від перевищення допустимих значень параметрів. **Наукова новизна** отриманих результатів полягає у розробці КПА з інтегрованою математичною моделлю двигуна та набором функцій, які забезпечують повну автономну перевірку працездатності регулятора, що верифіковано в процесі випробувань на реальному двигуні. **Практична значущість** отриманих результатів полягає в тому, що виробництво та експлуатація новорозробленого регулятора авіадвигуна оснащені компактним та зручним у застосуванні засобом повноцінного оперативного автоматизованого контролю його працездатності.

Ключові слова: контрольно-перевірочна апаратура; комплектуючі вироби авіаційної техніки; регулятор двигуна.

Вступ

Тенденції розвитку контрольно-перевірочної апаратури для комплектуючих виробів авіаційної техніки (КВ АТ) в сучасних умовах з урахуванням доступної елементної бази полягають в:

– зменшенні масогабаритних показників з одночасним розширенням функцій автоматизації та повноти перевірки характеристик КВ АТ в умовах експлуатації;

– широкому використанні спеціалізованого програмного забезпечення, як вбудованого, так і «зовнішнього», що встановлюється на стандартний персональний комп'ютер, який взаємодіє з апаратною частиною контрольно-перевірочної апаратури.

АТ «Елемент» як сертифікований розробник і виробник КВ АТ, серед яких значне місце займають регулятори режимів роботи авіадвигунів, має в своєму арсеналі значну кількість спеціально розроблених засобів випробувань і діагностики бортової апаратури (від порівняно простих імітаторів датчиків до стендів з вбудованою математичною моделлю авіадвигуна), які використовуються як при випробуваннях виробів у процесі розробки та виробництва, так і при тестуванні в умовах експлуатації [1–4].

1. Постановка задачі

У зв'язку з розробкою АТ «Елемент» нового регулятора, призначеного для управління роботою

малорозмірного газотурбінного авіадвигуна, була поставлена задача забезпечити його експлуатацію спеціалізованою контрольно-перевірочною апаратурою. Основною метою розробки зазначеної апаратури було забезпечення оперативної перевірки функціонування регулятора, що проводиться на базі експлуатуючого підприємства. Додатковим завданням розробки стала автоматизація випробувань регулятора при випуску з виробництва.

У рамках поставлених задач треба було:

- визначити оптимальний набір функцій, який би забезпечив достатні дані для достовірної оцінки працездатності регулятора за результатами перевірки при мінімізації як витрат часу, і ймовірності помилки;

- забезпечити максимально можливу зручність використання, включаючи рівень автоматизації і так званий дружній інтерфейс з одного боку і прийнятні масо-габаритні показники з іншого;

- реалізувати функції автоматизованого виконання комплектного градування (калібрування) вимірювальних каналів регулятора, зокрема каналу вимірювання тиску (спільно з датчиком тиску) та каналу вимірювання витрати палива (спільно з датчиком кута повороту дозуючого елемента дозатора палива).

2. Результати

Розроблений і виготовлений зразок контрольно-перевірочної апаратури складається з апаратної частини, вбудованого програмного забезпечення та спеціально розробленого програмного виробу, що встановлюється на персональний комп'ютер.

Апаратна частина конструктивно виконана у вигляді блоку КПА (рисунок 1) розміром 221×213×91 мм, який з'єднується з регулятором, що перевіряється, і з персональним комп'ютером кабелями, що входять в комплект.



Рис. 1. Блок КПА

Вага блоку не перевищує 1,7 кг. На передній панелі розташовані три кнопки керування та дисплей, на який виводиться найбільш значуща інформація (повна інформація про режим і параметри виконуваного процесу та інструменти керування цим процесом – на екрані персонального комп'ютера).

У блоці КПА реалізовані імітатори об'єктів, що взаємодіють з регулятором при експлуатації та функція вимірювання сигналів, що надходять від регулятора до взаємодіючих з ним об'єктів. Спрощена структура блоку КПА показана на малюнку 2.

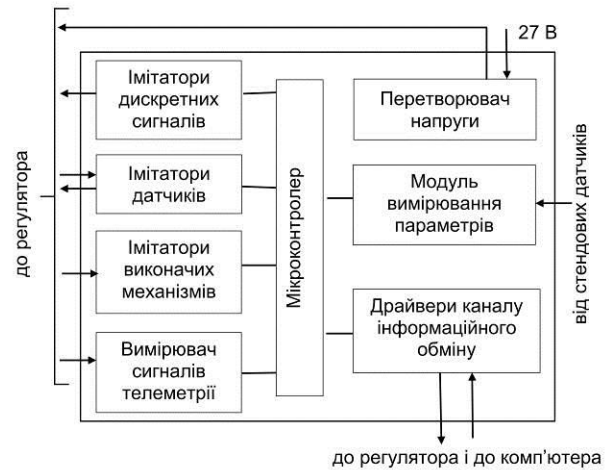


Рис. 2. Спрощена структура блоку КПА

Блок КПА забезпечує імітацію:

- датчиків, встановлених на двигуні та на дозаторі палива (аналогові та частотні сигнали) – 6 каналів імітації датчиків тиску, температури, кута повороту дозуючого елемента дозатора палива, швидкості обертання ротора двигуна;

- виконавчих механізмів – 6 дискретних сигналів;

- ряду сигналів від двигуна та ЛА (у тому числі сигналу керування з бортової системи керування).

Імітатори забезпечують відтворення заданих рівнів, діапазонів і похибок сигналів, що надходять в регулятор від взаємодіючих з ним об'єктів. Додатково передбачена можливість імітувати відмови згаданих об'єктів в експлуатації для перевірки функціонування вбудованої системи контролю регулятора.

Щодо імітації приймачів сигналів, які видаються регулятором у взаємодіючі об'єкти, виготовлений зразок блоку КПА забезпечує прийом:

- 11 дискретних сигналів;

- 11 аналогових сигналів телеметрії;

- сигналу управління на базі широтно-імпульсної модуляції (струм до 2 А).

Крім того, при проведенні комплектного гра-

дування вимірвальних каналів регулятора з датчиками блок КПА виконує вимірювання сигналів, що надходять від датчиків параметрів витрати палива по 12 каналах. Перелік параметрів з вказівкою діапазону вимірювань і меж допустимої похибки для кожного типу каналу наведено в таблиці 1.

Апаратна структура блоку КПА сформована на базі мікроконтролера, до складу резидентного програмного забезпечення якого включена спеціально розроблена програма, що реалізує математичну модель авіадвигуна, що ставить блок в один ряд зі стендами-імітаторами авіадвигунів аналогічними описаному в [1]. Наявність у блоці КПА вбудованої математичної моделі авіадвигуна в сукупності з установлюваним на персональний комп'ютер програмним виробом КПА дозволяє оператору виконати

повноцінну перевірку функціонування регулятора на різних режимах роботи двигуна, керуючи випробуваннями з клавіатури комп'ютера і спостерігаючи за перебігом процесу на екрані, де відображаються числові значення параметрів, так і графіки їх зміни в часі – рисунок 3.

Програмний виріб КПА, що встановлюється на персональний комп'ютер:

- в автоматичному режимі зчитує із підключеного регулятора його ідентифікаційний (заводський) номер та номер версії резидентного програмного забезпечення;

- виконує перевірку видачі та прийому регулятором аналогових та дискретних сигналів – автоматично по всьому списку або вибірково за завданням оператора;

Таблиця 1

Сигнали датчиків, що вимірюються блоком КПА

Найменування параметра та кількість каналів	Діапазони сигналів та параметрів		Функція перетворення	Межі основної похибки
	на вході КПА	на виході КПА		
1 Частота сигналу ТПР витрати палива – 4 канали	0 – 250 Гц	0 – 15 кг/год	Індивідуальне градування виду $Q_T = A + B \cdot f$	$\pm 0,06$ кг/год ($\pm 1,0$ Гц)
	0 – 500 Гц	0 – 600 кг/год		$\pm 1,20$ кг/год ($\pm 1,0$ Гц)
2 Температура палива – 4 канали	100 – 138,51 Ом	0 – 100 °С	По ДСТУ ГОСТ 6651:2014 – Pt (0,003910 °С ⁻¹)	± 1 °С
3 Тиск палива – 4 канали	4 – 20 мА	0 – 60 кгс/см ²	Лінійна	$\pm 1,0$ % ВП ($\pm 0,16$ мА)
		0 – 10 кгс/см ²		



Рис. 3. Головне вікно програми КПА

– дозволяє оператору дати команду на включення в роботу інтегрованої в блок КПА математичної моделі авіадвигуна і провести перевірку виконання регулятором основних функцій, таких як запуск двигуна, підтримка заданого режиму роботи, захист від перевищення допустимих значень параметрів;

– надає оператору можливість провести в автоматизованому режимі комплектне градування вимірювальних каналів регулятора – каналу вимірювання тиску (спільно з датчиком тиску) та каналу вимірювання витрати палива (спільно з датчиком кута повороту дозуючого елемента дозатора палива);

– веде запис баз даних та автоматично формує протокол випробувань або комплектного градування вимірювальних каналів, який за командою оператора може бути виведений на друк.

Перші зразки КПА пройшли комплекс необхідних випробувань і перевірку метрологічних характеристик в АТ «Елемент» і впроваджені як інструмент автоматизації випробувань нового регулятора як на підприємстві-виробнику, так і в експлуатаційній організації.

У той же час продовжується робота з вдосконалення розробленого КПА, зокрема вже найближчим часом планується відмова від використання «зовнішнього» програмного виробу, що встановлюється на комп'ютер, оскільки вбудоване програмне забезпечення КПА з розширеними функціями дозволить реалізувати весь спектр перевірок, що виконуються. Таким чином виробництво та експлуатація розробленого на підприємстві регулятора авіадвигуна буде оснащено малогабаритним автономним інструментом автоматизації випробувань, що логічно продовжує ряд спеціалізованих стендів, які розробляються і виготовляються в АТ «Елемент» у рамках робіт з метрологічного забезпечення та автоматизації виробництва.

Висновок

1. Розроблено контрольно-перевірочну апаратуру для регулятора малорозмірного газотурбінного авіадвигуна, що складається з малогабаритного блоку КПА з вбудованим програмним забезпеченням (у яке інтегрована математична модель авіадвигуна, що була уточнена за результатами експериментальних досліджень) та програмного виробу, що встановлюється на персональний комп'ютер. Виготовлені, пройшли всі випробування та перевірку метрологічних характеристик перші зразки, які забезпечують автоматизацію випробувань нових регуляторів на виробництві та в експлуатації.

2. Перспектива проведеної роботи передбачає вдосконалення вбудованого програмного забезпечення блоку КПА з тим, щоб надати можливість оператору виконувати повноцінну перевірку регулятора без використання персонального комп'ютера, що підвищить оперативність робіт в умовах експлуатації.

Внесок авторів: формулювання проблеми – **А. Г. Буряченко, Д. С. Бурунов**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **А. Г. Буряченко**; розробка контрольно-перевірочної апаратури – **Д. С. Бурунов, С. Р. Вялов**; аналіз результатів експериментальних досліджень КПА – **А. Г. Буряченко, Д. С. Бурунов**

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. 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.

2. Буряченко, А. Г. Метрологическое обеспечение испытаний электронных регуляторов ГТД – стенд-имитатор двигательных датчиков [Текст] / А. Г. Буряченко, И. К. Лопашенко // 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.

4. Буряченко, А. Г. Компактный аппаратно-программный комплекс для диагностики электронных регуляторов САУ ГТД в эксплуатации [Текст] / А. Г. Буряченко, Д. С. Бурунов, О. В. Немченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2021. – №4 (172). – С. 73-78.

References

1. Burjachenko, A. G., Grudinkin, V. M. & Burunov, D. S. Stend-imitator turboval'nogo dvigatelja AI-450M dlja ispytanj reguljatora dvigatelja. Metrologicheskoe obespechenie i atte-stacija 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. & Lopashhenko, I. K. Metrologicheskoe obespechenie ispytanj jelektronnyh reguljatorov GTD – stend-imitator dvigatel'nyh datchikov

[Metrological supply of electronic regulators for GTE – stand-imitator of engine sensors]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2018, no. 7 (151), pp. 101-106.

3. Burjachenko, A. G., Tsalimov, G. F. & Tsarev, A. A. Stend-imitator starter-generatora s funkciej imitacii raboty dvuh starter-generatorov na obshhuju bortovuju set' [On-board starter-generator control unit tests providing]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i*

tehnologia – Aerospace technic and technology, 2018, no. 8 (152), pp. 123-127.

4. Burjachenko, A. G., Burunov, D. S. & Nemchenko, O. V. Kompaktnyj apparatno-programmnyj kompleks dlja diagnostiki jelektron-nyh reguljatorov SAU GTD v jekspluatacii. [Compact hardware-software complex for diagnostics of electronic controllers of ACS gas turbine engines in operation]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2021, no. 4 (172), pp. 73-78.

Надійшла до редакції 07.06.2023, розглянута на редколегії 08.08.2023

METROLOGICAL SUPPLY AND AUTOMATION OF A SMALL GAS TURBINE AIRCRAFT ENGINE REGULATOR TESTING

*Anna Buryachenko, Dmitriy Burunov,
Sergey Vialov*

The subject of this research was the possibility of creating a control and verification apparatus (CVA) for ensuring full-scale autonomous tests of the regulator of a small gas turbine aircraft engine developed at the enterprise. **The purpose of this study** was to develop CVA (a modern small-sized hardware and software complex that allows automating the performance tests, which is carried out as during the production technological cycle of the regulator, as well as in operation) based on information about the aircraft engine characteristics, including refinement of its mathematical model based on experimental data. **The tasks** faced by the developers were to determine the optimal set of functions of the equipment, which would provide sufficient data for a reliable assessment of the regulator's performance based on the test results while minimizing the time spent and the probability of errors, and the implementation of the function of automated performance of complete regulator measuring channels calibration, including the pressure measurement channel (together with the pressure sensor) and the fuel flow measurement channel (with the sensor of the angle of rotation of the dosing element of the fuel dispenser). **The applied methods** are follows: at the first stage of design it was the analysis of available data on the processes that need to be automated, after that the experimental method of research the first sample characteristics and its interaction with the aircraft engine was applied at the developer's test base (JSC "Element") and at engine test stands of JSC "Motor Sich", and then – a method of statistical data processing, including refinement of the mathematical model of the aircraft engine. **The results.** The developed CVA consists of a hardware part structurally designed in the form of a CVA block weighing 1.7 kg with built-in software and a software product installed on a personal computer. The mathematical model of the aircraft engine integrated into the built-in software allows you to perform a full-fledged check of the regulator's functioning, in particular, at the start of the engine, at the maintenance of the specified operating mode, while ensuring protection against exceeding the permissible values of the parameters. **The scientific novelty** of the obtained results is the development of the CVA with an integrated engine mathematical model and a set of functions that provide a full autonomous regulator operability check, which was verified in the process of testing on real engine. **The practical significance** of the obtained results lies in the fact that the production and operation of the newly developed aircraft engine regulator is equipped with a compact and easy-to-use means of full-fledged operational automated control of its performance.

Keywords: control and testing equipment; aviation equipment components; engine regulator.

Буряченко Анна Григоріївна – головний метролог АТ «Елемент», Одеса, Україна.

Бурунов Дмитро Сергійович – начальник бюро АТ «Елемент», Одеса, Україна.

Вялов Сергій Русланович – інженер АТ «Елемент», Одеса, Україна.

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.

Sergey Vialov – Engineer of JSC "Element", Odessa, Ukraine,
e-mail: odessa@element.od.ua, ORCID: 0009-0006-7784-8896.