

УДК 621.452.3:006.91

А. Г. БУРЯЧЕНКО, И. К. ЛОПАЩЕНКО

АО «Элемент», Одесса, Украина

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ГТД – СТЕНД-ИМИТАТОР ДВИГАТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

Описано обеспечение испытаний электронных регуляторов газотурбинных двигателей типа FADEC в лабораторных условиях на площадке предприятия-изготовителя. Главное внимание уделено обеспечению контроля метрологических характеристик измерительных каналов регулятора. Приведены результаты разработки отдельных конструктивно обособленных имитаторов датчиков, с которыми взаимодействует регулятор, включая ДБСКТ и датчик вибрации. Показана целесообразность и результаты создания стенда, объединившего все имитаторы, необходимые для обеспечения серийного производства. Даны сведения о верификации имитаторов и обеспечении коэффициентов точности.

Ключевые слова: комплектующее изделие авиационной техники, математическая модель, измерительный канал, коэффициент точности

Введение

АО «Элемент» – сертифицированный разработчик и изготовитель комплектующих изделий авиационной техники (КИ АТ), выполняет в интересах ГП «Ивченко–Прогресс» и АО «Мотор Сич» работы по созданию ряда изделий бортового применения, включая электронные регуляторы типа FADEC для таких двигателей как АИ-450М, АИ-450В, АИ-450С, МС-500В-02С.

В этом ряду – регуляторы, находящиеся на различных стадиях, в том числе и выпускаемый серийно РДЦ-450М, имеющий Свидетельство о годности комплектующего изделия [1]. В сентябре 2017 года АО «Элемент» получило от Авиационного регистра МАК Сертификат одобрения производственной организации в качестве изготовителя РДЦ-450М.

Очевидно, что требования по обеспечению качества каждого такого агрегата подразумевают проведение комплекса различных работ, в частности, обеспечения испытаний, как в процессе разработки, так и при выпуске из производства. Существенную роль играет специализированное оборудование собственной разработки АО «Элемент», обеспечивающее в лабораторных условиях (на площадке Исполнителя) проверку всех функций и характеристик агрегата в части контроля параметров двигателя и управления режимами его работы, в частности – стенды, имитирующие двигатель как взаимодействующую с регулятором систему за счет:

- имитации всех аналоговых, дискретных и цифровых сигналов, поступающих к регулятору от датчиков, агрегатов и систем двигателя;
- приема управляющих сигналов (команд) от

регулятора;

– выполнения вычислений и формирование множеств взаимозависимых значений параметров (в виде аналоговых, дискретных и цифровых сигналов), каждое из которых соответствует одному из режимов работы двигателя, согласно заранее заданным функциональными зависимостям, отражающим характеристики двигателя (математической модели двигателя).

Например, один из таких стендов, представляющий собой двухканальный программно-аппаратный комплекс с встроенной математической моделью двигателя, описан в [2].

1. Постановка задачи

Одной из важнейших функций электронных регуляторов является измерение сигналов датчиков, установленных на летательном аппарате, в частности, на двигателе – типичный состав измеряемых датчиками параметров приведен в таблице 1. Результаты таких измерений служат основой для формирования «картины» состояния двигателя и режима его работы, для выполнения регулятором алгоритмов управления и защиты двигателя.

Для реализации указанной функции в состав регулятора интегрированы измерительные каналы, метрологические характеристики которых должны быть подтверждены в процессе испытаний.

Следует принять во внимание, что требования к стенду-имитатору в части имитации сигналов датчиков ограничиваются воспроизведением сигналов с погрешностями, не превышающими пределов погрешностей реальных (имитируемых) датчиков, чего

вполне достаточно для обеспечения проверки функционирования регулятора. В то же время требования к погрешностям измерительных каналов регулятора зачастую жестче, нежели требования к погрешностям датчиков.

Таблица 1
Типичный состав параметров

Параметры, измеряемые датчиками (используемый датчик)	Типичное количество
1. Скорость вращения ротора	10
2. Давление масла, топлива	4
3. Температура газа (термопара)	2
4. Температура масла, воздуха (термосопротивление)	3
5. Угловое положение ДЭ (45Д-32)	2
6. Угол установки ОПВ (ДБСКТ)	2
7. Уровень вибрации	2

Из сказанного очевидно, что для обеспечения проверки метрологических характеристик измерительных каналов регуляторов надо:

– либо ужесточать требования к стенду-имитатору в части погрешностей имитации сигналов датчиков до степени, обеспечивающей необходимый метрологический запас (коэффициент точности) согласно [3] – это было признано неоправданно усложняющим и без того крайне непростое изделие;

– либо изготовить отдельные специализированные имитаторы датчиков, что в общем случае представляется гораздо более целесообразным, выполнить их верификацию путем сравнения результатов, полученных с упомянутыми имитаторами и с реальными датчиками и обеспечить систематический (а в некоторых случаях – постоянный) контроль сигнала имитатора поверенными средствами измерительной техники.

К тому времени, когда эта задача стала актуальной для АО «Элемент» в отношении электронных регуляторов типа FADEC, мы уже имели определенный опыт создания и использования таких имитаторов для проверки других изделий. Новым, однако, являлось одно из наиболее сложных в этом ряду устройств – имитатор датчика вибрации.

Кроме того, накопленный опыт состоял в использовании отдельных, конструктивно обособленных имитаторов по принципу один имитатор – один датчик.

С ростом выпуска регуляторов после сертификации производства РДЦ-450М и, соответственно, повышением требований к сокращению времени проверки, актуальной стала задача объединения отдельных имитаторов (поочередно подключаемых к регулятору) в едином конструктивном блоке, который подключался бы к регулятору штатным кабелем

и обеспечивал проверку всех измерительных каналов.

Таким образом, в рамках метрологического обеспечения разработки и затем производства электронных регуляторов перед АО «Элемент» стояла задача:

- разработать новый имитатор – имитатор датчика вибрации и выполнить его верификацию;
- разработать стенд, конструктивно объединяющий имитаторы всех датчиков, с которыми взаимодействует регулятор, обеспечив их совместную корректную работу, а также удобство использования стенда при испытаниях.

2. Результаты

Сложность имитации датчиков, применяемых для измерения параметров, перечисленных в таблице 1, различается весьма значительно.

Так для имитации термосопротивления используется стандартный поверенный магазин сопротивлений – достаточно организовать удобство его подключения и переключения с одного канала регулятора на другой.

Довольно просто имитировать термоэлектрический преобразователь (термопару) посредством использования делителя, а также тензорезистивный датчик давления, схема которого представляет собой измерительный мост Уитстона.

Датчики скорости вращения, взаимодействующие с регуляторами – это датчики с частотным выходным сигналом. Для их имитации первоначально использовался стандартный генератор и подобранный специальным образом согласующий трансформатор.

В настоящее время элементная база позволяет изготовить имитатор датчика скорости вращения без использования трансформатора и при этом уйти от ограничений по форме сигнала и по минимальному значению амплитуды. Такой имитатор находится в стадии разработки.

Наиболее сложными для имитации оказались датчик вибрации и датчик углового положения типа ДБСКТ (дублированные бесконтактные синусно-косинусные трансформаторы).

Для измерения углового положения используются датчики двух типов:

- ДБСКТ, информационный сигнал которых представляет собой отношение напряжений на синусной и косинусной обмотках,
- 45Д-32 – линейные вращающиеся трансформаторы.

Что касается имитатора ДБСКТ, то он разработан специалистами АО «Элемент» ранее для калибровки и поверки системы контроля углового положения СКУП и используется для этой цели много

лет. Интересно отметить, что на сегодняшний день разработано два варианта имитатора, причем ни один из них не имеет в своем составе трансформаторных обмоток в отличие от реального ДБСКТ.

Соответствие имитатора ДБСКТ реальному датчику в части взаимодействия с измерительными каналами наших изделий подтверждено неоднократно, для чего в свое время был разработан, изготовлен и прошел государственную метрологическую аттестацию специализированный механический стенд для проверки характеристик ДБСКТ [4].

Имитатор датчика типа 45Д-32 выполнен на базе трансформатора и в целом максимально приближен к реальному датчику за исключением того, что изменение выходного сигнала достигается не за счет вращения обмоток, а регулируется (ступенчато) за счет дополнительно встроенной линейки прецизионных резисторов.

Задача измерения нашими изделиями сигналов датчика вибрации и, соответственно, имитации датчика вибрации стала впервые при разработке регулятора РДЦ-45М.

Регулятор должен взаимодействовать с датчиком, являющимся, по существу, пьезокристаллом, поляризующимся при сжатии под действием виброускорения – функция преобразования описана как прямо пропорциональная зависимость электрического заряда Q на выходе от амплитуды виброускорения α на входе датчика.

Очевидно, что наиболее близким имитатором поляризованного пьезокристалла является конденсатор. В результате проведенного поиска решений, разработан и изготовлен имитатор, основными элементами схемы которого являются специализированный трансформатор и набор конденсаторов. Трансформатор, запитываемый от стандартного генератора переменного напряжения, обеспечивает подачу питания $U_{вх}$ на вход состоящей из конденсаторов схемы, которая собственно и имитирует пьезокристалл. Емкости конденсаторов подобраны таким образом, что отношение заряда Q на выходе имитатора к напряжению $U_{вх}$ постоянно и равно 1 пКл/мВ:

$$Q / U_{вх} = 1 \text{ пКл/мВ.} \quad (1)$$

Наличие этой зависимости позволяет, измерив значение $U_{вх}$, легко вычислить Q . Иными словами, амплитудное значение напряжения $U_{вх}$, измеренное в мВ численно равно значению заряда Q на выходе, измеренному в пКл. Частота сигнала на выходе имитатора равна частоте, задаваемой от генератора.

По расчетной оценке при использовании конденсаторов с допуском $\pm 1,0\%$ наибольшее возможное значение погрешности, обусловленной разбро-

сом значений не превысит $\pm 1,0\%$ от измеряемого значения (от ИЗ).

Что касается погрешности измерения напряжения $U_{вх}$, то при использовании современных цифровых вольтметров, она будет на уровне $\pm 0,5\%$ от ИЗ.

Таким образом, в целом при проверке каналов РДЦ погрешность имитации менее $\pm 1,5\%$ от ИЗ, что вполне приемлемо при нормируемой погрешности измерительного канала 4% от ИЗ.

Для сравнения можно заметить, что типичные значения пределов погрешности имитируемых датчиков вибрации составляют от ± 5 до $\pm 10\%$.

Для экспериментального подтверждения соответствия разработанного имитатора реальному датчику была проведена следующая проверка. Регулятор, измерительные каналы которого были проградуированы на имитаторе, передали для проверки в комплекте с пятью датчиками вибрации в специализированный отдел ГП «Укрметртестстандарт» (г. Киев). Результаты комплектной проверки измерительных каналов с каждым из пяти датчиков подтвердили, что градуировка каналов на имитаторе обеспечила выполнение заданных требований.

В 2016 году испытательная база АО «Элемент» пополнилась аттестованным рабочим местом для проверки метрологических характеристик датчиков вибрации, благодаря чему стало доступно проведение систематической верификации имитатора датчика вибрации, которая подтверждает стабильность его характеристик.

В процессе разработки электронных регуляторов в АО «Элемент» были разработаны и изготовлены: стенд-имитатор двигателя, аттестованный согласно действующей НД и верифицированные имитаторы двигательных датчиков, контроль сигналов которых обеспечивается поверенными средствами измерительной техники.

Средства измерительной техники, используемые для контроля сигналов, выбраны, исходя из требований к пределам допускаемых погрешностей измерительных каналов регулятора с учетом обеспечения метрологического запаса (коэффициента точности) [3]. Выбор иллюстрируется данными таблицы 2, в которой для каждого типа контролируемых параметров, указаны:

- вид и диапазон сигнала, поступающего на вход измерительного канала регулятора;
- заданные пределы допускаемой погрешности измерительного канала регулятора;
- применяемые для контроля сигнала имитатора средства измерительной техники;
- пределы допускаемой погрешности средств измерительной техники в рассматриваемом диапазоне измерений;

Иллюстрация метрологического запаса

Контролируемый параметр, электрический сигнал датчика и его диапазон	Пределы допускаемой погрешности измерения	Наименование, обозначение СИТ	Диапазон измерения, пределы допускаемой погрешности СИТ	Коэффициент точности
Скорость вращения Частота переменного тока до 7,5 кГц	$\pm 0,1$ %ВП ($\pm 2,6$ Гц и $\pm 7,3$ Гц в зависимости от поддиапазона)	Частотомер электронносчетный ЧЗ-57, ЕЯ2.721.043;	0,1 Гц – 100 МГц; (используется в диапазоне 10 Гц – 10 кГц); $\pm 0,1$ Гц (при тсч = 10 с)	более 10
		или Мультиметр М3500	(10 – 40) Гц; $\pm 0,03$ %ИЗ; (40 – 10 000) Гц; $\pm 0,01$ %ИЗ	≈ 10
Давление Напряжение постоянного тока 0 – 100 мВ	$\pm 0,5$ %ВП	Калибратор TRX-II-R пр-во Druck	(0 – 100) мВ, $\Delta \leq \pm (0,0002 \cdot U_i + 0,0001 \cdot U_{пр})$ (0 – 12) В, $\Delta \leq \pm (0,0001 U_i + 0,00005 \cdot U_{пр})$	более 5
		или Мультиметр М3500	(0 – 100) мВ, $\Delta \leq \pm (0,00005 \cdot U_i + 0,000035 \cdot U_{пр})$ (0 – 10) В, $\Delta \leq \pm (0,000035 U_i + 0,000005 \cdot U_{пр})$	более 10
Температура газа (ХА) Напряжение постоянного тока	$\pm 0,41$ мВ (± 10 °С от минус 60 до 200 °С) и $\pm 0,12$ мВ (± 3 °С при 200 °С и выше)	1. Калибратор TRX-II-R (Druck) 2. ТСП 2-8-Pt100-A (измерение ТХС)	1. (0 – 100) мВ, $\Delta \leq \pm (0,0002 \cdot U_i + 0,0001 \cdot U_{пр})$; 2. (минус 40 – плюс 60) °С, кл.А	≈ 3
Температура (50П) Сопротивление 37 – 113 Ом	$\pm 0,2$ Ом (± 1 °С)	Магазин сопротивлений Р4831, ГОСТ 23737	$0,02/2 \cdot 10^{-6}$	≈ 10
		или Калибратор TRX-II-R	на пределе 400 Ом $\pm (0,08 – 0,09)$ Ом	≈ 4

Примечание – Для имитатора датчиков давления СИТ в общем случае обеспечивают измерение не только сигнала на выходе, но и напряжения питания на входе.

– обеспечиваемый метрологический запас (коэффициент точности).

Описанные выше имитаторы сигналов двигательных датчиков обеспечили проведение на базе АО «Элемент» комплекса испытаний регуляторов двигателя типа FADEC в процессе их разработки, квалификации и постановки на производство.

Однако, после того, как один из регуляторов (РДЦ-450М) начал выпускаться серийно и, соответственно, возросли требования к рационализации технологического процесса испытаний (снижению их длительности и трудоемкости), стало очевидно, что использование конструктивно обособленного имитатора для каждого измерительного канала двухканального регулятора замедляет проверку уже в силу необходимости выполнять значительное количество подключений и отключений, кроме того, имитаторы, разработанные в разное время, имели и другие недостатки с точки зрения организации ра-

бочих мест на производстве.

Для обеспечения серийного производства разработан стенд, объединивший имитаторы всех двигательных датчиков, взаимодействующих с регулятором. Общий вид стенда показан на рис. 1.



Рис. 1. Стенд-имитатор двигательных датчиков

Стенд подключается к регулятору двумя штатными кабелями, тем самым обеспечивается одновременное подключение всех имитаторов к соответствующим измерительным каналам.

На передней панели стенда предусмотрены переключатели установки каналов и регулировки сигналов, а также клеммы для подключения поверенных средств измерительной техники, которые обеспечивают контроль значений сигналов, подаваемых на вход регулятора.

Замена отдельных имитаторов на специализированный стенд заметно повысила производительность работ по градуировке и проверке параметров измерительных каналов регуляторов.

В рамках дальнейшего совершенствования метрологического обеспечения производства регуляторов планируется внедрение элементов автоматизации подачи сигналов на входы каналов путем создания программно-управляемых имитаторов.

Заключение

1. В рамках обеспечения испытаний электронных регуляторов ГТД специалистами АО «Элемент» разработаны, изготовлены и аттестованы все необходимые специализированные стенды, обеспечивающие как полноценную проверку в лабораторных условиях функций контроля и управления, так и проверку метрологических характеристик измерительных каналов регуляторов.

2. Для оснащения серийного производства регулятора РДЦ-450М в дополнение к использовавшимся ранее конструктивно обособленным имитаторам датчиков разработан и изготовлен стенд, объединяющий все необходимые для проверки измерительных каналов имитаторы, который обеспечил удобство работы и снижение времени проверки.

3. При работе с имитаторами обеспечен контроль выдаваемых ими сигналов с помощью стандартизованных поверенных средств измерительной техники. Также доступна систематическая верификация с использованием реальных датчиков и аттестованных стендов, создающих нормированное воздействие на входе датчика (давление, виброускорение, угол поворота вала).

4. Дальнейшее совершенствование испытательного оборудования будет состоять в автоматизации процедур проверки метрологических характеристик измерительных регуляторов посредством создания программно-управляемых имитаторов.

Литература

1. Регулятор двигателя АИ-450М – результаты разработки и квалификации на категорию А [Текст] / Г. С. Ранченко, А. Г. Буряченко, В. М. Грудинкин, Н. Л. Голубев, В. В. Данилов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – №10 (117). – С. 93 – 98.
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. ОСТ 1 00221-2005 Метрологическая экспертиза технических заданий, конструкторской и технологической документации. Организация и порядок проведения [Текст]. – М. : Стандартинформ, 2005. – 12 с.
4. Буряченко, А. Г. Система измерений угла поворота вала ДБСКТ с встроенным калибратором – разработка и результаты эксплуатации [Текст] / А. Г. Буряченко, В. М. Грудинкин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 7 (64). – С. 199-202.

References

1. Ranchenko, G. S., Burjachenko, A. G., Grudinkin, V. M., Golubev, N. L., Danilov, V. V. Reguljator dviatelja AI-450M – rezul'taty razrabotki i kvalifikacii na kategoriju A [AI-450M Engine regulator - results of development and qualification category A]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija - Aerospace technic and technology*, 2014, no.10 (117), pp. 93 – 98.
2. Burjachenko, A. G., Grudinkin, V. M., Burunov, D. S. Stend-imitator turboval'nogo dviatelja AI-450M dlja ispytanij reguljatora dviatelja. Metrologicheskoe obespechenie i attestacija stenda [The stand-simulator of the turboshaft engine AI-450M for testing the engine regulator. Metrological support and attestation of the stand] *Vestnik dviatlestroenija*, 2015, no. 2, pp. 95 – 101.
3. OST 1 00221-2005. *Metrologicheskaja jekspertiza tehničkih zadanij, konstruktorskoj i tehnologičeskoj dokumentacii. Organizacija i porjadok provedenija* [Metrological expertise of technical requirements, design and technological documentation. Organization and procedure]. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 12 p.
4. Burjachenko, A. G., Grudinkin, V. M. Sistema izmerenij ugla povorota vala DBSKT s vstroennym kalibratorom – razrabotka i rezul'taty jekspluatacii [The system for measuring the angle of rotation of the shaft of the DBSCT with an integrated calibrator - development and results of operation]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija - Aerospace technic and technology*, 2009, no. 7 (64), pp. 199 – 202.

Поступила в редакцию 5.06.2018, рассмотрена на редколлегии 25.07.2018

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ ЕЛЕКТРОННИХ РЕГУЛЯТОРІВ ГТД – СТЕНД-ІМІТАТОР ДВИГУННИХ ДАТЧИКІВ

А. Г. Буряченко, І. К. Лопашенко

Дано опис забезпечення випробувань електронних регуляторів газотурбінних двигунів типу FADEC в лабораторних умовах на потужностях підприємства - виробника. Головна увага присвячується забезпеченню контролю метрологічних характеристик вимірювальних каналів регулятора. Приведено результати окремих конструктивно відокремлених імітаторів датчиків, з котрими взаємодіє регулятор, включаючи ДБСКТ та датчик вібрації. Показана доцільність і результати створення стенду, який об'єднав всі імітатори, необхідні для забезпечення серійного виробництва. Дані відомості про верифікацію імітаторів та забезпечення коефіцієнтів точності.

Ключові слова: комплектуючий виріб авіаційної техніки, математична модель, вимірювальний канал, коефіцієнт точності.

METROLOGICAL SUPPLY OF ELECTRONIC REGULATORS FOR GTE – STAND-IMITATOR OF ENGINE SENSORS

A. H. Burjachenko, I. K. Lopashchenko

Testing of electronic control systems (further “regulators”) FADEC for gas turbine engines in the manufacturer laboratory conditions is described. The main attention is devoted to the control of the metrological characteristics of the regulator measuring channels. The results of constructively separated sensor imitators application, what interacts with the controller, including DBSCT and vibration sensor, are presented in this article. It is shown the expediency and results of the stand application, which united all the imitators necessary for testing of serial production. Data on verifying imitators and ensuring accuracy coefficients is given. In the framework of testing the electronic regulators of gas turbine engines, JSC Element experts developed, manufactured and certified all the necessary specialized stands that provide both a full-fledged inspection in the test-laboratory of monitoring and functions checking and additionally checking of the metrological characteristics of the regulators measuring channels. For reduced testing time in the serial production of the RDTs-450M regulator, in addition to the previously used structurally isolated sensors imitators, a stand was designed and manufactured combining all the imitators necessary for measuring channels testing. This new imitator provided usability and reduced testing time. The simulators used for test procedure. These simulators provide output signals of real sensors. These signals check by standardized measuring equipment. Systematic verification use certified stands, which create a normalized influence on the input signal of measuring (pressure, vibration acceleration, shaft rotation angle are also available). Further improvement of the test equipment will consist in automating of procedures for checking the metrological characteristics of the regulators channels by creating of programmatically controlled simulators. The replacement of individual simulators with a specialized stand markedly increased the productivity of work on the calibration and verification of the regulators measuring channels.

Keywords: aviation equipment component, mathematical model, measuring channel, accuracy factor

Буряченко Анна Григорьевна – главный метролог, АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: annaodessa2007@rambler.ru.

Лопашенко Иван Константинович – инженер-электроник, АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua

Burjachenko Anna Hryhorievna – Chief Metrologist, JSC “Element”, Odessa, Ukraine e-mail: annaodessa2007@rambler.ru.

Lopashchenko Ivan Konstantinovich – Electronic Engineer JSC “Element”, Odessa, Ukraine e-mail: odessa@element.od.ua