

УДК 621.452.3-752:681.2.089

doi: 10.32620/aktt.2019.7.22

А. Г. БУРЯЧЕНКО

АО «Элемент», Одесса, Украина

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЛИБРОВКИ КАНАЛОВ КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ В СОСТАВЕ РЕГУЛЯТОРА АВИАДВИГАТЕЛЯ

Показаны требования нормативной документации к комплектной и к поэлементной калибровке (градуировке) измерительных каналов информационно-измерительных систем, применимые в области испытаний газотурбинных авиационных двигателей и их комплектующих изделий, включая электронные регуляторы типа FADEC. Дана краткая информация об опыте предприятия АО «Элемент» – сертифицированного разработчика и изготовителя таких регуляторов – по обеспечению калибровки и проверки измерительных каналов с использованием имитаторов электрических сигналов двигательных датчиков. Приведены сведения о требуемых диапазонах измерений виброускорений и виброчастот для обеспечения вибромониторинга работы двигателя и об экстремальных значениях виброускорения, интересующих разработчика двигателя. Освещены проблемы, с которыми сталкивается разработчик регулятора при необходимости выполнить комплектную (совместно с первичным преобразователем) калибровку (проверку) каналов измерения вибрации, включая ограничения, накладываемые характеристиками доступных средств создания вибрации с контролируруемыми значениями виброускорения и виброчастоты в требуемых диапазонах измерений. Описаны рабочие места, организованные в АО «Элемент» при методической помощи ГП «Укрметртестстандарт» для обеспечения комплектной калибровки каналов измерения вибрации в лабораторных условиях на площадке предприятия-изготовителя, в том числе – рабочее место со специально разработанным и изготовленным резонатором. Приведены результаты разработки, изготовления и использования резонатора, обеспечивающего создание контролируемых вибраций с экстремальным уровнем виброускорения – 400 g и более при заданном уровне виброчастоты. Показана целесообразность поэлементной калибровки измерительных каналов с использованием имитаторов сигналов датчиков при серийном выпуске регуляторов и пояснена необходимость организации на предприятии, разрабатывающем регуляторы типа FADEC, рабочих мест для проведения комплектной калибровки, обеспечивающих верификацию результатов, полученных с имитаторами.

Ключевые слова: комплектующее изделие авиационной техники; измерительный канал; вибропреобразователь; вибростенд.

Введение

Отраслевой стандарт [1] предусматривает два варианта экспериментального исследования (определения) метрологических характеристик измерительных каналов информационно-измерительных систем:

– поэлементный, когда характеристики определяются отдельно для первичного преобразователя (датчика) и отдельно для обрабатывающего сигнал датчика преобразователя (входящего в состав системы) – следует отметить, что датчик, как правило, «не входит в сферу ответственности» разработчика системы, поскольку имеет другого изготовителя и выбирается разработчиком двигателя, а преобразователь, обрабатывающий сигнал датчика, собственно и рассматривается разработчиком системы как измерительный канал, характеристики которого разработчик должен обеспечить;

– комплектный, когда экспериментальное исследование выполняется для канала в целом, вклю-

чая и датчик, и преобразователь его сигнала, входящий в состав системы.

Для иллюстрации сказанного выше на рис. 1 показана типичная структура измерительного канала на примере канала измерения давления, реализованного в изделиях АО «Элемент», с обеспечением компенсации температурной погрешности датчика давления (сенсора) [2].

Очевидно, что при комплектном методе, необходимо обеспечить создание на входе датчика контролируемых с заданной погрешностью значений измеряемой физической величины (давления, температуры и т.д.), что не всегда может быть обеспечено на предприятии-разработчике электронного оборудования.

При отдельных экспериментальных исследованиях, разработчик системы обеспечивает исследование метрологических характеристик канала с использованием имитатора сигнала датчика – опыт АО «Элемент» по созданию и использованию имитаторов описан в [3].

В [3] достаточно подробно описаны имитаторы датчиков, используемые, в частности, для исследования метрологических характеристик образцов измерительных каналов семейства регуляторов двигателя цифровых РДЦ-450.

Однако, наряду с имитаторами в ряде случаев для верификации результатов, получаемых с имитаторами, разработчик системы старается обеспечить комплектную калибровку. В АО «Элемент» постоянно совершенствуется стендовое оборудование, обеспечивающее комплектную калибровку измерительного канала.

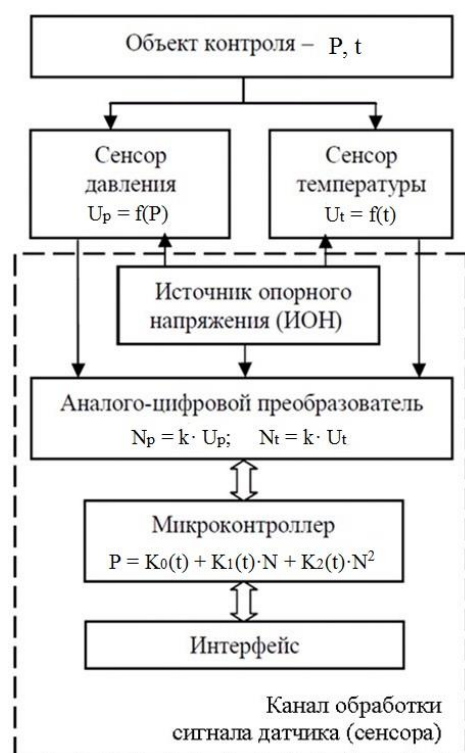


Рис. 1. Пример структуры измерительного канала

Так, например, в свое время был разработан, изготовлен и прошел государственную метрологическую аттестацию механический прецизионный стенд для исследований характеристик дублированных синусно-косинусных трансформаторов ДБСКТ, используемых в качестве датчиков угла поворота вала, описанный в [4].

С недавнего времени особую актуальность приобрело оснащение специализированными стендами, которые обеспечили бы комплектную калибровку каналов измерения вибрации.

1. Постановка задачи

На первом этапе исследование метрологических характеристик каналов измерения вибрации, входящих в состав регуляторов газотурбинных дви-

гателей РДЦ-450М, обеспечивалось на площадке АО «Элемент» использованием специально разработанных имитаторов, а подтверждение соответствия было выполнено посредством комплектной калибровки в ГП «Укрметртестстандарт» (г. Киев) на вибростенде, оснащенный эталонным датчиком вибрации.

Комплектная калибровка была проведена во всем требуемом диапазоне частот (до 5000 Гц), однако при значениях виброускорения, не достигающих и половины требуемого верхнего предела – это вполне типичная методика, предполагающая экстраполяцию результатов.

Дело в том, что доступные стандартные вибростенды небольших габаритов, которые удобны для работы в рамках метрологической лаборатории, обеспечивают уровень виброускорения не выше 70 м/с^2 (приблизительно 7 g) даже для вибропреобразователей массой 150 – 200 г.

Использование более мощных вибростендов, хотя и обеспечивает расширение диапазона, сопряжено с рядом неудобств, включая такие, как необходимость установки массивного вибростенда на специальное основание, обеспечения шумоизоляции помещения и т.п. (например, вибростенд Instron модели 1503, используемый в АО «Элемент» для испытаний изделий на воздействие внешних механических факторов, весит более полутонны и создает шум на уровне 90 дБ).

Требуемый диапазон измерений виброускорения для РДЦ-450М составляет (без учета перегрузки) 300 м/с^2 (около 30 g).

Кроме того, практика показала, что в ряде случаев разработчик двигателя при его испытаниях заинтересован в том, чтобы регулятор обеспечил оценку уровня вибрации до 4000 м/с^2 (около 400 g).

В рамках развития испытательной базы АО «Элемент» было признано целесообразным в дополнение к разработанным ранее имитаторам создать оборудование, обеспечивающее комплектную калибровку каналов измерения вибрации. Это предполагало следующие задачи:

- организация рабочего места с малогабаритным вибростендом для систематической проверки основных характеристик как вибропреобразователей в отдельности, так и каналов измерения вибрации в составе выпускаемых предприятием регуляторов авиадвигателей;

- обеспечение возможности комплектной калибровки каналов измерения вибрации в диапазоне виброускорений до 30 g, выполняемой при необходимости;

- экспериментальное подтверждение корректности оценки регулятором виброускорений на уровне 400 g.

2. Результаты

Задача организации рабочего места с малогабаритным вибростендом была решена в тесном сотрудничестве со специализированным отделом ГП «Укрметртестстандарт».

Рабочее место (рис. 2) организовано на базе вибростенда (электродинамического возбудителя) ESE 221 типа 11077 фирмы Robotron (габаритные размеры – 330 x 230 x 260 мм, вес – 28 кг).

Вибростенд оснащен специально изготовленным посадочным местом – переходником – для установки проверяемого (калибруемого) вибропреобразователя. Показанный на упомянутом рисунке переходник представляет собой полый профилированный цилиндр, напоминающий перевернутый вверх дном стакан, внутри которого (в центре «донышка») закреплен эталонный датчик вибрации.

Проверяемый вибропреобразователь крепится с наружной стороны «донышка» таким образом, что продольные оси его и эталонного датчика совпадают.

Эталонный датчик производства Endevo Corporation и все сопутствующие измерительные приборы (генератор синусоидального сигнала, усилитель мощности, согласующие усилители) прошли соответственно калибровку и поверку в ГП «Укрметртестстандарт», а рабочее место в целом – аттестацию.

Расширенная относительная неопределенность по результатам калибровки эталонного датчика для доверительной вероятности $P=0,95$ оценена как:

- 1 % при частотах от 20 до 1000 Гц;

- 2...2,5 % в диапазонах от 5 до 19 Гц и от 1,1 до 8 кГц.

Описанное рабочее место обеспечивает выполнение систематической комплектной калибровки (проверки) каналов измерения вибрации, входящих в состав изготавливаемых в АО «Элемент» регуляторов семейства РДЦ-450, а также используется для автономной проверки вибропреобразователей.

Доступный диапазон воспроизводимых виброчастот – от 5 Гц до 10 кГц задается и контролируется генератором синусоидального сигнала. Для вибропреобразователей, которые используются на авиадвигателях и имеют вес порядка 150 г, обеспечивается уровень виброускорений до 7 g, что позволяет провести ряд необходимых проверок.

Переходник, описанный выше, изготовлен таким образом, что может устанавливаться также и на более мощный вибростенд, имеющийся в АО «Элемент» (уже упомянутый Instron модели 1503). Тем самым обеспечивается возможность исследовать характеристики измерительного канала или отдельного вибропреобразователя в полном требуемом для мониторинга работы авиадвигателя диапазоне до 30 g.

Однако, 30 g – это практически предел для такой конфигурации, и интересовавший Заказчика уровень 300 – 400 g оставался недоступен.

Для обеспечения возможности экспериментального подтверждения корректности оценки каналом регулятора совместно с двигательным вибропреобразователем виброускорений на уровне 400 g было решено оснастить вибростенд резонатором.



Рис. 2. Рабочее место с малогабаритным вибростендом ESE 221, организованное в АО «Элемент»

Специалистами-конструкторами при методической помощи ГП «Укрметртестстандарт» была определена конфигурация резонатора.

К настоящему времени резонатор изготовлен и прошел испытания. Общий вид вибростенда Instron с установленным на нем резонатором и вибропреобразователем, характеристики которого исследуются, показан на рис. 3, а размещение эталонного датчика внутри резонатора – на рис. 4. Эталонный датчик, также как и в переходнике малогабаритного вибростенда, размещается вдоль одной оси с исследуемым вибропреобразователем.

Резонанс наблюдается на частотах около 900 Гц. Испытания показали, что достижимый максимум амплитудного значения регулируемого виброускорения на этих частотах приближается к 600 g, однако с учетом характеристик эталонного датчика, который в итоге вошел в состав стенда, он аттестован в диапазоне до 420 g.

Таким образом, поставленная задача была решена в три этапа:

- создание рабочего места, оснащенного малогабаритным малошумящим вибростендом, на котором обеспечивается исследование во всём рабочем диапазоне виброчастот, но в ограниченном диапазоне виброускорений;

- доработка оснастки крупногабаритного вибростенда для обеспечения исследования характеристик измерительного канала с вибропреобразователем в рабочем диапазоне виброчастот и рабочем диапазоне виброускорений;

- разработка, изготовление и аттестация резонатора для крупногабаритного вибростенда, обеспечивающего оценку характеристик при экстремально высоких значениях виброускорения на некоторой заданной виброчастоте.



Рис. 3. Вибростенд Instron с резонатором и исследуемым вибропреобразователем

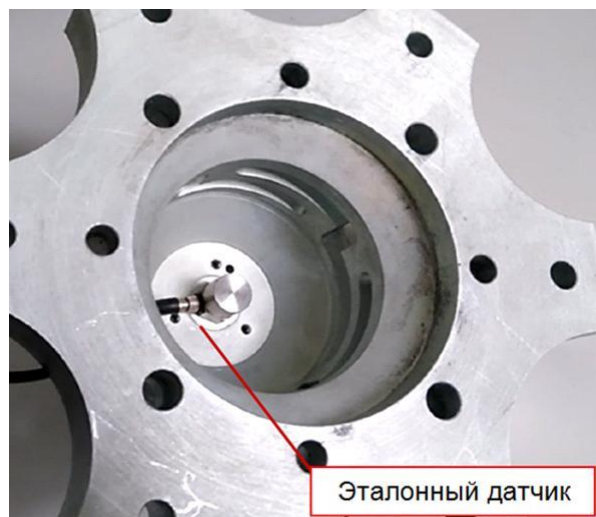


Рис. 4. Размещение эталонного датчика внутри резонатора

В результате к настоящему времени в АО «Элемент» наряду с имитаторами электрических сигналов двигательных вибропреобразователей созданы рабочие места для комплектной калибровки (проверки) каналов измерения вибрации, входящих в состав комплектующих изделий авиационной техники.

При серийном выпуске предпочтительна работа с имитаторами, что ведет к снижению времени и трудозатрат. В то же время комплектная калибровка обеспечивает верификацию результатов, что особенно актуально при первичных проверках вновь разработанных регуляторов и при смене типа двигательного датчика, с которым работает регулятор.

Заключение

1. Для исследования метрологических характеристик каналов измерения вибрации, входящих в состав электронных регуляторов ГТД, в АО «Элемент» организованы и аттестованы в ГП «Укрметртестстандарт» рабочие места, обеспечивающие создание контролируемых значений виброускорений:

- во всём рабочем диапазоне виброчастот, но в ограниченном диапазоне виброускорений (удобно для систематической работы);

- в рабочем диапазоне виброчастот и рабочем диапазоне виброускорений (в силу повышенного шума и энергопотребления желательно минимизировать время работы);

- для экстремально высоких значений виброускорения на некоторой заданной виброчастоте.

2. Вновь созданные рабочие места с вибростендами и резонатором, наряду с имитаторами выходных электрических сигналов вибропреобразова-

телей, обеспечивают полноценный комплекс исследований метрологических характеристик каналов измерения вибрации:

– работа с имитаторами, при серийном выпуске, обеспечивает рациональный, с точки зрения снижения трудозатрат, вариант контроля характеристик выпускаемых изделий;

– комплектная калибровка используется для верификации результатов, полученных на имитаторах и особо актуальна для вновь разрабатываемых изделий или при переходе к новому типу вибропреобразователя.

Литература

1. ОСТ 1 00487-83. Отраслевая система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение испытаний газотурбинных двигателей. Метрологическая аттестация измерительных каналов информационно-измерительных систем [Текст]. – М. : изд-во Госстандарт СССР, 1983. – 19 с.

2. Буряченко, А. Г. Технические и алгоритмические средства повышения метрологического уровня и надежности датчиков и систем измерения давления [Текст] / А. Г. Буряченко, В. М. Грудинкин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 8 (24). – С. 195–199.

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

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. OST 1 00487-83. *Otraslaslevaja Sistema obespechenijaedinstvaizmerenij. Metrologicheskoe obespechenie ispitanij gazoturbinnih dvigatelej. Metrologicheskaja attestacija izmeritelnih kanalov informacionno-izmeritelnih system.* [Branch system of measurements unity guaranteeing. Metrological guaranteeing of tests gas-turbin engines. Metrological certification of measuring channels of information-measuring systems]. Moscow, Gosstandard USSR Publ., 1983. 19 p.

2. Burjachenko, A. G., Grudinkin, V. M., *Tehnicheskie I algoritmicheskie sredstva povishenija metrologicheskogo urovnja i nadezhnosti datchikov i system izmerenija davlenija* [Technical and algorithmic means of metrological level and reliability increase of pressure transducers and measurement systems]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2005, no. 8 (24), pp. 195–199.

3. Burjachenko, A. G., Lopaschenko, I. K. *Metrologicheskoe obespechenie ispitanij elektronnih reguljatorov GTD – stand-imitator dvigatelnih datchikov* [Metrological support of GTD electronic regulators – stand-simulator of the engine transducers]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2018, no. 7 (151), pp. 101–106.

4. Burjachenko, A. G., Grudinkin, V. M. *Sistema izmerenij ugla povorota vala DBSKT s vstroennym kalibratorom – razrabotka i rezul'tatyj ekspluatcii* [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 tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2009, no. 7 (64), pp. 199–202.

Поступила в редакцию 12.06.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КАЛІБРУВАННЯ КАНАЛІВ КОНТРОЛЮ ВІБРАЦІЇ У СКЛАДІ РЕГУЛЯТОРА АВІАДВИГУНА

А. Г. Буряченко

Показані вимоги нормативної документації щодо комплектного та допоеlementного калібрування (градуювання) вимірювальних каналів інформаційно-вимірювальних систем, які застосовуються в області випробувань газотурбінних авіаційних двигунів і їх комплектуючих виробів, включаючи електронні регулятори типу FADEC. Дана коротка інформація про досвід підприємства АТ «Елемент» – сертифікованого розробника і виробника таких регуляторів – щодо забезпечення калібрування та перевірки вимірювальних каналів з використанням імітаторів електричних сигналів двигунних датчиків. Наведено відомості про необхідні діапазони вимірювань віброприскорень і віброчастот для забезпечення вібромоніторинга роботи двигуна та про екстремальні значення віброприскорення, що цікавлять розробника двигуна. Висвітлено проблеми, з якими стикається розробник регулятора при необхідності виконати комплектне (спільно з первинним перетворювачем) калібрування (перевірку) каналів вимірювання вібрації, включаючи обмеження, що накладаються характеристиками доступних засобів створення вібрації з контрольованими значеннями віброприскорення і віброчастоти в необхідних діапазонах вимірювань. Описано робочі місця, організовані в АТ «Елемент» за методичної допомоги ДП «Укрметртестстандарт» для забезпечення комплектного калібрування каналів вимірювання вібрації в лабораторних умовах на майданчику підприємства-виготовлювача, в тому числі –

робоче місце зі спеціально розробленим і виготовленим резонатором. Наведено результати розробки, виготовлення і використання резонатора, що забезпечує створення контрольованих вібрацій з екстремальним рівнем віброприскорення – 400 g і більш при заданому урівні віброчастоти. Показана доцільність поелементного калібрування вимірювальних каналів з використанням імітаторів сигналів датчиків при серійному випуску регуляторів і пояснена необхідність організації на підприємстві, яке розробляє регулятори типу FADEC, робочих місць для проведення комплектного калібрування, що забезпечують верифікацію результатів, отриманих з імітаторами.

Ключові слова: комплектуючий виріб авіаційної техніки; вимірювальний канал; віброперетворювач; вібростенд.

METROLOGICAL SUPPORT FOR MEASURING CHANNELS CALIBRATION CONJOINT WITH AIRCRAFT ENGINE REGULATOR

A. G. Buryachenko

There are shown the normative documentation requirements concerning complete and element wise calibration of the information-measuring systems measuring channels. It is about requirements, which are applicable for tests area of aviation turbo-engines and their componentry, including the electronic regulators FADEC-type. There are given short information concerning the experience of JSC "Element" – certificated developer and manufacturer of such regulators – on providing of calibration (testing) of measuring channels with the use of imitators of electric signals of engine transducers. There is given the information concerning the ranges of measuring of vibrating accelerations and vibrating frequencies, which are required for providing of the engine vibrating monitoring and the information about the extreme high magnitudes of vibrating acceleration, which is interesting for the developer of the engine. There are covered the problems, which the developer of regulators deals with necessary to execute complete calibration of vibration measuring channels (jointly with a primary transducer), including the limitations laid on by the possibilities of accessible facilities of creation of vibration with the controlled magnitudes of vibration acceleration and vibration frequency in the required ranges of measuring. There are described the workplaces organized in JSC "Element" at the methodical help of SE "Ukrmetrteststandard" for providing of complete calibration of vibration measuring channels in laboratory terms at the enterprise-manufacturer, including the workplace with the resonator, which was specially developed and made. There are brought the results over of development, making and uses of the resonator, which provides controlled vibrations with the extreme level of vibration acceleration – 400 g and more at the predetermined level of vibration frequency.

There is shown the expediency of element wise measuring channels calibration with the use of imitators of sensors signals for serial producing of regulators. There is explained the necessity to organize workplaces for the realization of complete calibration on enterprise-developer of FADEC regulators, which provide verification results got with imitators.

Keywords: aviation equipment component; measuring channel; vibration transducer; shaker.

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

Burjachenko Anna Hryhorievna – Chief Metrologist, JSC “Element”, Odessa, Ukraine, e-mail: annaodessa55@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-4480-6965.