ТРАНСПОРТ

УДК 629.735

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-1-137-146

СПОСОБ ВИБРАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА РОТОРНЫХ МАШИН

Б.А. ЧИЧКОВ¹

¹*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Вибрационный мониторинг машин и механизмов является неотъемлемой частью оценки их технического состояния в процессе эксплуатации и предупреждения разрушения при работе на резонансных режимах или из-за усталости материала. Авиационные газотурбинные двигатели и наземные газотурбинные установки – типичные представители машин, подлежащих обязательному вибрационному контролю. В большинстве случаев он должен осуществляться непрерывно, но в ряде случаев (например, силовые установки легких вертолетов) виброконтроль осуществляют через интервалы времени, исчисляемые десятками часов. В настоящее время при этом используются одноосевые датчики вибрации различных типов. В любом случае данные, полученные в ходе вибромониторинга, подвергаются обработке, в первую очередь с использованием допускового контроля и ряда способов сглаживания и оценки тенденции изменения вибрации в процессе эксплуатации, примеры использования которых для двигателей показаны в статье. В ряде случаев возникает необходимость упрощенной оценки вибрационного состояния машины в дополнительных точках или проведение оперативного первичного вибромониторинга без привлечения арендуемой аппаратуры контроля. Возможным решением представляется использование современных мобильных устройств, оснащенных датчиками ускорений и специализированного программного обеспечения для архивации и представления данных вибромониторинга в режиме реального времени. В учебном процессе эти устройства выступают полноценной заменой связки датчиков вибрации и осциллографа при исследовании критических частот вращения роторов с возможностью архивации данных мониторинга для дальнейшей обработки.

Рассмотренный в статье способ вибрационного мониторинга с использованием микроэлектромеханических систем современных мобильных устройств имеет ряд преимуществ перед прочими способами, в частности, выполняется одновременная трехосевая оценка виброускорений и вектора вибрации с графическим и символьным представлением данных в режиме реального времени и более широкими возможностями по архивации и оперативной обработке данных.

Ключевые слова: авиационный двигатель, вибрация, датчик вибрации, мониторинг, ротор, системы микроэлектромеханические, устройства мобильные.

ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации машин, имеющих в своей конструкции роторы, возможны режимы работы, на которых роторы могут потерять устойчивость. Эти режимы, как и скорости, принято называть критическими [1, 2]. Работа на них сопровождается резким увеличением прогибов роторов и усилий, действующих на их элементы, включая опоры. Наблюдается рост вибрации машины (двигателя) в целом. Возникает необходимость определения (исследования) критических режимов работы роторов и вибраций машин на различных режимах работы. Указанные исследования находятся в неразрывной связи с оценкой вибрационного состояния газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) в эксплуатации [3–8] и разработкой способов снижения вероятности проявления опасных вибраций и их последствий.

ОСОБЕННОСТИ ВИБРАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА РОТОРНЫХ МАШИН НА ПРИМЕРЕ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Вибрационный мониторинг и связанные с ним исследования базируются на методах анализа частотных характеристик, спектрального и дискриминантного анализа [9, 10] временных рядов [9, 11–14], допускового контроля [12–15] и нейронных сетей. В настоящий момент они

реализованы в ряде способов и методик обработки данных, регистрируемых в эксплуатации [14, 15].

Известен способ вибрационного мониторинга машин, при котором на них устанавливаются датчики вибрации сейсмического или пьезоэлектрического типа, позволяющие оценить вибрацию вдоль одной, определенной, оси (направления – горизонтального или вертикального) [8, 15].

Этот способ используется для большинства современных двухконтурных двигателей (ТРДД) [15] и мониторинг их вибрационного состояния осуществляется в течение всего полета. Примеры изменения за полет оборотов роторов ТРДД и вибраций, полученные по данным регистрации бортовой системы контроля, осуществляющей сбор данных с частотой 5 Гц, представлены на рис. 1. Такого рода графики позволяют установить моменты времени, в которые отмечался существенный рост вибрации, и связать его с режимами работы двигателя.

Рис. 1. Пример изменения за полет оборотов каскада высокого давления (Nvd) и вибрации в районе разделительного корпуса ТРДД, генерируемой вентилятором (Vpk_PB)

Fig. 1. In-flight change example of turns of high pressure spool (Nvd) and vibrations in the vicinity of an intermediate case of a bypass turbojet generated by fan (Vpk_PB)

Внутриполетные изменения вибрации в зависимости от оборотов роторов (они могут рассматриваться как амплитудно-частотные характеристики) ТРДД представлены на рис. 2.

На рис. 2 установлен диапазон оборотов ротора каскада низкого давления, при котором наблюдается стабильная вибрация выше 6 мм/с.

Данные могут быть сглажены с использованием скользящего среднего по 10 полетам (рис. 3). В настоящее время в эксплуатации вибромониторинг ТРДД сводится к допусковому контролю и тренд-анализу [15] вибраций (рис. 4). Базовое значение параметра рассчитывается по первым 10 полетам. В случае обнаружения опасного тренда параметра и (или) более двух выходов за предельно-допустимое отклонение требуется выполнить действия в соответствии с указаниями диагностического Бюллетеня конкретного типа двигателя [15].

Важно отметить, что используемая штатная аппаратура для вибромониторинга, как правило, включает в себя одноосевые датчики [16].

На рассматриваемом временном интервале наблюдается естественное небольшое снижение уровня вибраций с наработкой исправного двигателя.

Виброскорость, мм/с

Рис. 2. Пример амплитудно-частотной характеристики двигателя (обороты – ротора каскада низкого давления, вибрация – в районе разделительного корпуса (маркеры – о) и задней подвески ТРДД (маркеры – х), генерируемая вентилятором)

Fig. 2. An example of the engine amplitude-frequency characteristic (a rotor of a low pressure spool speed, vibration – in the vicinity of the intermediate case (markers – o) and rear mount of a bypass turbojet (markers - x) generated by the fan)

Виброскорость, мм/с

Рис. 3. Пример динамики вибрации (по реперным точкам) в районе разделительного корпуса ТРДД, генерируемой ротором вентилятора после сглаживания скользящим средним по 10 полетам

Fig. 3. An example of vibration dynamics (on reference points) in the vicinity of the intermediate case of a bypass turbojet generated by a fan rotor after smoothing by a sliding average based on 10 flights

Тренд для данных рис. 4 не значим по корреляционному критерию, как и для данных последних 10 полетов на рис. 5. В то же время на рис. 5 представлены результаты анализа виброскоростей в программе «ДИАГНОЗ-90-ТРЕНДплюс» [14, 15], позволяющей определять длину ряда наблюдений вибрации со значимым трендом, при наличии такового. Значимый тренд наблюдается для данных последних 8 полетов. Он опасен [15].

СПОСОБ ПЕРВИЧНОГО ИЛИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ВИБРАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Предлагаемый далее способ вибромониторинга относится к авиации и наземным энергетическим установкам на базе газотурбинных двигателей, в частности, к способу вибрационного мониторинга разновидности роторных машин – газотурбинных двигателей.

В результате сравнения вибродатчиков, используемых в эксплуатации для оценки вибрационного состояния рассматриваемых роторных машин, с датчиками движения, используемыми в микроэлектромеханических системах современных мобильных устройств, установлена возможность оценки вибросостояния с использованием датчиков мобильных устройств при задействовании широких возможностей их встроенных систем сбора и обработки данных [16].

Целью описываемого способа является расширение возможностей штатных систем вибрационного мониторинга роторных машин – при их наличии, или организации вибрационного мониторинга в случае отсутствия штатных систем оценки вибраций.

Способ позволяет осуществлять одномоментную трехосевую оценку виброускорений с контролем вектора вибрации отображением направления вибрации на круговой диаграмме в осях на плоскости экрана мобильного устройства.

Должно быть обеспечено жесткое бездемпферное крепление мобильного устройства к корпусу машины. Для авиационных двигателей такое крепление в различных точках может быть осуществлено, например, с использованием набора переходников под временно демонтируемые заглушки, используемые обычно для обеспечения доступа в проточную часть двигателя при проведении оптико-визуального контроля. Съемная платформа для размещения мобильного устройства должна обеспечивать крепление к компактному трипод-устройству с возможностью фиксации положения головки трипод-устройства для выставления необходимого углового положения мобильного устройства (рис. 6).

Рис. 6. Схема крепления мобильного устройства к объекту вибромониторинга:

1 – объект контроля, 2 – трипод-устройство с элементами фиксации положения,
3 – съемная платформа для размещения мобильного устройства, 4 – мобильное устройство

Fig. 6. The scheme of fastening the mobile device to the object of vibration monitoring

1 – object of monitoring, 2 – tripod-device with elements of position fixing,
3 – demountable platform for placing the mobile device, 4 – the mobile device

Питание мобильного устройства может быть как автономным (от штатного аккумулятора, при разовых измерениях), так и организовано через трансформирующее (или зарядное устройство), позволяющее получить на выходе напряжение 5 В и 0,5–2 А.

Возможна архивация значений контролируемых вибраций на внутреннем или внешнем носителе мобильного устройства, в том числе для дальнейшего углубленного анализа.

При необходимости, дистанционный мониторинг с использованием внешнего монитора осуществим применением технологий, реализованных в приставках типа Miracast,

или аналогичных, встроенных в приемное устройство (рис. 7), или с использованием сети Интернет.

В режиме EZMirror Miracast-приставка работает как обычный приемник-транслятор видеосигнала, поступающего с мобильного устройства «по воздуху». Этот режим и должен быть использован в процессе вибромониторинга.

Рис. 7. Организация дистанционного мониторинга:

1 – объект виброконтроля, 2 – крепление смартфона (планшета), 3 – смартфон (планшет),
4 – приставка Miracast, 5 – внешний монитор

Fig. 7. Organization of distance monitoring

1 – the object of vibration monitoring, 2 – the smart phone fastening (pad), 3 – smart phone (pad),
4 – Miracast detachable device, 5 – the external display

Пример результатов оценки ускорений в одной из используемых программ представлен на рис. 8.

Рис. 8. Пример результатов оценки ускорений

Fig. 8. An example of results of accelerations estimation

Примером положительных результатов апробации (с участием Трухтанова А.С.) использования смартфона для вибромониторинга авиационных двигателей является применение описанного мониторинга для одного из типов вертолетных ГТД, не оснащенного штатной системой контроля вибраций (рис. 9).

Выполненные исследования позволили установить связь между износом детали крепления двигателя к воздушному судну, преимущественным направлением вектора вибрации и режимом работы двигателя рис. 9, б.

Рис. 9. К установлению связи между износом детали крепления двигателя к воздушному судну (б), преимущественным направлением вектора вибрации (а) и режимом работы двигателя (а2)

Fig. 9. To establishing association between deterioration of a detail of engine fastening to the helicopter (б), a primary direction of a vibration vector (а) and engine power setting (а2)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кратко рассмотрены существующие способы вибрационного мониторинга машин на примере авиационных газотурбинных двигателей.

Предложен способ вибрационного мониторинга роторных машин, отличающийся тем, что с целью вибрационного мониторинга используются микроэлектромеханические системы современных мобильных устройств (смартфонов, планшетов), их вычислительные и коммуникационные возможности, что обеспечивает расширение возможностей штатных систем вибрационного мониторинга роторных машин – при их наличии, или организации вибрационного мониторинга в случае отсутствия штатных систем вибромониторинга.

При этом: 1) осуществляется одновременная трехосевая оценка виброускорений и вектора вибрации с графическим и символьным представлением данных в режиме реального времени; 2) возможно размещение мобильного устройства на различных местах корпусов и агрегатов роторных машин; 3) обеспечивается меньшее запаздывание в оценке виброускорений по сравнению с датчиками сейсмического типа; 4) возможна архивация регистрируемых данных на внутренний или внешний накопитель мобильного устройства или мониторинг в режиме реального времени, в том числе с передачей на внешний монитор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 31320-2006. Межгосударственный стандарт. Вибрация. Методы и критерии балансировки гибких роторов. М.: Стандартинформ, 2006. 12 с.
2. Лозицкий Л.П. Оценка технического состояния авиационных ГТД. М.: Транспорт, 1982. 167 с.
3. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений // основополагающие стандарты в области метрологии. М.: Изд-во стандартов, 1986. 311 с.

4. ГОСТ 23220-78. Средства контроля работы двигателей летательных аппаратов. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1978. 10 с.
5. ГОСТ 8.467-82. Нормативно-технические документы на методики выполнения измерений. Требования к построению, содержанию и изложению // основополагающие стандарты в области метрологии. М.: Изд-во стандартов, 1986. 311 с.
6. ГОСТ 26656-85. Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 1986. 15 с.
7. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин⁻¹. М.: Стандартинформ, 2002. 10 с.
8. ГОСТ Р 52526-2006. Национальный стандарт Российской Федерации. Установки газотурбинные с конвертируемыми авиационными двигателями. Контроль состояния по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. М.: Стандартинформ, 2006. 12 с.
9. Кендалл М., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Гл. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1976. 736 с.
10. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами: Пер. с англ. М.: Мир, 1973. 959 с.
11. Кендэл М. Временные ряды. М.: Финансы и статистика, 1981. 199 с.
12. Практическая диагностика авиационных газотурбинных двигателей / под ред. В.Л. Степаненко. М.: Транспорт, 1985. 116 с.
13. Программа МСД-ЕСМ II. Engine Condition Monitoring Programm. Pratt & Whitney. Performance & Diagnostics Support, 1994. 11 p.
14. Программа построения моделей и диагностирования двигателей типа ПС-90А «ДИАГНОЗ-90-ТРЕНДплюс». Рекламно-техническое описание (01132212.1948–01 99 01), 2003. 23 с. Депонировано во ВНИИЦ, инв. номер 50200300100.
15. Бюллетень № 94148-БЭ-Г. Изделие: Двигатель ПС-90А. По вопросу: Внедрения в эксплуатацию 2-й очереди наземной автоматизированной системы диагностирования «АСД-Диагноз-90» двигателя ПС-90А на самолете ИЛ-96-300. Пермь, 1996. 71 с.
16. Чичков Б.А. Вибродатчики и микроэлектромеханические системы мобильных устройств, как их аналоги, для оценки вибросостояния роторных машин // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. № 223 (1). С. 120–125.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Чичков Борис Анатольевич, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры двигателей летательных аппаратов МГТУ ГА, b.chichkov@mstuca.aero.

TECHNIQUE OF VIBRATION MONITORING

Boris A.Chichkov¹

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Vibration monitoring of machines is an integral part of their technical health estimation while in service and prevention of collapse resulting from resonance conditions operation or material fatigue.

Aviation gas-turbine engines and land based gas turbine – typical representatives of the of machines which are subject obligatory vibro-monitoring. In most cases it should be carried out continuously, but, in some cases (for example, power-plants of light helicopters), vibro-monitoring is performed within periods reckoned in dozens of hours. Now one-axial vibration transmitters of various types are thus used. Anyway, the data received as a result of vibro-monitoring are

processed, first of all, with the use of range verification and a number of smoothing modes and the estimation of a tendency of vibration change modes while in service, examples of which shown on the engines are displayed in a paper. In some cases, there is a necessity of the simplified estimation of a vibrational condition of the machine for additional points or holding operative primary vibro-monitoring without engaging of a rented control equipment. The possible solution is the use of the modern mobile devices equipped with acceleration transmitters and the specialized software for archiving and vibro-monitoring data presentation in real-time mode. In the training process these devices appear full-scale substitution of vibration pickups and an oscillograph sheaf at estimating critical frequencies of rotors rotation with the possibility of archiving of the monitored data for the further processing.

The vibrational monitoring technique with the use of microelectromechanical systems of modern mobile devices, has a number of advantages over the other ways. Particularly, the simultaneous three-axial estimation of vibration acceleration and a vibration vector with the graphic and character data presentation in real-time mode and more archiving and operative data processing opportunities, is executed.

Key words: the aviation engine, vibration, the vibration gauge/transmitter, monitoring, rotor, systems microelectromechanical, devices mobile.

REFERENCES

1. GOST 31320-2006. *Mezhhgosudarstvennyi standart. Vibratsiya. Metody i kriterii balansirovki gibkikh rotorov* [The interstate standard. Vibration. Methods and criteria of balancing flexible rotors]. M., Standartinform publ., 2006, 12 p. (in Russian)
2. Lozitskii L.P. *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya aviatsionnykh GTD* [Estimation of GTE operating condition]. M., Transport publ., 1982, 167 p. (in Russian)
3. GOST 8.207-76. *Pryamye izmereniya s mnogokratnymi nablyudenyami. Metody obrabotki rezul'tatov nablyudenii. Osnovopolagayushchie standarty v oblasti metrologii* [Direct measurements with repeated observations. Methods of processing of observation results. Basic standards in the field of metrology]. M., Standards publ., 1986, 311 p. (in Russian)
4. GOST 23220-78. *Sredstva kontrolya raboty dvigatelei letatel'nykh apparatov. Terminy i opredeleniya* [Monitoring facilities of aircraft engine operation. Terms and definitions]. M., Standards publ., 1978, 10 p. (in Russian)
5. GOST 8.467-82. *Normativno-tekhnicheskie dokumenty na metodiki vypolneniya izmerenii. Trebovaniya k postroyeniyu, soderzhaniyu i izlozheniyu. V sb. Osnovopolagayushchie standarty v oblasti metrologii* [Standard - technical documentation on techniques of measurement performance. Requirements to design, content and statement. Basic standards in the field of metrology]. M., Standards publ., 1986, 311 p. (in Russian)
6. GOST 26656-85. *Tekhnicheskaya diagnostika. Kontroleprigodnost'. Obshchie trebovaniya* [Technical diagnostics. Testability. The general requirements]. M., Standards publ., 1986, 15 p. (in Russian)
7. GOST ISO 10816-3-2002. *Vibratsiya. Kontrol' sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmerenii vibratsii na nevrashchayushchikhsya chastyakh. Chast' 3. Promyshlennyye mashiny nominal'noi moshchnost'yu bolee 15 kVt i nominal'noi skorost'yu ot 120 do 15000 min⁻¹* [Vibration. Monitoring machinery condition based on results of vibration measurements on not rotating parts. Part 3. Industrial machinery of nominal capacity more than 15kw and nominal speed from 120 to 15000 min⁻¹]. M., Standartinform publ., 2002, 10 p. (in Russian)
8. GOST R52526-2006. *Natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii. Ustanovki gazoturbinnyye s konvertiruemyimi aviatsionnymi dvigatelyami. Kontrol' sostoyaniya po rezul'tatam izmerenii vibratsii na nevrashchayushchikhsya chastyakh* [The national standard of the Russian Federation. Gas-turbine units with convertible aviation engines. Monitoring the condition based on results of vibration measurements on not rotating parts]. M., Standartinform publ., 2006, 12 p. (in Russian)
9. Kendall M., St'yuart A. *Mnogomernyi statisticheskii analiz i vremennyye ryady* [Multi-dimensional statistical analysis and time series]. M., Fizmatlit, Nauka Publ. house, 1976, 736 p. (in Russian)

10. **Khimmel'blau D.** *Analiz protsessov statisticheskimi metodami. Per. c angl.* [The analysis of processes with statistical methods. Transl. from English]. M., Mir publ., 1973, 959 p. (in Russian)
11. **Kendall M.** *Vremennye ryady* [Time series]. M., Finance and Statistics publ., 1981, 199 p. (in Russian)
12. *Prakticheskaya diagnostika aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei* [Gas-turbine engines health monitoring]. Ed. by V.L. Stepanenko. M., Transport publ., 1985, 116 p. (in Russian)
13. *Programma MSD-ECM II. Engine Condition Monitoring Programm.* Pratt & Whitney. Performance & Diagnostics Support, 1994, 11 p.
14. *Programma postroeniya modelei i dvigatelei tipa PS-90A "DIAGNOZ-90-TRENDplyus". Deponirovano vo VNTITs. Reklamno-tekhnicheskoe opisaniye* [The program of model design and diagnosing engine type PS-90A "DIAGNOZ-90-TRENDplus". Deposited in VNTITS. Promotional support. (01132212.1948–01 99 01). Inventory No.50200300100], 2003, 23 p. (in Russian)
15. *Byulleten' №94148-BE-G. Izdelie: Dvigatel' PS-90A. Po voprosu: Vnedreniya v ekspluatatsiyu 2-i ocheredi nazemnoi avtomatizirovannoi sistemy diagnostirovaniya "ASD-Diagnoz-90" dvigatelya PS-90A na samolete IL-96-300* [Product: Engine PS-90A. On a question: Introduction into operation of the 2d ground automated system of diagnosing "ASD-Diagnostics-90" of engine PS-90A on aircraft IL-96-300]. Bulletin No. 94148-BE-G. Perm', 1996, 71 p. (in Russian)
16. **Chichkov B.A.** *Vibrodatchiki i mikroelektromekhanicheskie sistemy mobil'nykh ustroystv, kak ikh analogi, dlya otsenki vibrosostoyaniya rotornykh mashin* [Vibration sensors and microelectromechanical systems for mobile devices, such as analogs, for evaluation of vibration of rotary machines]. *Nauchny Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of MSTUCA], 2016, No. 223, pp. 120–125. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Boris A. Chichkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Full Professor of Aircraft Engine Chair of Moscow State Technical University of Civil Aviation, b.chichkov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию
Принята в печать

20.09.2017
28.12.2017

Received
Accepted for publication

20.09.2017
28.12.2017