

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОЛЕБАНИЙ ОБОЛОЧКИ

© 2014 Д.С. Лежин¹, О.В. Нагурная¹, Е.В. Никулин¹, Д. Верньяно²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

²Технический университет г. Турина, Италия

В статье приведены результаты модального анализа вала высокого давления турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД) НК-8 в пакете ANSYS. В подтверждение расчётов представлены результаты экспериментальных исследований низших частот и форм колебаний оболочки с использованием фотограмметрического комплекса ARAMIS HS. Особое внимание уделено особенностям проведения эксперимента. В частности, отработаны условия установки – закрепления оболочки при проведении исследований для создания свободного состояния вала, опробованы различные способы возбуждения исследуемого объекта, что даёт возможность корректного проведения эксперимента по определению собственных частот. Проведены сравнительные эксперименты при различных значениях кроп – фактора, на основании чего проведён анализ информативности полученных изображений. Отработаны технологии освещения объекта для обеспечения удовлетворительной экспозиции (достаточной для распознавания образа) при малых значениях выдержки. Опробованы методы съёмки исследуемого объекта при сложных алгоритмах триггирования кадров, что даёт возможность проведения экспериментальных исследований гармонических процессов при частотах, превышающих предельные частоты регистрирующей аппаратуры. По результатам отработки указанных факторов составлена методика и проведён эксперимент. В результате получены две низшие собственные частоты, согласующиеся с результатами расчётов, что свидетельствует о правильном моделировании вала в пакете ANSYS и корректно заданных граничных условиях. Получены формы колебаний на частотах 211 Гц и 362 Гц. Формы соответствуют результатам расчётов. Работа выполнена в рамках исследования вала высокого давления ТРДД НК-8 в части корректного моделирования граничных условий – жёсткости и демпфирования фланцевого соединения вала с дисками турбины и компрессора и влияния этих граничных условий на собственные частоты и формы колебаний.

Измерение, сила, перемещение, эксперимент.

В рамках экспериментально – расчётных исследований динамики вала высокого давления ТРДД НК-8 проведена серия экспериментов с использованием измерительного комплекса ARAMIS HS. В основе работы комплекса заложен фотограмметрический принцип. Исследовались собственные частоты и формы колебаний вала в свободном состоянии – без соединения вала с дисками компрессора и турбины. Вал представляет собой оболочку с двумя фланцами.

Целью работы является подтверждение расчётной модели и результатов расчётов вала в пакете ANSYS в рамках исследования влияния граничных условий оболочечных моделей. Кроме того, работа проводилась с целью наработки опыта исследования динамических процессов с использованием комплекса ARAMIS.

Авторами выполнен ряд экспериментальных исследований динамических процессов с использованием комплекса ARAMIS [1,2]. Всякий раз наибольшие трудности возникают при необходимости регистрации небольших значений деформаций на габаритных деталях (при низких градиентах изменения деформаций), а также при исследовании процессов, протекающих с частотами, близкими или превышающими допустимые предельные частоты съёмки камер комплекса ARAMIS HS (500 кадр/с). Одной из целей, поставленных авторами при выполнении данной работы, была проверка опыта, наработок и рекомендаций в решении указанных проблемных вопросов, опубликованных различными научными коллективами в ряде статей [3 - 7] при проведении динамических исследований с

аналогичным оборудованием.

Вал был смоделирован в конечно-элементном пакете ANSYS с помощью конечных элементов типа “shell”, что дало возможность получить трёхмерную модель с относительно невысоким количеством элементов. Вал моделировался как свободный объект.

По результатам расчёта в ANSYS первая собственная частота должна иметь значение 204,13 Гц. В первой модальной форме происходит интенсивное возбуж-

дение верхнего фланца вала, в зоне которого наблюдаются четыре пучности с относительно высокими перемещениями. Нижний фланец на этой частоте остаётся практически неподвижным.

На второй модальной форме основное возбуждение наблюдается в среднем поясе вала (рис. 1). Имеют место шесть зон пучности, а фланцы при этой форме остаются невозмущёнными. Форма соответствует расчётной частоте 335,63 Гц.

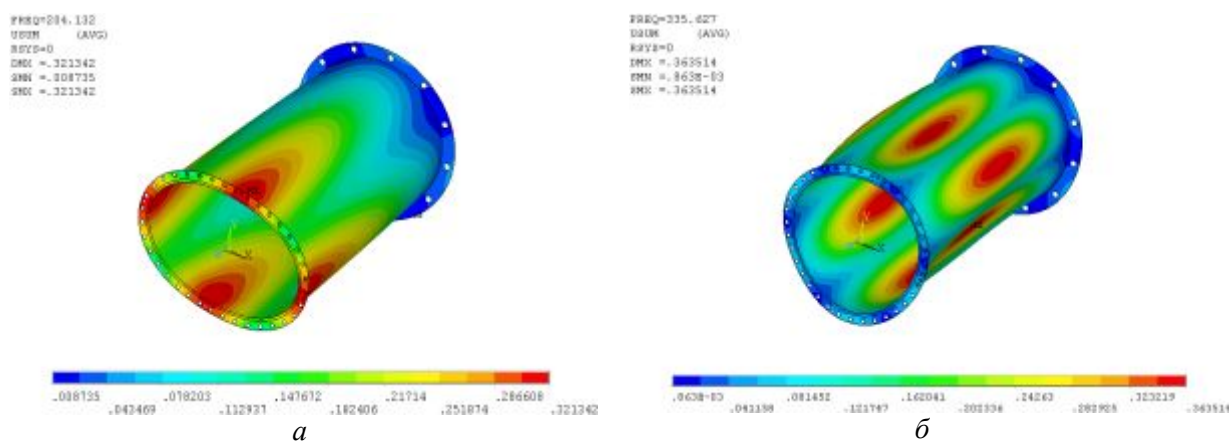


Рис. 1. Низшие расчётные формы колебаний вала: с частотами 204,13 Гц (а), 335,63 Гц (б)

Было выполнено несколько вариантов расчёта с различными граничными условиями на нижнем фланце – со свободным и заземлённым нижним фланцем вала. Расхождение низших собственных частот в зависимости от способа закрепления составило около 5 Гц.

В процессе эксперимента предполагалось проверить низшие частоты и формы колебаний вала.

Для создания свободного состояния вала он был размещён на пневмоподушке. Пневмоподвес имеет достаточно низкую собственную частоту (гораздо ниже первой собственной частоты оболочки) и достаточно эффективно обеспечивает обезвешивание и увеличение степеней свободы исследуемого объекта, что соответствует вывешенной оболочке.

Для возбуждения использовался мощный шейкер MODALSHOP 2025E с усилителем 2100E21-400. Шейкер механически связан с исследуемым валом.

Частота возбуждения задавалась с помощью генератора GW INSTEK GFG-8216A, сигнал подавался на вход усилителя. Связь шейкера с исследуемым объектом осуществлялась с помощью закалённой упругой спицы, закрепляемой с одной стороны к шейкеру, а с другой стороны - к приклеенной к валу гайке. Такое соединение позволило наиболее эффективно возбудить конструкцию. При этом спица обеспечивала полную развязку вала и шейкера, масса вала увеличилась на массу гайки и клея, что минимизировало влияние присоединённых масс. Была проведена серия экспериментов с перекалибровками измерительного комплекса ARAMIS на разные измерительные объёмы. Увеличение объёма, с одной стороны, увеличивает площадь доступной для измерения и исследования поверхности, а с другой стороны, при этом увеличивается порог минимально распознаваемых размеров

перемещений. Кроме того, параллельно проводились исследования по регистрации результатов с различной частотой съёмки. Комплекс ARAMIS HS обеспечивает в полноэкранный режим (с разрешением 1280×1024) максимальную частоту съёмки 500 кадров/с. Однако камеры комплекса и программное обеспечение позволяют осуществлять «кропнинг» - уменьшение размера кадра с одновременной возможностью повышения частоты съёмки. Например, при использовании половинного кадра можно повысить скорость съёмки в 2 раза. «Урезание» кадра идёт по высоте. Данная процедура соответственно уменьшает доступную для исследования площадь при необходимости увеличения частоты съёмки. В результате многочисленных опытов был найден компромисс между скоростью съёмки, порогом перемещения и площадью вала, на которой измеряются перемещения.

Собственные частоты экспериментально определить было достаточно просто: вал, представляющий собой цилиндрическую оболочку, легко входил в резонанс, что было хорошо ощутимо на слух. Низшие экспериментальные собственные частоты составили 211 Гц и 362 Гц. Эти же данные подтвердил эксперимент с измерением значений перемещений в отдельных точках при изменении частоты возбуждения с использованием лазерного виброметра Polytec.

Расхождение расчётных и экспериментальных значений составляет для первой частоты около 6 Гц. На второй собственной частоте расхождение оказалось выше: около 30 Гц, что составляет менее 10%.

Для исследования формы колебаний вала с измерением частоты колебаний необходимо было зафиксировать один период колебаний любой точки объекта.

Попытки повышения частоты съём-

ки таким образом, чтобы фиксировать одно полное колебание оболочки, оказались малоперспективными: ощущается недостаток информации из-за уменьшения площади исследования (так как при этом приходится прибегать к кропнингу кадра) и достаточно быстро наступает порог по предельной частоте колебаний исследуемого объекта. Как показывает практика, на основной тон происходит наложение гармоник, часто имеет место зашумление сигнала, вследствие чего удовлетворительное отображение одного периода такого сигнала возможно при приблизительно десятикратном увеличении частоты дискретизации (в данном случае частоты съёмки колебательного процесса). Подобная методика не дала бы возможности исследовать с помощью комплекса ARAMIS вторую собственную частоту. В качестве примера на рис. 2, 3 приведён результат съёмки вала на первой собственной частоте (на фото распознаваемой области виден характерный предфланцевый поясок).

На рис. 3 представлены перемещения точки 1 (рис. 2) по кадрам съёмки. Зная частоту съёмки по представленному графику перемещений, нетрудно определить частоту колебаний вала.

Поэтому было принято решение проводить исследования в полноэкранный режим, но с использованием триггер-бокса – устройства, управляющего запуском камер комплекса.

Была составлена программа управления камерами так, что съёмка велась с интервалом в несколько периодов с небольшим фазовым сдвигом. Это дало возможность зафиксировать полный период колебаний оболочки с отказом от «погоны» за высокой скоростью съёмки, соответственно полным кадром, с возможностью наблюдения за половиной вала. Результаты (с максимальными амплитудами) представлены на рис. 4.

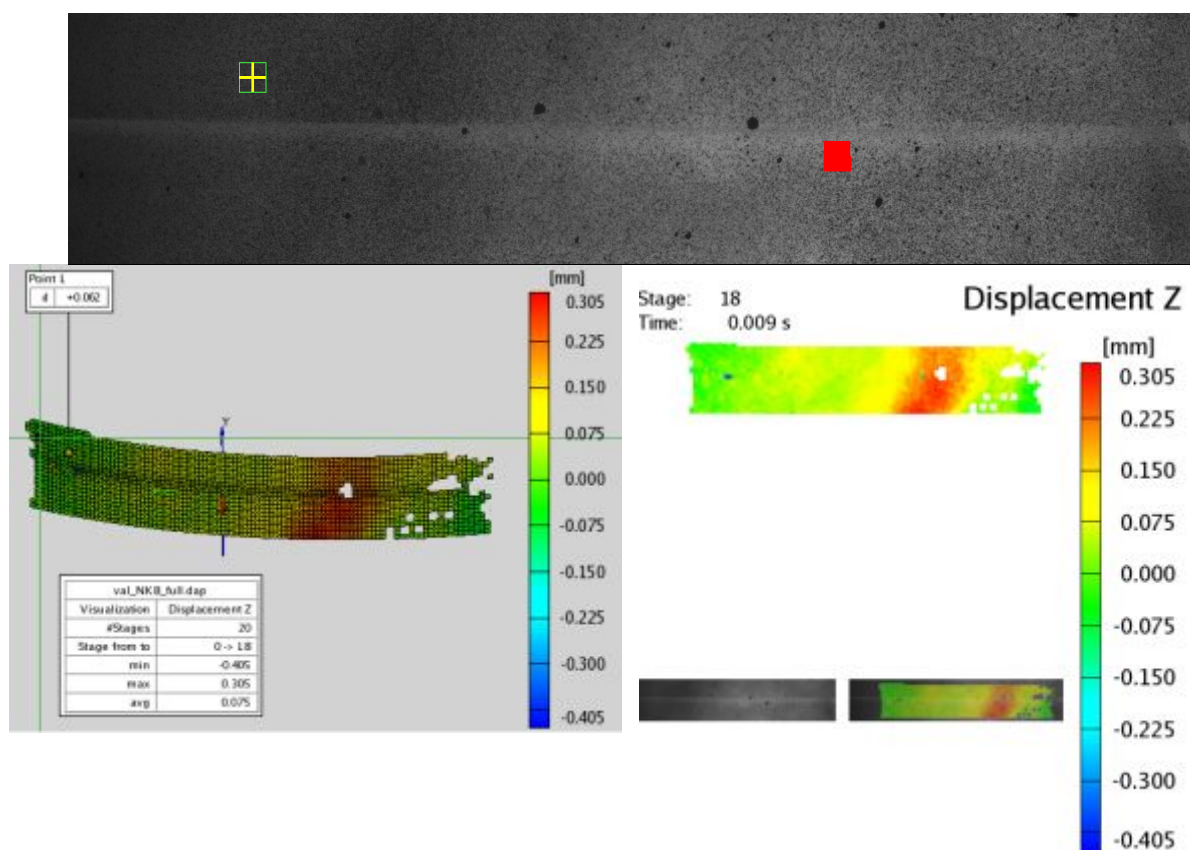


Рис. 2. Колебания фланцевой части вала на частоте 211 Гц, снятые со скоростью съёмки 2000 кадров/с

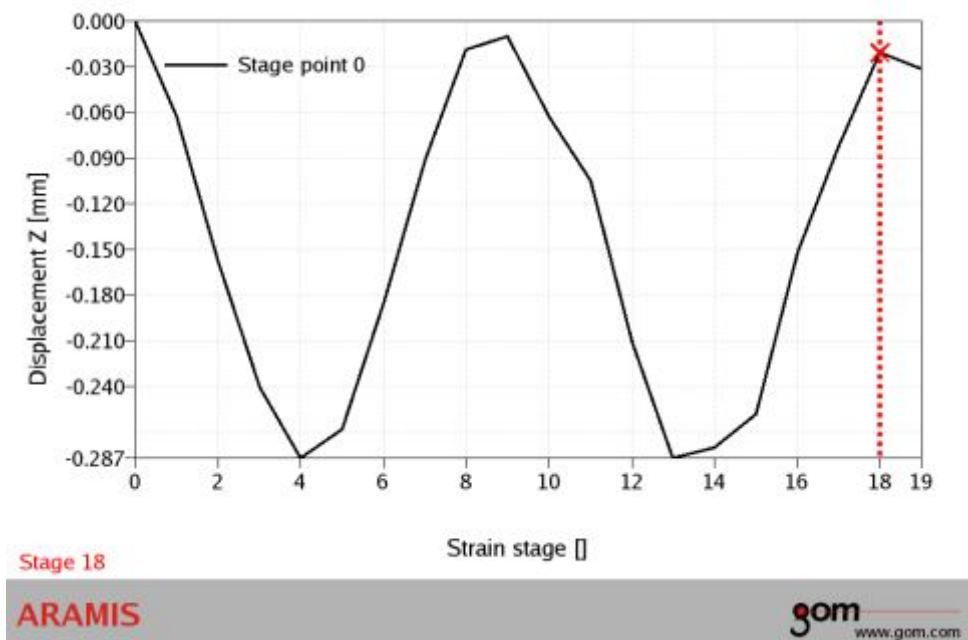


Рис. 3. Перемещения точки 1 по кадрам съёмки

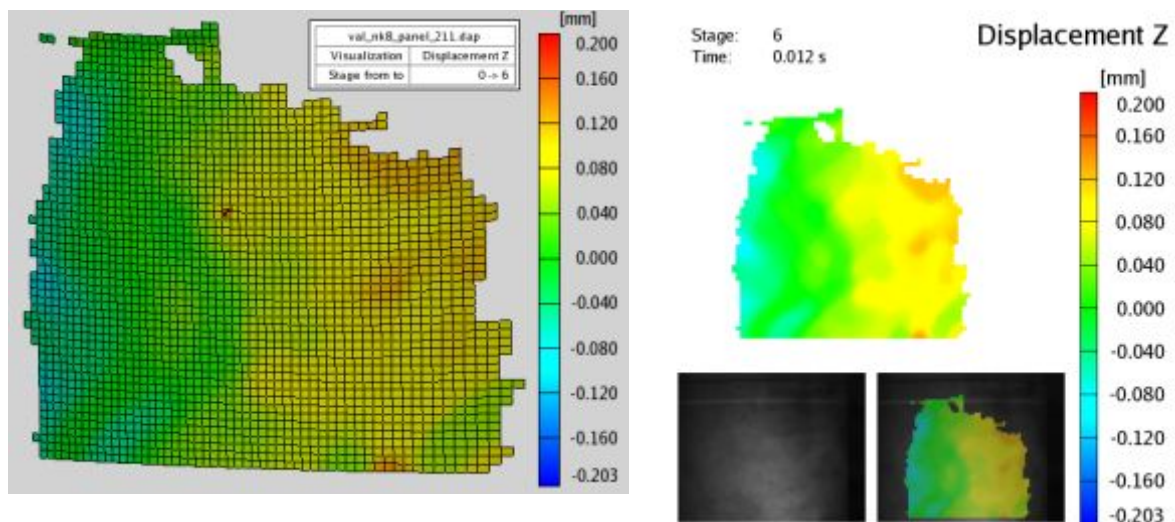


Рис. 4. Форма колебаний на частоте 211 Гц

На данном снимке наглядно видно, что пучность, наблюдаемая на фланцевой зоне вала на рис. 3, по мере приближения к центральной части исчезает, что согласуется с результатами расчёта. Можно сделать вывод, что на частоте 211 Гц наиболее возбуждается фланцевая зона вала.

Та же самая фланцевая часть оболочки на частоте 362 Гц оказывается фактически невозмущённой, что показано на рис. 5.

Зона максимальных амплитуд на этом режиме смещается в центральную

часть оболочки, о чём наглядно свидетельствует рис. 6, полученный съёмкой центральной части вала с возбуждением на частоте 362 Гц. Камеры были сориентированы чётко на зону пучности, по бокам хорошо видно начало аналогичных зон. Наложив зону распознавания на реальное фото вала, можно сделать вывод о наличии на видимой части вала (а это половина оболочки) трёх зон пучности, т.е. на всей оболочке на частоте 362 Гц имеют место шесть зон с максимальной амплитудой, что согласуется с расчётом.

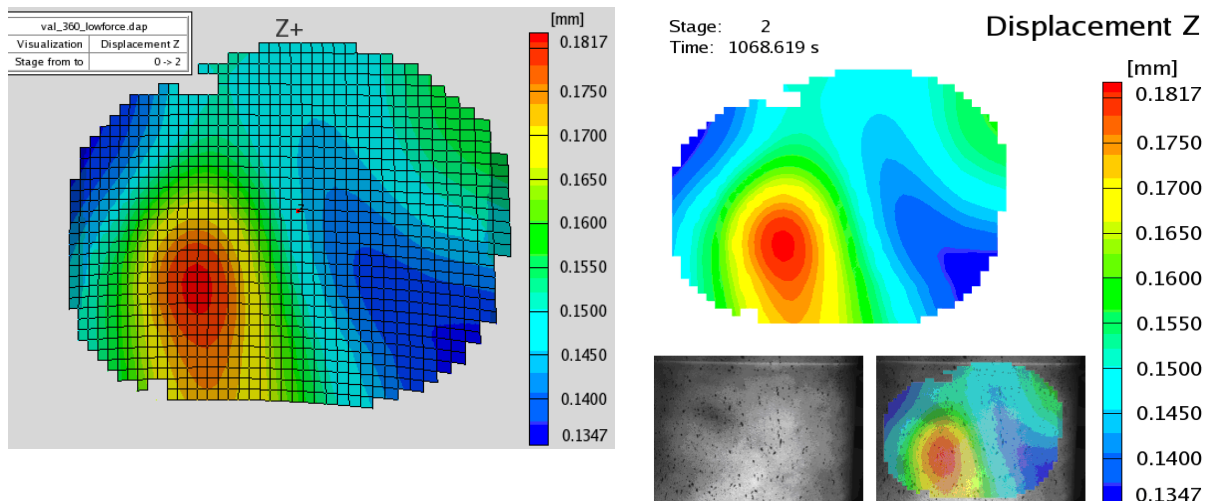


Рис. 5. Форма колебаний фланцевой части вала на частоте 362 Гц

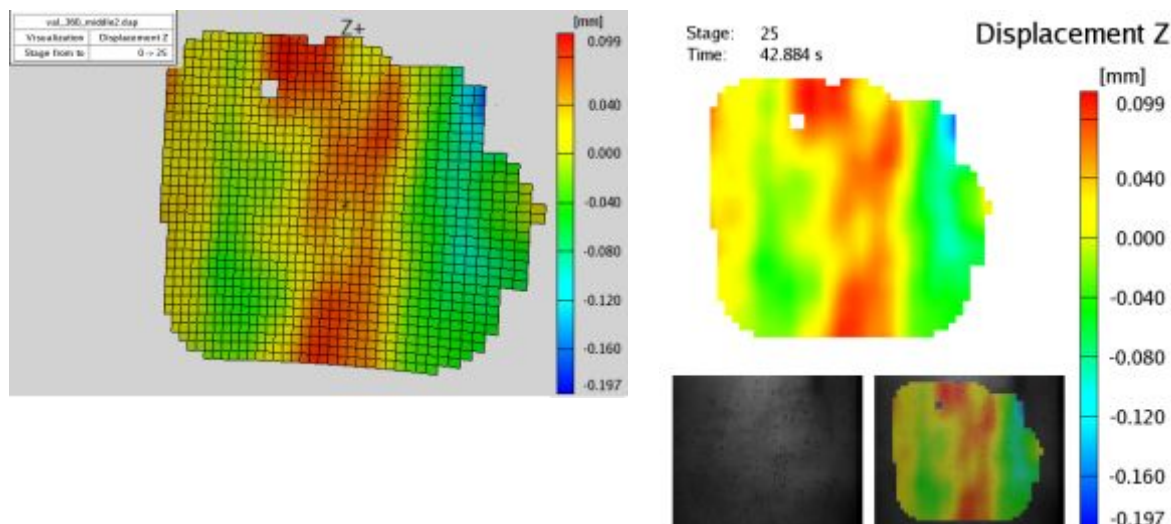


Рис. 6. Форма колебаний средней части вала на частоте 362 Гц

Предварительно с помощью лазерного виброметра была проверена стабильность характеристик гармонического процесса колебаний вала.

Все приведённые результаты экспериментов были обработаны: проведены интерполяция нераспознаваемых участков и сглаживание. Реальная картина колебаний оболочки имела более неоднородный характер, что можно объяснить спецификой самого метода регистрации – конечным значением времени экспозиции, а также особенностями реального объекта.

Несмотря на то, что съёмка велась в режиме внешнего запуска, с достаточно большим (0,01 с) интервалом между кадрами, высокие частоты регистрируемых процессов потребовали для получения высокой чёткости кадров уделить большое внимание выбору времени экспозиции. Этот вопрос также явился результатом компромисса. Желательное с точки зрения снимаемого процесса уменьшение выдержки влечёт за собой проблемы недостаточной освещённости объекта исследований и необходимость раскрытия диафрагмы, что, как известно, снижает глубину резкости. Последнее обстоятельство имеет большое значение из-за специфики формы исследуемого объекта. В результате многочисленных проб съёмка велась с выдержкой 0,19 - 0,3 мс, при этом был использован мощный

фронтальный осветитель 2 кВт и боковые источники направленного освещения. Как показало сравнение результатов, полученных при разных выдержках, большие значения выдержки при регистрации динамических процессов реальных объектов на комплексе ARAMIS могут существенно увеличивать структурную неоднородность поля перемещений.

Несмотря на ограниченные размеры полей перемещений, полученных на комплексе ARAMIS, их достаточно, чтобы провести сравнение с результатами расчётов.

Качественная картина полей перемещений на обеих низших частотах совпадает полностью. Следует отметить некоторые отличия распределения перемещений внутри пучности, зарегистрированные комплексом ARAMIS и представленные на рис. 6. Зона максимальных перемещений представляет собой не единый эллипс, как это было представлено по результатам расчёта, а несколько локальных экстремумов.

Аналогичные эксперименты были проведены с помощью виброметра Polytec-3D, для которого поле сканирования было намного шире, давая уже аккуратную модальную форму всей оболочки. Тем не менее, ARAMIS дал ограниченную, но дискретно более точную картину деформированной формы

и также представление об одномоментных перемещениях всех точек поверхности исследуемого объекта в исследуемой зоне.

В результате проведённого эксперимента получены две низшие собственные

частоты, согласующиеся с результатами расчётов, что свидетельствует о правильном моделировании вала в пакете ANSYS и корректно заданных граничных условиях.

Библиографический список

1. Лёжин Д.С., Паровай Ф.В., Собоуль А.В. Применение бесконтактного измерительного комплекса «ARAMIS» в экспериментальных задачах // Вестник СГАУ. 2011. № 3(27), ч. 4. С. 244-253.

2. Уланов А.М., Лежин Д.С., Швецов А.В. Экспериментальное исследование колебаний трубопровода ГТД с опорой из МР для отработки методики расчёта в среде ANSYS // Вестник СГАУ. 2012. № 3(34), ч. 3. С. 245-250.

3. Schmidt T., Tyson J., Galanulis K. Full-Field Dynamic Displacement and Strain Measurement Using Advanced 3D Image Correlation Photogrammetry: Part I // Experimental Techniques. 2003. V. 27, no. 3. P. 47-50.

4. Schmidt T., Tyson J., Galanulis K. Full-Field Dynamic Displacement and Strain Measurement Using Advanced 3D Image

Correlation Photogrammetry: Part II // Experimental Techniques. 2003. V. 27, no. 4. P. 22-26.

5. Schmidt T., Tyson J., Galanulis K., Revilock D., Melis M. Full-field dynamic deformation and strain measurements using high-speed digital cameras // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2005. V. 5580. P. 174-185.

6. Eriksen R., Berggreen C., Boyd S.W., Dulieu-Barton J.M. Towards high velocity deformation characterisation of metals and composites using Digital Image Correlation // EPJ Web of Conferences. 2010. V. 6. Article number 31013.

7. Yu J.H., Dehmer P.G. Dynamic Impact Deformation Analysis Using High-speed Cameras and ARAMIS Photogrammetry Software. Aberdeen Proving Ground, MD: Army Research Laboratory; 2010.

Информация об авторах

Лёжин Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: ldms@mail.ru. Область научных интересов: измерения вибрации, торцовые уплотнения, динамика и прочность, бесконтактные методы в эксперименте.

Нагурная Ольга Васильевна, ведущий программист кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: ulch@mail.ru. Область научных интересов: математические модели, программи-

рование, обработка и анализ результатов.

Никулин Евгений Викторович, инженер кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: nikulinevgen@rambler.ru. Область научных интересов: проведение экспериментальных исследований, электротехнические и электронные элементы стендового оборудования.

Верньяно Даниэль, магистрант по аэрокосмической технике, Туринский политехнический университет, Италия. E-mail: vdk.88@mail.ru. Область научных интересов: динамика, вибрация, проектирование газотурбинных двигателей, история авиации, технический перевод.

EXPERIMENTAL STUDIES OF SHELL VIBRATIONS

© 2014 D.S. Lezhin¹, O.V. Nagurnaya¹, E.V. Nikulin, D. Vergnano²

¹Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

²Technical University of Torino, Torino, Italy.

Results of modal analysis by ANSYS software for high pressure shaft of turbofan engine NK-8 are presented. Results of experimental researches of low modes and frequencies of the shell by photogrammetric complex ARAMIS HS are given as verification of calculations. The main attention is for experiment fulfillment features. For example, conditions of shell installation for free position of shaft are developed; different ways of researched shell vibration excitement are used. It gives a possibility of correct experiment for own frequencies obtaining. Comparison experiments for different values of crop-factor are fulfilled; analysis of information volume for obtained pictures is undertaken. Technology of researched object lighting for satisfactory image recognition for little exposure is developed. Methods of researched object photographing for complex algorithm of pictures switching are developed. It gives a possibility of experimental research of vibration processes which frequency is more than limit frequency of recording equipment. By these results an experimental methodic is developed and an experiment is fulfilled. First and second own frequencies are obtained experimentally; its values correspond to calculation results. In means that modeling of shaft in ANSYS software and boundary conditions are correct. Vibration modes for frequencies 211 Hz and 362 Hz are obtained. It corresponds to calculation results too. This research is fulfilled as a part of research of high pressure shaft of turbofan engine NK-8, as obtaining of correct model of boundary conditions (stiffness and damping of flange connection between shaft and disks of turbine and compressor) and influence of these boundary conditions on own frequencies and modes.

Measurements, stress, displacement, experiments.

References

1. Lezhin D.S., Parovay F.V., Sobul A.V. Application of contactless measuring complex «ARAMIS» in experimental tasks // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2011. No. 3(27), part 4. P. 244-253 (In Russ.)
2. Ulanov A.M., Lezhin D.S., Shvecov A.V. Experimental research of vibrations of pipeline of GTD with support from MR for working off method of calculation in environment of ANSYS // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2012. No. 3(34), part 3. P. 245-250 (In Russ.)
3. Schmidt T., Tyson J., Galanulis K. Full-Field Dynamic Displacement and Strain Measurement Using Advanced 3D Image Correlation Photogrammetry: Part I // Experimental Techniques. 2003. V. 27, no. 3. P. 47-50.
4. Schmidt T., Tyson J., Galanulis K. Full-Field Dynamic Displacement and Strain Measurement Using Advanced 3D Image Correlation Photogrammetry: Part II // Experimental Techniques. 2003. V. 27, no. 4. P. 22-26.
5. Schmidt T., Tyson J., Galanulis K., Revilock D., Melis M., "Full-field dynamic deformation and strain measurements using high-speed digital cameras". 26th International Congress on High-Speed Photography and Photonics, SPIE Vol, 5580. P. 174-185. (2005)
6. Eriksen R., Berggreen C., Boyd S.W., Dulieu-Barton J.M. Towards high velocity deformation characterisation of metals and composites using Digital Image Correlation // EPJ Web of Conferences. 2010. V. 6. Article number 31013.
7. Yu JH, Dehmer PG. Dynamic Impact Deformation Analysis Using High-speed Cameras and ARAMIS Photogrammetry Software. Aberdeen Proving Ground, MD: Army Research Laboratory; 2010.

About the authors

Lezhin Dmitriy Sergeevich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Samara State Aerospace University. E-mail: ldms@mail.ru. Area of Research: measurement, vibration engineering, contact seals, contactless methods experiment.

Nagurnaua Olga Vasilievna, Lead Programmer, Samara State Aerospace University. E-mail: ulch@mail.ru. Area of Research: mathematical models, programming, data processing and analysis.

Nikulin Evgeny Viktorovich, Engineer, Samara State Aerospace University. E-mail: nikulinevgen@rambler.ru. Area of Research: experimental studies, electrical and electronic components of the bench equipment.

Vergnano Daniele, aerospace engineering master student, Politecnico di Torino. E-mail: vdk.88@mail.ru. Area of Research: dynamics, vibration engineering, construction of gas turbine engines, aviation history, technical translation.