

МЕТОДИКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ВЫРАБОТКИ РЕСУРСА ЛОПАТОК ТУРБОАГРЕГАТОВ

© 2011 А. И. Данилин, В. М. Гречишников

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

Предлагается методика эксплуатационного мониторинга выработки ресурса лопаток турбоагрегатов, основанная на экспериментальных данных, полученных с помощью дискретно-фазовых преобразователей перемещений, реализующих дискретно-фазовый метод.

Турбоагрегат, лопатки, дискретно-фазовый метод, мониторинг, ресурс.

Рост стоимости жизненного цикла турбоагрегатов выдвигает проблему полного и безопасного использования ресурсных возможностей каждой турбомашины – недопущения снятия с эксплуатации по ресурсным ограничениям исправных турбоагрегатов и недопущения отказов в пределах назначенных ресурсов. Важная роль в её решении отводится непрерывному контролю технического состояния лопаток – мониторингу выработки ресурса (МВР) лопаток в реальных условиях их эксплуатации. Наличие такой информации позволяет оптимизировать сроки проведения ремонтов с продлением межремонтного периода эксплуатации, снижать трудоёмкость путём проведения восстановительно-ремонтных работ на стадии раннего развития дефектов, уменьшать общую длительность ремонтных работ за счёт своевременной поставки запасных частей, предупреждать аварийные ситуации и повышать общую надёжность работы турбоагрегатов.

Существующие методы и средства оценки выработки ресурса лопаток турбоагрегатов такие, как учёт наработок в стандартных циклах эксплуатации или счётчики моторесурса, не в полной мере учитывают влияние всех эксплуатационных факторов на выработку лопаточного ресурса турбомашин [1, 2]. Расчётная оценка выработки лопаточного ресурса, например авиационного двигателя,

показывает, что её значение в каждом отдельном полёте может отличаться на порядок и больше в зависимости от условий эксплуатации, режимов работы двигателя на протяжении полёта, его конструктивных особенностей и других факторов, которые можно учесть, используя форму установления ресурса лопаток по их фактическому состоянию [2].

В основе современных методик эксплуатационного МВР лопаток авиационных двигателей лежат методы расчёта их напряжённо-деформированного состояния (НДС) и теплонагруженного состояния (ТНС) по параметрам состояния двигательной установки, которые замеряются в полёте и записываются на магнитные бортовые регистраторы параметров.

Далее с помощью моделей НДС и ТНС проводится расчёт напряжений в наиболее нагруженных точках лопаток. По этим данным с использованием характеристик длительной прочности конкретных материалов определяется статическое повреждение лопаток. Одновременно путём анализа уровней действующих нагрузок методом полных циклов или "потока дождя" формируются параметры циклов напряжений и температур, которые после окончания обработки полётного файла используются для оценки повреждения от малоциклового усталости. В результате расчёта

определяются числовые характеристики максимальных действующих напряжений и суммарные статические и циклические повреждения за полёт на основе вероятностного линейного суммирования однородных повреждений, что позволяет установить на следующем этапе их вероятностные характеристики.

Таким образом, существующие современные методики МВР можно рассматривать как определение выработанного ресурса лопаток путём вычисления НДС и ТНС лопаток на основании данных контроля параметров двигателя, косвенно характеризующих состояние лопаток.

Приводимые в технической литературе описания систем МВР, как правило, не содержат количественных оценок погрешностей. Однако сведения из работ, в которых приводится характер принимаемых допущений, свидетельствуют о низкой точности математических моделей НДС и ТНС, используемых в алгоритмах мониторинга, особенно на неустановившихся режимах [3, 4]. Погрешности вызываются, прежде всего, приближённостью моделей для определения статических, динамических и тепловых нагрузок, действующих на лопатки, неучётом многоцикловых (вибрационных) напряжений, теплового и силового взаимодействия лопаток в составе лопаточного колеса и другими причинами. Для примера погрешность МВР от погрешностей определения НДС и ТНС составляет 10...15%, которые, в свою очередь, получают при погрешности мониторинга температурных режимов менее 3% и мониторинга максимальных напряжений меньше 1% [2, 3, 4].

Таким образом, модули современных автоматизированных систем, отвечающих за мониторинг НДС и ТНС лопаток турбомашин, имеют в своей основе приближённые математические модели, наполнение которых определяется, в основном, частотой вращения соответствующего ротора, давлением

воздуха на входе, за вентилятором, после компрессора, расходом топлива и сигналами включения различных сигнализаций [2]. На основании такой фактически косвенной информации, используя заводские верификационные соотношения, оцениваются параметры возможных статических и циклических нагрузок и делается прогноз относительно долговечности лопаток.

Увеличение точности прогнозирования выработанной части ресурса лопаток, как отмечалось, связано с использованием информации о реальном деформационном состоянии лопаток на любых режимах работы турбоагрегата.

Деформационное состояние лопаток определяется с помощью дискретно-фазовых преобразователей перемещений, реализующих дискретно-фазовый метод [5]. В результате контролируется изменение статического окружного отклонения торца каждой лопатки от исходного состояния, угловое положение её торца, амплитуда и частота колебаний торца лопатки. Знание этих параметров с учётом частоты вращения лопаточного колеса полностью характеризует НДС лопатки.

Для получения количественных оценок НДС предлагается воспользоваться расчётной заводской конечно-элементной моделью лопатки и решить с её помощью обратную задачу: по найденным известным перемещениям определить статические, циклические и вибрационные напряжения в контрольных сечениях пера лопатки. Для этого:

- на основании определённых координат торца деформированной лопатки и формы колебаний лопатки вводятся граничные условия по его статическим и динамическим перемещениям;
- поле перемещений в каждом элементе конечно-элементной модели лопатки через соотношения Коши определяет поле деформаций, поле деформаций определяет поле напряжений, а интеграл их произведения по объёму конечного



Рис. 1. Алгоритм эксплуатационного мониторинга выработки ресурса лопаток турбоагрегатов

элемента – энергию деформации. Таким образом, полная энергия деформации всего объекта, т.е. пера лопатки, является суммой энергий деформации каждого конечного элемента и может быть выражена функциональной зависимостью

через перемещения узлов сетки конечных элементов с учётом граничных условий; – среди кинематических возможных перемещений узлов истинными будут те перемещения, которые обеспечивают минимум этой полной энергии.

После нахождения соответствующих напряжений в характерных сечениях пера лопатки определяются статические, малоцикловые и многоцикловые нагрузки и создаётся архив изменения этих параметров. Затем, используя тот или иной закон накопления повреждений, например линейное суммирование однородных повреждений, за определённый временной или эксплуатационный цикл турбоагрегата рассчитываются эквивалентные параметры статических и циклических нагрузений.

В результате методика учёта выработки ресурса лопаток сводится к определению показателей прочностной надёжности: коэффициентов запаса прочности, коэффициентов выработки ресурса, эквивалентной наработки лопаток за конкретный эксплуатационный цикл и её накопление. Полученные данные сохраняются в памяти информационно-диагностического комплекса. Алгоритм функционирования предлагаемой системы представлен на рис. 1.

Библиографический список

1. Иноземцев, А.А. Газотурбинные двигатели [Текст]/ А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. – Пермь: Авиадвигатель, – 2006. – 1203 с.
2. Кучер, А.Г. Эксплуатационный мониторинг выработки ресурса критических элементов ГТД [Текст] / А.Г. Кучер, А.В. Тышкевич, П.А. Власенко // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 3. – С. 65-69.
3. Олейник, А.В. Сравнительная оценка погрешностей методов мониторинга выработки ресурсов авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / А.В. Олейник // Авиационно-космическая техника и технология: науч.-техн. журн. – 2005. – №8(24). – С.40-44.
4. Олейник, А.В. Оценка погрешностей мониторинга выработки ресурса авиационного газотурбинного двигателя [Текст]/ А.В. Олейник, Н.А. Шимановская//Вест. двигателестроения. – 2006. – № 3. – С. 70-74.
5. Данилин, А.И. Диагностика и контроль рабочего состояния лопаток паровых турбин [Текст]/ А.И. Данилин, С.И. Адамов, А.Ж. Чернявский [и др.] // Электрические станции. – 2000. – №7. – С. 19-25.

References

1. Inozemtsev, A.A. Gas turbine engines [Text]/ A.A. Inozemtsev, V.L. Sandratsky. – Perm: AviaEngine, – 2006. – 1203 p.
2. Kucher, A.G. Exploitation monitoring of gas turbine engine strained elements service life exhaustion [Text] / A.G. Kucher, A.V. Tishkevich, P.A. Vlasenko // Engine construction bulletin. – 2006. – № 3. – PP. 65-69.
3. Oleynik, A.V. Comparative assessment of errors in aircraft gas turbine engine life time exhaustion monitoring methods [Text] / A.V. Oleynik // Aerospace equipment and technology: scientific journal. – 2005. – №8(24). – PP.40-44.
4. Oleynik, A.V. Assessment of errors in aircraft gas turbine engine life time exhaustion monitoring [Text]/ A.V. Oleynik, N.A. Shimanovskaya // Engine construction bulletin. – 2006. – № 3. – PP. 70-74.
5. Danilin, A.I. Diagnostics and control of condition of steam turbine blades [Text]/ A.I. Danilin, S.I. Adamov, A.G. Chernyavskiy [et al.] // Electrical stations. – 2000. – №7. – PP. 19-25.

TECHNIQUE OF OPERATIONAL MONITORING OF BLADE OPERATIONAL LIFE EXHAUSTION ON TURBOUNITS

© 2011 A. I. Danilin, V. M. Grechishnikov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

A technique of operational monitoring of blade operational life exhaustion is proposed, based on the experimental data received with the help of discrete-phase movement transducers which use the discrete-phase method (blade tip timing).

Turbounit, blades, discrete-phase method, blade tip timing, monitoring, operational life.

Информация об авторах

Данилин Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), aidan@ssau.ru. Область научных интересов: измерительные системы, разработка методов и электронной аппаратуры для определения параметров эксплуатационного состояния лопаток турбоагрегатов.

Гречишников Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), gv@ssau.ru. Область научных интересов: измерительные системы, разработка методов и электронной аппаратуры для определения параметров эксплуатационного состояния лопаток турбоагрегатов.

Danilin Alexander Ivanovich, candidate of technical sciences, associate professor of the radio engineering and medical diagnostic systems department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), aidan@ssau.ru. Area of research: developing methods and designing electronic equipment for determining parameters of turbine-unit blade operating condition.

Grechishnikov Vladimir Mikhaylovich, doctor of technical sciences, professor, head of the electrical engineering department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), gv@ssau.ru. Area of research: developing methods and designing electronic equipment for determining parameters of turbine-unit blade operating condition.