

ДИСКРЕТНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ УЗЛОВ ЭНЕРГООАГРЕГАТОВ

© 2014 А.И. Данилин, В.М. Гречишников

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

Представлен новый класс преобразователей угловых и линейных перемещений элементов вращающихся узлов энергоагрегатов, позволяющих в условиях минимального препарирования обеспечивать необходимую точность и достоверность контроля перемещений в реальных условиях эксплуатации.

Турбомашина, турбина, энергоагрегат, лопатки, ротор, диагностика, колебания, надёжность, дискретно-фазовый метод, дискретно-фазовые преобразователи.

Одним из важнейших приоритетов Стратегии национальной безопасности Российской Федерации до 2020 г., утверждённой Указом Президента РФ № 537 от 12 мая 2009 г., является комплексная программа создания средств аварийной защиты энергоёмких объектов с целью обеспечения их техногенной, экологической, медицинской и антитеррористической безопасности. Внедрение на таких производствах технической диагностики, высокоинтеллектуальных инновационных методов и средств неразрушающего контроля - важнейший фактор, способствующий предотвращению аварийных ситуаций, экономии финансовых ресурсов и сохранению человеческих жизней.

С другой стороны, обеспечение высокой надёжности изделий машиностроения, в первую очередь энергетических установок (ЭУ) на базе турбоагрегатов, увеличение их эксплуатационного ресурса, снижение эксплуатационных расходов и эксплуатация по техническому состоянию базируется на информации о фактическом, реальном состоянии нагруженных вращающихся элементов. По этой причине всё большую актуальность приобретает разработка эффективных автоматизированных средств оценки технического состояния элементов вращающихся силовых узлов ЭУ, которое в свою очередь определяется статическими и динамическими угловыми и линейными перемещениями (УЛП) этих элементов. Примерами УЛП являются: статическая закрутка и крутильные колебания роторов мощных электродвигателей и

электрогенераторов, турбин и компрессоров, статический изгиб и раскрутка, изгибные и крутильные колебания лопаток турбоагрегатов и др.

По статистическим данным Самарского конструкторского бюро машиностроения за период эксплуатации двигателей НК-12СТ с 1995 по 2000 годы по причине неконтролируемого развития УЛП и образования дефектов, приведших к разрушению лопаток 1-ой ступени компрессора, досрочно сняты с газокompressорной станции (ГКС) 25 двигателей. Недоработка ресурса составила 870766 часов (средняя недоработка ресурса одного двигателя за 1 год - 6966 часов). По данным технической службы российской грузовой авиакомпании «ВОЛГА-ДНЕПР» за период (1991–2006 г.г) эксплуатации девяти серийных машин Ан-124 с двигателями Д-18Т зафиксировано 43 случая разрушения двигателей, причём 23 случая - по причине повреждения или разрушения лопаток, т.е. 53% от всех причин выхода из строя двигателей связано с низкой надёжностью лопаточного аппарата. В соответствии с данными Всероссийского теплотехнического института, приведёнными в «Методических указаниях по расследованию причин повреждений деталей роторов паровых турбин электростанций» РД153-34.117.424-2001, следует, что за 30 лет эксплуатации паротурбоагрегатов в России и СНГ по трём типам турбин (К-300, К-500, К-800) имели место повреждения лопаточного аппарата, приведшие к серьёзным разрушениям турбоагрегатов, машинных за-

лов и пожарам. В качестве примера можно привести фотографию (рис. 1) разрушения

лопаток двигателей на самолётах Ил-62 и Ту-154. Видны следы повреждения мотогондолы от разлёта лопаток.

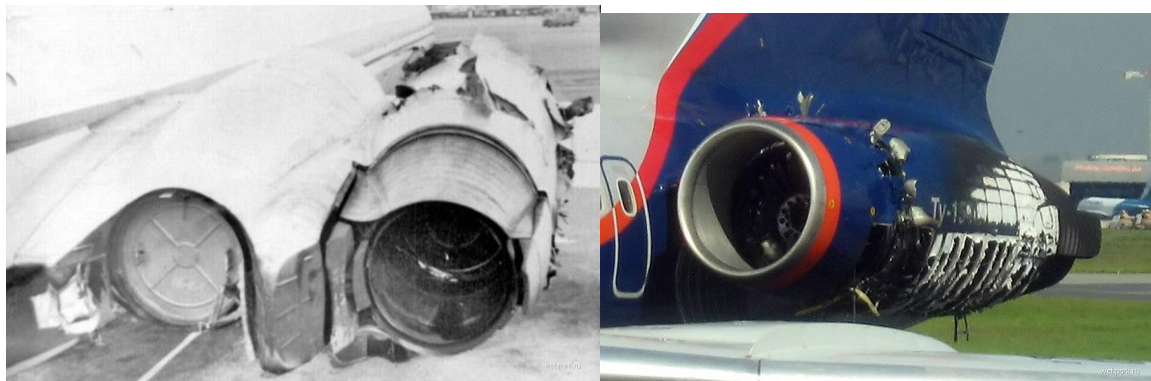


Рис. 1. Фотография разрушений двигателей самолётов Ил-62 и Ту-154

В настоящее время на практике основным методом как оперативного, так и длительного контроля состояния элементов вращающихся узлов (ВУ) ЭУ является бесконтактный дискретно-фазовый метод (ДФМ) [1]. Однако, внедрение известного классического метода дискретно-фазовых измерений сдерживается как на штатных, так и на экспериментальных ЭУ вследствие необходимости выполнения глубокого препарирования энергоагрегата для установки датчиков в его внутреннем тракте. Установка внутренних датчиков требует монтажа дополнительных крепёжных, токосъёмных и других конструктивных элементов, что снижает надёжность как устройства контроля, так и ЭУ в целом. Кроме того, классический ДФМ имеет существенный недостаток, связанный с резким уменьшением чувствительности при измерении локальных УПП, обусловленных высшими формами колебаний элементов вращающихся узлов энергетических установок.

В то же время в связи с возрастанием требований к точности и достоверности контроля перемещений ВУ ЭУ возникает необходимость в создании нового поколения устройств, которые в силу специфики построения и методики использования целесообразно выделить в самостоятельный класс средств измерений – дискретно-фазовые преобразователи перемещений (ДФПП) [2]. Особенность преобразователей данного класса заключается в том, что значения дискретных фаз перемещений формируются с

помощью расположенного в технологическом отверстии корпуса ЭУ одно – или двухканального первичного преобразователя (ПП), в котором конструктивно и функционально интегрированы объект контроля, источник и приёмник зондирующего излучения (ЗИ) оптического или радиоволнового диапазона, а также электронные узлы первичной обработки сигналов. Такое конструктивное решение позволяет обеспечить получение необходимой информации при минимальном уровне препарирования ЭУ (используется лишь одно технологическое отверстие в корпусе $\varnothing 8...10$ мм), что не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на прочность конструкции ЭУ в целом. Проведённый анализ научно-технической и патентной информации показал, что технические возможности ДФПП динамически нагруженных ВУ ЭУ дают возможность их широкому использованию в процессе доводки, испытаний и технической эксплуатации различных изделий машиностроения.

В качестве примера на рис. 2, а схематически представлена ступень лопаточной ЭУ. Здесь элементы конструкции ротора (диск колеса и вал) при его вращении совершают угловые статические (в виде закрутки) и динамические (в виде колебаний) перемещения относительно оси вала OO , линейные перемещения в направлении осей X и Z . Под действием рабочего тела (газовоздушной смеси или жидкости) на лопатки ЭУ их торцы подвергаются осевым перемещениям (ОП) вдоль оси X и радиальным перемеще-

ниям (в пределах рабочего зазора δ - РЗ) вдоль оси Z (рис. 2, б). Торец лопатки в результате закрутки её пера может совершать угловые перемещения (УП), также статические и динамические, в пределах некоторого угла φ (рис. 2, в) в плоскости XOY . Кроме этого, в результате изгиба пера лопатки её торец перемещается вдоль оси Y (ИП) (рис.

2, г), при этом (см. боковую проекцию на рис. 2, г) нормаль торца лопатки отклоняется от исходного состояния на угол α . Для контроля перемещений торцов лопаток в корпусе ЭУ над траекторией их движения установлен первичный преобразователь многофункционального ДФПП (датчик, ЧЭ ПП – чувствительный элемент ПП).

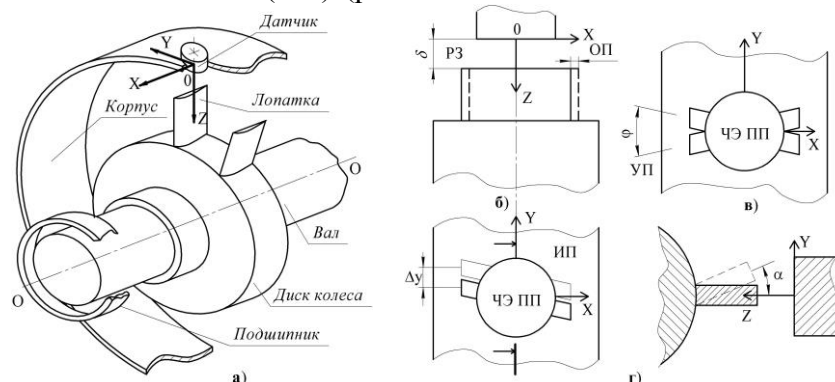


Рис.2. Элементы ротора лопаточной ЭУ, развёртка лопаточного венца с угловыми и линейными перемещениями лопаток

Своевременное обнаружение предельных УЛП элементов ВУ позволяет предупредить их поломку и избежать разрушения ЭУ. После определения предаварийных УЛП элементов ВУ изменяются режимы работы энергоагрегата, а в критических ситуациях осуществляется его аварийная остановка. В настоящее время известен ряд методов и измерительных средств [3, 4], позволяющих контролировать УЛП элементов ВУ ЭУ. Они используются при конструкторской доводке ВУ энергоагрегатов и проведении научных исследований для оценки напряжений, возникающих в валах, роторах, лопатках компрессорных и рабочих колес, для контроля уровней предельных деформаций контролируемых элементов.

С другой стороны, в современных энергоустановках достаточно хорошо отработаны и реализованы автоматические системы, обеспечивающие оптимальный по оборотам ротора выход на рабочий режим, поддержание заданных оборотов ротора, аварийный останов ЭУ [5]. Примером может служить электрогидравлическая система регулирования и поддержания оборотов ротора газотурбинных двигателей НК-12 и НК-14, в которой управляющие электрические напряжения с системы сигнальных датчиков приводят в действие электродвигатели гидрав-

лических заслонок в топливном тракте турбомашин, электроклапаны или изменяют положение иглы дозатора.

Таким образом, при наличии чётких критериев оценки УЛП элементов ВУ ЭУ существует реальная возможность создания системы автоматического поддержания безаварийного состояния ВУ ЭУ (САПБАС) и включения её в состав стандартных САУ режимами работы энергоагрегатов.

Для примера на рис. 3 приведена структурная схема системы автоматического поддержания безаварийного состояния лопаток турбоагрегатов (САПБАСЛ) на основе ДФПП торцов лопаток.

Движение контролируемых элементов (КЭ) ВУ в эксплуатационных условиях ЭУ складывается как из статических, так и динамических перемещений. В качестве примера такого характерного объекта контроля можно рассмотреть перемещения динамически нагруженных консольно-закрепленных элементов ВУ ЭУ. Перемещение КЭ иллюстрируется рис. 4, на котором показаны два соседних консольно-закрепленных элемента. На рабочем режиме ЭУ под действием центробежных и газовых сил упругая линия элементов ВУ занимает усреднённо-стационарное положение OS , относительно которого, при наличии возбуждающих сил,

рассматриваемые элементы участвуют в колебательном движении [6, 7]. Усреднённый шаг между зонами взаимодействия элементов с ДФПП определится величиной y_{ss} . Если, например, в i -м КЭ начинает развиваться

дефект, то это приводит к уменьшению жёсткости материала элемента и, соответственно, к уменьшению запаса прочности. Поэтому положение упругой линии КЭ в процессе его нагружения начинает меняться.

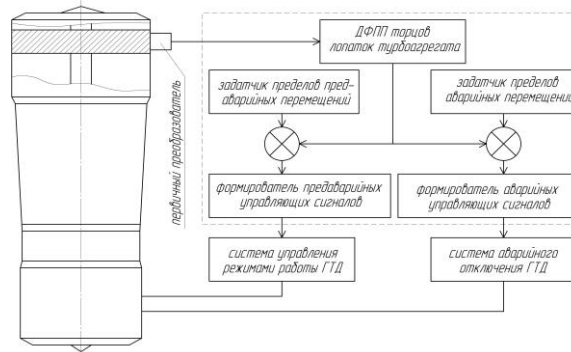


Рис. 3. Система автоматического поддержания безаварийного состояния лопаток турбомашин

Дефектный элемент получает дополнительное статическое перемещение (изгиб) и его колебательные движения с изменившейся амплитудой A_d происходят относительно новой упругой линии OD . В этом случае шаг между КЭ будет равен y_{ds} и отклонение контролируемого элемента от исходного бездефектного состояния $\Delta y_{ik} = y_{ss} - y_{ds}$.

Таким образом, зафиксированное изменение взаимных перемещений КЭ позволяет судить о его деформационном состоянии (ДС) и прогнозировать степень его аварийности, причём именно этот диагностический признак не зависит от фазы и частоты колебаний. Исправные, бездефектные КЭ характеризуются средней по венцу из K элементов амплитудой A_s колебаний (рис. 4). Посредством статистического анализа амплитуд колебаний всех элементов выделяются максимальные $A_{ssi\max}$ и минимальные $A_{ssi\min}$ значения, которые при сравнении со средней амплитудой дают алгебраическую разность $\Delta = A_{ssi\max} - A_s = |A_{ssi\min} - A_s|$. Полученная разность характеризует конструктивно-технологические отклонения, обусловленные различными упругостями отдельных КЭ и особенностями изготовления ВУ.

При эксплуатации ЭУ постоянно контролируется текущее значение амплитуд колебаний КЭ $A_{imek} = (y_{ssi\max} - y_{ssi\min})/4$, составленное из контролируемых перемеще-

ний, и сравнивается со средним значением. Как только $|A_{imek} - A_s| > \Delta$, констатируется изменение амплитуды колебаний i -го элемента, т.е. регистрируется появление в нём дефекта [5]. Для выявленного межэлементного интервала амплитуда колебаний дефектного КЭ:

$$A_d = -A_s + (y_{ds\max} - y_{ds\min})/2.$$

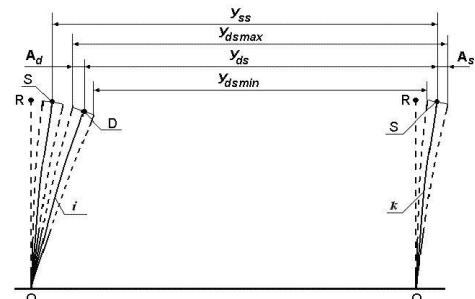


Рис. 4. Фрагмент окружной развёртки вращающегося узла с двумя консольно-закреплёнными элементами

Таким образом, задача определения ДС КЭ при использовании ДФПП с одноканальным чувствительным элементом связана с определением межэлементных перемещений или соответствующих временных интервалов. При этом предполагается, что в процессе накопления информации соседние КЭ проходят в зоне чувствительного элемента периферийного датчика хотя бы один раз в фазах, соответствующих двум экстремальным значениям их колебательных процессов, и между i -м дефектным и k -ым исправным

элементами будут зафиксированы максимальное и минимальное перемещения. Увеличение времени накопления позволяет с большей вероятностью правильно зафиксировать межэлементный интервал с дефектным КЭ. Поэтому время накопления информативного параметра ограничено, с одной стороны, временем развития дефекта, а с другой, – надёжностью проводимых измерений. В случае использования ДФПП с одноканальным чувствительным элементом для определения минимального времени накопления информации, при котором с заданной вероятностью можно утверждать, что погрешность измерения перемещения между КЭ не превзойдёт наперёд заданной величины, было проведено компьютерное моделирование методом статистических испытаний Монте-Карло. Для каждого числа последовательных периодов вращения ротора N было проведено 10^5 испытаний, в каждом из которых вычислялось N значений y_{ik} (индекс $ik = 1, 2, \dots, N$) по формуле: $y_{ik} = y_{ds} + y_v$, при этом полагалось, что $y_{ds} = const$. Величины кратности n (отношение частоты колебаний КЭ к частоте вращения ротора) и фазовых значений φ_i и φ_k для каждого испытания задавались с помощью трёх различных некоррелированных генераторов случайных чисел с равномерным распределением. Всего было проведено 90 серий таких испытаний для числа периодов вращения ротора $N = 10, 11, \dots, 99, 100$. В каждой серии вычислялась вероятность $P[2(A_s + A_d) - (y_{ik\max} - y_{ik\min}) \leq \mu]$ для различных значений ошибки μ . Результаты расчётов приведены на рис. 5.

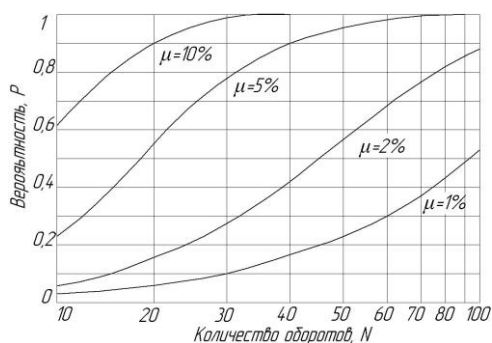


Рис. 5. Зависимость достоверности определения интервала между соседними КЭ от числа оборотов ротора турбоагрегата для различных значений допустимой ошибки

Результаты расчётов позволяют в каждом конкретном случае найти достоверность определения межэлементного интервала в зависимости от числа оборотов ротора ВУ для различных по величине допустимых ошибок.

При решении задачи эксплуатационного контроля ДФПП предназначены для постоянной и продолжительной работы в составе ЭУ. В этом случае с помощью ДФПП определяется изменение взаимного перемещения y_i торцов соседних лопаток в венце по мере развития дефекта в лопатке и соответствующее изменение амплитуды A_s их колебательного движения. При этом ДФПП могут быть реализованы по схеме с одноканальным (ДФПП-1) или двухканальным (ДФПП-2) чувствительными элементами [6, 7]. Структурная схема устройства эксплуатационного контроля взаимных перемещений торцов лопаток на базе ДФПП-1 представлена на рис. 6.

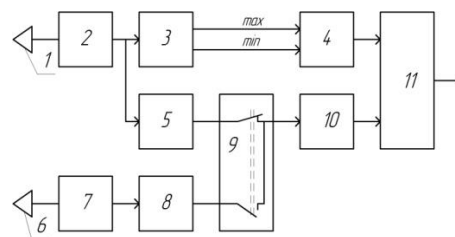


Рис. 6. Структурная схема устройства эксплуатационного контроля перемещений лопаток турбоагрегатов на базе ДФПП-1

Периферийный датчик 1, в котором конструктивно совмещены источник и приёмник ЗИ, установлен в корпусе турбоагрегата над траекторией движения торцов лопаток. В результате взаимодействия ЗИ с торцами лопаток датчик генерирует электрические сигналы, которые с помощью формирователя 2 преобразуются в прямоугольные импульсы. Информация о значениях параметров Δy_{ik} , A_s и A_d заложена в изменениях временных интервалов τ_i между этими импульсами, далее τ_i преобразуются в цифровой код в блоке 3. По результатам измерения в течение N текущих оборотов ротора определяются величины максимальных и минимальных значений τ_i для каждого шага. По-

лученные экстремальные значения каждого межлопаточного интервала поступают в блок 4, где определяется значение τ_{si} каждого шага в соответствии с выражением:

$\tau_{si} = (\tau_{i\max} + \tau_{i\min}) / 2$. Кроме этого, прямоугольные импульсы с формирователя 2 поступают в блок 5, где временные интервалы τ_i суммируются за N оборотов ротора и находится средний период вращения ротора:

$$T_s = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^K \tau_{ij}.$$

Если техническая реализация турбоагрегата позволяет установить датчик 6 оборотной метки ротора, то его электрические сигналы преобразуются формирователем 7 в прямоугольные импульсы, поступающие в блок 8, в котором определяется средний период вращения ротора за N оборотов:

$$T_s = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j.$$

Полученные значения T_s в блоке 10 делятся на количество лопаток K в колесе и определяется средний шаг лопаток по колесу за N оборотов ротора: $\tau_s = T_s / K$.

Определённые таким образом текущие значения окружных перемещений $y_{si} \sim \tau_{si}$ и $y_{ss} \sim \tau_s$ сравниваются между собой в блоке 11 сравнения. Если τ_s отличается от τ_{si} на некоторую пороговую величину Δy , то на выходе блока 11 генерируется сигнал о возникновении дефекта в одной или нескольких лопатках.

Определение амплитуды колебательного движения торцов лопаток осуществляется следующими двумя способами. В первом из них в процессе контроля участвует только ДФПП-1, ПП которого фиксирует моменты прохождения возле него торцов лопаток. В этом случае определяются усреднённые амплитуды колебаний пар лопаток, следующих друг за другом в лопаточном венце. Отсутствие датчика оборотов и оборотной метки не позволяет осуществлять привязку измерений к конкретной лопатке. С другой стороны, при построении устройств - сигнализаторов предаварийных деформаций лопаток - на основании амплитудного критерия важно выделить наличие превышения амплитуды колебаний контролируемого элемента ВУ

некоторой предельной величины, после чего должен быть сгенерирован сигнал тревоги. Поэтому некоторое уменьшение функциональных возможностей подобных сигнализаторов даёт выигрыш в надёжности и стоимостных характеристиках подобных ДФПП.

Во втором способе определения амплитуд колебаний лопаток используется датчик оборотов, который позволяет идентифицировать положение и перемещение любой лопатки относительно оборотной метки на роторе. Такая привязка также позволяет определить фазовые компоненты колебательного перемещения каждой лопатки и увеличить точность контроля перемещений за счёт исключения взаимного влияния на результат измерения пространственно-временных положений соседних лопаток. При необходимости контроля УПП, обусловленных высшими формами колебательного движения лопаток, используются ДФПП-2, работающие в СВЧ диапазоне (эксплуатационный контроль) или в оптическом диапазоне (экспериментальные исследования).

Выводы, полученные при теоретических исследованиях эксплуатационного варианта ДФПП, послужили основой для разработки на базе ДФПП-1 устройств определения предаварийных и предельных - аварийных перемещений торца лопатки при развитии в ней дефекта. Одним из таких приборов стал сигнализатор предельных деформаций лопаток (СПДЛ-1).

Разработанный вариант СПДЛ-1 прошёл испытания на стендах ОАО "Самарское конструкторское бюро машиностроения" (СКБМ). Программа испытаний состояла из того, что исследуемую серийную лопатку 1-й компрессорной ступени двигателя НК12-СТ с собственной резонансной частотой 130 Гц подвергали возбуждению на вибростенде на частоте собственного резонанса до тех пор, пока её собственная резонансная частота не снизилась до 125 Гц [1]. Исследование "надорванной" лопатки люминесцентным способом показало наличие трещины длиной не более 3 мм на спинке лопатки вблизи корня. Дефектная лопатка была запрессована в диск первой компрессорной ступени, которая затем была штатно установлена в двигатель. За время испытаний было произведено 44 запуска двигателя с режимом малого газа

и выходом на рабочие обороты. Для активизации развития трещины использовался окорезонансный режим (по отношению к резонансной частоте лопаток 1-ой ступени компрессора) работы турбомашин при вы-

ходе на малый газ. Перемещение периферийного торца дефектной лопатки от исходного состояния представлено на рис. 7. Штриховкой выделена зона отклонения бездефектных лопаток.

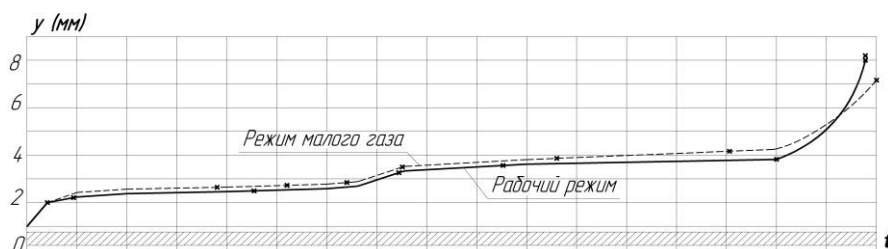


Рис. 7. Величина отклонения торца дефектной лопатки от исходного состояния за время последних пусков двигателя

На рис. 8 приведена экранная форма программы оператора СПДЛ-1, на которой представлены отклонения от исходного состояния всех лопаток, в том числе и дефектной, достигающее 6 мм.

для лопаток 1-й ступени двигателя НК12-СТ. Для проверки методики диагностики в эксплуатационных условиях комплект аппаратуры был установлен на ГКС "РЖЕВ" объединения "ЛЕНТРАНСГАЗ". Фрагмент записи рабочего состояния лопаточного венца на ГКС "РЖЕВ" приведён на рис. 9. Комментируя это состояние, можно отметить, что величины отклонений лопаток от исходных состояний находятся в пределах нормы и одна из лопаток имеет отклонение, превышающее 1 мм.

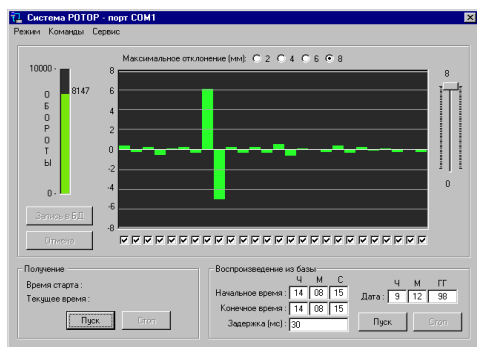


Рис. 8. Экранная форма программы оператора СПДЛ-1 с дефектной лопаткой

Экспериментальные исследования, проведённые на стендах СКБМ, и полученные результаты позволили обосновать рекомендации по выбору пороговых уровней (уставок) напряжений для САУ ГТД, соответствующих предаварийным (2,5 мм) и аварийным (3,5 мм) перемещениям торцов лопаток

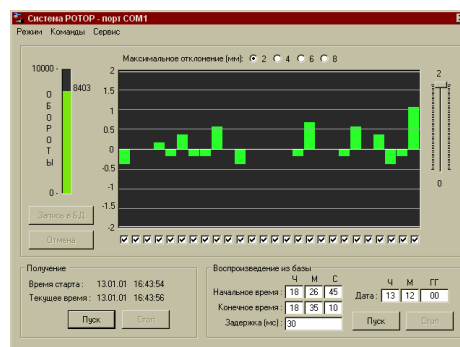


Рис. 9. Экранная форма программы оператора СПДЛ-1 с ГКС "РЖЕВ"

Библиографический список

1. Данилин А. И. Бесконтактные измерения деформационных параметров лопаток в системах контроля и управления турбоагрегатами. Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2008. 218 с.
2. Данилин А.И., Гречишников В.М. Дискретно-фазовые преобразователи перемещений для определения параметров колебаний лопаток турбоагрегатов // Вестник Самар.

гос. аэрокосм. ун-та. 2011. № 1(25). С. 144-149.

3. Danilin A.I., Adamov S.I., Chernyavskii A.Zh., Serpokrylov M.I. Diagnostics and monitoring of the operating condition of steam-turbine blades// Power Technology and Engineering. 2007. Т. 41, № 5. С. 295-301.

4. Данилин А.И., Гречишников В.М. Сигнализаторы предаварийных деформаций лопаток турбоагрегатов на базе дискретно-фазовых преобразователей перемещений // Вестник транспорта Поволжья Самар. гос. ун-та путей сообщ. 2011. № 4(28). С. 37-41.

5. Данилин А.И., Чернявский А.Ж. Критерии дискретно-фазового контроля рабочего со-

стояния лопаток и их реализуемость в системах автоматического управления турбоагрегатами // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2009. № 1(17). С.107-115.

6. Данилин А.И., Чернявский А.Ж. Сигнализатор предаварийных деформаций лопаток турбомашин. Патент РФ № 2177145, МКИ G01H1/08. ; Опубликовано 20.12.2001, Бюл. № 35.

7. Данилин А.И., Адамов С.И., Чернявский А.Ж., Серпокрьлов М.И., Данилин С.А., Арефьева О. В. Способ измерения амплитуды колебания лопаток турбомашин и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2341781, МКИ G01H1/06.; опубликовано 20.12.2008, бюл. № 35.

Информация об авторах

Данилин Александр Иванович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева (национальный исследовательский университет).

E-mail: aidan@ssau.ru Область научных интересов: измерительные системы, разработка методов и электронной аппаратуры для определения параметров эксплуатационного состояния элементов вращающихся узлов энергоагрегатов.

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

DISCRETE PHASE CONVERTERS MOVING ELEMENTS ROTATING UNITS POWER UNITS

© 2014 A.I. Danilin, V.M. Grechishnikov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federetion

Presents a new class of converters of angular and linear elements rotating units power units, allowing with the minimum of preparation to ensure accuracy and reliability of the control of movements in real operational conditions.

Key words: turbomachine, turbine, the auxiliary power unit, blades, rotor, diagnostics, vibration, reliability, discrete phase method, the discrete phase converters.

References

1. Danilin A. I., Contactless measurement of deformation parameters of the blades in the systems of monitoring and control of turbine units

/Samara: Publishing house of Samara scientific center of RAS, 2008.218 p.

2. Danilin A. I., Grechishnikov V.M. Discrete phase converters movements for definition of

- parameters of vibrations of turbine blades // Vestnik of Samara. state Aerocom. Univ. 2011. № 1(25). P. 144-149. (In Russ.)
3. Danilin A.I., Adamov S.I., Chernyavskii A.Zh., Serpokyrov M.I. Diagnosics and monitoring of the operating condition of steam-turbine blades// Power Technology and Engineering. 2007. So 41, № 5. P. 295-301.
4. Danilin A. I., Grechishnikov V.M. Alerters pre deformations of the blades of the turbine on the basis of discrete phase converters movements // Bulletin of transport of the Volga region Samar. state University of Railways the message. 2011. № 4(28). P. 37-41. (In Russ.)
5. Danilin A. I., Chernyavsky A.Z. Criteria discrete phase control the working status of blades and their feasibility in systems of automatic control of turbo-machinery Vestnik of Samara. state Aerocom. Univ. 2009. № 1(17). P. 107-115. (In Russ.)
6. Danilin A. I., Chernyavsky A.Z. Signalizator predavariynikh deformatsiy lopatok turbomashin [The alerter pre deformations of turbomachine blades]. RF patent № 2177145, MKI G01H1/08.; (Publ. 20.12.2001, bul. № 35).
7. Danilin A. I., Adamov S.I., Chernyavsky A.Z., Serpokyrov M.I., Danilin S.A. Sposob izmereniya amplitude kolebaniya lopatok turbomashini i ustroystvo dlya ego osushestvleniya [The method of measurement of amplitude of oscillations of turbomachine blades and a device for its implementation]. RF patent № 2341781, MKI G01H11/06.; (publ. 20.12.2008, bul. № 35).

About the authors

Danilin Alexander Ivanovich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, head of the radio engineering Department. E-mail: aidan@ssau.ru. Area of research: measuring systems, development of methods and electronic equipment for determination of parameters of operational condition of rotating units power units.

Grechishnikov Vladimir Mikhailovich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, head of the Department. E-mail: gv@ssau.ru. Area of research: measuring systems, development of methods and electronic equipment for determination of parameters of operational condition of rotating units power units.