

УСТРОЙСТВА ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

© 2008 А. И. Данилин¹, А. Ж. Чернявский², А. С. Капустин¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет,

²ОАО "АВТОВАЗ" г. Тольятти

Приводится краткий обзор известных устройств определения рабочего состояния лопаток турбин в эксплуатационных условиях, указываются недостатки существующих систем, описывается предлагаемая структурная схема системы диагностирования дефектных лопаток турбоагрегатов, приводятся технические характеристики разработанных устройств, результаты их испытаний и примеры использования.

Турбомашина, турбина, лопатки, датчик, дискретно-фазовый метод, измерения, испытания

В настоящее время контроль состояния лопаток турбомашин, находящихся в эксплуатации, осуществляется путем визуального осмотра каждой лопатки с помощью технических эндоскопов и вихретоковых дефектоскопов. Это очень трудоемкая работа, требующая от технического персонала профессионализма и ответственности. По данным фирмы "Роллс-ройс", объем эндоскопической диагностики на авиационных турбореактивных двигателях доходит до 45...60% от общего объема диагностических работ. Несмотря на принимаемые меры, как свидетельствует статистика, имеют место аварийные ситуации, связанные с поломкой лопаток.

На сегодняшний день известно несколько разработок, выполненных в 60-х годах прошлого века, в основе которых лежит дискретно-фазовый метод (ДФМ) измерения динамических деформаций лопаток вращающихся колес турбин [1], но практически все они предназначены и используются для решения задач конструкторской доводки и испытаний лопаток турбоагрегатов. Известные сигнализаторы "ЦИКЛ" обрыва лопаток регистрируют только свершившийся факт и не позволяют получить информацию о возникновении и развитии дефекта в лопатках. Развитие радиотехнической элементной базы, появление быстродействующих микропроцессоров и микроконтроллеров позволило автоматизировать многие операции и функции таких устройств, как "ЭЛУРА", "ЭЛИА" и некоторых других [1]. В связи с этим появились новые разработки [2], в основном предназначенные для контроля за

лопатками паровых турбин (ПТ), в которых процесс сбора, обработки и архивирования информации о состоянии лопаточного венца возлагается на компьютеризированные устройства. Однако они не нашли широкого применения из-за большой трудоемкости препарирования внутренних и внешних элементов турбоагрегата, необходимого для установки корневых датчиков и возбудителей во внутреннем тракте турбомашин. Кроме того, стандартное использование известных первичных преобразователей, имеющих ограничения по температурному диапазону и ряду технических характеристик, не позволяет распространить контроль деформационного состояния лопаток на высокотемпературные ступени ГТД или ПТ. Таким образом, к настоящему времени существует реальная необходимость в разработке устройств диагностики и контроля рабочего состояния лопаток турбин, находящихся в эксплуатации.

На основании теоретических предположений по реализации ДФМ, проведенных исследований и моделирования деформационных изменений в пере лопатки была разработана структурная схема системы контроля деформационного состояния лопаток [3], представленная на рис.1. Структурная схема построена по принципу измерения текущих временных интервалов (шагов) между торцами вращающихся лопаток, определения максимального и минимального значений каждого шага, нахождения усредненного значения каждого шага и сравнения их со средним по лопаточному колесу шагом на каждом обороте ротора турбоагрегата. В со-

ответствии с рис. 1 структурная схема работает следующим образом. Периферийный датчик 1, установленный в корпусе турбоагрегата над траекторией движения торцов лопаток,

генерирует электрический сигнал, который с помощью формирователя 2 преобразуется в прямоугольный импульс.

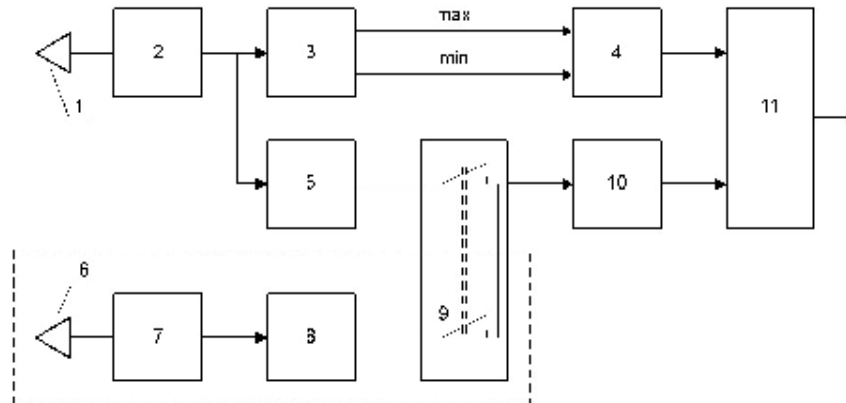


Рис. 1. Структурная схема системы диагностирования дефектных лопаток

Временные интервалы τ_i между прямоугольными импульсами, соответствующие окружному шагу между торцами лопаток, преобразуются в цифровой код в блоке 3. В этом же блоке из N текущих оборотов ротора определяются величины максимальных и минимальных значений для каждого шага. Полученные экстремальные значения каждого шага поступают в блок 4, где определяется усреднённое значение τ_{si} каждого шага в соответствии с выражением

$$\tau_{si} = (\tau_{imax} + \tau_{imin}) / 2.$$

Кроме того, прямоугольные импульсы с формирователя 2 поступают в блок 5, где временные интервалы τ_i суммируются за N оборотов ротора, после чего находится средний за N оборотов период вращения ротора

$$T_s = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^k \tau_i / N.$$

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

$$T_s = \left(\sum_{j=1}^N T_j \right) / N.$$

Блок переключателей 9 позволяет обеспечить необходимый режим работы устройства как с датчиком оборотной метки, так и без него. Полученные значения T_s в блоке 10 делятся на количество лопаток k в колесе, тем самым определяется средний шаг по колесу за N оборотов ротора:

$$\tau_s = T_s / k.$$

Далее, определённые таким образом τ_{si} и τ_s сравниваются между собой в блоке 11 сравнения. Если τ_{si} отличается от τ_s на некоторую пороговую величину p , то на выходе блока 11 генерируется сигнал о возникновении дефекта в одной или нескольких лопатках.

На основании предложенного алгоритма и структурной схемы разработан сигнализатор предаварийных деформаций лопаток (СПДЛ) для диагностики деформационного состояния лопаток 1-ой компрессорной ступени двигателя НК-12СТ, НК-14СТ, эксплуатируемых на газокompрессорных станциях (ГКС). Внешний вид и функциональный состав СПДЛ представлен на рис. 2. В его состав входят: импульсный датчик, устанавливаемый в корпусе турбоагрегата; измерительный блок с интерфейсом

RS-232 для связи с компьютером; соединительные помехозащищённые кабели связи; специальное программное обеспечение.

Сигнал о возникновении дефекта одной или нескольких лопаток в виде предупредительного светового и звукового сигналов вы-

даётся на пульт диспетчера-оператора. Если дефект лопатки продолжает развиваться, СПДЛ формирует сигнал для системы автоматического управления двигателем на нормальный (или аварийный) останов турбомашины.



Рис.2. Внешний вид и функциональный состав СПДЛ

Для контроля текущего состояния лопаток, экспресс-анализа их работоспособности, запоминания их эксплуатационного состояния, протоколирования результатов осмотра, создания технического паспорта лопаток в конкретном лопаточном колесе имеется возможность связи СПДЛ с персональным компьютером по последовательному интерфейсу RS-232. Для осуществления этой возможности разработано специальное программное обеспечение, которое позволяет в реальном времени производить эксплуатационную диагностику лопаток. Кроме того, в СПДЛ предусмотрено наличие автономного внутреннего запоминающего устройства, которое включается после выдачи предупредительного сигнала и фиксирует динамику развития дефекта лопатки. При этом во внутреннем энергонезависимом ОЗУ записывается дата, время и деформационное состояние всех лопаток в колесе. СПДЛ разработан и реализован на современной радиотехнической элементной базе, что позволило при двукратном резервировании получить компактное и надёжное устройство с оперативной адаптацией под любой тип двигателя и лопаточные колёса с различным количеством лопаток. СПДЛ может контролировать любую из ступеней двигателя, включая вы-

сокотемпературные. Предаварийный и аварийный пороги срабатывания устройства могут изменяться в соответствии с требованиями заказчика.

СПДЛ имеет следующие технические характеристики:

1. Диапазон частот вращения ротора турбомашин: (100 ... 16000) об/мин.
2. Диапазон рабочих температур импульсных датчиков:
 - вариант 1 (-40 ... +150) °С;
 - вариант 2 (-40 ... +1000) °С.
3. Диапазон рабочих температур измерительного блока (-40 ... +50) °С.
4. Питание СПДЛ - постоянное напряжение +27 В.

Разработанный вариант СПДЛ прошёл испытания на стендах ОАО "Самарское конструкторское бюро машиностроения". Программа испытаний состояла из двух этапов. На первом этапе исследуемую серийную лопатку 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. 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 околорезонансный режим работы турбомашин при выходе на малый газ. Изменение величины отклонения периферийного торца дефектной лопатки от исходного состояния за время последних запусков двигателя представлено на рис. 3. Штриховкой выделена зона отклонения бездефектных лопаток.

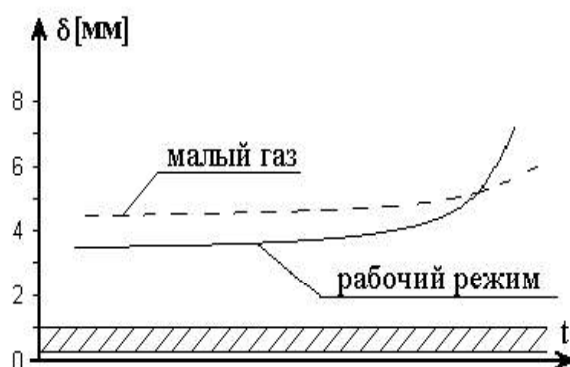


Рис. 3. Величина отклонения торца дефектной лопатки от исходного состояния за время последних пусков двигателя

На рис. 4 приведен экран программы оператора СПДЛ, на котором представлены отклонения всех лопаток, в том числе и дефектной, достигающее 6 мм.

На втором этапе в соответствии с программой испытаний в компрессорное колесо первой ступени были запрессованы 3 дефектные лопатки с условными номерами 1, 5, 15, которые имели нарушение целостности структуры материала лопаток в виде нитевидных трещин на спинке возле корня лопаток. Причём длина трещины у 1-й лопатки составляла примерно 10 мм, у 5-й – 15 мм и у 15-й – 20 мм. После первых запусков двигателя и выхода на рабочий режим были зафиксированы следующие отклонения их торцов: 1-я лопатка – (0,8...0,9) мм, 5-я – (1,2...1,3) мм, 15-я – (1,8...1,9) мм.

Эти значения отклонений торцов лопаток приведены на рис. 5. На этой диаграмме подсвечены дефектные лопатки 1, 5, 15 и 9-я лопатка экспериментального колеса, откло-

нение торца которой также отличается от уровня отклонения бездефектных лопаток.

На основании проведённых экспериментальных исследований разработаны рекомендации по выбору пороговых уровней сигнализации для лопаток 1-ой компрессорной ступени НК-12СТ, соответствующих предаварийным (3 мм) и аварийным (3,5 мм) отклонениям торцов лопаток.

Для проверки методики контроля и диагностирования рабочего состояния лопаток в эксплуатационных условиях комплект аппаратуры был установлен на ГКС "РЖЕВ" объединения "ЛЕНТРАНСГАЗ". Фрагмент записи состояния лопаточного венца на ГКС "РЖЕВ" приведён на рис. 6, комментируя которое, можно отметить, что величины отклонений лопаток находятся в пределах нормы и одна из лопаток имеет отклонение, превышающее 1 мм.

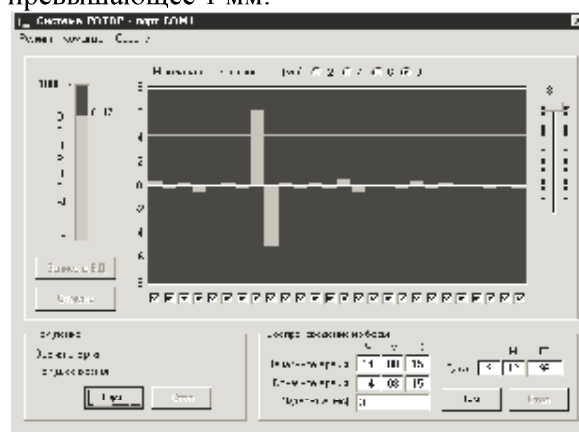


Рис. 4. Экран программы оператора СПДЛ с дефектной лопаткой

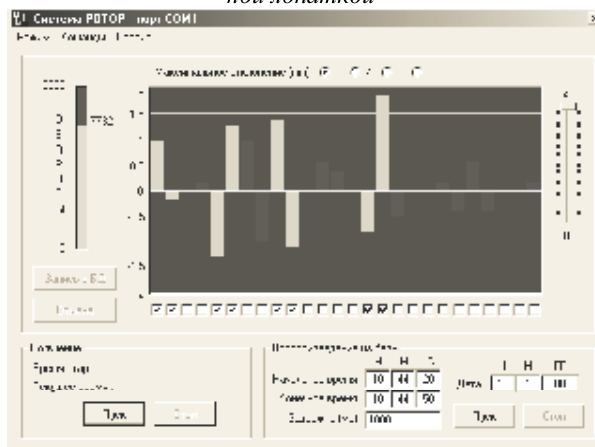


Рис. 5. Экран программы оператора СПДЛ с тремя дефектными лопатками

Аналогичные проблемы контроля за рабочим состоянием лопаток существуют и в паровых турбинах (ПТ). В настоящее время для серийных ПТ прямой непрерывный контроль уровня механических напряжений лопаток в эксплуатационных условиях не проводится. Косвенные методы оценки деформаций лопаток, основанные на анализе вибрационного состояния корпусных элементов ПТ [4], неэффективны. Поэтому в соответствии с планом НИОКР ОАО "Волжская ТГК" в разделе "Разработка и испытание опытных систем диагностики состояния рабочих лопаток паровых турбин" с учетом накопленного опыта диагностики рабочего состояния лопаток ГТД была разработана система контроля деформационного состояния лопаток паровых турбин (СКДСЛ ПТ). СКДСЛ ПТ предназначена для определения дефектного состояния лопаток на работающих турбоагрегатах, построена по методическим рекомендациям [2] и полностью соответствует техническим требованиям к программно-аппаратным средствам, реализующим дискретно-фазовый метод на паровых турбинах. Внешний вид СКДСЛ ПТ представлен на рис. 7.

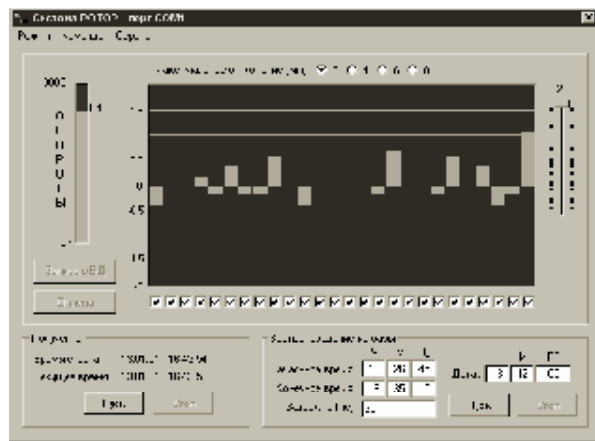


Рис. 6. Экран программы оператора СПДЛ с ГКС "РЖЕВ"

На рис.8, для примера, приведено меню диспетчера-оператора СКДСЛ, на котором представлено текущее состояние лопаточного венца 30-й ступени ПТ 60-130/13. Лопатки 30-й ступени этой турбины в динамическом режиме имеют изначальную расстановку, не превышающую для большинства из них

10%-го отклонения от среднего шага, и только одна из лопаток имеет отклонение 13%.



Рис.7. Внешний вид блока электроники СКДСЛ

Электронные блоки СКДСЛ ПТ разработаны с учетом их длительной эксплуатации в условиях повышенных температур, какие обычно имеют место в турбинных цехах тепловых электростанций. СКДСЛ может контролировать любую из ступеней ПТ, включая высокотемпературные. Сигнал о возникновении дефекта одной или нескольких лопаток в виде предупредительного светового и звукового сигналов выдается на пульт диспетчера-оператора.

Разработанная и изготовленная СКДСЛ была установлена на ТЭЦ ВАЗа на различных ПТ для контроля за состоянием лопаток последних ступеней. Анализ особенностей эксплуатации системы диагностики показал, что существует целесообразность сведения всей получаемой информации о деформационном состоянии лопаток в единый программный комплекс. Структурная схема программного комплекса для выявления дефектного состояния лопаток системой контроля деформационного состояния рабочих лопаток ПТ на ТЭЦ ВАЗа представлена на рис. 9.

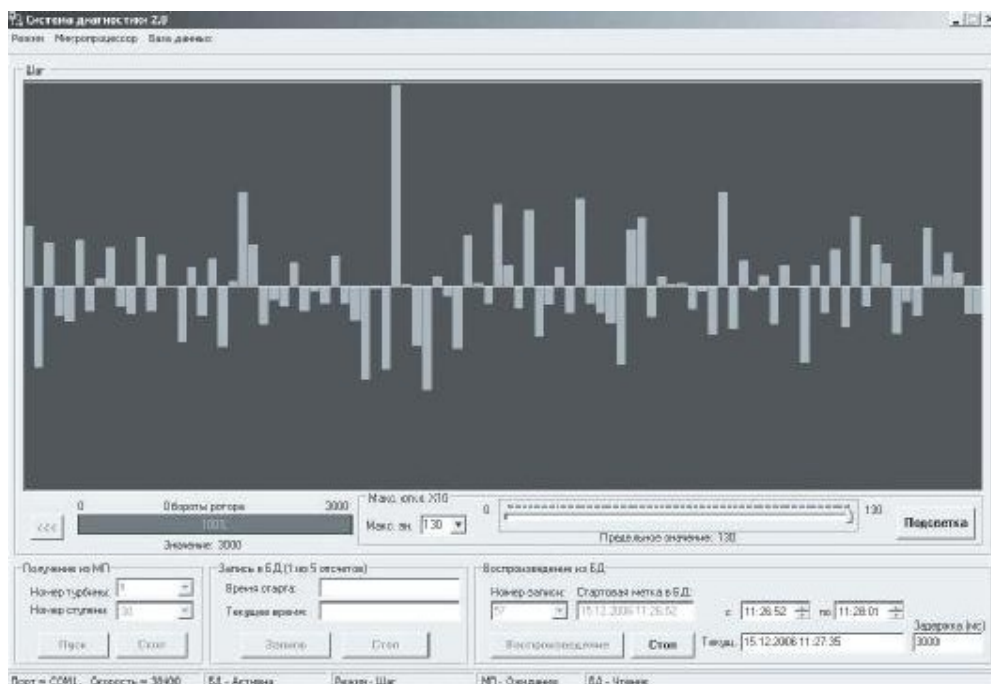


Рис.8. Текущее меню оператора системы контроля деформационного состояния рабочих лопаток (30-я ступень ПТ 60-130/13)

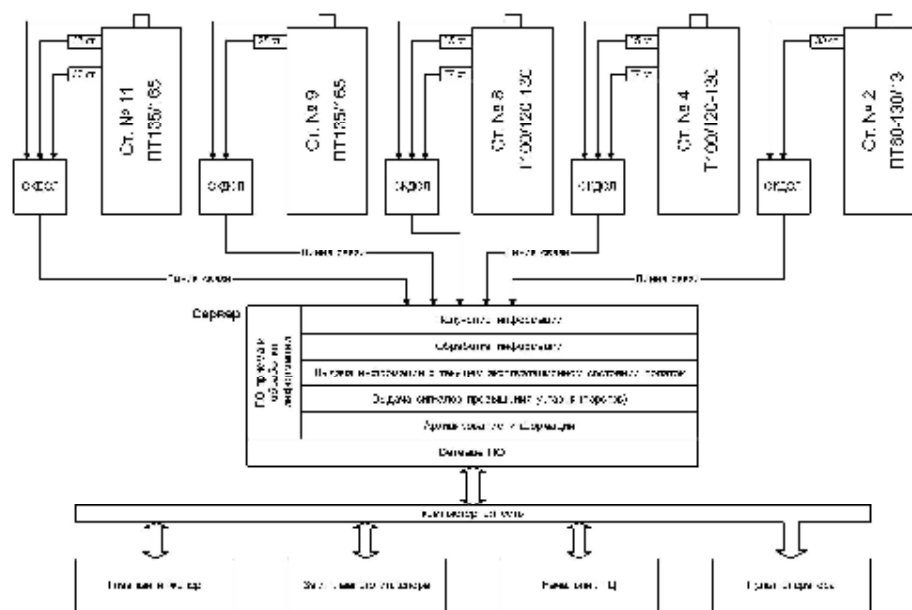


Рис.9. Структурная схема программного комплекса для выявления дефектного состояния лопаток системой контроля деформационного состояния рабочих лопаток ПТ на ТЭЦ ВАЗа

Реализация программного комплекса предусматривает создание и хранение паспорта лопаточного колеса, автоматизированный сбор и обработку поступающей информации о рабочем состоянии лопаток, определение корреляционных связей с вибрационными процессами турбины, архивирование информации, выдачу информации

об изменении динамики развития дефектов в лопатках и предоставление текущей информации о состоянии лопаточных венцов турбин через компьютерную сеть руководящему персоналу и специалистам соответствующих служб. В результате внедрения программного комплекса планируется повысить технологическую дисциплину и оперативность

принятия решений в сложных эксплуатационных ситуациях.

Таким образом, разработанные и изготовленные устройства контроля деформаций лопаток прошли успешную апробацию в стендовых и реальных условиях газоперерабатывающей станции и ТЭЦ ВАЗа. На основании полученных эксплуатационных данных можно заключить, что предлагаемые системы позволяют надёжно контролировать деформационную картину лопаточных венцов турбоагрегатов, получать оперативную информацию о состоянии каждой лопатки, генерировать сигналы предупреждения о появлении дефектов лопаток, сигналы на изменение режимов их работы и отключения турбомашин при появлении и развитии опасных деформаций одной или нескольких лопаток в колесе. Кроме того, благодаря возможности подключения ПЭВМ можно документировать получаемую информацию, архивировать ее и наблюдать состояние лопаток в реальном времени.

References

1. Zablotsky, I.E. Noncontact measurement of turbomachine blades oscillations. Y.A. Korostelev, R.A.Shipov, Moscow: "Machine-Building", 1977, 160 p.
2. Instructional guidelines about order of estimation of the operability of steam turbines working blades during manufacturing, operation and repairing. Guidance documents 153-34.1-17.462-00.

Библиографический список

1. Заблоцкий, И.Е. Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин / Коростелев Ю.А., Шипов Р.А. - М.: Машиностроение, 1977.-160 с.
2. Методические указания о порядке оценки работоспособности рабочих лопаток паровых турбин в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта // Руководящие документы 153-34.1-17.462-00.
3. Патент РФ № 2177145, МКИ G01H1/08. Сигнализатор предаварийных деформаций лопаток турбомашин // Данилин А.И., Чернявский А.Ж. (РФ) – 2000107734/09; Заявлено 29.03.2000; Опубликовано 20.12.2000, бюл. № 35.
4. Кравчук, В.В. Некоторые особенности вылета лопаток, расположенных в средней части роторов Урьев Е.В. // Электрические станции.- №9.- 2003.

3. Russian Federation Patent No. 2177145, International Class G01H1/08. Signalling device of pre-failure deformations of turbomachines blades // Danilin A.I., Chernyavskiy A.G. (Russian Federation) – 2000107734/09; filed 29.03.2000; published 20.12.2000, bulletin No. 35.
4. Kravchuk, V.V. Some peculiarities of blade-offs of the blades, located in the middle of rotor. Uriev E.V. – Electric stations, No.9.- 2003.

THE DEVICES FOR THE DIAGNOSIS AND CONTROL OF TURBINE BLADES DEFORMATIVE CONDITION DURING OPERATION

© 2008 A. I. Danilin¹, A. G. Chernyavskiy², A. C. Kapustin¹

¹ Samara State Aerospace University

² Joint-Stock Company AVTOVAZ

The article gives an overview of known devices for the determination of blades working state in operational conditions, points out to the drawbacks of existing systems, describes the block diagram offered for turbo-units defective blades diagnosis, shows technical characteristics of the devices developed, its tests results and application examples.

Turbomachine, steam turbine, blades, blade condition, diagnostics, sensor, discrete-phase method, measuring, test

Информация об авторах

Данилин Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: aidan@ssau.ru. Область научных интересов: разработка методов и электронной аппаратуры для определения параметров эксплуатационного состояния лопаток турбоагрегатов.

Чернявский Аркадий Георгиевич, ведущий инженер управления главного механика, отдела координации развития АСУ “Ремонт” ОАО АВТОВАЗ. E-mail: ark@vaz.ru. Область научных интересов: разработка электронной аппаратуры для определения параметров эксплуатационного состояния лопаток турбоагрегатов.

Капустин Александр Степанович, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: aidan@ssau.ru. Область научных интересов: разработка электронной аппаратуры для определения параметров эксплуатационного состояния лопаток турбоагрегатов.

Danilin Alexander Ivanovich, Candidate of Engineering Science, associate professor, Chair of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University. E-mail: aidan@ssau.ru. Area of research: developing methods and designing electronic equipment for determination parameters of turbine-units blade's operating condition.

Chernyavskiy Arkadiy Georgevich, leading engineer, Joint-stock company AVTOVAZ, Chief mechanic division, IT department. E-mail: ark@vaz.ru. Area of research: designing electronic equipment for determination parameters of turbine-units blade's operating condition.

Kapustin Alexander Stepanovich, Candidate of Engineering Science, associate professor, Chair of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University. E-mail: aidan@ssau.ru. Area of research: designing electronic equipment for determination parameters of turbine-units blade's operating condition.