

УДК 534.87: 53.08

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-9-28-36

Определение моментов времени смены режимов динамической системы с помощью индикаторной функции числа состояний*

А.Л. Тукмаков, Н.А. Тукмакова

КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, 420111, Казань, Российская Федерация, К. Маркса ул., д. 10

The Determination of Instants of the Change of Modes of a Dynamic System Using the Indicator Function of the Number of States

A.L. Tukmakov, N.A. Tukmakova

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI, 420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg.10



e-mail: tukmakov@imm.knc.ru, Nadejdatukmakova@yandex.ru



При эксплуатации и испытаниях различных технических устройств (в том числе турбин ракетных и авиационных двигателей) может возникнуть необходимость в диагностике процесса смены их динамических режимов, в определении текущего типа динамического режима и моментов или интервала времени наступления этого события. Наряду со спектральными методами для решения этой задачи можно использовать метод, базирующийся на анализе состояний динамической системы в дискретном фазовом пространстве. Рассмотрены метод и алгоритм описания поведения динамической системы на основе анализа эволюции индикаторной функции числа состояний, определенной во временном окне и суммирующей количество различающихся состояний системы в дискретном фазовом пространстве. Построена модель двумерного фазового пространства, в котором найдены дискретные состояния анализируемого динамического процесса. Описаны способ построения базового дискретного множества состояний динамической системы и поведение индикаторной функции в ходе создания базового множества состояний и при последующей идентификации дискретных состояний динамического процесса. Показано, что рост индикаторной функции происходит при смене динамического режима, приводящего к появлению новых состояний по отношению к таковым для смещающегося вдоль оси времени окна заданной ширины. В качестве примера на основе анализа акустического сигнала исследована смена динамического поведения системы, представляющей собой вращающийся вал, на который воздействует осевая нагрузка, содержащая постоянную и импульсную составляющие.

Ключевые слова: динамическая система, акустический сигнал, временная реализация, фазовое пространство, множество состояний, оконная функция, смена динамического режима, индикаторная функция

* Работа выполнена по государственному заданию Минобрнауки России высшим учебным заведениям и научным организациям в сфере научной деятельности 9.5542.2017/ВУ, номер для публикаций 9.5542.2017/6.7, а также при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках научных проектов, выполняемых коллективами исследовательских центров и научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России (проект 8.4157.2017/4.6/3305 «Разработка, проектирование и изготовление опытного образца универсального стенда модельных испытаний турбины перспективных двигателей»).

i When operating and testing technical devices, including turbines of rocket and aviation engines, there can be a need for diagnostics of the process of change of their dynamic modes, for the determination of the current type of the dynamic mode and the instants or the time interval of the event onset. Along with the spectral methods, a method based on the analysis of conditions of the dynamic system in a discrete phase space can be applied to solve this problem. The authors examine a method and an algorithm that describes the behavior of the dynamic system based on the analysis of the evolution of the indicator function of the number of states, determined in a temporary window and summing up the quantity of the differing conditions of the system in a discrete phase space. A model of the two-dimensional phase space is constructed, in which discrete conditions of the analyzed dynamic process are determined. A method to build a basic discrete set of states of the dynamic system and the indicator function behaviour are described while creating a basic set of states and subsequently identifying discrete conditions of the dynamic process. It is shown that an increase in the indicator function occurs when changing the dynamic mode, leading to the emergence of new states in relation to the conditions of the window of a given width, which is displaced along a time axis. As an example, by analyzing the acoustic signal, the authors examine a change in the dynamic behavior of the system represented by a rotating shaft onto which a thrust force containing constant and pulse components is applied.

Keywords: dynamic system, acoustic signal, temporary realization, phase space, set of states, window function, change of dynamic mode, indicator function

При эксплуатации и испытаниях технических устройств различного назначения может возникнуть необходимость в диагностике состояния системы [1–7], смены динамического режима и в определении моментов времени наступления этого события [8]. Для решения подобных задач применяют методы спектрального анализа сигналов, к которым относятся и методы вейвлет-анализа [9]. Задачи идентификации решают методами искусственных нейронных сетей [10, 11] и корреляционного анализа [12]. Наряду с этими широко известными методами для идентификации динамических режимов, сигналов и диагностики связанных с ними объектов [13–15] может быть применен метод, основанный на анализе состояний динамической системы в дискретном фазовом пространстве [7, 8].

Цель работы — демонстрация возможностей данного метода применительно к анализу динамики технических систем.

В частности, актуальной является разработка универсального стенда для модельных испытаний перспективных газотурбинных установок, в связи с чем возникает ряд технических задач, решаемых методами диагностики и идентификации динамической системы. Одна из задач при проведении стендовых испытаний турбин перспективных двигателей — автоматизированное измерение не только азимутального, но и осевого усилия, создаваемого аэродинамическими силами на вращающемся валу

[16]. При работе турбины вращающийся вал под действием аэродинамической нагрузки передает осевое усилие на опорный подшипник. Если приложить осевое усилие известного значения в противоположном относительно осевой составляющей аэродинамической силы направлении, то при достижении равновесия между этими силами произойдет разгрузка опорного подшипника, изменится режим его работы и характеристики акустического сигнала, создаваемого устройством.

Зная временной закон изменения силы, компенсирующей аэродинамическую нагрузку, и момент времени разгрузки опорного подшипника вала, можно вычислить осевую аэродинамическую нагрузку, действующую на рабочее колесо турбины. Момент времени изменения динамики системы при достижении разгрузки в осевом направлении определяется на основе анализа колебаний, генерируемых при работе стенда.

В качестве анализируемого сигнала можно рассматривать механические колебания станины стенда, снимаемые тензодатчиком, или акустические колебания воздуха с датчика давления. Для анализа сигнала и выработки решения об изменении динамического режима применяют различные методы [17, 18], в том числе метод анализа сигнала с помощью функции числа состояний динамической системы в дискретном фазовом пространстве [7, 8].

В качестве иллюстрации возможности применения этого метода рассмотрим модельную задачу об акустической диагностике момента времени разгрузки опорного подшипника вращающегося вала электродвигателя.

Построение дискретного множества состояний динамической системы и индикаторной функции. На рис. 1 приведена схема устройства, в котором реализованы различные динамические режимы, рассмотренные далее. Устройство представляет собой вращающийся вал, к которому приложена осевая нагрузка F с постоянной F_0 и импульсной $F(t)$ составляющими. На начальном этапе нагружения на вращающийся вал действует только постоянная составляющая осевой нагрузки. В результате устанавливается некоторый динамический режим. Через некоторое время добавляется импульсная составляющая нагрузки, меняющая динамику системы.

Задача состоит в разработке метода, позволяющего диагностировать процесс изменения в состоянии системы на основе анализа акустического сигнала, формируемого устройством. При этом акустический сигнал поступает на микрофон, далее на вход звуковой карты, оцифровывается, и строится временная реализация сигнала с заданной дискретностью.

Для дальнейшего анализа построим отображение множества дискретных точек временной реализации в двумерное фазовое пространство (рис. 2), по оси x которого отложим дискретные значения сигнала $u(t_i)$, а по оси y — значения первой центральной разностной производной

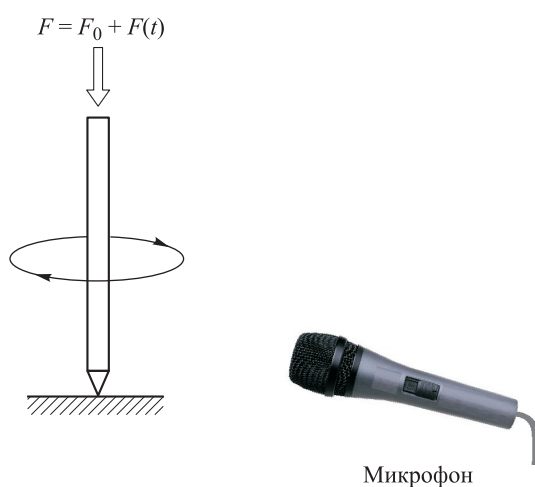


Рис. 1. Источник акустического сигнала — вращающийся вал с меняющейся во времени осевой нагрузкой

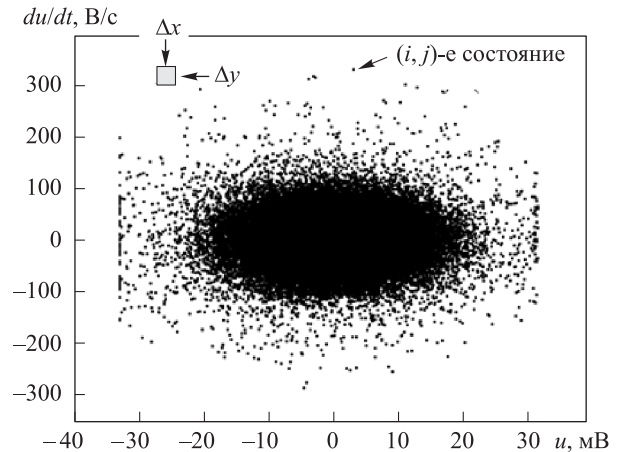


Рис. 2. Точки анализируемой временной реализации сигнала на фазовой плоскости

по времени $du/dt \approx [u(t_{i+1}) - u(t_{i-1})]/(t_{i+1} - t_{i-1})$. Полученное множество точек — дискретных узлов фазовой кривой процесса — покроем сеткой, ячейки которой имеют постоянные шаги Δx , Δy . Тогда текущее состояние системы можно отождествить с попаданием дискретной точки фазовой траектории в некоторую ячейку сетки с индексами (i, j) , где $i = u(t)/\Delta x$, $j = (du/dt)/\Delta y$. Стороны ячейки Δx , Δy должны быть выбраны так, чтобы избежать эффектов насыщения и бедной статистики при дальнейшем анализе сигнала [14].

Введем оконную функцию числа состояний динамической системы. Расположим окно на временной оси и зададим его ширину интервалом ΔT . Пусть левая граница временного окна (ВО) обозначает момент времени t , а правая — $t + \Delta T$. Внутри окна находятся дискретные текущие состояния системы с индексами (i, j) в соответствующие моменты времени t , $t + \Delta t$, $t + 2\Delta t$, ..., $t + \Delta T - \Delta t$.

Построим индикаторную функцию динамического процесса следующим образом. Если состояние системы на правой границе ВО в момент времени $t + \Delta T$ не содержится в окне, то будем считать это состояние новым и увеличим значение индикаторной функции на единицу.

Затем сдвинем ВО на шаг Δt вправо. При этом прежнее анализируемое состояние попадает в крайнее правое положение ВО. Вправо смещается и левая граница ВО. Крайнее левое состояние внутри ВО, соответствующее моменту времени t , утрачивается и заменяется на состояние системы в момент времени $t + \Delta t$. Если состояние системы на правой границе ВО в момент времени $t + \Delta T$ уже содержится в окне,

т. е. присутствует среди состояний, находящихся внутри ВО, то оставим индикаторную функцию числа состояний без изменения. Далее сдвинем ВО вправо на временной шаг и проверим новизну следующего состояния системы по отношению к состояниям ВО, а в случае обнаружения нового состояния увеличим индикаторную функцию на единицу.

В начальный момент времени $t = 0$ начинается процесс формирования ВО. Последовательно происходит пополнение ВО состояний и смещение его правой границы при неподвижной левой до тех пор, пока ширина ВО не достигнет заданного значения. При этом по описанному ранее алгоритму изменяется индикаторная функция числа состояний. После того как ширина окна во времени примет заданное значение ΔT , начинается смещение ВО как целого вдоль временной оси вправо с анализом на каждом временном шаге состояния системы на правой границе и с корректировкой индикаторной функции.

Анализ временной реализации сигнала. На рис. 3 показана временная зависимость, полученная при записи акустического сигнала, возникающего при вращении вала двигателя. Реализация сигнала содержит три различных участка: А, В, С. На участке А вращение вала происходит при действии постоянной осевой нагрузки. На участке В к ней добавляется импульсная осевая нагрузка. В начале участка С

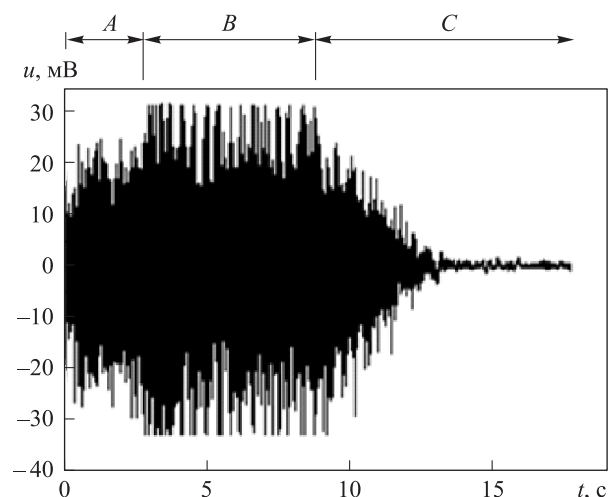


Рис. 3. Акустический сигнал с микрофона, содержащий три различных участка:

А — вращение вала при действии постоянной осевой нагрузки F_0 ; В — вращение вала при действии постоянной F_0 и импульсной $F(t)$ осевых нагрузок; С — вращение вала при уменьшении интенсивности постоянной и импульсной осевых нагрузок

система выключается, снижаются до нуля обороты вала и интенсивность импульсной нагрузки.

На рис. 4, а, б показаны временная реализация и спектр мощности колебаний S акустического сигнала в режиме А. Спектр мощности получен как прямое Фурье-преобразование автокорреляционной функции [15]. В левой части спектра содержится пик на частоте колебаний $f = 165$ Гц, которая возникает при работе механизма, создающего импульсную осевую нагрузку, и полностью подавить ее не удается.

На рис. 4, в, г приведены временная зависимость и спектр мощности колебаний акустического сигнала в режиме В — при включенном механизме, создающем импульсную осевую нагрузку. На частоте генерации импульсной нагрузки $f = 165$ Гц мощность сигнала возрастает примерно в 5 раз.

На рис. 5, а показан спектр мощности колебаний акустического сигнала с тремя режимами колебаний, на рис. 5, б — его временная реализация, на рис. 5, в — сопоставленная временной реализации индикаторная функция — оконная функция числа состояний $N_{\text{сост}}$.

Кривая 1 (см. рис. 5, в) соответствует индикаторной функции, построенной на правой границе ВО, движущегося вдоль временной оси и содержащего 15 000 последовательных состояний. В этом случае множество точек временной реализации сигнала (см. рис. 5, б) на фазовой плоскости покрывалось сеткой с числом узлов 40×40 .

Кривая 1 (см. рис. 5, в) содержит ряд участков. Начальный участок роста индикаторной функции находится в пределах $0 < t < 1,05$ с. Рост индикаторной функции на начальном интервале связан с процессом обучения системы: на правой границе ВО, движущегося по оси времени, расположены состояния системы, которые для ВО являются новыми, что каждый раз увеличивает значение индикаторной функции на единицу. К моменту времени $t = 1,05$ с все возможные состояния режима А оказываются в окне и рост индикаторной функции практически прекращается, образуется горизонтальная полка на временной зависимости индикаторной функции в интервале $1,05 \text{ с} < t < 2,73$ с.

Таким образом, на временной оси в пределах $0 < t < 1,05$ с индикаторная функция растет вследствие появления новых состояний режима А, так происходит обучение системы распознаванию этого режима. В интервале $1,05 \text{ с} < t < 2,73$ с

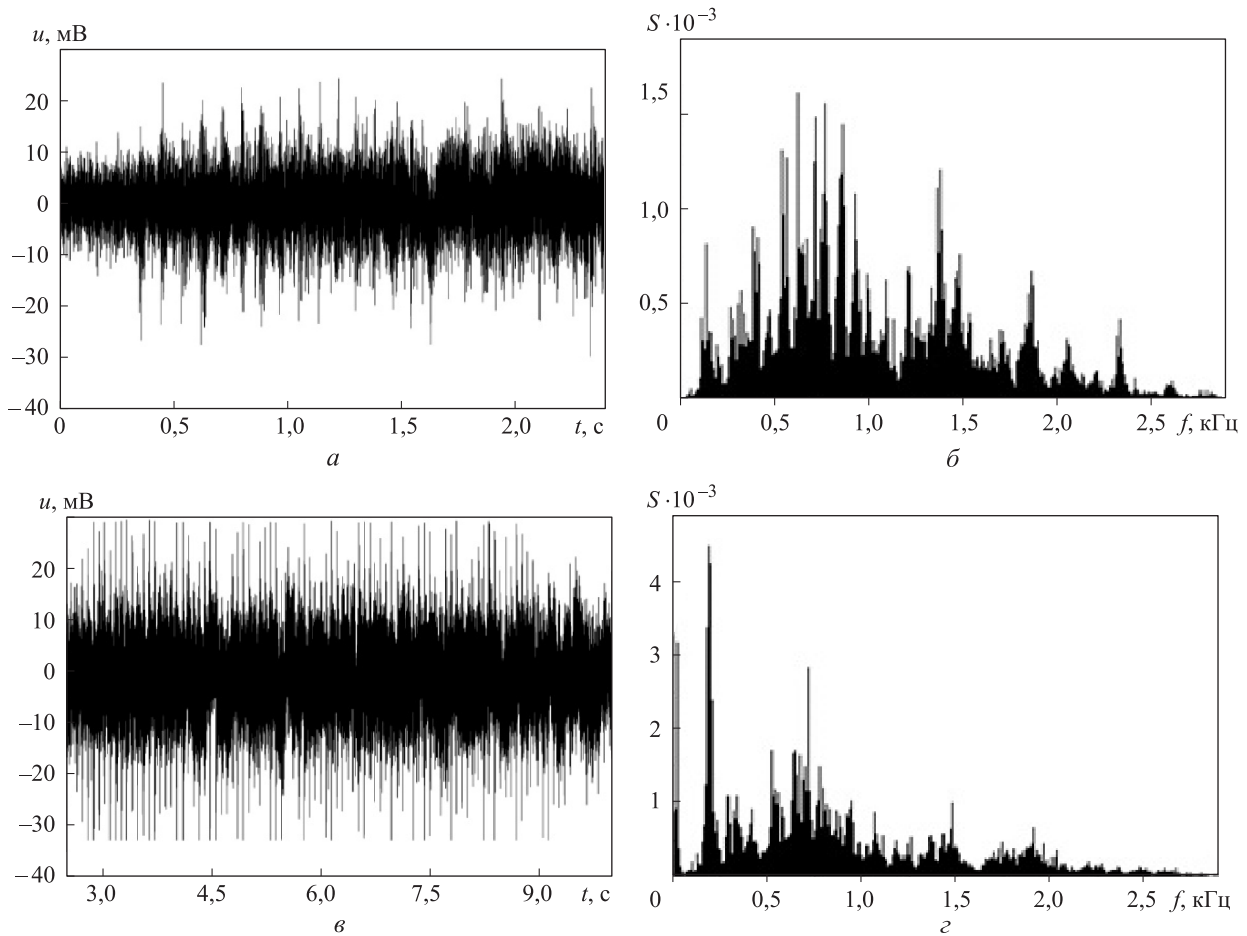


Рис. 4. Временная реализация (а, в) и спектр мощности колебаний (б, г) акустического сигнала в режиме А (а, б) и В (в, г)

увеличение индикаторной функции прекращается, что свидетельствует о неизменности динамического режима и окончании процесса обучения, так как состояния системы на правой границе ВО уже содержатся в нем.

При $t > 2,73$ с динамика системы меняется вследствие включения импульсной осевой нагрузки. Индикаторная функция реагирует возрастанием в ответ на появление новых состояний относительно находящихся в окне. В диапазоне $2,73 \text{ с} < t < 4,51$ с индикаторная функция интенсивно увеличивается, что указывает на появление новых состояний, свойственных режиму В относительно состояний ВО.

К моменту времени $t \approx 4,51$ с скорость роста индикаторной функции замедляется: в режиме В все состояния системы в основном уже попали в окно, процесс обучения системы распознаванию режима В практически завершился. Поскольку индикаторная функция не меняется, можно сделать вывод, что новых состояний в системе при $t > 4,51$ с не возникает.

В то же время вслед за режимом В следует режим С, возникающий вследствие выключения двигателя, вращающего вал и создающего импульсную нагрузку. При построении индикаторной функции путем сопоставления состояний системы — текущего и расположенного слева ВО — режим С не распознается и индикаторная функция не реагирует на состояния режима С (см. рис. 5, в, кривая 1).

Для коррекции этого недостатка изменим способ построения индикаторной функции. Пусть новизна текущего состояния определяется по отношению к состояниям окна, расположенного как слева, так и справа от анализируемого состояния. При этом увеличиваем индикаторную функцию на единицу независимо от того, является анализируемое состояние новым относительно левого или правого ВО.

На рис. 5, в кривая 2 соответствует описанному алгоритму построения индикаторной функции для временной реализации сигнала, показанного на рис. 5, б. В этом случае при

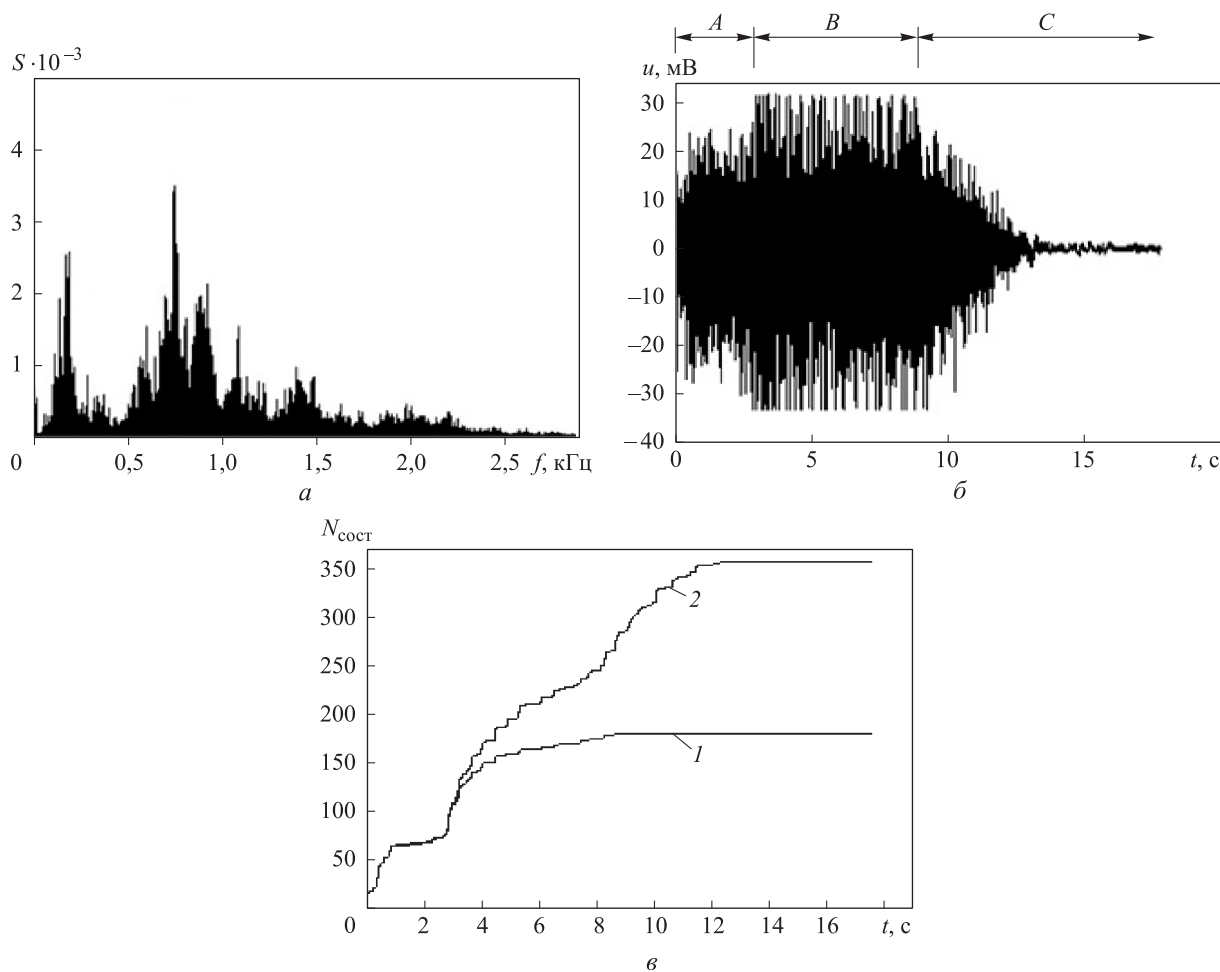


Рис. 5. Спектр мощности колебаний акустического сигнала с тремя режимами колебаний (а), его временная реализация (б) и оконная функция числа состояний (в): 1 и 2 — анализируемое состояние на правой границе ВО и в центре ВО

$t > 5,54$ с скорость роста индикаторной функции замедляется, что можно трактовать как окончание процесса обучения системы режиму В. При $t > 9,1$ с двигатель отключается, но индикаторная функция фиксирует появление новых состояний и начинает возрастать (см. рис. 5, в, кривая 2). Ее стабилизация начинается с момента времени $t \approx 12,44$ с, когда амплитуда акустического сигнала приближается к нулю. Так, на рис. 5, в на кривой 2 расположены три участка с интенсивным ростом индикаторной функции, что соответствует последовательной смене режимов А, В, С на временной реализации акустического сигнала (см. рис. 5, б).

Таким образом, индикаторная функция числа состояний динамического процесса позволяет определить количество возникающих динамических режимов, время начала процесса перехода системы из одного режима в другой и его длительность.

Выводы

1. Анализ полученных данных показал, что метод диагностики и идентификации, основанный на анализе состояний сигнала в дискретном фазовом пространстве, можно использовать наряду с классическими методами для обработки результатов стендовых испытаний газотурбинных установок перспективных ракетных и авиационных двигателей.

2. В частности, рассмотренный метод может быть применен при разработке обрабатывающего алгоритма для системы измерения осевой аэродинамической нагрузки, действующей на опорный подшипник вала турбины.

3. Преимуществами предложенного метода являются простота алгоритмизации и обучения построенной на его основе системы диагностики динамических режимов, а также наглядность интерпретации результатов.

Литература

- [1] Ахтямов А.М., Сафина Г.Ф. Определение виброзащитного закрепления трубопровода. *Прикладная механика и техническая физика*, 2008, т. 49, № 1(287), с. 139–147.
- [2] Ахтямов А.М., Ямилова Л.С., Муфтахов А.В. Идентификация вида и параметров закрепления стержня по собственным частотам его колебаний. *Акустический журнал*, 2008, т. 54, № 2, с. 181–188.
- [3] Ахтямов А.М., Аюпова А.Р. О решении задачи диагностирования дефектов в виде малой полости в стержне. *Журнал Средневолжского математического общества*, 2010, т. 12, № 3, с. 37–42.
- [4] Казаков О.Н., Сайфутдинов М.И., Стрижков С.А., Шемякин В.В. Эффективность применения метода акустической эмиссии при диагностике магистральных нефтепроводов. *Безопасность труда в промышленности*, 2000, № 4, с. 25–28.
- [5] Дудаков С.В. Об акустической диагностике железобетонных изделий. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 2007, № 2, с. 90–93.
- [6] Буйло С.И. Диагностика предразрушающего состояния по амплитудным и временным инвариантам потока актов акустической эмиссии. *Дефектоскопия*, 2004, № 8, с. 79–83.
- [7] Тукмаков А.Л., Аксенов И.Б. Идентификация объектов на основе анализа функции числа состояний акустического отклика. *Журнал технической физики*, 2003, т. 73, вып. 10, с. 130–133.
- [8] Тукмаков А.Л. О диагностике регулярных и хаотических режимов движения динамической системы при помощи функции числа состояний. *Письма в Журнал технической физики*, 2002, т. 28, № 6, с. 18–22.
- [9] Бигус Г.А., Травкин А.А., Даниев Ю.Ф. Вейвлет-анализ сигналов акустической эмиссии при диагностике конструкций. *Сварка и диагностика*, 2012, № 4, с. 34–38.
- [10] Соловьев А.Н., Соболев Б.В., Васильев П.В. Ультразвуковая локация внутренних трещиноподобных дефектов в составном упругом цилиндре с применением аппарата искусственных нейронных сетей. *Дефектоскопия*, 2016, № 3, с. 3–9.
- [11] Краснощеков А.А. Идентификация дефектов в упругих элементах конструкций на основе искусственных нейронных сетей. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*, 2011, № 4, с. 1549–1551.
- [12] Захаров С.И. Повышение достоверности значений износа деталей машин при акустической диагностике. *Вестник машиностроения*, 2008, № 11, с. 89–91.
- [13] Tsallis C. Computational applications of nonextensive statistical mechanics. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2009, vol. 227, no. 1, pp. 51–58.
- [14] Шустер Г. *Детерминированный хаос*. Москва, Мир, 1988. 240 с.
- [15] Берже П., Помо И., Видаль К. *Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности*. Москва, Мир, 1991. 368 с.
- [16] Jardine A.K.S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, vol. 20, is. 7, pp. 1483–1510.
- [17] Xu G.Y., Zhu W.D., Emory B.H. Experimental and Numerical Investigation of Structural Damage Detection Using Changes in Natural Frequencies. *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, 2007, vol. 129(6), pp. 686–700, doi:10.1115/1.2731409.
- [18] Ruqiang Yan, Robert X. Gao, Xuefeng Chen. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications. *Signal Processing*, 2014, vol. 96, Part A, pp. 1–15.

References

- [1] Akhtyamov A.M., Safina G.F. Vibration-proof conduit fastening. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2008, vol. 49, no. 1, pp. 114–121.
- [2] Akhtyamov A.M., Yamilova L.S., Muftakhov A.V. Identification of the type and parameters of fastening from the natural frequencies of a fastened rod. *Acoustical Physics*, 2008, vol. 54, no. 2, pp. 146–152.

- [3] Ahtyamov A.M., Ayupova A.R. O reshenii zadachi diagnostirovaniya defektov v vide maloy polosti v sterzhne [On solving the problem of diagnosing defects in a small cavity in the rod]. *Zhurnal Srednevolzhskogo matematicheskogo obshchestva* [Mid-Volga Mathematical Society]. 2010, vol. 12, no. 3, pp. 37–42.
- [4] Kazakov O.N., Sayfutdinov M.I., Strizhkov S.A., Shemyakin V.V. Effektivnost' primeneniya metoda akusticheskoy emissii pri diagnostike magistral'nyh nefteprovodov [Efficiency of application of the acoustic emission method in the diagnosis of oil trunk pipelines]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational safety in industry]. 2000, no. 4, pp. 25–28.
- [5] Dudakov S.V. Ob akusticheskoy diagnostike zhelezobetonnyh izdeliy [About acoustic diagnostics of reinforced concrete products]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2007, no. 2–2, pp. 90–93.
- [6] Buylo S.I. Diagnostika predrazrushayushchego sostoyaniya po amplitudnym i vremennym invariantam potoka aktov akusticheskoy emissii [Diagnostics of the pre-destructive state by amplitude and time invariants of the flow of acoustic emission acts]. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing]. 2004, no. 8, pp. 79–83.
- [7] Tukmakov A.L., Aksenov I.B. Identifikatsiya ob"ektov na osnove analiza funktsii chisla sostoyaniy akusticheskogo otklika [Identification of objects based on the analysis of the function of the number of states of acoustic response]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics]. 2003, vol. 73, is. 10, pp. 130–133.
- [8] Tukmakov A.L. O diagnostike regulyarnykh i haoticheskikh rezhimov dvizheniya dinamicheskoy sistemy pri pomoshchi funktsii chisla sostoyaniy [On diagnose regular and chaotic regimes of motion for a function of the number of states of a dynamic system]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Applied Physics Letters]. 2002, vol. 28, no. 6, pp. 18–22.
- [9] Bigus G.A., Travkin A.A., Daniev Yu.F. Veyvlet-analiz signalov akusticheskoy emissii pri diagnostike konstruktsiy [Wavelet analysis of acoustic emission signals in the diagnosis of structures]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2012, no. 4, pp. 34–38.
- [10] Solov'ev A.N., Sobol' B.V., Vasil'ev P.V. Ultrasonic location of inner crack defects in a compound elastic cylinder using an artificial neural-network apparatus. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 119–124.
- [11] Krasnoshchekov A.A. Identifikatsiya defektov v uprugih elementah konstruktsiy na osnove iskusstvennykh neyronnykh setey [Identification of defects in elastic structures based on artificial neural networks]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod]. 2011, no. 4, pp. 1549–1551.
- [12] Zaharov S.I. Povyshenie dostovernosti znacheniy iznosa detaley mashin pri akusticheskoy diagnostike [Raising the authenticity level of the machinery wear at acoustic diagnostics]. *Vestnik mashinostroeniya* [Russian Engineering research]. 2008, no. 11, pp. 89–91.
- [13] Tsallis C. Computational applications of nonextensive statistical mechanics. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2009, vol. 227, no. 1, pp. 51–58.
- [14] Shuster G. *Determinirovannyi haos* [Deterministic chaos]. Moscow, Mir publ., 1988. 240 p.
- [15] Berzhe P., Pomo I., Vidal' K. *Poryadok v haose. O deterministskom podhode k turbulentnosti* [Order in chaos. On the deterministic approach to turbulence]. Moscow, Mir publ., 1991. 368 p.
- [16] Jardine A.K.S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, vol. 20, is. 7, pp. 1483–1510.
- [17] Xu G.Y., Zhu W.D., Emory B.H. Experimental and Numerical Investigation of Structural Damage Detection Using Changes in Natural Frequencies. *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, 2007, vol. 129(6), pp. 686–700, doi:10.1115/1.2731409.
- [18] Ruqiang Yan, Robert X. Gao, Xuefeng Chen. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications. *Signal Processing*, 2014, vol. 96, Part A, pp. 1–15.

Информация об авторах

ТУКМАКОВ Алексей Львович (Казань) — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник. КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева (420111, Казань, Российская Федерация, К. Маркса ул., д. 10, e-mail: tukmakov@imm.knc.ru).

ТУКМАКОВА Надежда Алексеевна (Казань) — аспирант кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение». КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева (420111, Казань, Российская Федерация, К. Маркса ул., д. 10, e-mail: Nadejdatukmakova@yandex.ru).

Information about the authors

TUKMAKOV Aleksey Lvovich (Kazan) — Doctor of Science (Physics & Maths), Chief Research Scientist. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg.10, e-mail: tukmakov@imm.knc.ru).

TUKMAKOVA Nadezhda Alekseevna (Kazan) — Postgraduate, Department of Heat and Power Engineering. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg.10, e-mail: Nadejdatukmakova@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Тукмаков А.Л., Тукмакова Н.А. Определение моментов времени смены режимов динамической системы с помощью индикаторной функции числа состояний. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 9, с. 28–36, doi: 10.18698/0536-1044-2018-9-28-36.

Please cite this article in English as:

Tukmakov A.L., Tukmakova N.A. The Determination of Instants of the Change of Modes of a Dynamic System Using the Indicator Function of the Number of States. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 9, pp. 28–36, doi: 10.18698/0536-1044-2018-9-28-36.



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография
Ю.В. Никифорова, А.А. Казаковой, М.Б. Алехиной
**«Диффузия и адсорбция газов и паров
в инженерных задачах»**

Изложены теоретические основы мембранных и адсорбционных технологий и даны примеры расчета соответствующих процессов и аппаратов. Для специалистов в области очистки и разделения газовых смесей.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru