

## ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.И. Жужукин

cntkknio@yandex.ru

ПАО «КУЗНЕЦОВ», г. Самара, Российская Федерация

---

### Аннотация

Разработана спекл-интерферометрическая установка для исследования колебаний колес турбомашин. Оптическая схема установки и исследуемый объект размещены на массивной голографической плите. Приведены частоты и формы колебаний колеса турбины авиационного двигателя, полученные с применением этой установки. Для исследования колебаний деталей в условиях производственного помещения разработан спекл-интерферометр, не требующий наличия интерферометрического стола. С помощью этой установки проведены исследования частот и форм колебаний партии лопаток вентилятора

### Ключевые слова

*Спекл-интерферометрия, формы колебаний, виброметрия, измерение вибраций, лазерные спеклы*

Поступила в редакцию 29.08.2016  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

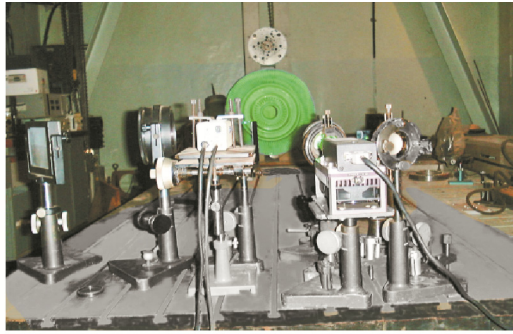
**Введение.** При разработке и доводке газотурбинных двигателей (ГТД) по прочности и надежности возникает необходимость в исследовании собственных частот и форм колебаний как всей конструкции, так и отдельных ее составляющих элементов. В настоящее время наиболее эффективными экспериментальными методами исследования резонансных колебаний реальных конструкций являются лазерно-голографические методы, в частности методы голографической [1–3] и спекл-интерферометрии [1, 4–6]. Голографические методы исследования предъявляют повышенные требования к виброизоляции оптической схемы и связаны с процессом «мокрой» обработки фоторегистрирующих материалов. В последнее десятилетие широкое распространение получил метод цифровой спекл-интерферометрии. В основе этого метода исследования колебаний лежит спекл-эффект, заключающийся в том, что при отражении когерентного света от диффузной поверхности образуется случайное распределение интенсивности, называемое спекл-полем. При этом малые изменения положения поверхности диффузного объекта приводят к изменению спекл-поля в плоскости наблюдения. Эти изменения в распределении интенсивности спекл-поля регистрируются с помощью телекамеры и используются для измерения величины перемещения поверхности исследуемого объекта. Спекл-интерферометрический метод позволяет проводить автоматизированные исследования с записью экспериментальных данных на ЭВМ с их последующей обработкой. В [4–6] разработаны спекл-интерферометрические установки, которые позволяют исследовать колебания только от-

дельных деталей, таких как, например, рабочие и направляющие лопатки ГТД. Применение указанных установок для исследования колебаний деталей более крупных размеров связано с необходимостью преодоления экспериментальных трудностей, вызванных следующими ограничениями: энергетическими параметрами (чувствительностью телекамеры, мощностью лазерного излучения, потерями на оптических элементах схемы, коэффициентом отражения объекта); углом поля зрения камеры; спектральными характеристиками лазерного излучения (когерентностью); виброзащищенностью исследуемого объекта и оптической схемы интерферометра.

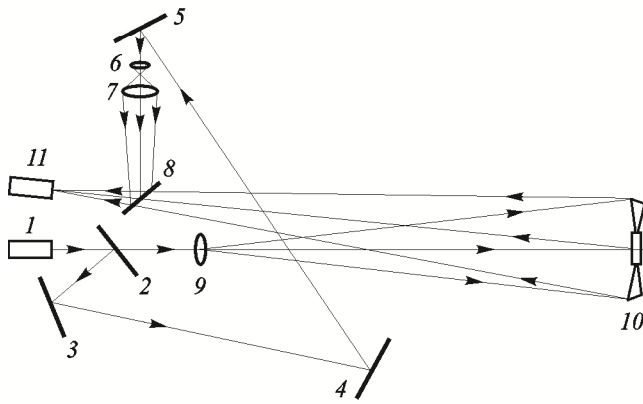
Вместе с тем на практике остро стоит проблема обеспечения вибрационной прочности таких крупногабаритных конструкций, как рабочие колеса турбомашин. Применения только расчетных методов в этом случае недостаточно, так как результаты численных расчетов зависят от используемой математической модели. Поэтому возникают трудности при трактовке полученных методом тензометрирования экспериментальных результатов. Как показано в работе [3], в большинстве случаев математическая модель не позволяет определить, по какой форме колебаний системы диск-лопатки возникают максимальные напряжения и появляется необходимость использовать оптические методы, в том числе корреляционную спекл-интерферометрию, которая дает полную информацию о формах колебаний системы диск-лопатки.

**Экспериментальная часть.** В настоящей работе для исследования колебаний рабочих колес турбомашин на базе непрерывного лазера разработана спекл-интерферометрическая установка, в основе которой лежит оптическая схема с разделенными пучками и гладкой опорной волной (рис. 1).

В качестве источника излучения служит непрерывный твердотельный лазер с диодной накачкой SLM-417-50 мощностью 50 мВт, длиной волны 0,532 мкм и длиной когерентности более 50 м, поставляемый фирмой Laser-export. Излучение лазера 1 светоделителем 2 расщепляется на два пучка: один (предметный), проходя через линзу 9, расширяется и освещает исследуемый объект 10; другой (опорный) с помощью глухих зеркал 3, 4, 5 и плоскопараллельной пластины 8 направляется в объектив телекамеры 11. Линзы 6 и 7, установленные между зеркалом 5 и плоскопараллельной пластиной 8, фокусируют световой поток опорного пучка в плоскость апертурной диафрагмы объектива телекамеры 11. Для регистрации спекл-изображений объекта используется телевизионная камера WAT-902H, обеспечивающая регистрацию с разрешением  $752 \times 582$  пиксель. Формирование приходящего на светочувствительную площадку телекамеры спекл-изображения объекта осуществляется объективом TAMRON с переменным фокусным расстоянием  $f = 28 \dots 80$  мм. Диафрагма объектива устанавливается такой, чтобы средний размер спекла (определяемый как  $1,22\lambda(NA)$ , где  $\lambda = 0,532$  мкм — длина волны лазерного излучения;  $(NA)$  — числовая апертура объектива) в плоскости изображения был близок к размерам ячейки приемной матрицы телекамеры ( $8,6 \times 8,3$  мкм).



*а*

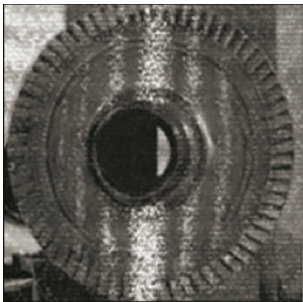


*б*

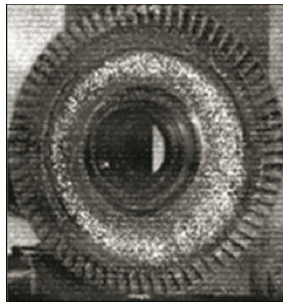
**Рис. 1.** Спекл-интерферометр с разделенными пучками и гладкой опорной волной для исследования колебаний колес турбомашин:

*а* — внешний вид; *б* — оптическая схема; 1 — непрерывный лазер; 2 — светоделитель; 3, 4, 5 — поворотные зеркала; 6, 7 — линзы; 8 — плоскопараллельная пластина; 9 — расширительная линза; 10 — исследуемый объект; 11 — телекамера

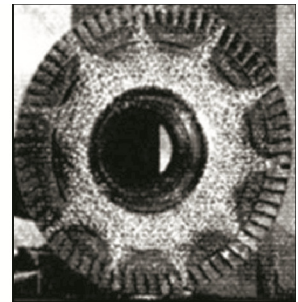
С помощью этой установки исследовались собственные частоты и формы колебаний колеса первой ступени турбины (рис. 2).



*а*



*б*



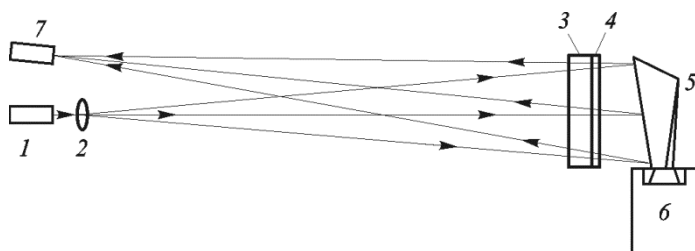
*в*

**Рис. 2.** Формы колебаний колеса турбины на различных частотах:

*а-в* — 326, 1279 и 1777 Гц соответственно

С колеса были демонтированы дефлектор и экран. Рабочие лопатки в колесе расклинивались с помощью технологических клиньев. Расклиненное колесо крепилось болтами к специально изготовленной установочной плите, которая четырьмя болтами притягивалась к силовой раме, расположенной на плите голографического интерферометра. Возбуждение колебаний колеса осуществлялось в осевом направлении электродинамическим вибратором ВЭДС-10А отечественного производства. Возбуждающая сила от подвижной платформы возбuditеля передавалась колесу с помощью переходника, который был жестко связан с подвижной платформой. Точка контакта переходника с колесом располагалась в плоскости полотна диска колеса.

Однако использование интерферометра с большими оптическими путями предъявляет высокие требования к виброзащищенности оптической схемы, так как в этом случае незначительные колебания отражающих зеркал интерферометра приводят к значительным смещениям опорного и предметного пучков. В связи с этим оптическая схема установки размещена на голографической плите площадью  $3 \times 6 \text{ м}^2$  и массой 14 т. Плита установлена на каучуковых подушках, что обеспечивает необходимую механическую стабильность эксперимента. Это ограничивает возможности применения такой установки только условиями специализированной лаборатории. Во многих случаях для сокращения сроков исследования вибрационных характеристик высоконагруженных крупногабаритных деталей ГТД необходимо обеспечить работоспособность спекл-интерферометрической установки в условиях обычного производственного помещения. Для этого на ПАО «КУЗНЕЦОВ» на основе оптической схемы с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной разработана спекл-интерферометрическая установка повышенной помехоустойчивости, которая позволяет проводить исследования колебаний крупногабаритных деталей без использования интерферометрического стола (рис. 3).



**Рис. 3.** Оптическая схема спекл-интерферометра с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной для исследования колебаний крупногабаритных деталей турбомашин:

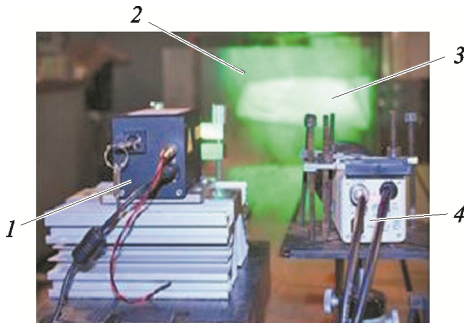
1 — непрерывный лазер; 2 — расширительная линза; 3 — держатель диффузора; 4 — диффузор; 5 — исследуемый объект; 6 — устройство для зажима и возбуждения лопатки; 7 — телекамера

С помощью источника когерентного излучения 1 через расширитель 2 и диффузор 4 (со слабой диффузностью) освещен вибрирующий объект 5. Небольшая часть излучения расходуется на образование спеклов внутри самого диффузора,

основная часть излучения — на освещение вибрирующего объекта 5. В результате на светочувствительную матрицу телекамеры 7 попадают спекл-структура от диффузора 4 и спекл-структура от поверхности объекта 5, где происходит когерентное сложение этих двух спекл-полей. Телекамера 7 при этом должна быть расположена как можно ближе к оптической оси.

Спекл-интерферограммы регистрировались методом вычитания изображений с использованием алгоритма статистического накопления разности фаз между предметным и опорным пучками в условиях отсутствия виброизоляции оптической схемы [6]. В этой работе такой метод использован для стандартной оптической схемы с гладким опорным пучком, но он хорошо подходит и для данной оптической схемы. В этом случае случайный сдвиг фаз между предметным и опорным пучками обеспечивается случайными колебаниями диффузора вдоль оптической оси.

Спекл-интерферометр с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной позволяет проводить исследования колебаний крупногабаритных деталей без использования интерферометрического стола и содержит малое число оптических элементов. В настоящей работе эта установка была использована для исследования форм колебаний партии вентиляторных лопаток одного из авиационных двигателей (рис. 4).



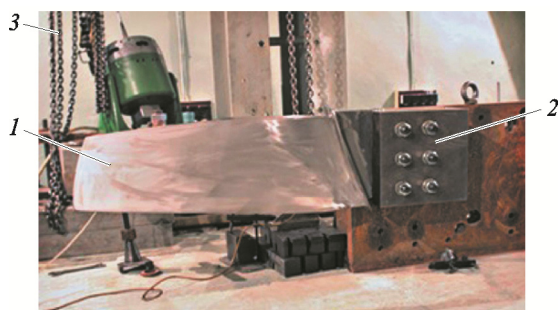
**Рис. 4.** Внешний вид спекл-интерферометрической установки с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной для исследования колебаний лопатки вентилятора:

1 — лазер; 2 — диффузор; 3 — лопатка вентилятора; 4 — телекамера

Лазер и телекамера использовались с аналогичными техническими характеристиками, как и в спекл-интерферометрической установке с разделенными пучками и гладкой опорной волной. Лопатки крепились, как показано на рис. 5. Длина пера каждой лопатки превышала 70 см. Возбуждение колебаний лопатки осуществлялось с помощью пьезоэлемента (на рис. 5 не виден, так как находится с обратной стороны лопатки) через заделку.

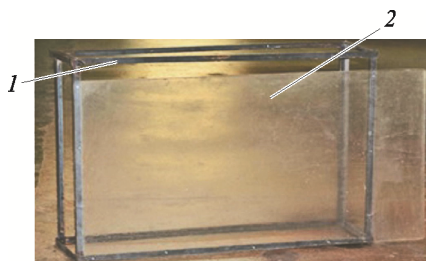
Наличие подъемного механизма в используемом производственном помещении существенно облегчало и ускоряло процесс замены лопаток. Диффузор, с помощью которого формировалась опорная волна, крепился к держателю с помощью винтов. Эта конструкция (рис. 6) устанавливалась перед исследуемым объектом.

В этом случае важным является условие достаточной жесткости каркаса держателя диффузора в направлениях, перпендикулярных оптической оси устройства,



**Рис. 5.** Закрепление крупногабаритной лопатки вентилятора ГТД:

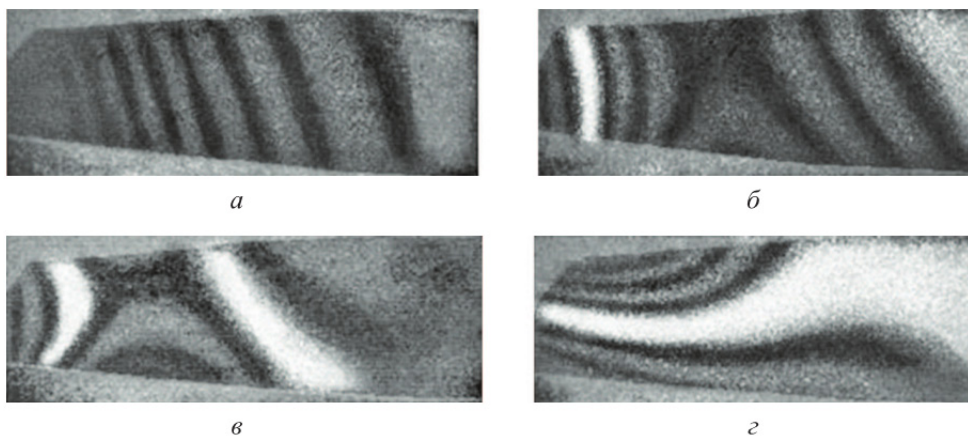
1 — лопатка вентилятора; 2 — зажим; 3 — цепи подъемного механизма



**Рис. 6.** Диффузор для исследования крупногабаритных деталей ГТД:

1 — держатель диффузора; 2 — диффузное стекло

чтобы диффузор мог колебаться случайным образом только вдоль оптической оси. Результирующая спекл-интерферограмма описывается, как и в случае использования метода вычитания изображений с регулируемым сдвигом фаз [1, 4], функцией Бесселя первого рода нулевого порядка. На рис. 7 приведены результаты исследований вибрационных характеристик одной из лопаток вентилятора, полученные с помощью этой установки.



**Рис. 7.** Формы колебаний лопатки вентилятора на различных частотах:

а-г — 53, 109, 298 и 342 Гц соответственно

**Заключение.** Методы цифровой спекл-интерферометрии в настоящее время относятся к наиболее эффективным при решении задач поузловой доводки двигателя, так как имеют большую информативность и наглядность получаемых результатов. Однако при применении спекл-интерферометров с разделенными пучками и гладкой опорной волной для исследования колебаний крупногабаритных конструкций ГТД возникают дополнительные экспериментальные трудности, связанные с необходимостью использования оптических схем с большими опти-

ческими путями. Эти проблемы решены в результате применения массивной крупногабаритной голографической плиты, виброизолированной от здания каучуковыми подушками. Кроме того, юстировка таких интерферометров достаточно сложна. Все это ограничивает возможности использования таких установок для исследования колебаний крупногабаритных деталей и узлов ГТД.

Ввиду того, что спекл-интерферометры с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной имеют повышенную помехоустойчивость, содержат малое число оптических элементов, они позволяют проводить исследования без использования интерферометрического стола и могут применяться во внестендовых условиях. При этом они имеют значительно меньшую стоимость и не требуют тщательной юстировки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир, 1986. 328 с.
2. Макаева Р.Х., Каримов А.Х., Царева А.М., Фатыхова Э.М. Исследование резонансных частот и форм колебаний лопаток компрессора ГТД с применением голографической интерферометрии // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2011. № 8. С. 57–60. URL: <http://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/АКТТ/2011/АКТТ811/Макаева.pdf>
3. Коскин А.О., Селезнев В.Г. Исследование форм и частот колебаний бандажированного колеса вентилятора на голографической установке и в составе двигателя на испытательном стенде // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2014. № 5–2. С. 109–114. URL: <http://journals.ssau.ru/index.php/vestnik/article/view/2517>
4. Еленевский Д.С., Шапошников Ю.Н. Лазерно-компьютерная система анализа спекл-интерферограмм вибрирующих объектов // *Известия Самарского научного центра РАН*. 1999. № 1. С. 134–136.
5. Ткач М.Р., Золотой Ю.Г., Довгань Д.В. Определение форм собственных колебаний элементов ГТД в реальном времени методом электронной спекл-интерферометрии // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2013. № 9. С. 203–207. URL: <http://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/АКТТ/2012/АКТТ812/Tkach.pdf>
6. *Исследование резонансных колебаний рабочей пластины в экспериментальной модели пневмоклапана* / О.А. Журавлёв, С.Ю. Комаров, Г.М. Макарьянц, Р.Н. Сергеев, Ю.В. Харчинова // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2011. № 3–3. С. 363–369.

**Жужукин Анатолий Иванович** — канд. техн. наук, инженер-конструктор конструкторского научно-исследовательского отделения ПАО «КУЗНЕЦОВ» (Российская Федерация, 443009, г. Самара, Заводское шоссе, д. 29).

### Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Жужукин А.И. Применение спекл-интерферометрии для исследования колебаний крупногабаритных конструкций газотурбинных двигателей // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2017. № 3. С. 66–74. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-3-66-74

## SPECKLE-INTERFEROMETRY IN INVESTIGATION OF LARGE-SIZE GAS TURBINE ENGINE VIBRATIONS

A.I. Zhuzhukin

cntkknio@yandex.ru

PJSC Kuznetsov, Samara, Russian Federation

---

### Abstract

We developed a speckle-interferometer plant to investigate turbo-machinery wheels vibrations. We placed the plant optical arrangement and the object under investigation on a massive holographic plate. By using the plant we obtained frequencies and modes of aircraft engine wheel vibrations. To investigate the part vibrations, in working area conditions we designed another speckle-interferometer requiring no interferometer plate (table). With the help of this plant, we performed investigation of frequencies and modes of fan blades lot vibrations

---

### Keywords

*Speckle-interferometry, vibration modes, vibrometry, vibration measuring, laser speckles*

## REFERENCES

- [1] Jones R., Wykes C. Holographic and speckle interferometry. Cambridge, Cambridge University Press, 1989 (Russ. ed: Голографическая и спекл-интерферометрия. Moscow, Mir Publ., 1986. 328 p.).
- [2] Makaeva R.Kh., Karimov A.Kh., Tsareva A.M., Fatykhova E.M. Investigation of resonance frequencies and oscillation modes in GTE compressor blades with use of the holographic interferometry. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2011, no. 8, pp. 57–60 (in Russ.). Available at: <http://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/AKTT/2011/AKTT811/Makaeva.pdf>
- [3] Koskin A.O., Seleznev V.G. The study of shrouded fan vibration modes and frequencies on holograph and as a part of the engine on the test rig. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering], 2014, no. 5–2, pp. 109–114 (in Russ.). Available at: <http://journals.ssau.ru/index.php/vestnik/article/view/2517>
- [4] Elenevskiy D.S., Shaposhnikov Yu.N. Computer-aided laser systems for obtaining of vibrating objects speckle-interferograms and their analysis. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the RAS], 1999, no. 1, pp. 134–136 (in Russ.).
- [5] Tkach M.R., Zolotoy Yu.G., Dovgan' D.V. Definition the dynamic parameters of GTE elements in real-time by electronic speckle interferometry. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2013, no. 9, pp. 203–207 (in Russ.). Available at: <http://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/AKTT/2012/AKTT812/Tkach.pdf>
- [6] Zhuravlev O.A., Komarov S.Yu., Makar'yants G.M., Sergeev R.N., Kharchikova Yu.V. Research on operating plate resonance oscillation in experimental model of pneumatic valve. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering], 2011, no. 3–3, pp. 363–369 (in Russ.).

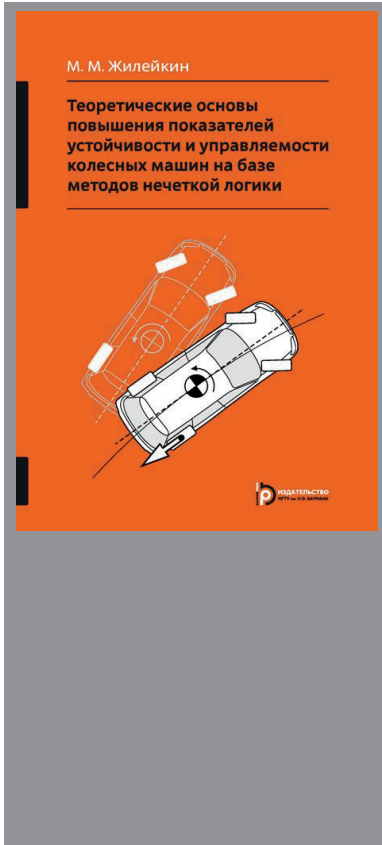


**Zhuzhukin A.I.** — Cand. Sc. (Eng.), engineer-designer of the Research and Development Department PJSC Kuznetsov (Zavodskoye shosse 29, Samara, 443009 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Zhuzhukin A.I. Speckle-Interferometry in Investigation of Large-Size Gas Turbine Engine Vibrations. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 3, pp. 66–74.

DOI: 10.18698/0236-3941-2017-3-66-74



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие автора

**М.М. Жилейкина**

**«Теоретические основы повышения  
показателей устойчивости и управляемости  
колесных машин на базе методов нечеткой  
логики»**

Управляемость и устойчивость автомобиля являются важнейшими эксплуатационными свойствами и составляющими активной безопасности движения, оценке которых придается большое значение. Представлены результаты теоретических исследований, выполненных на кафедре «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Разработаны принципы повышения показателей устойчивости и управляемости как двухосных, так и многоосных колесных машин, оснащенных различными типами трансмиссий. Обоснованы принципиальные решения по способам управления движением машин, обеспечивающих повышение их курсовой и траекторной устойчивости. Предложены критерии оценки эффективности работы комплексной системы динамической стабилизации движения колесных машин. Разработаны алгоритмы работы системы динамической стабилизации с применением методов нечеткой логики для двухосных и многоосных колесных машин.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
+7 (499) 263-60-45  
press@bmstu.ru  
www.baumanpress.ru