DOI: 10.15593/2224-9982/2021.64.04

УДК 621.51

В.В. Савченко, В.Л. Блинов, С.Ю. Шаманин

Уральский федеральный университет им. первого Президента России

Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Как показала практика, создание компрессорных установок невозможно без большого объема экспериментальных работ. На решение этой проблемы затрачиваются большие средства, а к проведению испытаний привлекается большое количество людей. Практически все расчетные методы, которые применяются при проектировании, экспериментально-теоретические. В связи с этим модернизация методов расчета неразрывно связана с развитием экспериментальных исследований, совершенствованием средств и методов измерения. Описан созданный миниатюрный экспериментальный стенд двухступенчатого осевого компрессора, приведена общая схема стенда, подробно описаны системы. Проведен ряд экспериментов на различных частотах вращения с различной нагрузкой, результаты проанализированы. Представлены методы получения характеристик осевых компрессоров при помощи программного комплекса для численного трехмерного термогазодинамического моделирования. В описанной компрессорной установке имеется комплекс датчиков для сбора параметров потока в различных плоскостях. Сигналы, полученные с датчика, обрабатываются при помощи восьмибитного микроконтроллера. Стенд изготовлен из пластика с использованием технологии послойного наплавления (FDM) на 3D-принтере. Предварительно были проведены расчеты на прочность роторных элементов конструкции, определены материалы, рекомендуемые для изготовления установки. Стенд предлагается использовать с целью конструирования и оптимизации конечных двухступенчатых компрессорных установок, а также в процессе обучения. Описана также построенная численная модель для исследования параметров потока компрессорной установки, приводятся результаты сравнения некоторых экспериментальных и расчетных данных, построена расходонапорная характеристика, произведена оценка неопределенности измерений, сформулирован ряд рекомендаций.

Ключевые слова: осевой компрессор, экспериментальный стенд, коэффициент напора, коэффициент расхода, трехмерное численное моделирование, характеристика компрессора, трехмерная печать, аддитивные технологии, прочностной анализ, система автоматизированного анализа.

V.V. Savchenko, V.L. Blinov, S.Yu. Shamanin

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,

Yekaterinburg, Russian Federation

DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL AXIAL STAND COMPRESSORS USING ADDITIVE TECHNOLOGIES

In practice, the creation of compressor units is impossible without a large amount of experimental work. A lot of money is being invested in solving this problem, and many people participate in testing. Almost all calculation methods that are used in design are experimental and theoretical. In this regard, the modernization of calculation methods is inextricably linked with the development of experimental research, improvement of means and methods of measurements. In this paper, the created miniature experimental stand of a two-stage axial compressor is described, the general scheme of the stand is shown, the systems are described in detail. Several experiments were carried out at different speeds of rotation with different loads, the results were analyzed. Methods for obtaining characteristics of axial compressors using a software package for numerical three-dimensional thermodynamics modeling are presented. The described compressor unit has a set of sensors for collecting flow parameters in different planes. The signals from the sensors are processed by an eight-bit microcontroller. The stand is made of plastic using fused deposition modeling (FDM) on a 3D printer. Preliminary calculations of the strength of the rotor structure elements were carried out, the materials recommended for the manufacture of the installation were determined. The stand is proposed to be used for the design and optimization of two-stage compressor, as well as in the educational process. Also, in this article describes a constructed numerical model for studying the flow parameters of a compressor, presents the results of comparing some experimental and calculated data, constructs a flow characteristic, estimates the measurement uncertainty, and formulates several recommendations.

Keywords: axial compressor, experimental bench, pressure coefficient, flow rate, three-dimensional numerical simulation, compressor characteristics, 3D printing, additive manufacturing, strength analysis, automated analysis system.

Введение

Осевые компрессоры (ОК) нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, а также в качестве собственного компрессора газотурбинных установок и двигателей. Движение потока в осевом компрессоре является сложным нестационарным пространственным течением, что определяет сложность проектирования его лопаточного аппарата. На сегодняшний день единственным достоверным способом получения характеристик осевых компрессоров является проведение натурных испытаний. При этом проблема испытаний компрессоров практически не решена и требуется развитие стендово-экспериментальной базы для проведения исследования как узлов, так и изделий в целом [1].

Основной целью данного проекта являлось создание стенда со сменной проточной частью осевого компрессора для сравнения экспериментальных данных с расчетными. Стенд был распечатан с использованием технологии послойного наплавления пластика (FDM – Fused Deposition Modeling) на 3D-принтере. Эта технология формирования объекта осуществляется путем послойной укладки расплавленной нити из плавкого рабочего материала (пластик, композитные материалы, металл, воск и др.) [2].

В натурной компрессорной установке был интегрирован комплекс датчиков для сбора параметров потока в различных плоскостях и на различных режимах. Сигналы, полученные с датчика, обрабатывались при помощи восьмибитного микроконтроллера. Предлагаемая установка относится к стендам для испытаний осевых компрессоров и может быть использована при изучении характеристик компрессоров, а также их параметрической доводки в процессе разработки. Техническим результатом, достигаемым при использовании текущей установки, является возможность имитации различных режимов работы испытуемого компрессора в реальных условиях [3, 4]. Появляется возможность осуществлять проверку оптимизированных конструкций лопаток ОК на натурном стенде [5, 6].

Постановка проблемы

Воздух при прохождении через проточную часть компрессора участвует в сложном движении. Изменение величины скоростей этого движения, зависящих соответственно от расхода воздуха и частоты вращения, определяет углы обтекания лопаток. Изучение сложных физических явлений, возникающих в проточной части компрессора, занимает большое количество времени. Для полноценной оценки итоговой установки недостаточно использовать только инженерные расчеты, рекомендуется также проводить экспериментальные исследования. Существующие методы вычислительной газодинамики не позволяют получать точный результат, описывающий характер течения в проточной части во всем диапазоне режимов работы компрессора. Во многом это связано с принимаемыми допущениями при задании граничных условий, отличием параметров среды и т.д. [7]. Для получения точных результатов параметров компрессора, а также картин течения потока необходимо проводить верификацию получаемых данных на натурной модели.

В настоящей работе решены следующие задачи:

1. Разработан малоразмерный стенд осевого компрессора.
2. Проведены натурные эксперименты на разработанном стенде.
3. Проведены численные исследования течения в проточной части исследуемого компрессора.
4. Проанализированы результаты экспериментов и расчетов.
5. Разработаны рекомендации.

Разработка экспериментального стенда

Разработанный стенд представляет собой одновальный двухступенчатый осевой компрессор. Входной направляющий аппарат (ВНА), направляющий аппарат (НА) 1-й ступени, направляющий аппарат 2-й ступени состоят из 14 лопаток. Рабочие колеса (РК) 1-й и 2-й ступеней содержат по 5 лопаток. Ротор опирается на два высокооборотных подшипника качения

типа 6003ZZ. Двигатель установлен на специальных стойках с возможностью калибровки по высоте. Спроектированная проточная часть компрессора представлена на рис. 1 [8]. Конструкция стенда предусматривает простоту сборки и замену проточной части установки. Размер проточной части: $D_k = 37$ мм, $D_n = 75$ мм, втулочное отношение $D_k/D_n = 0,49$, удлинение лопаток l/B : РК 1-й, 2-й ступеней – 1,3, НА 1-й ступени – 1,47, НА 2-й ступени – 1,65, всерность D_{cp}/l : РК 1-й, 2-й ступеней – 3,1, НА 1-й ступени – 3,1, НА 2-й ступени – 2,9, густота B/t : РК 1-й, 2-й ступеней – 0,38, НА 1-й ступени – 0,8, НА 2-й ступени – 0,78. В целях изменения нагрузки используются фильтры с различной пропускной способностью, установленные на входе потока. Компрессорная установка рассчитана на работу при частотах вращения, не превышающих 24 000 об/мин. Развиваемая степень повышения давления соответствует 1,0027, объемный расход через ОК на номинальном режиме около 180 м³/ч. Числа Маха в проточной части при температуре на входе 20 °С находятся в диапазоне от 0,023 до 0,047. Номинальная мощность используемого в качестве привода электродвигателя составляет 86,4 Вт.

Рис. 1. Проточная часть стенда

Трехмерная печать деталей стенда осуществлялась в несколько этапов:

1. Выбор материалов для элементов на основании данных из открытых источников и результатов проведенных прочностных расчетов наиболее нагруженных элементов ОК.
2. Определение необходимых зазоров в готовой модели.
3. Настройка принтера для печати выбранным материалом.
4. Печать элементов стенда.

5. Постобработка распечатанных деталей и сборка стенда.

Параллельно с разработкой стенда проводились расчеты и моделирование сменных проточных частей. Прорабатывались конструкторские и программные решения.

Экспериментальный стенд оснащен контрольно-измерительной и регистрирующей аппаратурой, позволяющей контролировать и регистрировать все необходимые при проведении исследования параметры компрессора. В основу системы автоматики легла открытая среда разработки Arduino IDE [9, 10] с одноименным восьмибитным контроллером. С помощью данного контроллера производилось управление частотой вращения, сбор и анализ данных с датчиков. Для определения частоты вращения использовался датчик Холла. Для расчета скорости потока, расхода и степени повышения давления применен датчик давления MPXV7002. Мощность, которую реализует электродвигатель, отображает вольтамперметр, который установлен в блок питания. Оценка мощности потока натурной модели производилась с учетом потери давления на фильтре. Данное значение определялось экспериментальным путем.

Для удобства дальнейшего считывания данных в среде Visual Studio была разработана программа. При использовании данной программы указывался порт, к которому подключена плата, и выставлялась скорость общения с микроконтроллером.

Проведение натурного эксперимента

Существует множество факторов, влияющих на результаты испытаний. В связи с этим необходимо тщательно планировать и организовывать испытания для достижения наивысшей практической точности. Для этого использовались предварительно откалиброванные датчики, которые установлены таким образом, чтобы никакие дополнительные погрешности, создаваемые окружающими условиями, такими как излучение, вибрация и прочее, или утечками из трубопровода и соединительных фитингов, не увеличивали неопределенность показаний.

Натурный эксперимент проводился при нормальных условиях с барометрическим давлением 100 800 Па, температура окружающего

воздуха составляла 298 К, относительная влажность 60 %. В качестве нагрузки выступали фильтры различной толщины и пропускной способности. Схема контрольного объема для испытаний включала область с оборудованием и аппаратурой установки, подвергаемым испытаниям с учетом нормальных условий для обеспечения адекватности результатов (рис. 2). Фильтр устанавливался в посадочное устройство 1, после чего рабочее тело попадало в проточную часть испытуемой установки 2, ротор которой приводился во вращение электродвигателем 3. Выходной домен 5 был оснащен модулем замера давления в среднем сечении 4. Для оценки параметров потока по всей проточной части на выходе была установлена манометровая стойка 6.

В табл. 1 представлены результаты проведения эксперимента на различных частотах вращения с различной нагрузкой. С использованием методики [11] был проведен расчет неопределенности и получены следующие результаты: $U_p = 2,34$ Па с коэффициентом охвата $k = 2$ и уровнем значимости 95 %. Это означает, что 95 % ожидаемых значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны к измеренной величине, находятся в интервале $\pm 2,34$ Па. Во многом столь точного значения удалось достичь путем использования алгоритмов фильтрации входного сигнала микроконтроллером.

Численное исследование

В целях обеспечения надежности и безопасности эксплуатации стенда были определены прочностные характеристики [12]. От проведенного прочностного анализа во многом зависел выбор пластика для конкретных элементов. Прочностные свойства используемых типов пластика внесены в табл. 2.

Самыми нагруженными элементами являются рабочие лопатки и муфта, передающая вращение от двигателя к ротору. В настоящей работе для расчетов напряженно-деформируемого состояния деталей и узлов применялся метод конечных элементов [13].

При расчете были заданы следующие параметры: частота вращения ротора $n = 24\,000$ об/мин; периферийный диаметр $D_n = 75$ мм, высота лопатки $l_{рл} = 17$ мм; масса лопатки $m_{рл} = 1,3$ г. Геометрические модели объектов исследования преобразованы в формат IGES. Количество элементов расчетной сетки составило 292 743 для лопатки и 285 321 для муфты. Граничные условия расчетов представлены на рис. 3. Плоскость фиксации хвостовика лопатки задавалась при помощи инструмента Fixed Support, усилие растяжения (force) – 291,4, частота вращения (rotational velocity) – 2513 рад/с.

Рис. 2. Схема испытаний компрессорной установки: 1 – фильтр, 2 – проточная часть, 3 – электродвигатель, 4 – модуль замера динамического давления, 5 – выходной домен, 6 – установка замера динамического давления на выходе

Таблица 1

Результаты проведенного эксперимента

Частота вращения, об/мин	Полное давление на входе, Па	Полное давление на выходе, Па	Объемный расход, м ³ /ч	Степень повышения давления
22 300	100 826	101 440	195,0	1,0011
	100 818	101 487	185,6	1,0016
	100 715	101 550	125,0	1,0022
	100 663	101 602	83,9	1,0027
21 000	100 826	100 901	177,1	1,0007
	100 818	100 913	164,0	1,0009
	100 715	100 871	119,1	1,0016
	100 663	100 855	76,4	1,0019
20 000	100 826	100 865	166,8	1,0004
	100 818	100 866	161,8	1,0005
	100 715	100 865	86,6	1,0015
	100 663	100 825	65,4	1,0016
18 000	100 826	100 829	145,5	1,0000
	100 818	100 839	137,2	1,0002
	100 715	100 839	78,1	1,0012
	100 663	100 797	60,4	1,0013

Таблица 2

Прочность пластиков

Тип пластика	Прочность на изгиб, МПа	Прочность на разрыв, МПа
PLA	55,3	57,8
PETG	80,5	46,5
ABS	41	22
HIPS	37,6	16,4

При расчете муфты условие Fixed Support указано на плоскости соединения с ротором. Крутящий момент (moment), передающийся от вала двигателя, 343 гс·см (см. рис. 3, а).

По результатам прочностного анализа (рис. 4) установлено, что роторные элементы рекомендуется печатать пластиком PET-G (полиэтиленгликольтерефталат). Наибольшие на-

пряжения по лопатке возникают в замке и прикорневой части профиля, пиковые напряжения составляют 48,53 МПа. Максимальные напряжения на гибкой муфте составляют 26 МПа. Использование данной конструкции способствует передаче момента от вала двигателя к ротору без разрушений.

Статорные элементы являются менее нагруженными, и для их печати допускается использовать PLA (полилакрид)-пластик.

Важнейшем этапом в оценке надежности является определение коэффициента запаса прочности на самом нагруженном элементе. По данным проведенного исследования, искомый коэффициент равен 1,67. Данное значение удовлетворяет условию прочности, так как минимально допустимая величина составляет 1,3 [14].

Рис. 3. Задание граничных условий для лопатки (а) и муфты (б)

Рис. 4. Распределение напряжений (а) и деформаций (б)

Рис. 5. Результат задания граничных условий

Следующим этапом было формирование численной модели для исследования течения методами вычислительной газовой динамики. Созданная модель в дальнейшем использована для анализа рабочего процесса натурной модели компрессора, определения ошибок проектирования и поиска способов увеличения ее газодинамической эффективности. Процесс построения расчетной модели условно можно разделить на четыре этапа: построение расчетной модели, задание граничных условий,

непосредственный расчет, визуализация полученных результатов [15].

По результатам итоговой геометрии была построена конечно-элементная сетка, общее число элементов составило 2 658 440 ячеек. Модель турбулентности – $k-\epsilon$, рабочее тело – Air Ideal Gas, модель теплообмена – Total Energy. На входе задавалось полное давление, на выходе – статическое. Взаимодействие областей «ротор – статор» – Frozen Rotor. Список принятых допущений: течение газа является стационарным, рабочее тело – воздух, подчиняющийся законам идеального газа; утечки рабочего тела, перетекание через зазоры, а также шероховатость не учитывались. На рис. 5 показана модель с расставленными граничными условиями.

Анализ результатов

Далее рассмотрен режим работы с максимальной частотой вращения, достигнутой во время испытаний. Во время проведения экспе-

римента с переменной нагрузкой выставить точную частоту вращения достаточно сложно, в связи с чем она незначительно отклонялась и среднее значение составило 22 300 об/мин. Выбор данного режима основывается на удалении от расчетного, в связи с чем появляется возможность оценить образование вихревого течения и сравнить с результатами расчетной модели.

Параметры натурной установки определялись усреднением результатов по расходу путем определения средневзвешенного значения для минимизации общей ошибки.

По результатам анализа распределения динамического давления по радиусу (рис. 6, а) можем наблюдать схожую траекторию распределения значений давления. Максимальное значение достигнуто на среднем диаметре, на корневом и периферийном диаметрах заметно уменьшение динамического давления. Интенсивность снижения скорости потока к торцевым поверхностям проточной части определяется высотой ступени. В таких сечения скорость потока значительно снижается, что необходимо учитывать при построении треугольников скорости на этих диаметрах и проектировании компрессора.

Изменение коэффициента напора в зависимости от коэффициента расхода представлено на рис. 6, б. Расхождение результатов натурного эксперимента с результатами расчетной модели по коэффициенту расхода составляет 16 %. Разница в значениях коэффициента напора составляет не более 2 %.

На рис. 6, в представлен сравнительный график зависимости мощности от коэффициента расхода. Отчетливо виден момент пиковой мощности и дальнейшее ее снижение, что может свидетельствовать о приближении к режиму неустойчивой работы и образованию сильных вихревых течений. Максимальное отклонение расчетного значения от экспериментального составляет 5 %.

Делая выводы, следует учитывать, что в процессе расчета были приняты некоторые допущения, которые ожидаемо повлияли на результаты. В качестве таких допущений можно выделить: симметричность постановки задачи, течение газа являлось стационарным и одномерным, рабочим телом являлся воздух,

подчиняющийся законам идеального газа, утечки рабочего тела не учитывались.

Данные, полученные экспериментальным путем, также могут иметь некоторые отклонения от действительности, равные общей ошибке средств измерений. Дальнейшим этапом будет уточнение численной модели, увеличение числа численных элементов сетки. Из опыта численного моделирования следует, что погрешности при расчете течения также связаны с выбором модели турбулентности. Модель интерфейса численной модели учитывает осредненные по окружности параметры, что справедливо только для периодического течения. Каждый из этих источников ошибок необходимо подвергать всестороннему анализу для рассматриваемого объекта исследования.

а

б

в

Рис. 6. Параметры испытуемого компрессора:
— натурная модель; --- расчетная модель

Рекомендации

На основании результатов проведенного исследования были сформулированы следующие рекомендации:

1. На основании прочностного расчета элементов осевого компрессора для изготовления экспериментальной установки с применением аддитивных технологий выбран пластик PET-G для роторных элементов и пластик PLA для статорных.

2. Перед непосредственным экспериментом следует проводить тарировку средств измерений. Для корректной работы следует плавно повышать нагрузку, следить за показаниями вольтамперметра и не допускать силу тока выше максимально допустимой для используемого электродвигателя. На режиме пуска сила тока может в несколько раз превышать номинальное значение. Следует фиксировать данные только на установившемся режиме работы установки. Проводить испытания необходимо, соблюдая меры безопасности; следует избегать попадания в проточную часть стационарных предметов.

3. Особое внимание следует уделить созданию расчетной модели осевого компрессора. Граничные условия должны быть максимально приближены к условиям проведения натурного эксперимента. В рамках проведенного исследования установлено, что использование численной модели компрессора (число элементов расчетной сетки – 2 658 440 ячеек; модель – k - ϵ , рабочее тело – Air Ideal Gas, модель теплообмена – Total Energy; на входе задавалось полное давление, на выходе – статическое; взаимодействие областей «ротор – статор» – Frozen Rotor, с учетом описанных в работе допущений) позволяет смоделировать характеристики компрессора с точностью 2, 16 и 5 % для коэффициента напора, коэффициента расхода и мощности, потребляемой компрессором, соответственно.

4. Разработанный малоразмерный стенд может использоваться в целях верификации параметров потока спроектированной проточной части. Изобретение направлено на обучение методам проектирования и конструирования лопаточных машин, натурное исследование и моделирование условий их работы в широком диапазоне частот вращения с возможностью смены проточной части, в том числе на конструкции, полученные путем многокритериальной оптимизации. В разработанной установке при проектировании сменной проточной части допускается обоснованное уменьшение зазоров; при увеличении количества рабочих лопаток необходимо перепроектирование ротора; толщина входной, выходной кромок не должна быть ниже 0,2 мм, что обусловлено диаметром печатного сопла.

Заключение

В рамках описанной работы построен малоразмерный испытательный стенд осевого компрессора, разработана система автоматического сбора данных установки, проведен сравнительный анализ результатов эксперимента с результатами численного моделирования течения в проточной части рассматриваемого компрессора. Испытания были проведены при частоте вращения от 18 000 до 22 300 об/мин, значения объемного расхода определены в диапазоне от 60,4 до 195 м³/ч, максимальное значение степени повышения давления 1,0027.

Для проектируемого компрессора возможно проводить оптимизацию работы каждой ступени в отдельности, оценивать протекание характеристик каждой отдельной ступени на нерасчетных режимах работы, что ускоряет и проектирование компрессора, улучшает его параметры эффективности, но требует верификации.

Библиографический список

1. Разработка испытательного стенда для малоразмерных газотурбинных двигателей [Электронный ресурс] / М.С. Болховитин, Д.А. Боровиков, А.В. Ионов, С.Д. Селиверстов // Труды МАИ. – 2016. – Вып. № 91. – URL: www.mai.ru/science/trudy/ (дата обращения: 25.01.2021).
2. 3D printable conductive materials for the fabrication of electrochemical sensors: A mini review / Hamzah Hairul Hisham, Saiful Arifin Shafiee, Aya Abdalla, Patel Bhavik Anil // Electrochemistry Communications. – 2018. – No. 96. – P. 27–371.

3. Промышленная автоматика SIEMENS [Электронный ресурс]. – URL: <https://labsys.ru/upload/iblock/677/6772922932b419a6ceccc4cedcb5b1fd.pdf> (дата обращения: 25.01.2021).
4. CompactRIO Controllers. – URL: <http://www.ni.com/pdf/product-flyers/compactrio-controller.pdf> (accessed 25 January 2021).
5. Выбор параметров расчетной модели при решении задач многокритериальной оптимизации плоских компрессорных решеток / В.Л. Блинов, Ю.М. Бродов, О.В. Комаров, В.А. Седунин // Компрессорная техника и пневматика. – № 1. – 2015. – С. 36–42.
6. Саженов А.Н., Самохвалов Н.Ю., Соловьев М.Н. Экспериментальный стенд для исследования аэродинамических характеристик лопаток газовых турбин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2015. – № 41. – С. 41–58.
7. Седунин В.А., Блинов В.Л., Шепелина Я.П. Моделирование физических процессов в турбомашинах в примерах и задачах / УрФУ. – Екатеринбург, 2016. – 128 с.
8. 3D printed dual stage axial compressor. – URL: <https://imgur.com/a/ByC0AJW> (accessed 25 January 2021).
9. Блум Дж. Exploring Arduino: пер. с англ. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015. – 336 с.
10. Петин В.А., Биняковский А.А. Практическая энциклопедия Arduino. – 2-е изд. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 166 с.
11. Николаева Е.А., Николаев А.В. Алгоритм расчета неопределенности при проведении калибровки средств измерений // Вестник КузГТУ. – 2017. – № 5. – С. 162–167.
12. Путилова Е.М., Обухова М.В., Мельникова Т.Е. Анализ динамических характеристик статорной лопатки направляющего аппарата компрессора авиационного газотурбинного двигателя // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2018. – № 52. – С. 27–37.
13. Нихамкин М.Ш., Черняев А.И., Семенов С.В. Методика расчета показателей надежности роторных систем на основе статического моделирования вибраций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 47. – С. 198–213.
14. Седунин В.А., Нусс А.С., Серков С.А. Исследование прочностных характеристик лопаток осевого компрессора // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2016. – № 3. – С. 90–99. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-3-90-99
15. Параметрическое профилирование плоских компрессорных решеток при решении задач многокритериальной оптимизации / В.Л. Блинов, Ю.М. Бродов, В.А. Седунин, О.В. Комаров // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2015. – № (3–4). – С. 86–95.

References

1. M.S. Bolkhovitin, D.A. Borovikov, A.V. Ionov, S.D. Seliverstov. Razrabotka ispytatelnogo stenda dlya malorazmernykh gazoturbinnnykh dvigateley [Development of a test bench for small-sized gas turbine engines]. Trudy MAI, Issue No. 91. Available at URL: www.mai.ru/science/trudy/ (Date of access: 25.01.2021).
2. Hamzah, Hairul Hisham; Saiful, Arifin Shafiee; Aya, Abdalla; Patel, Bhavik Anil. "3D printable conductive materials for the fabrication of electrochemical sensors: A mini review". Electrochemistry Communications, 2018, pp. 27-371.
3. Industrial automation SIEMENS. Available at URL: <https://labsys.ru/upload/iblock/677/6772922932b419a6ceccc4cedcb5b1fd.pdf> (date of access: 25.01.2021).
4. CompactRIO Controllers. Available at URL: <http://www.ni.com/pdf/product-flyers/compactrio-controller.pdf> (Date of access: 25.01.2021)
5. V.L. Blinov, Yu.M. Brodov, O.V. Komarov, V.A. Sedunin. Vybore parametrov raschetnoy modeli pri reshenii zadach mnogokriterial'noy optimizatsii ploskikh kompressornykh reshetok [The choice of the parameters of the computational model when solving the problems of multicriteria optimization of flat compressor cages]. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*, No. 1, 2015, pp. 36-42.
6. Sazhenkov A.N., Samokhvalov N.Yu., Soloviev M.N. Eksperimentalnyy stend dlya issledovaniya aerodinamicheskikh kharakteristik lopatok gazovykh turbin [Experimental stand for studying the aerodynamic characteristics of gas turbine blades]. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2015, No. 41, pp. 41-58.
7. V.A. Sedunin, V.L. Blinov, Ya.P. Shepelina. [Modeling of physical processes in turbomachines in examples and tasks]. Yekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2016, P. 128.

8. 3D printed dual stage axial compressor. Available at URL: <https://imgur.com/a/ByC0AJW> (Date of access: 25.01.2021).
9. Bloom Jeremy Exploring Arduino. Translated from English. SPb.: BHV-Petersburg, 2015, P. 336.
10. Petin V.A., Binyakovskiy A.A. Prakticheskaya entsiklopediya Arduino [Practical Encyclopedia of Arduino]. 2nd ed. Moscow: DMK Press, 2020, P. 166.
11. E.A. Nikolaeva, A.V. Nikolaev. Algoritm rascheta neopredelennosti pri provedenii kalibrovki sredstv izmereniy [Algorithm for calculating the uncertainty when calibrating measuring instruments]. Bulletin of the Kuzbass State Technical University, No. 5, 2017, pp. 162-167.
12. Putilova E.M., Obukhova M.V., Melnikova T.E. Analiz dinamicheskikh kharakteristik statornoy lopatki napravlyayushchego apparata kompressora aviatsionnogo gazoturbinnogo dvigatelya [Analysis of the dynamic characteristics of the stator blade of the guide vane of the compressor of an aircraft gas turbine engine]. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2018, No. 52, pp. 27-37.
13. Nikhamkin M.Sh., Chernyaev A.I., Semenov S.V. Metodika rascheta pokazateley nadezhnosti rotnykh sistem na osnove staticheskogo modelirovaniya vibratsiy [Methodology for calculating the reliability indicators of rotor systems based on static vibration modeling]. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2016, No. 47, pp. 198-213.
14. V.A. Sedunin., A.S. Nuss, S.A. Serkov. Issledovaniye prochnostnykh kharakteristik lopatok oseвого kompressora [Investigation of strength characteristics of axial compressor blades]. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering, 2016, No. 3, pp. 90-99. DOI: 10.18698 / 0236-3941-2016-3-90-99.
15. Blinov V.L., Brodov Yu.M., Sedunin V.A., Komarov O.V. Parametricheskoye profilirovaniye ploskikh kompressornykh reshetok pri reshenii zadach mnogokriterialnoy optimizatsii [Parametric profiling of plane compressor grids when solving multicriteria optimization problems]. Power engineering: research, equipment, technology. 2015, No. 3-4, pp. 86-95.

Об авторах

Савченко Владислав Владимирович (Екатеринбург, Россия) – аспирант кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, e-mail: Vladislav.savchenko@urfu.me).

Блинов Виталий Леонидович (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, e-mail: v.l.blinov@urfu.ru).

Шаманин Сергей Юрьевич (Екатеринбург, Россия) – студент ФГАОУ ВО УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, e-mail: shamanin0090@gmail.com).

About the authors

Vladislav V. Savchenko (Yekaterinburg, Russian Federation) – PhD Student of Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira st., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation; e-mail: vladislav.savchenko@urfu.me).

Vitalii L. Blinov (Yekaterinburg, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor of Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira st., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation; e-mail: v.l.blinov@urfu.ru).

Sergei Yu. Shamanin (Yekaterinburg, Russian Federation) – Student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira st., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation; e-mail: shamanin0090@gmail.com).

Получено 26.01.2021