DOI: 10.15593/2224-9982/2017.50.05

УДК 629.7.036.3:62-752

И.А. Кривошеев, К.Е. Рожков, Н.Б. Симонов

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ПРИВОДА
В СОСТАВЕ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА**

Рассматривается текущее состояние газотурбинного привода (ГТП) в составе газоперекачивающего агрегата (ГПА), применяемого в компрессорной станции на магистральном газопроводе. Для оценки технического состояния используется оригинальный метод параметрической диагностики, предложенный авторами. Он состоит в применении комплексных показателей, компонентами которых являются относительные отклонения фактических характеристик ГТП от исходных (при нулевой наработке). Приведены табличные и графические результаты, полученные с использованием предложенной методики, оценено влияние отдельных видов дефектов на общее техническое состояние ГТП. Кратко описана методика исключения точек на тренде измеряемых параметров, которые соответствуют неустановившимся режимам. Исключение значений параметров, полученных при неустановившихся режимах, необходимо для повышения адекватности результатов оценки, используемой в предлагаемой авторами методике. Без изменения существующей технологии проведения периодических испытаний ГТД и теплотехнических испытаний газотурбинной установки (ГТУ) предложен новый алгоритм обработки данных, вычисления значений показателей, позволяющих контролировать накопление отдельных видов дефектов, прогнозировать (с использованием метода фазовых портретов) изменения состояния ГТД и ГТУ по мере увеличения наработки и с учетом этого планировать (индивидуально для каждого конкретного изделия) остановки для проведения регламентных работ, профилактики, ремонта и снятия с эксплуатации.

Ключевые слова: газотурбинный привод, газоперекачивающий агрегат, техническое состояние, диагностика, трендовый анализ, оценка состояния, комплексный показатель, характеристики газотурбинного привода, наработка, тренды.

I.A. Krivosheev, K.E. Rozhkov, N.B. Simonov

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

**APPLICATION OF THE PARAMETRIC DIAGNOSTIC METHOD USING COMPLEX
INDICATORS TO ASSESS THE STATE OF THE GAS TURBINE DRIVE
IN THE GAS PUMPING UNIT**

The current state of the gas turbine drive (GTD) is being considered as part of the gas pumping unit (GPU) used in the compressor station (CS) on the main gas pipeline. To assess the technical condition, the original parametric diagnostic method proposed by the authors is used. It consists of applying complex index, the components of which are the relative deviations of the actual characteristics of the GTD from the initial ones (with zero operating time). Table and graphical results obtained by using the proposed method are given; the influence of certain types of defects on the overall technical state of the GTP is estimated. Method of the excluding points on the trend of measured parameters that correspond to transient state is briefly described. Elimination of the values of the parameters obtained under transient regimes is necessary to increase the adequacy of the evaluation results used in the methodology proposed by the authors. Without modification of the existing technology of periodic gas turbine engine tests and heat engineering tests of gas turbine engines (GTE), a new algorithm for processing data, calculating the values of indicators allowing to control the accumulation of individual types of defects, to predict (by using the method of phase portraits) changes in the state of GTE and GPU as the operating time increases and taking this into account to plan (individually for each particular product) stops for routine maintenance, prevention, repair and decommissioning.

Keywords: gas turbine drive, gas pumping unit, technical condition, diagnostics, trend analysis, condition assessment, complex diagnostic index, gas turbine drive characteristics, operating time, trends.

Введение

Для снижения затрат на эксплуатацию газотурбинных приводов (ГТП) (рис. 1), используемых на газоперекачивающих агрегатах (ГПА) для газотранспортной отрасли, в настоящее время, как и в авиации, производится переход от эксплуатации по назначенному ресурсу к эксплуатации по фактическому техническому состоянию. На практике выработка ресурса по мере наработки у агрегатов, эксплуатируемых в разных условиях (на севере, на юге, в условиях запыленности, зимой, летом), происходит по-разному, поэтому оценка фактического технического состояния агрегатов в процессе их эксплуатации позволяет наиболее рациональным методом проводить регламентные работы, ремонт и снятие с эксплуатации, увеличить срок службы агрегатов [1–13]. Однако при этом могут увеличиваться затраты на использование контрольной аппаратуры и программных средств, оплату высококвалифицированного персонала. В их числе датчики температуры, давления, вибродатчики, датчики частоты вращения и других параметров, использование SCADA-систем сбора, обработки и хранения данных по узлам агрегата. Реализация такого подхода позволит с ростом наработки ГТП использовать базу данных логистического анализа, в которой для каждого конкретного агрегата накапливаются, хранятся и анализируются сведения о проводимых ремонтах, техническом состоянии, расположении измерительных приборов и т.д.

Рис. 1. Газотурбинный привод ГТП АЛ-31СТ, используемый в составе «ГПА-16Р Уфа» на компрессорных станциях (КС) магистральных газопроводов

Особенности предложенного метода

Общее обоснование предложенного авторами метода параметрической диагностики ГТП для ГПА опубликовано в работе [14]. Для оценки работоспособности агрегатов предложено использовать комплексный критерий Φ . Его компонентами являются относительные отклонения $\delta x_i(\text{ПЗР}_j)$ отдельных характеристик ГТП от исходных, полученных при нулевой наработке. Здесь ПЗР – параметр, задающий режим (например, приведенная к САУ (стандартным атмосферным условиям) частота вращения ротора НД $n_{\text{нпр}}$). При этом исходные характеристики нормализуются (так, чтобы они проходили через начало координат). Для нормирования используются предельные относительные отклонения $\delta x_i(\text{ПЗР}_j)_0$. Для каждого вида из возможных дефектов выявляется соответствующее значение $\delta x_i(\text{ПЗР}_j)_0$. Предлагается использовать два подобных критерия: один для общей оценки технического состояния – основной критерий Φ , и второй – предупреждающий – комплексный критерий $\Phi_{\text{упр}}$. При этом основной критерий Φ характеризует степень выработки ресурса (по результатам контроля относительного отклонения всех контролируемых характеристик от исходных), предупреждающий критерий $\Phi_{\text{упр}}$ обеспечи-

вает раннее обнаружение проявления отдельных дефектов. Достижение $\Phi_{\text{упр}} = 1$ происходит даже тогда, когда только по одному из контролируемых параметров есть предельное относительное отклонение. Однако признаком исчерпания ресурса является достижение условия $\Phi = 1$ по основному критерию. Ниже приведены предложенные математические выражения для вычисления текущих значений этих критериев:

$$\Phi_{\text{упр}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\delta x_i(\text{ПЗР}_j) - \delta x_i(\text{ПЗР}_j)_{\text{КС}}}{\delta x_i(\text{ПЗР}_j)_0 - \delta x_i(\text{ПЗР}_j)_{\text{КС}}} \right]^2},$$

$$\Phi = \sqrt{\frac{\left\{ \sum_{i=1}^n \left[\delta x_i(\text{ПЗР}_j) - \delta x_i(\text{ПЗР}_j)_{\text{КС}} \right]^2 \left[\delta x_i(\text{ПЗР}_j)_0 - \delta x_i(\text{ПЗР}_j)_{\text{КС}} \right]^2 \right\}}{\sum_{i=1}^n \left[\delta x_i(\text{ПЗР}_j)_0 - \delta x_i(\text{ПЗР}_j)_{\text{КС}} \right]^4}}.$$

Здесь учитывается, что исходные характеристики $x_i(\text{ПЗР}_j)$ получаются на заводе при приемо-сдаточных испытаниях (ПСИ) и наработка при этом $\tau = 0$, но при установке ГТП в составе ГПА на компрессорной станции (КС) при той же наработке $\tau = 0$ сразу же возникает начальное относительное отклонение $\delta x_i(\text{ПЗР}_j)_{\text{КС}}$ из-за того, что ПСИ проводится с технологическим соплом и стендовым воздухозаборником, а на КС в ГПА вместо сопла устанавливается силовая турбина (СТ) и выхлопная система ГПА. Влияет также входной тракт ГПА (КВОУ – комплексное воздухоочистительное устройство и т.д.).

Для каждого из возможных дефектов номенклатура характеристик, в отклонении которых этот дефект проявляется, является индивидуальной. Соответственно, для каждого из возможных дефектов различными являются и номенклатуры компонентов $\delta x_i(\text{ПЗР}_j)$, которые учитываются при вычислении показателя Φ для конкретного дефекта. Показано, что такой подход при трендовом анализе устраняет необходимость приведения контролируемых параметров к некоторому базовому режиму (как в известных методах). Физический смысл показателя Φ состоит в том, что это доля выработанного ресурса. При этом $(1 - \Phi)$ – это доля оставшегося ресурса. Сам показатель имеет значение $\Phi = 0$ в начале эксплуатации при нулевой наработке $\tau = 0$ и $\Phi = 1$ в конце эксплуатации при полной выработке ресурса. В процессе эксплуатации значение показателя Φ меняется (увеличивается) монотонно от 0 до 1. Чаще всего эта зависимость $\Phi(\tau)$ экспоненциальная и в простейшем варианте фазовый портрет $d\Phi/d\tau = f(\Phi)$ является линейным. При проведении профилактик и ремонта показатель Φ ступенчато уменьшается от текущего состояния до некоторого значения $\Phi < \Phi'$, поэтому общее изменение показателя Φ в рамках жизненного цикла изделия может иметь пилообразный вид.

Результаты использования предложенного метода для диагностики состояния ГТП

В настоящее время в практике трендового анализа при контроле каждого ГТП в эксплуатации с использованием SCADA-системы проводится контроль следующих параметров: частот роторов НД, ВД и СТ, температуры за ТНД, статического давления за КВД. В рамках существующих методов замеренные параметры приводятся к САУ и базовому режиму, выявляется, не вышли ли полученные контрольные точки за пределы «уставок», назначенных разработчиком ГТП. Это не позволяет достаточно достоверно и оперативно определить техническое состояние ГТП, выявить влияние отдельных видов дефектов.

Применение предложенного метода для трендового анализа результатов контроля конкретных ГТП показало следующее. На рис. 2 представлен тренд изменения показателя Φ в процессе эксплуатации конкретного ГТП за время наработки $\tau = 0 \dots 1528$ ч. На рис. 3 представлен тренд изменения упреждающего показателя $\Phi_{\text{упр}}$ на том же интервале накопления наработки τ в процессе эксплуатации того же экземпляра ГТП $\tau = 0 \dots 1528$ ч. При этом показатель Φ вычислен по всем контролируемым параметрам. Значения предельных относительных отклонений использовались с учетом знака фактических отклонений. Таким образом, полученные значения Φ характеризуют общее техническое состояние ГТП безотносительно видов накопленных дефектов.

Рис. 2. Кривая изменения Φ -показателя текущего состояния ГТП по наработке τ

Рис. 3. Кривая изменения $\Phi_{\text{упр}}$ – упреждающего показателя состояния ГТП

Для более детального анализа технического состояния газотурбинной установки (ГТУ) необходимо увеличить частоту замеров (на данный момент представлены результаты замеров с интервалом наработки $\Delta\tau = 150$ ч, т.е. 1 раз в 150 ч, практически 1 раз в неделю). Если увеличить частоту замеров не удастся, то необходимо в процессе эксплуатации использовать хотя бы простые методы фильтрации. Контрольные точки неуставившихся режимов, где $d\PЗР/d\tau \neq 0$ (в данном случае $dn_{\text{лп}}/d\tau \neq 0$), при трендовом анализе не должны учитываться. Условием отбраковки таких точек могут быть $|d\PЗР/d\tau| > (d\PЗР/d\tau)^*$, в данном случае $|dn_{\text{лп}}/d\tau| > (dn_{\text{лп}}/d\tau)^*$. Для этого достаточно при контроле параметров ГТП записывать значения $dn_{\text{лп}}/d\tau$.

На рис. 4 представлена кривая изменения текущего состояния ГТП по наработке после отбраковки неуставившихся точек.

При анализе переходных процессов изменения технического состояния ГТП удобно использовать фазовые портреты (фазовые траектории). На рис. 5 представлен фазовый портрет эксплуатации ГТУ за период наработки $\tau = 0 \dots 1528$ ч. Фазовая траектория может быть

экстраполирована, и это позволяет определить наработку $\tau = 1600$ ч, при которой ресурс будет исчерпан, $\Phi = 1$.

Рис. 4. Кривая изменения Φ -показателя текущего состояния ГТП по наработке τ (после отбраковки неустановившихся точек)

Рис. 5. Фазовый портрет процесса эксплуатации ГТУ за время наработки $\tau = 0 \dots 1528$ ч (фазовая траектория изменения показателя Φ)

В процессе эксплуатации ГТП накапливаются дефекты, которые тем или иным образом влияют на термогазодинамические параметры. Влияние каждого отдельного дефекта проявляется в отклонении тех или иных характеристик от исходных (полученных при нулевой наработке). Показатель Φ может быть определен для каждого контролируемого параметра в отдельности. Текущее техническое состояние ГТП при наработке $\tau = 1528$ ч характеризуется следующими столбчатыми диаграммами (рис. 6) (в скобках указаны параметры, на которые влияют накопленные дефекты).

Рис. 6. Столбчатые диаграммы для анализа текущего состояния ГТП и накопления дефектов при наработке $\tau = 1528$ ч

Если предположить, что общее истощение ресурса является суммой истощения ресурса по каждому из контролируемых параметров, то $\sum \Phi_i$, полученных на первом этапе, может использоваться для нормирования по схеме $\Phi'_i = \Phi_i / \sum \Phi_i$. На рис. 7 показаны результаты такого нормирования. Полученные значения Φ'_i могут рассматриваться как характеристики истощения ресурса по каждому отдельному параметру.

Рис. 7. Нормированные столбчатые диаграммы для анализа текущего состояния ГТП и накопления дефектов по каждому отдельному параметру при наработке $\tau = 1528$ ч

В предложенном методе трендового анализа кроме отбраковки неустановившихся точек (режимов) используется нормализация таким образом, чтобы исходные характеристики (при нулевой наработке) проходили через начало координат. Так, например, вместо зависимости $T_{\text{ТНД}}^* = f(n_{\text{лп}})$ рассматривается зависимость $T_{\text{ТНД}}^* - T_h = f(n_{\text{лп}})$. Кроме того, как и в известных методах, параметры приводятся к САУ. Поэтому контролируется не $p_{2\text{лп}}$ – приведенное к САУ на входе статическое давление за КНД, а $(p_{2\text{лп}} - 101\,300 \text{ Па})$, не $T_{4\text{лп}}$ – приведенная к САУ на входе температура за КНД, а $(T_{4\text{лп}} - 288 \text{ К})$ или $(t_{4\text{лп}} - 15 \text{ °С})$. Ряд параметров (например, мощность $N_{\text{СТ}}$) в такой нормализации не нуждаются (их характеристики изначально проходят через начало координат).

На рис. 8 приведены тренды изменения параметров в процессе эксплуатации до и с учетом такого нормирования. После перевода в нормированный вид удобно показать относительные отклонения от линии, полученной при 72-часовых испытаниях (при отсутствии ПСИ принято за первоначальное состояние). На рис. 9 приведены тренды изменения параметров в процессе эксплуатации после нормирования, на рис. 10 показаны отклонения нормированных параметров в процессе эксплуатации.

В дальнейшем предлагается проводить отбраковку (исключение, фильтрацию) неустановившихся точек (режимов) следующим образом. На тренд параметра в нормализованном виде следует наложить исходную характеристику – линию, полученную при ПСИ (или, как в данном случае, при 72-часовых испытаниях). Далее оценить изменение производной $dn_{\text{лп}}/d\tau$, на участках с немонотонным (нелинейным) изменением проводить фильтрацию параметров, проводить расчет относительного отклонения. На рис. 11 представлена иллюстрация данной методики.

a

b

v

Рис. 8. Тренды параметров, полученные в эксплуатации, до нормирования: а – изменения по наработке приведенного давления за КНД; б – изменения по наработке приведенной температуры за ТНД; в – изменения по наработке приведенной частоты вращения КВД

а

б

в

Рис. 9. Тренды параметров, полученные в эксплуатации, после нормирования: а – изменения по наработке приведенного давления за КНД; б – изменения по наработке приведенной температуры за ТНД; в – изменения по наработке приведенной частоты вращения КВД

Рис. 10. Относительные отклонения нормированных параметров в процессе эксплуатации:
 а – относительное отклонение приведенного давления за КНД; б – относительное отклонение
 приведенной температуры за ТНД; в – относительное отклонение приведенной
 частоты вращения КВД

Рис. 11. Иллюстрация отбраковки неустановившихся точек (фильтрации) с учетом производной:
a – нормирование приведенной температуры за ТНД; *б* – оценка величины производной в процессе эксплуатации; *в* – относительное отклонение приведенной температуры за ТНД

Заключение

Применение предложенной методики при трендовом контроле и диагностике технического состояния конкретных ГТП в составе ГПА на КС магистрального газопровода показало, что метод обладает рядом преимуществ. В отличие от контроля отдельных параметров она позволяет оператору следить за поведением комплексного показателя. Это помогает повысить оперативность и достоверность диагностики. Предложенный комплексный показатель имеет физический смысл – доля израсходованного ресурса. Упреждающий показатель позволяет своевременно выполнять остановку ГТП для профилактики, ремонта и снятия с эксплуатации.

Построение фазовой траектории помогает прогнозировать такие остановы. Метод позволяет выявлять влияние отдельных видов дефектов на общее техническое состояние ГТП. Он отличается универсальностью, простотой, точностью, адекватностью, полнотой. Метод предполагает использование одновременно всех контролируемых параметров. При этом чем больше количество контролируемых параметров, тем более достоверными являются результаты диагностики, тем более точно можно выделить влияние отдельных видов дефектов. При трендовом анализе предложено выводить из рассмотрения неустановившиеся точки (режимы). Для этого в число контролируемых параметров добавляются производные $d\text{ПЗР}/d\tau$, например $dn_{\text{лп}}/d\tau$.

Всё это позволяет эффективно организовать эксплуатацию агрегата по фактическому техническому состоянию. При этом чем выше частота производимых замеров, тем точнее получается фазовый портрет и это позволяет более точно прогнозировать отказы, выход из строя ГПА, планировать остановы на профилактику, ремонт, снятие с эксплуатации.

Библиографический список

1. Куприк В.В., Балабан Ю.Н., Хотеев И.А. Способ оценки технического состояния газотурбинного двигателя / ОКБ им. А. Люльки, филиал ПАО «УМПО» // Газотурбинные технологии. – 2016. – Июль-август. – С. 32–34.
2. Чичков Б.А. Модели и параметрическая диагностика авиационных двигателей: учеб. пособие / Моск. гос. техн. ун-т гражд. авиации. – М. – Ч. 1. – 2004. – 96 с. Ч. 2. – 2005. – 60 с.
3. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей: учеб. пособие / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, К.А. Малиновский, В.Г. Попов. – М.: Высш. шк., 2002. – 355 с.
4. Оценка технического состояния авиационных ГТД / Л.П. Лозицкий [и др.]. – М.: Транспорт, 1982. – 167 с.
5. Практическая диагностика авиационных газотурбинных двигателей / под ред. В.Л. Степаненко. – М.: Транспорт, 1985. – 116 с.
6. Шереметьев А.В. Анализ опыта эксплуатации зарубежных газотурбинных двигателей по техническому состоянию // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков, 2003. – Вып. 40/5. – С. 5–9.
7. Курочкин В.Н., Назаренко С.А., Щербак Н.А. Влияние технического обслуживания и ремонтов на ресурс оборудования для переработки масличных культур // Успехи современной науки и образования. – 2015. – № 3. – С. 83–91.
8. Тарасенко А.В., Кондратьев Ю.В. Оценка технического состояния устройств компенсации реактивной мощности в тяговой сети // Успехи современной науки и образования. – 2016. – Т. 5, № 10. – С. 155–157.
9. Черкез А.Я. Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений. – М.: Машиностроение, 1965. – 354 с.
10. Коняев Е.А. Техническая диагностика ГТД. – Рига: RIO RCAП, 1989. – 63 с.
11. Чуян Р.К. Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов: учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.
12. Козаченко А.Н. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов. – М.: Нефть и газ, 1999. – 463 с.
13. Krivosheev I.A., Kozhinov D.G., Rozhkov K.E. Changes in the engineering products performance during operation // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 74–80.
14. Кривошеев И.А., Суханов А.В., Симонов Н.Б. Метод диагностики газотурбинных приводов в составе газоперекачивающих агрегатов // Успехи современной науки: междунар. науч.-исслед. журнал. – 2016. – № 11, Т. 5. – С. 44–53.

References

1. Kuprik V.V., Balaban Yu.N., Khoteyenkov I.A. Sposob otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya gazoturbinnogo dvigatelya [Method of evaluating the technical condition of a gas turbine engine]. *Gazoturbinnyye tekhnologii*, 2016, iyul-avgust, pp. 32–34.
2. Chichkov B.A. Modeli I parametricheskaya diagnostika aviatsionnykh dvigateley. Uchebnoye posobiye [Models and parametric diagnostics of aircraft engines. Tutorial]. Moscow, Part 1. 2004. 96 p. Part 2. 2005. 60 p.

3. Yeliseyev Yu.S., Krymov V.V., Malinovskiy K.A., Popov V.G. Tekhnologiya ekspluatatsii, diagnostiki i remonta gazoturbinnnykh dvigateley: Uchebnoye posobiye [Technology of operation, diagnostics and repair of gas turbine engines: Textbook]. Moscow: Vysshaya shkola, 2002, 355 p.
4. Lozitskiy L.P. I dr. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya aviatsionnykh GTD [Assessment of technical condition of GTE]. Moscow: Transport, 1982, 167 p.
5. Prakticheskaya diagnostika aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley [Practical diagnostics of aviation gas turbine engines] / Ed. V.L. Stepanenko. Moscow: Transport, 1985, 116 p.
6. Sheremetyev A.V. Analiz opyta ekspluatatsii zarubezhnykh gazoturbinnnykh dvigateley po tekhnicheskomu sostoyaniyu [Analysis of operational experience of foreign gas turbine engines according to their technical state]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. Kharkov, 2003, no. 40/5, pp. 5-9.
7. Kurochkin V.N., Nazarenko S.A., Shcherbak N.A. Vliyaniye tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remontov na resurs oborudovaniya dlya pererabotki maslichnykh kultur [The influence of maintenance and repairs on the resource of equipment for processing oilseeds]. *Uspekhi sovremennoy nauki i obrazovaniya*, 2015, no. 3, pp. 83-91.
8. Tarasenko A.V., Kondratyev Yu.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya ustroystv kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v tyagovoy seti [Assessment of the technical condition of reactive power compensation devices in the traction network]. *Uspekhi sovremennoy nauki i obrazovaniya*, 2016, no. 10, vol. 5, pp. 155-157.
9. Cherkez A.Ya. Inzhenernyye raschety gazoturbinnnykh dvigateley metodom malyykh otkloneniy [Engineering calculations of gas turbine engines using the method of small deviations]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1965, 354 p.
10. Konyayev Ye.A. Tekhnicheskaya diagnostika GTD [Technical Diagnostics of GTE]. *Riga, RIO RCAII*, 1989.
11. Chuyan R.K. Metody matematicheskogo modelirovaniya dvigateley letatelnykh apparatov. [Methods of mathematical simulation of aircraft engines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1988, 288 p.
12. Kozachenko A.N. Ekspluatatsiya kompressornykh stantsiy magistralnykh gazoprovodov [Operation of compressor stations of main gas pipelines]. Moscow: Neft i gaz, 1999, 463 p.
13. Krivosheev I.A., Kozhinov D.G., Rozhkov K.E. Changes in the engineering products performance during operation. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, p.74-80
14. Krivosheyev I.A., Sukhanov A.V., Simonov N.B. Metod diagnostiki gazoturbinnnykh privodov v sostave gazoperekachivayushchikh agregatov [The method of diagnostics of gas turbine drives as part of gas pumping units]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal «Uspekhi sovremennoy nauki»*, 2016, vol. 5, no. 11, pp. 44-53.

Об авторах

Кривошеев Игорь Александрович (Уфа, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Авиационные двигатели» Уфимского государственного авиационного технического университета (450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: krivosh@sci.ugatu.ac.ru).

Рожков Кирилл Евгеньевич (Уфа, Россия) – старший преподаватель кафедры «Авиационная теплотехника и теплоэнергетика» Уфимского государственного авиационного технического университета (450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: rke85@mail.ru).

Симонов Николай Борисович (Уфа, Россия) – аспирант кафедры «Авиационные двигатели» Уфимского государственного авиационного технического университета (450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: sventigo@yandex.ru).

About the authors

Igor A. Krivosheev (Ufa, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Aircraft Engines Department, Ufa State Aviation Technical University (12, K. Marx st., Ufa, 450000, Russian Federation, e-mail: krivosh@sci.ugatu.ac.ru).

Kirill E. Rozhkov (Ufa, Russian Federation) – Senior Lecturer, Thermal Engineering and Aviation Power System Department, Ufa State Aviation Technical University (12, K. Marx st., Ufa, 450000, Russian Federation, e-mail: rke85@mail.ru).

Nikolai B. Simonov (Ufa, Russian Federation) – Postgraduate Student, Aircraft Engines Department, Ufa State Aviation Technical University (12, K. Marx st., Ufa, 450000, Russian Federation, e-mail: sventigo@yandex.ru).