

УДК 621.431.75

К ИССЛЕДОВАНИЮ РАБОТЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ЗАПЫЛЁННОЙ АТМОСФЕРЕ

©2014 Б.Р. Абдуллин¹, Р.Г. Акмалетдинов¹, Х.С. Гумеров¹, Р.Р. Нигматуллин²

¹Уфимский государственный авиационный технический университет,

²Шаранское линейное производственное управление магистральных газопроводов
ООО «Газпром трансгаз Уфа»

Рассмотрены экспериментальные данные по влиянию эрозии элементов турбомашин на характеристики двигателя. Анализ проводился для генератора сжатого воздуха установки очистки трубопроводов, который эксплуатировался в условиях повышенной концентрации пыли в воздухе – в полупустыне, и газоструйной установки по очистке временных технологических железнодорожных путей. Обе установки созданы на базе конвертированных авиационных двухвальных турбореактивных двигателей. По модели эрозионного износа установлено, что глубина эрозии зависит от размерности двигателей: большому двигателю соответствует большая глубина эрозии. Показана возможность раннего обнаружения приближающегося отказа двигателя, работающего в запылённой атмосфере, на основе анализа трендов его параметров с использованием различных вариантов статистического сглаживания: простое, с линейным трендом, с экспоненциальным трендом, с демпфированным трендом. Выявлено, что первым из рассмотренных контролируемых параметров рабочего процесса на приближение к отказу двигателя реагирует частота вращения ротора высокого давления. Своевременное обнаружение тенденций изменения параметров из-за развития ряда необратимых процессов позволит прогнозировать текущие и критические состояния устойчивой работы газотурбинных двигателей, соответствующие потере газодинамической устойчивости двигателя.

Эрозия элементов турбомашин, запылённая атмосфера, конвертированный авиационный газотурбинный двигатель, статистическое сглаживание, тренд параметров рабочего процесса, отказ двигателя.

Наземная эксплуатация конвертированного авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) в тяжёлых климатических условиях должна сопровождаться непрерывным контролем параметров рабочего процесса. Своевременное обнаружение тенденций изменения параметров из-за развития ряда необратимых процессов позволит прогнозировать текущие и предельные (критические) состояния устойчивой работы ГТД, соответствующие потере газодинамической устойчивости двигателя. В эксплуатации работа на режимах вблизи границы устойчивости, где запас устойчивости мал, недопустима.

В статье рассмотрены экспериментальные данные по влиянию эрозии элементов турбомашин на характеристики двигателя в целом. Используются различные варианты статистического сглаживания контролируемых параметров с целью уменьшения влияния случайных факторов

при изучении тенденций изменения параметров двухвального турбореактивного двигателя (ТРД).

Исследование выполнено по результатам работы газотурбинных энергоустановок на базе конвертированных авиационных ТРД типов Р13-300 и Р29Б-300.

Генератор сжатого воздуха (ГСВ) на базе конвертированного ТРД Р13-300 в составе передвижной компрессорной установки используется для продувки, очистки и осушки строящихся или ремонтируемых магистральных газонефтепроводов, а также для вытеснения воды после их гидроиспытаний.

В рассматриваемом случае ГСВ эксплуатировался в полупустыне, в условиях повышенной концентрации пыли в воздухе (республика Калмыкия, Краснодарский край, Ставропольский край). Установка находилась в эксплуатации 128 часов, после чего во время работы на двигателе

произошли три последовательных срыва и остановка двигателя. ГСВ эксплуатировался на следующих режимах: «Запуск», «Малый газ», «Холостой ход», «Рабочий режим». Под режимом «Холостой ход» понимают работу установки при частоте вращения ротора низкого давления $n_{\text{лпр}}$ от 86 до 100 процентов без отбора воздуха.

Вторая установка на базе конвертированного ТРД Р29Б-300 используется для очистки технологических временных железнодорожных путей от смёрзшихся мелких вскрышных и горных пород в условиях горнодобывающего карьера, а также для очистки железнодорожных полувагонов от смёрзшихся остатков сыпучих грузов и снега на ОАО «Михайловский ГОК» Курской магнитной аномалии.

Работа в условиях карьера характеризуется сильной запылённостью воздуха, проходящего через двигатель. Нароботка газоструйной установки на базе двигателя Р29Б-300 составила 130 часов. Прекращение эксплуатации установки произошло вследствие наступления помпажей, обгорания и разрушения лопаток турбин двигателя. Газоструйная установка эксплуатировалась на следующих режимах: «Запуск» с выходом на «Малый газ», режим прогрева в течение не менее двух минут, «Рабочий режим». После окончания работы установки двигатель переводился на режим «Малый газ», затем следовал режим охлаждения не менее двух минут и останов.

Обращают на себя внимание два факта: время работы обеих установок до полной потери работоспособности абсолютно совпадает и режимы работы также достаточно близки и составляют около 90% от максимального режима по частоте вращения, то есть по окружной скорости. При близких конструктивных схемах турбокомпрессоров базовых конвертированных двигателей они отличаются размерностью: вторая установка больше по линейным размерам на 25%.

Анализ с учётом этих факторов и условий работы позволит уточнить неко-

торые закономерности механизма эрозивного износа.

В общем виде в моделях эрозивного износа величина E в функции различных факторов представляется в виде [1]

$$E = f(\delta, k, c, G_b, \tau, V_p, \gamma, V_{\text{отн}}, \xi),$$

где δ – дисперсный состав пылевых частиц;

k – коэффициент эффективности пыли;

c – концентрация пыли в окружающей атмосфере;

G_b – расход воздуха через двигатель;

τ – время наработки в запылённой атмосфере;

V_p – скорость частиц при соударении;

γ – угол при соударении;

$V_{\text{отн}}$ – скорость частиц при скольжении в межлопаточных каналах

ξ – коэффициент эффективности ПЗУ.

Величина E равна произведению подверженной эрозии поверхности и глубины эрозии. Площадь прямо пропорциональна расходу воздуха. Из подобия картин объёмного износа E следует, что глубина эрозии на втором двигателе больше в соответствии с его размерами, которые определяются по величине, равной корню квадратному от отношения расходов воздуха этих двигателей - 105:66. Поскольку режимные факторы близки, а размеры отличаются, значит так же отличаются режущие свойства лессовой и железорудной пыли (с точностью до неопределённости концентраций той и другой пыли).

Другие факторы могут быть установлены на основе исследования тенденции поведения параметров в процессе эксплуатации.

Особенностью эксплуатации конвертированного ГТД (в отличие от лётной эксплуатации базового двигателя) является чрезвычайно большой градиент изменения параметров в период, предшествующий отказу двигателя.

Наступление отказного состояния возникает сравнительно быстро и следует за периодом медленных изменений, протекающих с постоянной скоростью.

При этом контроль параметров рабочего процесса происходит при изменяющихся в широком диапазоне атмосферных условиях, малом времени работы двигателя на подконтрольном режиме, большой погрешности измерения ограниченного числа параметров рабочего процесса. Поэтому изменение параметров рабочего процесса по наработке представляет собой случайный, нестационарный по среднему значению и по дисперсии процесс [2, 3].

Выделение объективных тенденций по такой информации является трудной задачей для персонала установки. Необходимо обработка измерительной информации, связанная с отбраковкой отдельных измерений, приведением к определённым базовому режиму, статистическим сглаживанием.

Массив измерительной информации по двигателю на режиме «Холостой ход» (без отбора воздуха) при определённой наработке включал приведённые к стандартным атмосферным условиям значения:

$n_{1пр}$ – частота вращения ротора низкого давления (НД), %;

$n_{2пр}$ – частота вращения ротора высокого давления (ВД), %;

$t_{Тпр}^*$ – полная температура газа за турбиной низкого давления, °С;

$P_{2пр}$ – статическое давление воздуха за компрессором высокого давления.

Для выявления закономерностей в случайных процессах, например, при вибрационной диагностике авиационных двигателей применяют различные методы сглаживания случайных флуктуаций: математического ожидания, текущего среднего, экспоненциальное и др. Сглаживающие свойства определяются постоянной сглаживания α и числом наблюдений n .

Для выявления закономерностей и уменьшения влияния случайных факторов, имеющих место при контроле параметров рабочего процесса наземной энергетической установки, рассмотрены несколько вариантов экспоненциального сглаживания: простое, с линейным трендом, с экспоненциальным трендом, с демпфированным трендом.

Результаты простого экспоненциального сглаживания при $\alpha = 0,1$ представлены на рис. 1, 2. Наряду со сглаженными значениями на рисунках приведены фактические значения и остатки (отклонения сглаженных значений от фактических).

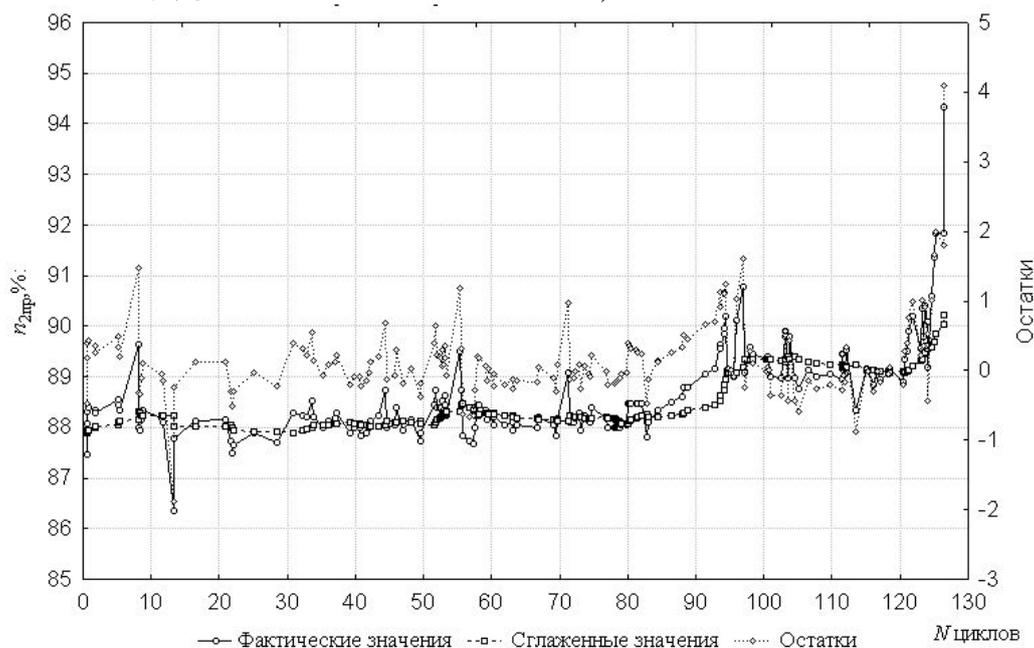


Рис. 1. Экспоненциальное сглаживание частоты вращения ротора высокого давления: режим «холостой ход», среднее (по трём первым значениям) $n_{2пр}=87,95\%$, $\alpha=0,1$, среднеквадратическая ошибка $0,594\%$

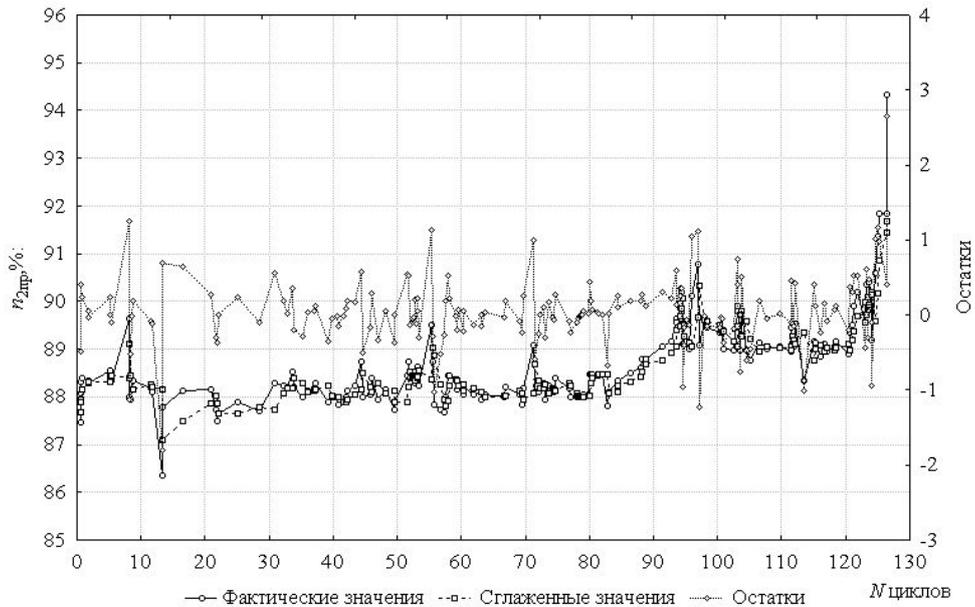


Рис. 2. Экспоненциальное сглаживание температуры газа за турбиной: режим «холодной ход»: среднее (по трём первым значениям) $n_{гпр}=87,95\%$, $\alpha = -0,586$, среднеквадратическая ошибка $0,476\%$

Из анализа рис. 1, 2 можно сделать следующие выводы:

- для частоты вращения ротора высокого давления наблюдается тенденция возрастания после достижения наработки примерно 80 циклов. Резкий выброс параметра обнаруживается после 120 циклов наработки, после чего у двигателя прекращается эксплуатация (из-за возникновения помпажа двигателя);

- для температуры газа за турбиной тенденции по наработке не отмечено за

исключением рубежа в 120 циклов, за которым следует существенное повышение значения параметра и прекращение эксплуатации.

На рис. 3, 4 показаны результаты простого экспоненциального сглаживания частоты вращения ротора ВД и температуры газа за турбиной с такими коэффициентами α , при которых среднеквадратичные ошибки остатков являются минимальными.

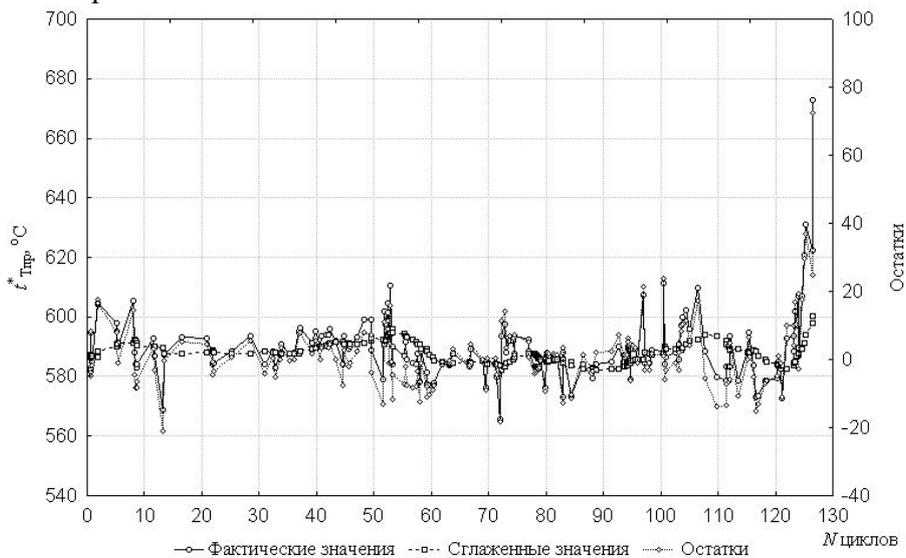


Рис. 3. Экспоненциальное сглаживание частоты вращения ротора высокого давления при условии минимизации остатков: режим «холодной ход», среднее (по трём первым значениям) $t_{гпр}^*=586,8^\circ\text{C}$, $\alpha = -0,1$, среднеквадратическая ошибка $10,19^\circ\text{C}$

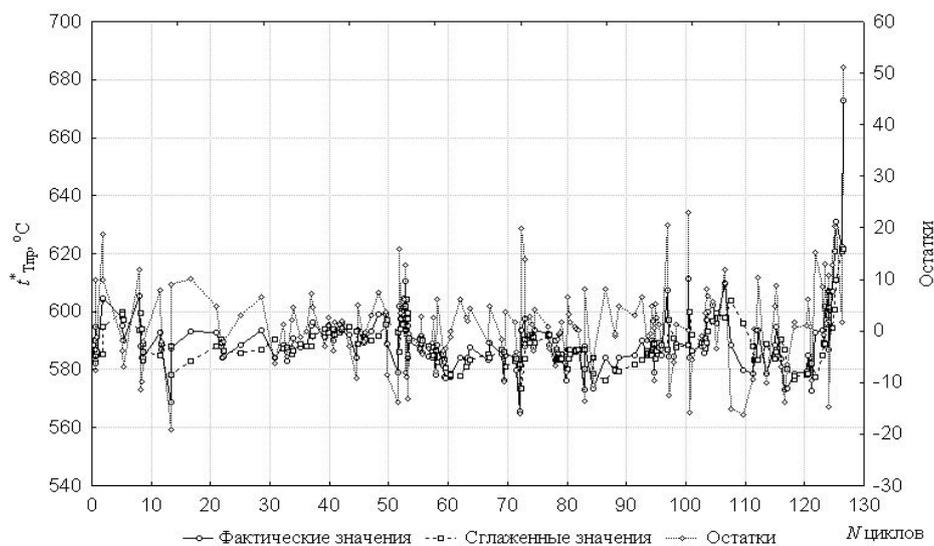


Рис. 4. Экспоненциальное сглаживание температуры газа за турбиной при условии минимизации остатков: режим «холостой ход», среднее (по трём первым значениям) $t_{гр}^* = 586,8^\circ\text{C}$, $\alpha = -0,503$, среднеквадратическая ошибка $8,58^\circ\text{C}$

Для проверки адекватности моделей, полученных с помощью экспоненциального сглаживания, необходимо проверить наличие автокорреляции в остатках [4]. В случае её значимого наличия модель будет неадекватной.

Вычислены критерии Дурбина-Ватсона для частоты вращения ротора ВД: $d = 1,804 > d_U = 1,74$ (d_U – верхняя граница критерия); для температуры газа за турбиной: $d = 1,844 > d_U = 1,74$. Следовательно, остатки не содержат автокорреляции и для данных параметров построенные модели методом экспоненциального сглаживания являются адекватными.

Поскольку ранее в рядах динамики частоты вращения ротора ВД и температуры газа за турбиной обнаружены тенденции, то имеется необходимость их оценить, используя различные виды тренда: линейный, экспоненциальный, демпфированный. Данные виды трендов экспоненциально сглаживаются специальными параметрами: γ – для линейного и экспоненциального трендов, ϕ – для демпфированного тренда.

Тренд, дающий минимальную среднеквадратичную ошибку и отсутствие автокорреляции в остатках, будет являться окончательным вариантом сглаживающей модели.

В качестве примера на рис. 5, 6 приведены результаты экспоненциального сглаживания с исключённым демпфированным трендом, которое оказалось лучшей моделью для всех рассматриваемых параметров рабочего процесса, отмечающей увязанные по всем контролируемым параметрам тенденции.

Для всех видов тренда найдены оптимальные соотношения параметров (α , γ , ϕ), при которых среднеквадратичная ошибка минимальна. В табл. 1 приведены вычисленные критерии Дурбина-Ватсона в сравнении с табличными значениями (доверительная вероятность $P_0 = 0,95$), значения среднеквадратичных ошибок для всех вариантов сглаживания.

Из табл. 1 можно сделать вывод, что после исключения различных видов тенденций из рядов динамики частоты вращения ротора ВД и температуры газа за турбиной ряды динамики, состоящие из отклонений (остатков) от тенденций, автокорреляции не содержат. Это говорит о том, что полученные модели по критерию автокорреляции адекватны. Исходя из значений среднеквадратичной ошибки, лучшей моделью для всех рассматриваемых параметров является модель с исключённым демпфированным трендом, отмечающая увязанные по всем контролируемым параметрам тенденции.

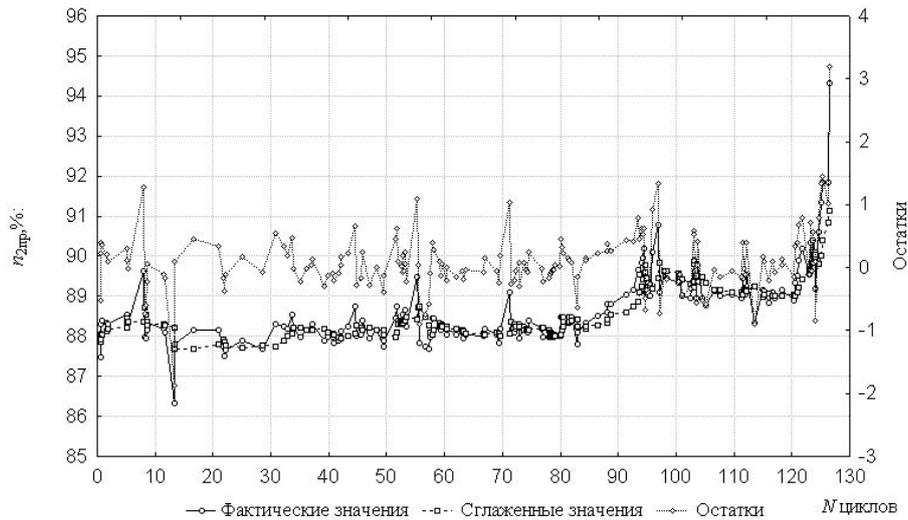


Рис. 5 Сглаживание демпфированного тренда частоты вращения ротора высокого давления: режим «холостой ход» среднее (по трём первым значениям) $n_{2пр}=87,95\%$, параметр начального тренда $T_0=0,1542$, $\alpha 0,225$, $\gamma = 1$, $\Phi = 0,253$, среднеквадратическая ошибка $0,502\%$

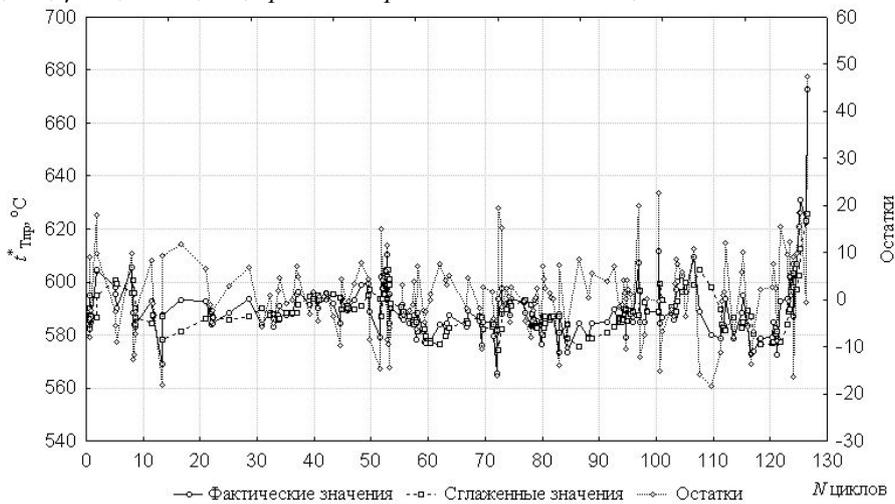


Рис. 6. Сглаживание демпфированного тренда температуры газа за турбиной: режим «холостой ход» среднее (по трём первым значениям) $t^*_{Тпр}=586,8^\circ\text{C}$, параметр начального тренда $T_0=0,5435$, $\alpha 0,42$, $\gamma = 0,13$, $\Phi = 0,938$, среднеквадратическая ошибка $8,52^\circ\text{C}$

Таблица 1. Определение автокорреляции в сглаженных параметрах

	Линейный тренд		Экспоненциальный тренд		Демпфированный тренд	
	$n_{2пр}, \%$	$t^*_{Тпр}, ^\circ\text{C}$	$n_{2пр}, \%$	$t^*_{Тпр}, ^\circ\text{C}$	$n_{2пр}, \%$	$t^*_{Тпр}, ^\circ\text{C}$
Вычисленное d	1,814	1,861	1,805	1,831	1,804	1,808
Табличное d (d_L или d_U)	$d_U = 1,74$	$d_U = 1,74$	$d_U = 1,74$	$d_U = 1,74$	$d_U = 1,74$	$d_U = 1,74$
Наличие автокорреляции	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Среднеквадратичная ошибка	0,476	8,55	0,496	8,97	0,474	8,52

Кроме того, следует заметить, что для частоты вращения РВД и температуры газа за турбиной среднеквадратичные ошибки для модели с исключённым линейным трендом практически сопоставимы с демпфированным.

При простом экспоненциальном сглаживании и при сглаживании с параметром линейного тренда результаты по

автокорреляции и по среднеквадратичной ошибке примерно сопоставимы. Поэтому модель, определённая простым экспоненциальным сглаживанием, также адекватна и пригодна для предварительной обработки контролируемых параметров рабочего процесса генератора сжатого воздуха.

В целом, по результатам всех видов сглаживаний можно однозначно сказать,

что первым из рассматриваемых контролируемых параметров рабочего процесса на приближение к отказу двигателя реагирует частота вращения ротора ВД.

Начиная примерно с 82 цикла наработки, среднее значение частоты вращения ротора ВД возрастает в течение 15 циклов на один процент. После наработки в 120 циклов наблюдается резкое повышение частоты вращения. В течение последующих шести циклов вплоть до отказа двигателя среднее значение частоты вращения ротора ВД (по сглаженным значениям) увеличивается на 3%.

Для температуры газа за турбиной существенное изменение значения произошло только по достижении 120 циклов наработки.

Таким образом, можно говорить о том, что для раннего обнаружения приближающегося отказа более предпочтительна частота вращения ротора ВД. К тому же этот параметр имеет наименьшую погрешность измерения по сравнению с остальными контролируемыми параметрами.

Библиографический список

1. Гумеров А.В., Акмалетдинов Р.Г. Моделирование эрозионного износа лопатки компрессора // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 3(27), ч. 2. С. 233-239.

2. Адгамов Р.И., Боровик В.О., Дмитриев С.В., Кожевников Ю.В., Шибанов Г.П. Обработка и анализ информации при автоматизированных испытаниях ГТД. М.: Машиностроение, 1987. 126 с.

3. Мокроус М.Ф. Применение методов диагностической обработки и анализа термогазодинамических параметров при стендовых испытаниях авиационных ГТД // Межвузовский сб. научных трудов «Испытания авиационных двигателей». Т. 5. Уфа: УАИ, 1977. С. 29-34.

4. Вайну Я.Я.-Ф. Корреляция рядов динамики. М.: Статистика, 1977. 119 с.

Информация об авторах

Гумеров Хайдар Сагитович, доктор технических наук, профессор кафедры авиационных двигателей, Уфимский государственный авиационный технический университет. E-mail: profgumerov@yandex.ru. Область научных интересов: проектирование, эксплуатация и надёжность авиационных двигателей.

Абдуллин Булат Ринатович, кандидат технических наук, доцент кафедры авиационных двигателей, Уфимский государственный авиационный технический университет. E-mail: parallaksya@yandex.ru. Область научных интересов: проектирование и доводка авиационных двигателей, статистический анализ данных испытаний.

Акмалетдинов Рафиль Газитдинович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электромеханики, Уфимский государственный авиационный технический университет. E-mail: akmar51@inbox.ru. Область научных интересов: авиадвигателестроение, пылевая и капельная эрозия, эксплуатация двигателей.

Нигматуллин Рифат Рафитович, главный инженер – заместитель начальника Шаранского линейного производственного управления магистральных газопроводов ООО «Газпром трансгаз Уфа». E-mail: nrg@bk.ru. Область научных интересов: эксплуатация и надёжность энергетических машин.

RESEARCH OF GAS TURBINE ENGINE OPERATION IN DUST-FILLED ATMOSPHERE

© 2014 B.R. Abdullin, R.G. Akmaletdinov, K.S. Goumerov, R.R. Nigmatullin

¹Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

²Sharansky linear production department of main gas pipelines «Gazprom Transgaz Ufa»
Ltd., village Sharan

The article describes the experimental data on the effect of erosion the turbomachines elements under the influence solids on the engine performance. The analysis was performed for the generator of compressed air for the aggregate of cleaning pipelines and the gas jet treatment plants temporary technological railways. The aggregate of cleaning pipelines was operated under conditions of high concentrations of dust in the air - in the semi-desert. Both plants are based on the converted aircraft twin-shaft turbojet engines. According to the model of erosive wear was set, that the depth of erosion depends on the dimension of the engines. Also shown is the ability to detect impending failure of the engine working in a dusty atmosphere, based on trend analysis of its parameters using various statistical smoothing options: simple linear trend, exponential trend, damped trend. Revealed that the first of the considered parameters controlled workflow approach to engine failure reacts high pressure rotor speed. Timely detection of trends in parameters due to the development of a number of irreversible processes will predict current and stable operation of the critical state of gas turbine engines, the corresponding loss of gasdynamic stability of the engine, so as to use the work on modes near with the marginal stability of the compressor is unacceptable.

Erosion of the turbomachines elements, dusty atmosphere, a converted aircraft gas turbine engine, statistical smoothing, trend parameters workflow, engine failure.

References

1. Goumerov A.V., Akmaletdinov R.G. Compressor blade erosion modeling // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2011. No. 3(27), part 2. P. 233-239. (In Russ.)
2. Adgamov R.I., Borovik V.O., Dmitriev S.V., Kozhevnikov Y.V., Shibanov G.P. Obrabotka i analiz informatsii pri avtomatizirovannykh ispytaniyakh GTD [Processing and analysis of information in automated tests GTE]. Moscow: Mashinostroenie Publ, 1987. 126 p.
3. Mokrous M.F. Primenenie metodov diagnosticheskoy obrabotki i analiza termogazodinamicheskikh parametrov pri stendovykh ispytaniyakh aviatsionnykh GTD // Mezhvuzovskii sb. nauchnykh trudov «Ispytaniya aviatsionnykh dvigateley». V. 5. Ufa: UAI Publ., 1977. P. 29-34. (In Russ.)
4. Vainu Ya.Ya.-F. Korrelyatsiya ryadov dinamiki [Correlation of time series]. Moscow: Statistika Publ, 1977. 119 p.

About the authors

Goumerov Khaidar Sagitovich, Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department Aviation Engines, Ufa State Aviation Technical University. E-mail: profgoumerov@yandex.ru. Area of Research: design and finishing of aircraft engines.

Abdullin Bulat Rinatovich, candidate of Science (Engineering), associate professor of the Department Aviation Engines, Ufa State Aviation Technical University. E-mail: parallaksya@yandex.ru. Area of Research: design and finishing of aircraft engines, statistical analysis of test data.

Akmaletdinov Rafil Gazitdinovich, candidate of Science (Engineering), Senior Lecturer, Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University. E-mail: akmar51@inbox.ru. Area of Research: erosion, exploitations factors, jet engine construction.

Nigmatullin Rifat Rafitovich, chief engineer - deputy chief Sharansky LPUMG "Gazprom Transgaz Ufa." Ltd. E-mail: nrr@bk.ru. Area of Research: operation and reliability of power machines.