

УДК 621.452.3

И.Ф. КРАВЧЕНКО, В.Н. ЖУРАВЛЕВ, С.А. БОРЗОВ*ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ ГТД

Нормативная методика обработки результатов испытаний по определению границ устойчивой работы камеры сгорания применяется в течение длительного периода времени и, в связи с развитием средств измерений и методов цифровой обработки сигналов, требует оптимизации и адаптации к существующему уровню техники. Проведен анализ результатов исследований устойчивости работы камеры сгорания двигателя АИ-450. Учитывая квазистационарность исследуемых сигналов и недостатки метода исследования подобных сигналов путем расчета амплитудного спектра коэффициентов преобразования Фурье, предложена методика помехоустойчивого измерения и расчета параметров пульсаций давления основанная на методе оконного анализа спектральной плотности мощности. Показано, что изменение коэффициента корреляции функций изменения частоты вибрации деталей двигателя и математического ожидания широкополосного сигнала процесса турбулентного горения свидетельствует об изменении расчетного режима работы двигателя. Для формализации полученных результатов исследований необходимы более глубокие теоретические исследования энергетических взаимосвязей параметров процессов турбулентного горения в камере сгорания на переходных режимах ГТД.

Ключевые слова: камера сгорания, турбулентное горение, методика измерения параметров пульсаций давления.

Введение

При сертификации газотурбинных двигателей (ГТД) для гражданских и военных летательных аппаратов нормативной документацией [1] оговаривается необходимость проведения расчетно-экспериментальных работ по определению границ устойчивой работы камеры сгорания. Признаками стабильной работы камеры сгорания (КС) является работа без срывов пламени и вибрационного горения (ВГ).

Нормативной документацией оговариваются: схема препарировки камеры сгорания, измерительная аппаратура для проведения работ и методика обработки результатов. Нормативная методика обработки результатов испытаний применяется в течение длительного периода времени и, в связи с развитием средств измерений и методов цифровой обработки сигналов, требует, на наш взгляд, оптимизации и адаптации к существующему уровню техники и научно-техническому потенциалу научных организаций авиационной промышленности. При выполнении намеченного плана работ, по доказательству возможности применения вибрационных датчиков для обнаружения признаков ВГ в узле камеры сгорания, был выполнен ряд испытаний, как уменьшенных моделей камер сгорания в лабораторных условиях, так и полноразмерных двигателей в условиях испытательных стендов предприятия. Не-

обходимо отметить, что вибрационный метод проверки наличия процесса ВГ значительно сокращает финансовые затраты разработчиков при сертификации двигателей, его различные варианты уже применяются организациями проектирующими и эксплуатирующими ГТД [2 – 4]. Метод исследования новых параметров процесса горения, естественно, требует доработки теории, практики и методики исследований.

1. Основная часть

Как отмечалось в [4], в случае проведения работ по доказательству отсутствия режима ВГ в узле камеры газотурбинного двигателя во всем диапазоне рабочих условий, анализировать показания вибрационного датчика (датчиков) установленных на корпусе камеры сгорания в непосредственной близости от источника термоакустических колебаний – пламени. Для увеличения достоверности анализируемой информации её обработка проводилась по двум независимым каналам измерений: давления, в двух точках объема КС, и вибрации её корпуса в окрестности точек измерения давления. Следует также отметить, что отдельный вибрационный датчик был расположен в непосредственной близости от места подвода топлива на рабочие форсунки двигателя. Такое расположение датчика мы считаем необходимым для анализа пульсаций

топлива, создаваемых насосом-дозатором, которые могут являться определяющим фактором в возникновении предпосылок ВГ. Тип двигателя, участвовавший в эксперименте, был сертифицирован - доказано отсутствие склонности этого типа двигателей к возникновению ВГ во всех эксплуатационных режимах. В связи с этим нами было предусмотрено применение дополнительного регулируемого выхлопного устройства (РВУ), как средства для создания предпосылок к уменьшению объемной скорости течения газа в КС, нерасчетному режиму работы двигателя и возможности возникновения процесса ВГ.

Измерение давления воздуха в кольцевом канале камеры сгорания в сечении непосредственно на выходе из компрессора проводилось последовательно двумя типами датчиков ДМИ и МИДА. В непосредственной близости к точке замера, был расположен вибрационный датчик АВС-017-04. Вторая пара датчиков располагалась в сечении, наиболее удаленном от первого по оси КС. Одновременно с измерением уровня давления воздуха в кольцевых каналах выполнялось измерение давления газа в полости жаровой трубы и давления топлива в рабочих форсунках. Для выполнения работ были использованы датчики ДДИ и ДМИ (МИДА).

Работа двигателя имитировала цикл эквивалентно-циклических испытаний. Выполнялось три испытательных цикла. Первый цикл служил для выполнения тарировки и согласования показаний измерительной аппаратуры. Второй цикл выполнялся с полностью раскрытым РВУ. Третий цикл выполнялся с закрытым РВУ.

В результате ранее проведенных теоретических и экспериментальных исследований [5, 6] доказано - для процесс ВГ характеризуется регулярным изменением параметров скорости горения, температуры, давления (в камере сгорания), состава продуктов горения и т. п. Вибрационное горение возникает при наличии положительной обратной связи между процессами вибраций деталей ГТД, изменения давления в камере сгорания и скоростью горения. Таким образом, параметрами сигналов датчиков вибраций, которые характеризуют процессы вибрационного горения в камере сгорания, являются:

- регулярные колебания давления газа в КС в частотном диапазоне $\Delta\Omega = (100 - 1000)$ Гц;
- широкая полоса этих колебаний, как минимум на порядок шире, чем роторных и зубцовых сигналов;
- математическое ожидание частоты широкополосного сигнала ВГ коррелированно с гармониками сигналов деталей ГТД.

Анализ результатов экспериментальных исследований выполнялся по следующей методике.

1. Проводился расчет частотных параметров сигналов вибраций вращающихся деталей коробок приводов, турбины высокого давления, свободной турбины и насоса-дозатора на всех режимах работы ГТД.

2. Учитывая: квазистационарность исследуемых сигналов $s(t)$ и недостатки метода исследования подобных сигналов [7] методом расчета амплитудного спектра $S(A, \omega)$ коэффициентов преобразования Фурье

$$S(A, \omega) = \int_t s(t) \exp(-j\omega t) dt, t \in [Ta], \omega \in [\Delta\Omega]$$

нами был применен метод оконного анализа спектральной плотности мощности (СПМ) $N[s(\Delta\Omega, t)]$ в соответствии с теоремой Винера-Хинчина [8]. Плотность мощности определялась как преобразование Фурье от автокорреляционной функции

$$R_{ss}(t, \tau) = \int_0^{Ta} [s(t, \tau), s(t, \tau)] d\tau, \tau \in (Ta) \quad \text{сигнала на}$$

оконном интервале анализа Ta :

$$N_1(\omega, t) = \int_0^{Ta} R_{ss}[s(t, \tau)] \exp^{-j\Delta\omega t} d\tau, \quad (1)$$

$$\omega \in [\Delta\Omega], t \in (Ta).$$

Для дальнейшего анализа целесообразно исследовать функцию удельной спектральной плотности мощности:

$$N[s(\Delta\Omega, t)] = \left(\frac{N_1(\omega, t)}{N_0} \right), \quad (2)$$

$$t \in Ta, \omega \in [\Delta\Omega],$$

где $N[s(\Delta\Omega, t)]$ – удельная мощность исследуемого сигнала $N_1(\omega, t)$ в полосе частот $\Delta\Omega$, отнесенная к полосе частот один Гц, $N_0 = 10^{-12}$ Вт/м² – удельная мощность не зависящая от частоты и соответствующая абсолютному нулевому уровню звука, Ta – временной интервал окна анализа, величина которого определяется постоянной времени τ_g процесса горения топлива в камере сгорания. Отношение $Ta/\tau_g \gg 1$ – целое число, которое в совокупности с несущими частотами сигналов, определяет базу помехоустойчивости метода в соответствии с теорией шумоподобных сигналов [9].

В связи с большим динамическим диапазоном амплитуд суперпозиции сигналов роторных частот и ВГ целесообразно исследовать логарифм выражения (2), т.о. математическая модель анализируемого сигнала:

$$N[s(\Delta\Omega, t)] = 10 \lg_{10} \left(\frac{N_1(\omega, t)}{N_0} \right) \text{dB}, \quad (3)$$

$$t \in Ta, \omega \in [\Delta\Omega].$$

2. Обсуждение результатов исследования

Графики функции (3) рассчитанные для сигналов вибродатчиков приведены на рис. 1 – 4:

$n = 1$ – датчик, расположенный на выходе из компрессора,

$n = 2$ – датчик, расположенный в зоне рабочих форсунок. В имени файла указано положение заслонки РВУ:

otkr – заслонка открыта;

zakr – заслонка закрыта (проходное сечение уменьшено на 70 мм).

Измеренные значения частот роторных вибраций: свободная турбина – 650 Гц, турбина турбокомпрессора – 883 Гц. Частота пульсаций давления топлива, соответствующая режиму работы насоса-дозатора – 1256 Гц.

Нами был проведен анализ функции (3) сигналов датчиков давления и вибраций в частотном диапазоне (10 - 1000) Гц. Были зафиксированы сигналы, соответствующие процессу турбулентного горения (ТГ) в окрестностях функций сигналов первых роторных гармоник свободной турбины и турбины турбокомпрессора. Амплитуда этих сигналов значительно менее 1% от роторных, что соответствует имеющемуся заключению сертификационных испытаний по отсутствию склонности двигателя к вибрационному горению. В результате исследований от-

мечена практически единичная корреляция сигналов датчиков давления и вибраций, что соответствует физической модели. Изменение давления - девиация потенциальной энергии, изменения сигнала вибраций девиация ускорения поверхности, т.е. первой производной скорости, квадрат которой входит в выражение для кинетической энергии. Считаем, что данная информация не актуальна для настоящей статьи и будет приведена в отдельной публикации. В результате анализа функции (3) в частотном диапазоне (1150 - 1350) Гц пульсаций давления насоса-дозатора были отмечены изменения параметров сигналов ТГ, соответствующие изменению расчетного режима работы ГТД. Зафиксировано.

1. Уход математического ожидания частоты сигналов ТГ от частоты пульсаций давления насоса-дозатора на стационарных режимах МК и МП (интервал времени 100 - 250 с).

2. Расширение полосы частот, что эквивалентно увеличению мощности потерь и увеличению потенциальной энергии газов в жаровой трубе.

3. Рост амплитуд сигналов ТГ на (5 - 7)%, что эквивалентно увеличению вероятности возникновения процесса вибрационного горения в исследуемом диапазоне частот.

Выводы анализа функций СПМ (3) подтверждаются формой сигнала на (80 – 100) с. и (270 – 300) с., который соответствует переходным режимам работы двигателя.

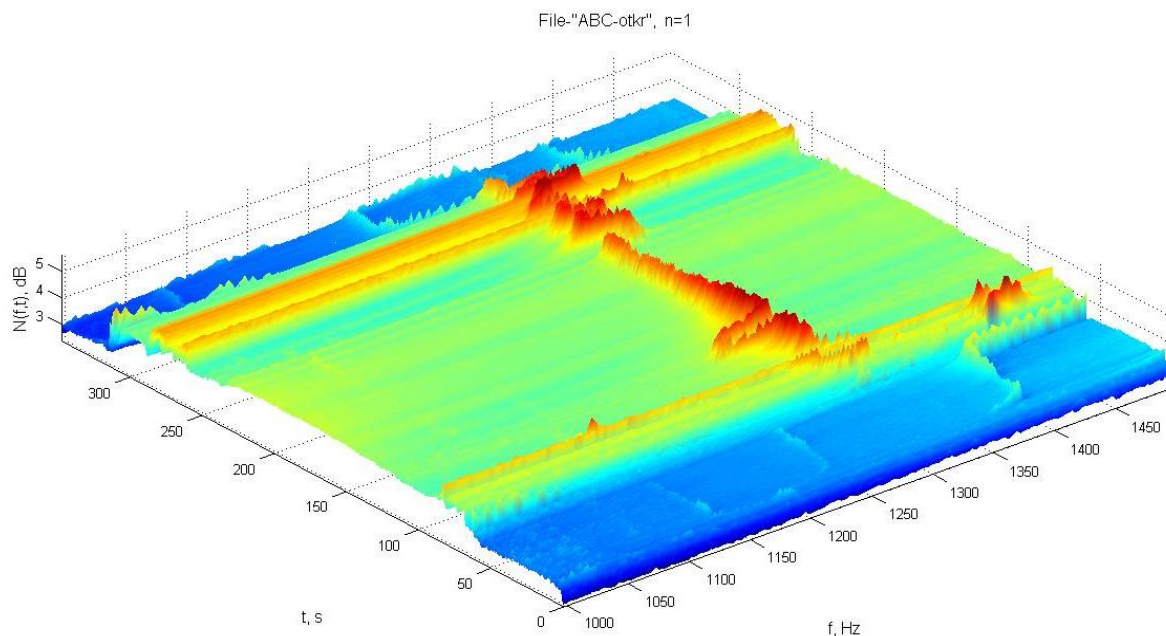


Рис. 1. График функции СПМ первого датчика 1 при открытой заслонке РВУ

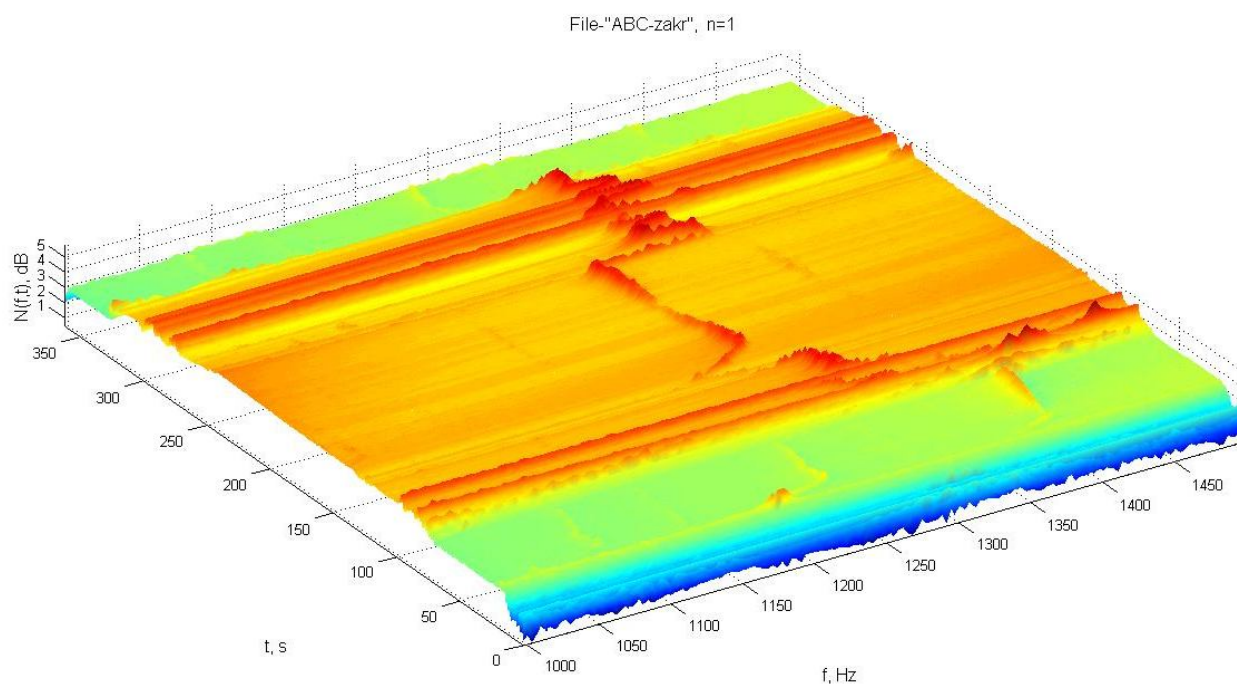


Рис. 2. График функции СПМ первого датчика при закрытой заслонке РВУ

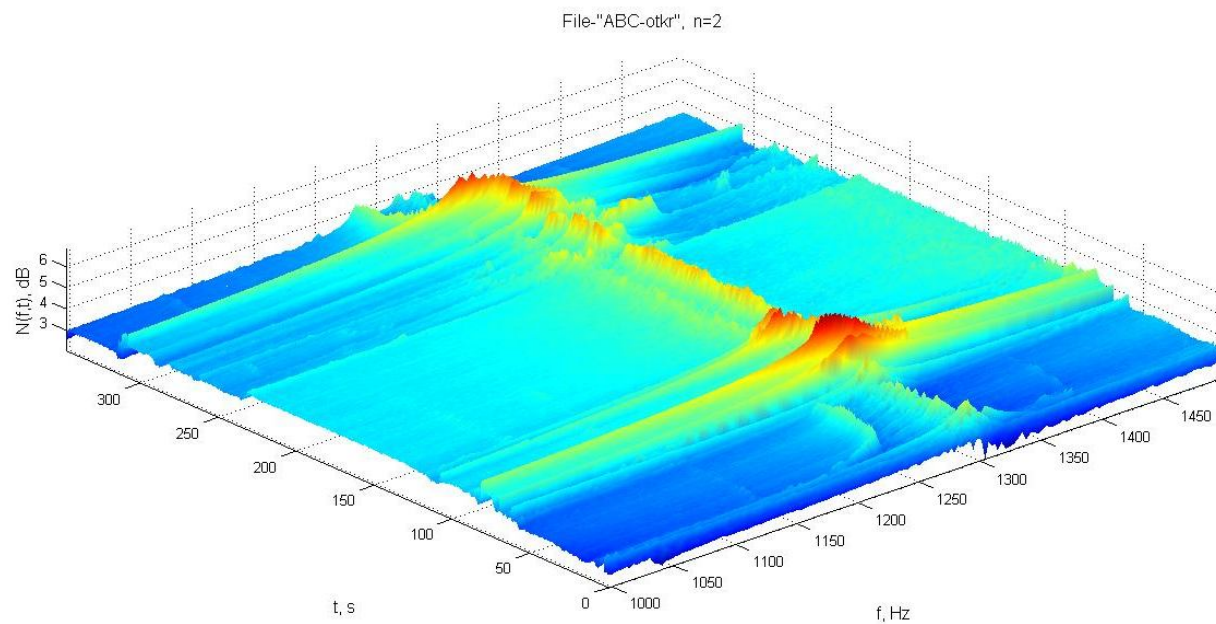


Рис. 3. График функции СПМ второго датчика при открытой заслонке РВУ

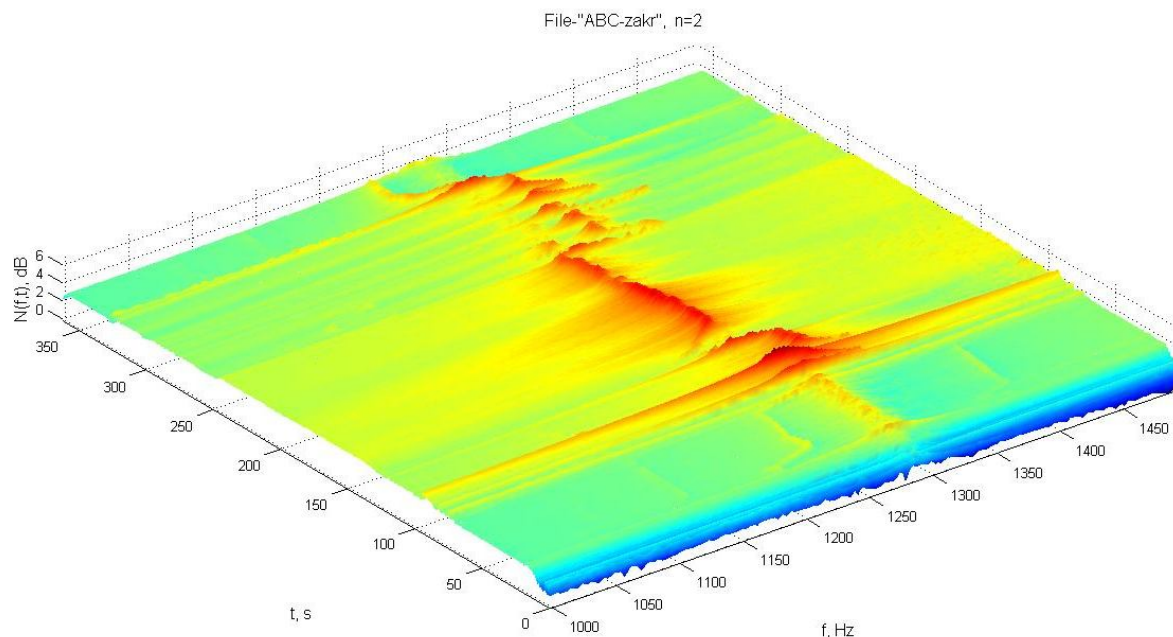


Рис. 4. График функции СПМ второго датчика при закрытой заслонке РВУ

Выводы

Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы.

1. Подтверждена эффективность анализа параметров акустических сигналов вибраций КС для идентификации процесса изменения расчетного режима работы ГТД.

2. Предложена и апробирована методика измерения параметров акустических и вибрационных сигналов КС ГТД, которая показала свою информационную (по сравнению с традиционной) и экономическую эффективность.

3. При искусственном создании режимов нестабильной работы наблюдалось уменьшение коэффициента корреляции функций изменения гармоничности сигнала частоты роторной вибрации свободной турбины (для исследуемого типа ГТД) и математического ожидания частоты сигнала турбулентного горения свидетельствует о недопустимом изменении режима работы двигателя.

4. Для формализации полученных результатов исследований необходимы более глубокие теоретические исследования энергетических взаимосвязей параметров процессов турбулентного горения в КС на переходных режимах ГТД.

При разработке ГТД четвертого и пятого поколений многие процессы, происходящие в двигателе, изучены, их дальнейшая незначительная оптимизация требует значительных финансовых и временных затрат. Полученные ГП «Ивченко-Прогресс» ре-

зультаты исследований процесса ВГ определяют задачи, решение которых позволит продлить ресурс, увеличить экономичность и уменьшить уровень акустических шумов ГТД. Специалистами ГП «Ивченко-Прогресс» определен ряд мероприятий, реализация которых будет выполнена в ближайшее время. При положительных результатах экспериментальных исследований они будут внедрены в конструкции созданных и находящихся в разработке ГТД как авиационного, так и наземного применения.

Литература

1. *Авиационные правила. Часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов [Текст] / отв. ред. А.Н. Кузнецов: Международный авиационный комитет. – М.: ОАО АВИАИЗДАТ, 2004. – 44 с.*
2. Потерянский, Л.И. *Исследование вибрационного состояния газотурбинной установки SIMENS V64.3A на пусковых режимах и под нагрузкой при опытно-промышленной эксплуатации [Электронный ресурс] / Л.И. Потерянский, С.Л. Потерянский. – 23 с. – Режим доступа: http://www.nppmera.ru/assets/files/vibro-expert_example.pdf. – 10.05.2013.*
3. *Применение средств вибрационной диагностики для защиты от вибрационного горения. [Текст]/С.В. Лозня, С.С. Некрасов, В.Г. Соляник, М.И. Торхов, А.В. Френев, В.Н. Якунин // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – №4 (20). – С. 57–60*
4. Борзов, С.А. *Анализ эффективности методов обнаружения процесса вибрационного горения в камерах сгорания газотурбинных двигателей*

[Текст] / С.А. Борзов, В.Н. Журавлев // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – № 2(85). – Дніпропетровськ, 2013. – С. 3 – 5.

5. Раушенбах, Б.В. Вибрационное горение [Текст] / Б.В. Раушенбах. – М.: Из-во физ.-мат. лит-ры, 1961. – 500 с.

6. Зарембо, Л.К. Введение в нелинейную акустику (Звуковые и ультразвуковые волны большой интенсивности) [Текст] / Л.К. Зарембо, В.А. Крайников. – М.: Наука, 1966. – 519 с.

7. Журавлев, В.Н. Методическая и информаци-

онная адекватность гармонических методов анализа и идентификации речевых сигналов [Текст] / В.Н. Журавлев, В.С. Кабак // Системні технології: зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Національна металургійна академія України, 2009. – Вип. 2 (61). – С. 70 – 78.

8. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2003. – 608 с.

9. Урядников Ю.Ф. Сверхширокополосная связь [Текст] / Ю.Ф. Урядников, Ю.Ф. Аджемов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 368 с.

Поступила в редакцию 27.05.2013, рассмотрена на редколлегии 13.06.2013

Рецензент: канд. техн. наук, доцент кафедры В.С. Чигрин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПУЛЬСАЦІЙ ТИСКУ У КАМЕРІ ЗГОРЯННЯ НА СТІЙКІСТЬ РОБОТИ ГТД

І.Ф. Кравченко, В.М. Журавльов, С.А. Борзов

Нормативна методика обробки результатів випробувань по визначенню меж стійкої роботи камери згоряння застосовується протягом тривалого періоду часу й у зв'язку з розвитком засобів вимірювань та методів цифрової обробки сигналів, вимагає оптимізації й адаптації до існуючого рівня техніки. Проведений аналіз результатів досліджень стійкості роботи камери згоряння двигуна АІ-450. Враховуючи квазістаціонарність досліджуваних сигналів і недоліки методу дослідження подібних сигналів шляхом розрахунку амплітудного спектру коефіцієнтів перетворення Фур'є, запропонована методика завадостійкого виміру та розрахунку параметрів пульсацій тиску заснована на методі віконного аналізу спектральної щільності потужності. Показано, що зміна коефіцієнту кореляції функцій зміни частоти вібрації деталей двигуна й математичного сподівання широкосмугового сигналу процесу турбулентного горіння свідчить про зміну розрахункового режиму роботи двигуна. Щодо формалізації отриманих результатів досліджень необхідні більш глибокі теоретичні дослідження енергетичних взаємозв'язків параметрів процесів турбулентного горіння в камері згоряння на перехідних режимах ГТД.

Ключові слова: камера згоряння, турбулентне горіння, методика виміру параметрів пульсацій тиску.

RESEARCH THE IMPACT OF PRESSURE PULSATION IN COMBUSTION CHAMBER ON STABILITY WORK OF GAS TURBINE ENGINE

I.F. Kravchenko, V.N. Zhuravlev, S.A. Borzov

Normative methodic of analysis test-bench results by definition of boundaries stable work combustion chamber have being applied for a long period of time and in connection with the development of sensors and digital processing of signals demanding the kind of optimization and adaptation to the existing level of technical equipment. The analysis of research stability work combustion chamber the AI-450 engine is presented. Taking into consider quasi-stationary of investigated signals and disadvantages of methodic examination of similar signals by the calculation amplitude spectrum the Fourier transform coefficients method the methodic of noise immunity measurement and calculation the pressure pulsation parameters based on the method short-time Fourier transform power spectral density are proposed. It is shown that coefficient correlation function of frequency change engine parts vibration and expected value broadband signal process of turbulent combustion testify about change of rated duty of engine. To formalize gained research results necessary study in-depth energy interconnection turbulent combustion process parameters in combustion chamber during transient behavior of gas turbine engine.

Key words: combustion chamber, turbulent combustion, method of measurement, pressure pulsation parameter.

Кравченко Игорь Федорович – канд. техн. наук, Генеральный конструктор ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: root@ivchenko-progress.com.

Журавлев Владимир Николаевич – д-р техн. наук, ведущий конструктор отдела приводов ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: ws50@i.ua.

Борзов Сергей Анатольевич – ведущий конструктор отдела камер сгорания, руководитель группы жаровых труб ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: kpr345@i.ua.