

УДК 621.752

М.И. ТОРХОВ¹, С.В. ЛОЗНЯ¹, Н.Б. НАЛЕСНЫЙ²¹ООО «Котрис», Киев, Украина²ДК «Укртрансгаз», Черкассы, Украина

МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ВИБРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Предложен метод выявления вибрационного горения топлива в камерах сгорания газотурбинных установок, базирующийся на применении узкополосного спектрального анализа. В основу предлагаемого метода положена идея выделения из полосы частот роторных гармоник сигнала, пропорционального среднеквадратическому значению виброскорости, отвечающему гармоникам вибрационного горения камеры сгорания.

газотурбинная установка, камера сгорания, вибрационное горение, пьезоэлектрический датчик, среднеквадратическое значение вибрации, спектральный анализ

Введение

Одним из требований к современным газотурбинным установкам (ГТУ) является низкий уровень эмиссии токсичных веществ, в первую очередь соединений оксидов азота NOx и углерода CO. В современных ГТУ это требование удовлетворяется за счет разработки и внедрения низкоэмиссионных камер сгорания (КС), которые функционируют на бедных топливно-воздушных смесях.

Актуальной проблемой создания низкоэмиссионных КС ГТУ является борьба с вибрационным горением [1]. Как известно, вибрационное горение - вид неустойчивого горения, характеризуемый низкочастотными (с частотой 5...50 Гц) и высокочастотными (с частотой 400...600 Гц) автоколебаниями давления газа в КС. Причина - чувствительность смесеобразования и горения к колебаниям давления газа в камере. В КС ГТУ колебания могут привести к частичному или полному разрушению элементов конструкции. Поэтому обеспечение устойчивости процесса горения является серьезной и актуальной проблемой, требующей больших материальных затрат, и занимает значительную часть времени в общей доводке двигателей.

Формулирование проблемы. На сегодня основным способом борьбы с вибрационным горением

является аэродинамическая доводка КС, обеспечивающая устранение механизма установления автоколебаний в камере [2]. Однако такой подход не всегда дает положительные результаты, в реальной эксплуатации нередко возникают случаи выхода ГТУ на режимы вибрационного горения. Проблема осложняется отсутствием достаточно надежного количественного признака возникновения вибрационного горения. В то же время все современные ГТУ оборудованы системами, обеспечивающими контроль уровня корпусной вибрации двигателя, косвенно характеризующей пульсации давления в КС. Тем не менее, до сегодняшнего дня остается не выясненным насколько изменение параметров, снимаемых с датчиков вибрации, характеризует условия возникновения пульсаций давления в КС.

Решение проблемы. Метод определения вибрационного горения топлива в КС ГТУ

Пример из опыта реальной эксплуатации ГТУ. В качестве примера рассмотрим аварийный останов (АО) газоперекачивающего агрегата ГПА-25С мощностью 25 МВт с газотурбинным приводом ДН-80 разработки ГП НПКГ «Зоря – Машпроект» (г. Николаев) на компрессорной станции (КС)

«Гребеньковская» («Киевтрансгаз») 15.02.2005 г.

При переводе ГПА-25С в режим «Кольцо» произошло резкое повышение уровня среднеквадратического значения (СКЗ) виброскорости до 19,65 мм/с в полосе частот 20...500 Гц по каналу «КВД/КС», установленному в районе КС, что привело к аварийному останову (рис. 1).

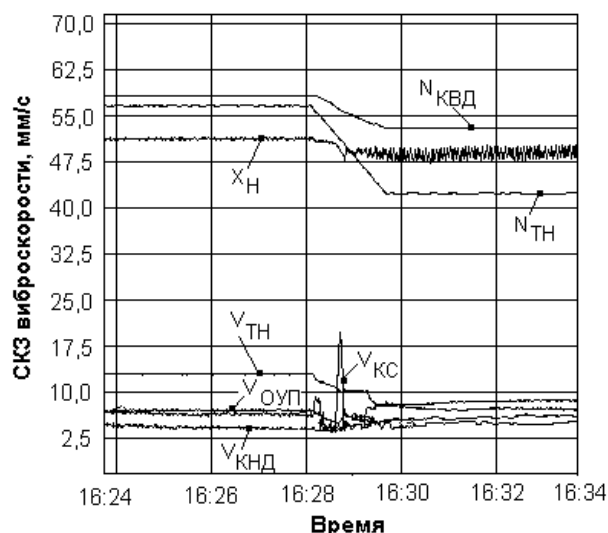


Рис. 1. Тренды параметров по записям САУ ГПА:
 $N_{КВД}$ – частота вращения компрессора высокого давления (КВД);
 N_{TH} – частота вращения свободной турбины;
 $V_{КВД}$ – виброскорость передней опоры компрессора низкого давления;
 $V_{КС}$ – виброскорость КВД-КС;
 V_{TH} – виброскорость свободной турбины;
 $V_{OУП}$ – виброскорость опорно-упорного подшипника нагнетателя;
 X_H – осевой сдвиг ротора нагнетателя

Анализ трендов параметров по записям системы автоматического управления (САУ) газоперекачивающего агрегата (ГПА) показал, что моменту максимальной вибрации соответствует резкий сброс топлива регулятором частоты вращения турбины нагнетателя вследствие резкого снижения потребляемой мощности при открытии клапана рециркуляции, что привело к временному обеднению рабочей смеси в КС. Из рис. 2 видно, что относительная скорость при закрытии топливно-регулирующего клапана (ТРК) перед моментом АО более чем вдвое выше скорости уменьшения давления воздуха за компрессором.

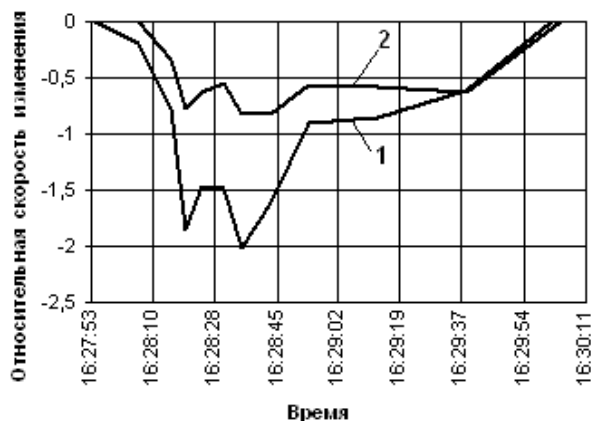


Рис. 2. Относительная скорость перекачки ТРК (кривая 1) и изменения давления воздуха за компрессором (кривая 2) в момент АО

Благодаря установленной на ГПА-25С стационарной системе вибрационного мониторинга и диагностики «ССМД КЦ», обеспечивающей непрерывный сбор и спектральную обработку контролируемых параметров вибрации с интервалом 5 с, удалось выяснить доминирующие гармоники вибрации, приведшие к увеличению СКЗ и аварийному останову агрегата. Анализ спектрального развития показал, что определяющей СКЗ вибрации по каналу «КВД/КС» явилась гармоника с частотой 31,7 Гц с СКЗ виброускорения 5,26 м/с² и СКЗ виброскорости 26,4 мм/с, которая присутствует в момент АО и отсутствует в предшествующих и последующих спектрах (рис. 3).

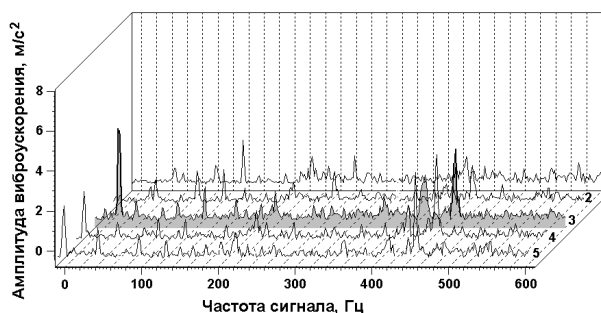


Рис. 3. Анализ спектрального развития сигнала по каналу «КВД/КС» в момент АО:

- 1 – 16:28:17, СКЗ виброскорости 3,99 мм/с;
- 2 – 16:28:22, СКЗ виброскорости 4,93 мм/с;
- 3 – 16:28:27, СКЗ виброскорости: 19,65 мм/с;
- 4 – 16:28:32, СКЗ виброскорости: 4,25 мм/с;
- 5 – 16:28:37, СКЗ виброскорости: 5,92 мм/с

Таким образом, выяснилось, что причиной АО ГПА явилась гармоническая составляющая вибрации 31,7 Гц, которая связана с низкочастотными компонентами вибрационного горения в КС двигателя ДН-80. Известно, что для данного типа двигателя характерной полосой высокочастотных составляющих вибрационного горения является диапазон 420...470 Гц. Как видно из рис.3, в рассматриваемый момент времени на спектре также присутствует гармоника 470 Гц с амплитудой виброускорения $3,76 \text{ м/с}^2$.

Известные методы определения вибрационного состояния ГТУ. Известные на сегодня методы определения вибрационного режима работы конструктивных элементов ГТУ заключаются в следующем [3]. На корпусе ГТУ закрепляют датчик вибрации пьезоэлектрического типа, к которому подключают формирователь сигнала. При помощи формирователя сигнала выполняют преобразование широкополосного сигнала виброускорения корпуса работающей ГТУ в сигнал, пропорциональный СКЗ виброскорости в полосе частот роторных гармоник ГТУ. По полученному сигналу судят о вибрационном состоянии ГТУ.

Основными требованиями к способу определения вибрационного состояния конструктивных элементов ГТУ являются:

- получение сигнала, который пропорционален СКЗ виброскорости в полосе частот, отвечающим роторным гармоникам ГТУ;
- отсутствие в сигнале гармоник, соответствующих процессу вибрационного горения топлива в КС.

Предлагаемый метод выявления вибрационного горения топлива в КС ГТУ. Суть предлагаемого метода рассмотрим на примере двигателя ДН-80, роторным гармоникам которого соответствует полоса частот 50...400 Гц в зависимости от режима работы ГПА, а полосам вибрационного горения – диапазоны частот 20...50 и 400...500 Гц (от режима работы не зависят).

В основу предлагаемого метода положена идея выделения из полосы частот роторных гармоник сигнала, пропорционального СКЗ виброскорости, отвечающего гармоникам вибрационного горения КС для определения факта ее выхода на режим автоколебаний. На рис. 4 представлена схема подключения аппаратуры для реализации предлагаемого метода.

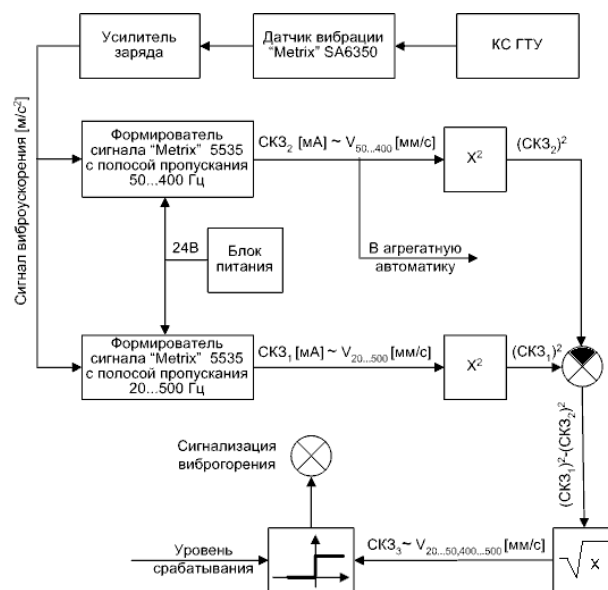


Рис. 4. Схема подключения аппаратуры для выявления вибрационного горения топлива в КС ГТУ

С пьезоэлектрического датчика, установленного в районе КС ГТУ, широкополосный сигнал виброускорения параллельно подается на два формирователя сигнала с полосами пропускания 20...500 Гц и 50...400 Гц соответственно. В формирователях выполняется интегрирование сигналов виброускорения для получения на выходах унифицированных токовых сигналов $СКЗ_1$ и $СКЗ_2$ (мА), пропорциональных виброскоростям $V_{20...500}$ и $V_{50...400}$ (мм/с) в указанных полосах частот. Возведение сигналов $СКЗ_1$ и $СКЗ_2$ в квадрат, вычисление разности и извлечение квадратного корня позволяет получить токовый сигнал $СКЗ_3$ (мА), пропорциональный суммарной величине виброскорости $V_{20...50, 400...500}$ (мм/с) в полосах частот 20...50 и 400...500 Гц, соответствующих колебани-

ям давления газа в КС при вибрационном горении (рис. 5). Подав сигнал $СКЗ_3$ на реле с заданным уровнем срабатывания, получим сигнализатор вибрационного горения топлива в КС ГТУ [4].

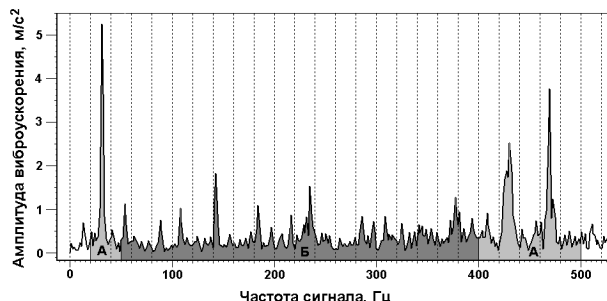


Рис. 5. Определение $СКЗ$ вибрации в полосах роторной вибрации (Б) и полосах, соответствующих вибрационному горению (А)

Описанным операциям соответствует следующее математическое выражение:

$$СКЗ_3 = \sqrt{\frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} A_i^2 - \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} A_j^2},$$

где N_1 — количество линий спектра в полосе частот 20...500 Гц;

A_i — значения амплитуд линий спектра в полосе частот 20...500 Гц [мм/с];

N_2 — количество линий спектра в полосе частот 50...400 Гц;

A_j — значения амплитуд линий спектра в полосе частот 50...400 Гц [мм/с].

Заключение

Представленный метод выявления вибрационного горения топлива в КС ГТУ базируется на известных аппаратных средствах, прост для практической реализации. При определении технического состояния механической части элементов ГТУ, данный подход обеспечивает отсутствие в вибрационном

сигнале, поступающем в агрегатную автоматику, гармоник, соответствующих процессу вибрационного горения топлива в КС.

Сигнализатор, реализованный по предложенной схеме, может быть использован при построении активных систем управления вибрационным горением, вопрос разработки и практической реализации которых на сегодня остается открытым.

Литература

1. Применение средств вибрационной диагностики для защиты от вибрационного горения / С.В. Лозня, С.С. Некрасов, В.Г. Соляник, М.И. Торхов, А.В. Френев, В.Н. Якунин // Вибрации в технике и технологиях. — Вінниця, 2001. — № 4 (20). — С. 57-60.
2. Ясиніцький Е.П., Торхов М.І., Лозня С.В., Налісний М.Б. Моделювання механізму автоколивань тиску при вібраційному горінні в низькоємісних камерах згоряння газотурбінних установок // Вісник НАУ. — 2006. — № 1. — С. 145-149
3. Диментберг Ф.М., Колесников К.С. Вибрации в технике. Справочник. — М.: Машиностроение, 1980. — Т. 3. — 544 с.
4. Деклараційний патент на корисну модель 13423 U Україна, F02K 3/00 G01M 7/02 (2006.01), H02P 13/00. Спосіб визначення вібраційного горіння в камері згоряння газотурбінного двигуна / М.І. Торхов, С.В. Лозня, Є.А. Дударев, М.Б. Налісний, А.С. Мандра (Україна). — № u200600778; Заявл. 30.01.2006; Опубл. 15.03.2006. Бюл. № 3. — 5 с.

Поступила в редакцию 1.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.