ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ КАВИТАЦИИ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

© 2006 М.С. Гаспаров¹, А.Н. Крючков², Е.В. Шахматов¹, Л.В. Родионов¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет ²Институт акустики машин

В статье рассмотрены экспериментальные исследования виброакустических характеристик авиационного комбинированного насосного агрегата в условиях зарождения кавитации в нем. Представлены результаты обработки реализаций пульсаций давления топлива при различных режимах работы насоса с помощью вейвлетных преобразований. Выявлен механизм изменения частотного состава пульсаций при кавитации.

Кавитация – это разрыв сплошности жидкости, обусловленный её неспособностью выдерживать растягивающие напряжения, и заполнение образовавшихся пустот газопаровой смесью. Проявления кавитации многообразны и, как правило, нежелательны: снижение эффективности работы гидрооборудования; эрозия, возникающая в результате многократного местного повышения давления; шум и вибрация, обязанные своим происхождением нестационарному характеру движения жидкости при возникновении каверн и т.д.

Знание того, как при кавитации изменяется частотный состав пульсаций, позволит понять процессы, происходящие в насосе. Частотный состав спектра, получаемый в результате преобразования Фурье, дает только интегральные характеристики. Оконное преобразование Фурье имеет ряд недостатков, связанных с тем, что базисная функция спектрального разложения остается синусоидой. Кроме того, окна в этом преобразовании имеют фиксированные размеры, и их трудно приспособить под корректное представление локальных свойств сигнала.

Преимущество вейвлет-анализа перед преобразованием Фурье заключается в высокой разрешающей способности во времени при достаточной частотной локализации.

Непрерывное вейвлет-преобразование одномерной функции f(t) есть [1]:

$$w(a,b) = a^k \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

где $\psi(t)$ - вещественная или комплексная функция, удовлетворяющая следующим требованиям.

1. Допустимость. Функция $\psi(t)$, которую будем называть анализирующим (материнским) вейвлетом должна иметь нулевое среднее значение:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$$

2. Подобие. Все функции семейства получаются из анализирующего вейвлета путем масштабного преобразования и сдвига,

$$\psi_{a,b}(t) = \psi(\frac{t-b}{a})$$

Таким образом, вейвлеты образуют двухпараметрическое семейство функций, в котором параметр a отвечает за масштаб (растяжение) функции, а параметр b за её положение (сдвиг).

3. Обратимость. Вейвлет-преобразование должно быть обратимо, то есть должно существовать обратное преобразование, однозначно восстанавливающее исходную функцию по ее вейвлет-представлению.

4. Регулярность. Функция $\psi(t)$ должна быть хорошо локализована и в физическом пространстве, и в пространстве Фурье.

Вейвлет-анализ позволяет восстановить

полную эволюцию спектрального состава сигнала во времени. Общее представление о спектрально-временной структуре сигнала можно получить по распределению модуля коэффициентов вейвлет-преобразования. Ширина полосы, получаемой при разложении гармонического сигнала, характеризует спектральное разрешение используемого анализирующего вейвлета. Распределение фазы вейвлет-преобразования менее информативно, особенно для сложных сигналов. В то же время, именно фаза дает наиболее точную информацию об особенностях в сигнале, именно по распределению фазы можно с большой точностью идентифицировать момент смены частоты.

Исследование кавитационных процессов в комбинированном топливном насосе проводилось на стендовом оборудовании, имитирующем штатную систему топливопитания авиационного ТРДДФ (рис. 1). Насосный агрегат состоит из шнекоцентробежной (ШЦС) и шестеренной ступеней (ШС). Количество зубьев шестерни ШС и лопаток центробежного колеса равно 11.

Записаны реализации пульсаций давления рабочей среды шестеренной ступени на трех режимах работы, соответствующих частоте вращения 2100 об/мин и различным давлениям на входе в ШС (штатный режим – Pвх₁=2.1·10⁵ Па, режим частичной кавитации – Pвх₂=0,66·10⁵ Па, режим развитой кавитации – Pвх₃=0,18·10⁵ Па). Давление на входе в



Рис. 1. Комбинированный насосный агрегат в составе стенда.

ШС понижалось путем дросселирования потока с помощью магнитного золотникового крана (МЗК), установленного перед входом в ступень.

Пульсации давления на выходе шестеренной ступени на всех исследованных режимах практически постоянны, а пульсации на входе в насос существенно зависят от среднего давления (рис. 2).

В работе [2] было показано, что основными гармониками в спектре пульсаций давления являются первая и вторая зубцовые гармоники (11 и 22 роторные). Из спектров, полученных с помощью преобразования Фурье, следует, что 1-ая и 2-ая зубцовые гармоники присутствуют всегда и меняется лишь их амплитуда.

Построены вейвлет-разложение временных реализаций пульсаций давления с использованием комплексного вейвлета Морле. На рис. 3 – 6 приведены сами временные реализации и модули коэффициентов вейвлетпреобразования пульсаций при трех указанных выше режимах.

Частотный состав пульсаций на выходе на всех режимах постоянен (рис. 3). Нижняя темная полоса соответствует первой зубцовой гармонике с частотой 390 Гц. На спектрограмме пульсаций на входе на штатном режиме четко прослеживаются первая и вторая гармоники (рис. 4). На рис. 5 показан модуль вейвлет-разложения пульсаций на входе при частичной кавитации. Видно, что интенсивность первой зубцовой гармоники существенно изменяется по времени, а второй практически не изменилась. При развитых кавитационных процессах происходит «размытие» обеих основных гармоник (рис. 6). Данное явление характеризует появление и развитие кавитации (2-ой и 3-ий режимы – рис. 5, 6).

Для подтверждения корреляции интенсивности основных гармоник и кавитации проведен следующий эксперимент. Исследованы 2 режима работы: на малых оборотах для исключения кавитации и больших (для гарантированного появления кавитационных процессов). Кавитацию наблюдали через оптическую проставку на входе (рис. 1).



Рис. 2. Пульсации на входе и выходе шестеренной ступени, n=2100 об/мин): а), в), д) – вход ШС; б), г), е) – выход ШС

Первый режим работы соответствует частоте вращения 1500 об/мин и давлению на входе и выходе шнкоцентробежной ступени соответственно 1,3 и 2,4 атм. Расход рабочей жидкости через ШЦС соответствует 600 кг/час.

На данном режиме присутствовали обратные токи, но кавитационных пузырьков не было видно визуально. На вейвлет-спектрограммах пульсаций на входе (рис. 7) и выходе ШЦС (рис. 8) постоянно присутствует первая зубцовая гармоника, соответствующая 275 Гц. Вторая более "разрежена" по времени. Второй режим работы соответствует частоте вращения ротора 4800 об/мин, давление на выходе из ступени 7,8 атм., расход рабочей жидкости 585 кг/час. Через оптическую проставку наблюдались кавитационные пузырьки. Частотный состав пульсаций на входе (рис. 9) сильно "размыт".

Таким образом, показана взаимосвязь кавитационных процессов и изменения частотного состава пульсаций давления рабочей среды в насосах. Интенсивность пульсационных составляющих, соответствующих основным гармоникам



на входе в ШЦС (n=1500 об/мин)

Рис. 8. Спектрограмма пульсаций давления на выходе из ШЦС (n=1500 об/мин)



Рис. 9. Спектрограмма пульсаций давления на входе в ШЦС (n=4800 об/мин)

частоты перекачки, на режимах скрытой кавитации изменяется во времени при работе насоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. П.Г.Фрик. Турбулентность: модели и подходы. Курс лекций. Пермь: Перм. гос.

Рис. 10. Спектрограмма пульсаций давления на выходе из ШЦС (n=4800 об/мин)

техн. ун-т. 1998.

 Гаспаров М.С., Иващенко А.В. Взаимный корреляционно-спектральный анализ пульсаций давления в комбинированном насосном агрегате // Труды всероссийской научной конференции "Математическое моделирование и краевые задачи" Самара: СамГТУ, 2004.

WAVELETS IN THE INVESTIGATION OF THE CAVITATION PROCESSES IN PUMP

© 2006 M.S. Gasparov¹, A.N. Kruchkov², E.V. Shakhmatov¹, L.V. Rodionov¹

¹ Samara State Aerospace University ² Institute of Acoustic of Machines

In the article the main principles of lowering of a noise of an exhaust of pneumatic systems surveyed. The expediency of lowering of exhaust speed of an exhaust jet, and also splitting it on set many direction jets, by means of application of a silencer is justified. The mathematical model of calculation of a noise level created exhaust jet designed in view of the installation of a silencer also permitting to calculate transients in the pneumatic system. The outcomes of simulation of transients, and also calculation of efficiency of a silencer are shown. Matching calculation datas of pressure drop in pneumocapacity with experimental is carried out.