

ВИБРОДИАГНОСТИКА КЛАПАНОВ КОМПРЕССОРА АКДС ПО ПСЕВДОСПЕКТРАМ MUSIC

А.А. Хвостов, В.И. Ряжских, И. А. Казьмин, Н.А. Дегтярев, А.В. Иванов

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

В работе представлена математическая модель поршневого компрессора азотокислорододобывающей станции (АКДС), которая позволяет, задаваясь конструктивными параметрами компрессора, всасывающего и нагнетательного клапанов, получать временные характеристики амплитуды давления под поршнем компрессора, виброскорости и виброускорения, передающиеся в виде механических воздействий на оборудование и фиксирующиеся датчиками вибродиагностики. Проведено исследование псевдоспектров вибросигналов по алгоритму MUSIC при различных параметрах модели компрессора, характеризующих развитие того или иного дефекта.

Ключевые слова: вибродиагностика, поршневые компрессоры, азотокислорододобывающая станция, псевдоспектр.

Введение

Анализ штатной работы азотокислорододобывающих станций (АКДС) типа АКДС-70М показал, что одной из причин остановки станции при проведении кампании являются неисправности в пневматических системах высокого давления. При этом основной причиной возникновения отказов в пневматической системе высокого давления является выход из строя клапанов всасывающей и нагнетательной магистралей.

Таким образом, от качества работы клапанов существенно зависит эффективность работы компрессора, а, следовательно, и всей АКДС. Дефекты клапанов приводят к увеличению энергии, затрачиваемой на проталкивание газа, и снижению экономичности работы компрессора, уменьшению его КПД, увеличению затрат на производство сжатого до определенных давлений воздуха [1]. Существующие системы вибрационной диагностики, основанные на использовании индивидуальных алгоритмов для обнаружения каждого вида дефекта на начальной стадии его развития, позволяют проводить функциональную диагностику объектов в режиме номинальной работы компрессора. Это позволяет прогнозировать техническое состояние оборудования и не допустить отказ станции в критический момент.

Однако для этого необходимо разработать математическую модель пневмооборудования с учетом развития основных вероятных дефектов, что позволит в результате численных экспериментов выявить основные вибропризнаки неисправностей клапанов, а также алгоритмы обработки информации, снимаемой вибродатчиками, оценки спектров регистрируемых сигналов и принятие решения о состоянии диагностируемой системы по совокупности вибропризнаков дефектов.

1. Математическая модель компрессора

Для моделирования влияния степени развития дефектов клапанов всасывающей и нагнетательной магистралей разработана математическая модель компрессора с учетом развития дефектов клапанов.

При разработке модели компрессора АКДС рассмотрены основные функциональные элементы системы: поршень компрессора в цилиндре, совершающий движение под действием силы со стороны кривошипного механизма; всасывающий и нагнетательный клапаны компрессора, осуществляющие перемещение под действием силы, обусловленной разницей давлений в камере под поршнем и линией всасывания (нагнетания); объем камеры под поршнем, характеризующийся величиной давления.

Уравнение движения поршня (1) относительно координаты x составлено, исходя из баланса сил (компрессор находится в горизонтальном положении, проекция силы тяжести на ось x равна нулю). В основу уравнения (2) динамики $P_{кам}$ положено уравнение состояния для идеального газа при условии постоянной массы газа и изотермическом режиме [2]. Для обеспечения качественного соответствия реальным процессам использована упрощенная расчетная схема для самодействующих клапанов [3], в которой клапан заменяется условным отверстием без потерь на трение и теплообмен, и течение газа в клапане определяется площадями прохода $S_{кл1}$, $S_{кл2}$. Для каждого клапана введена новая система координат x_1 (x_2) для всасывающего (нагнетательного) клапана. Движение пластин клапанов массой $m_{кл1}$, $m_{кл2}$ под действием сил тяжести, вязкого трения, реакции пружины $\tilde{H}_{\dot{\theta}, \dot{\theta}^2}$ и инерции описывается уравнениями (3), (5). Изменение давления в камере за счет истечения через всасывающий и нагнетательный клапаны описывается уравнениями (4), (6), полученными с использованием уравнения состояния, зависимостью количества газа, проходящего через переменное сечение от скорости и площади отверстия $S_{сеч}^{(1)} = x_1 \pi D_{кл1}$, $S_{сеч}^{(2)} = x_2 \pi D_{кл2}$, где $D_{кл1}$, $D_{кл2}$ – диаметры всасывающего и нагнетательного клапанов соответственно.

$$\begin{cases}
m_n \frac{d^2 x}{dt^2} + \mu_{mp} m_n g \operatorname{sign}\left(\frac{dx}{dt}\right) + S_n P_{кам} = F_{вын}; & (1) \\
\frac{dP_{кам}}{dt} = \frac{P_{кам} + P_{сбр}^{[1]} - P_{сбр}^{[2]}}{(H_n + H_{мо} - x)} \frac{dx}{dt}; & (2) \\
0 \leq x \leq H_n; \\
m_{кл1} \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \tau_{кл1} \frac{dx_1}{dt} + c_{np,кл1} x_1 = S_{кл1} (P_{вс} - P_{кам}); & (3) \\
0 \leq x_1 \leq X_{кл1}; \\
\frac{dP_{сбр}^{[1]}}{dt} = \rho x_1 \pi D_{кл1} \frac{RT}{V^{[1]}} \sqrt{\frac{2|P_{вс} - P_{кам}|}{\xi^{[1]} \rho}} \operatorname{sign}(P_{вс} - P_{кам}); & (4) \\
m_{кл2} \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \tau_{кл2} \frac{dx_2}{dt} + c_{np,кл2} x_2 = S_{кл2} (P_{нагн} - P_{кам}); & (5) \\
0 \leq x_2 \leq X_{кл2}; \\
\frac{dP_{сбр}^{[2]}}{dt} = \rho x_2 \pi D_{кл2} \frac{RT}{V^{[2]}} \sqrt{\frac{2|P_{нагн} - P_{кам}|}{\xi^{[2]} \rho}} \operatorname{sign}(P_{нагн} - P_{кам}); & (6) \\
x(0) = x_0, \frac{dx}{dt}(t=0) = x_{v,0}, x_1(0) = x_{01}, \frac{dx_1}{dt}(t=0) = x_{v,01}, \\
x_2(0) = x_{02}, \frac{dx_2}{dt}(t=0) = x_{v,02}; \\
P_{кам}(0) = P_{кам0}, P_{сбр}^{[1]}(0) = P_{сбр0}^{[1]}, P_{сбр}^{[2]}(0) = P_{сбр0}^{[2]}.
\end{cases}$$

где x – координата, t – время, m_n – масса поршня, S_n – площадь торцевой поверхности

поршня, $\operatorname{sign}\left(\frac{dx}{dt}\right) = \begin{cases} 1, \text{при } \frac{dx}{dt} > 0 \\ -1, \text{при } \frac{dx}{dt} \leq 0 \end{cases}$, μ_{mp} – коэффициент трения, $F_{вын}$ – сила, действующая со

стороны кривошипно-шатунного механизма, $P_{кам}$ – давление воздуха в камере под поршнем, H_n – ход поршня, $H_{мо}$ – перемещение по x , соответствующее величине «мёртвого» объема камеры, $P_{сбр}^{[1]}, P_{сбр}^{[2]}$ – потеря давления за счет истечения воздуха через отверстие всасывающего и нагнетательного клапанов, $\tau_{кл1}, \tau_{кл2}$ – коэффициент демпфирования клапана, зависит от конструкции клапана, вязкости и плотности газа, омывающего пластину, ρ – плотность газа, $\xi^{[1]}, \xi^{[2]}$ – коэффициент гидравлического сопротивления клапанов, $X_{кл2}, X_{кл1}$ – максимальный ход клапанов.

2. Численный эксперимент

Математическая модель реализована в среде имитационного моделирования MathWorks Simulink™. Проведение численного эксперимента включало в себя следующие этапы:

1. Запуск процесса имитационного моделирования и регистрация сигналов амплитуды давления, скорости его изменения и соответствующего ускорения.
2. Запись полученных массивов амплитуд, скоростей и ускорений в качестве эталонного сигнала, соответствующего режиму работы исправного компрессора в базу данных (БД) вибросигналов.

3. Имитация дефекта клапана путем изменения соответствующего параметра математической модели и запуск процесса имитационного моделирования.
4. Расчет спектров вибросигналов из БД сигналов для каждой имитации дефектов. Формирование БД спектров вибросигналов.
5. Графическое и параметрическое представление полученных спектров и оценка значимости различий в спектрах вследствие развития дефекта клапана.
6. Принятие решения о возможности диагностирования дефекта по выбранному вибропризнаку в спектре анализируемого сигнала.

В качестве средства построения спектра сигнала амплитуды, виброскорости и виброускорения давления в камере под поршнем компрессора использовался алгоритм MUSIC (MUltiple SIgnal Classification), предназначенный для спектрального анализа сигналов, представляющих собой сумму нескольких синусоид (в общем случае – нескольких комплексных экспонент) с белым шумом [4]. В основе метода лежит анализ собственных чисел и собственных векторов корреляционной матрицы сигнала.

Основным преимуществом данного алгоритма спектрального анализа является возможность не только расчёта спектра как такового, но и определение частот и уровней (амплитуд и мощностей) гармонических составляющих. Получаемая с его помощью зависимость уровня сигнала от частоты называется псевдоспектром (pseudo spectrum). Кроме того, настройка параметров алгоритма MUSIC позволяет использовать его как фильтр и регулировать его чувствительность к составляющим сигнал гармоникам, определяемую порядком спектрального преобразования.

В ходе численного эксперимента осуществлялся поиск параметров алгоритма спектрального анализа MUSIC, позволяющих идентифицировать имитируемую с помощью математической модели неисправность клапана всасывающей или нагнетательной магистрали. Для расчета псевдоспектра использовалась функция `pmusic()`, а для расчета частот и мощностей гармоник в спектре – функция `rootmusic()` библиотеки библиотеки Signal Processing Toolbox пакета MathWorks Matlab™ [5].

3. Результаты

Проведенные исследования показали возможность оценки степени развития ряда дефектов клапанов компрессора АКДС по параметрам псевдоспектра, полученного методом MUSIC. В качестве основных параметров, которые связаны с дефектами клапанов вследствие их износа или поломки использованы жесткость пружины клапана, площадь проходного сечения, время срабатывания и масса клапана.

Установлено, что понижение порядка преобразования (уменьшение количества аппроксимирующих гармоник) до $10 \div 20$ позволяет избавиться от составляющих спектра, соответствующих высокочастотным шумам в сигнале. Кроме того, для рассматриваемых имитаций дефектов наиболее чувствительными оказались параметры спектров виброскорости давления под поршнем (рис. 1).

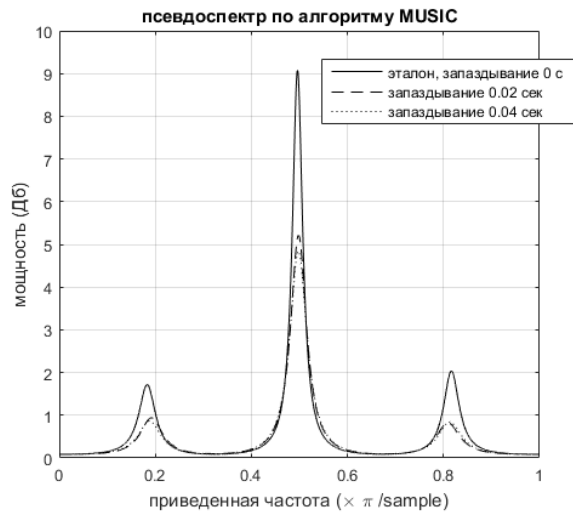


Рис.1. Псевдоспектр виброскорости давления под поршнем компрессора полученный по алгоритму MUSIC

Литература

1. Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. Том 1. Теория и расчет, М.: "Колосс", 2006.
2. Григорьев В.А. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника. Справочник. 2-е изд. / В.А. Григорьев, В.М. Зорин // М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Кондратьев Т.Ф. Клапаны поршневых компрессоров / Т.Ф. Кондратьев, В.П. Исаков // Л.: Машиностроение, 1983.
4. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: уч. Для вузов. 2-е изд. СПб.: Питер, 2007.
5. MathWorks (официальный сайт). [Электронный ресурс] - <http://matlab.ru/> Дата обращения 02.03.2016 г.