

РЕАЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО КВАДРАТИЧНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА

Воронцов А.Г., Дегтяренко И.В.

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк,
кафедра автоматики и телекоммуникаций

E-mail: div@fcita.dn.ua

Abstract

Vorontsov A., Degtyarenko I. Implementation of time-frequency quadratic detector for the piston compressor technical condition monitoring. Algorithm of time-frequency quadratic detector implementation for the piston compressor technical condition control are described. New method for the synthesizing synchrosignal is developed. This method allow turn out phase detecting channel from the piston compressor vibroacoustical control system. Technical condition making decision algorithms for the small refrigerant piston compressor is proposed.

Задача контроля технического состояния поршневых компрессоров по параметрам вибрации является на данный момент наиболее сложной и трудоемкой. Это, прежде всего, связано со сложным нестационарным характером процессов происходящих в поршневых компрессорах, обусловленных наличием множества источников возбуждения колебаний и сложностью конструкции машин.

Классические методы анализа стационарных сигналов и, в частности, методы оценивания энергетических характеристик (мощности, СКЗ) вибросигналов во времени и методы спектрального анализа, не приспособлены для исследования вибрации поршневых компрессоров. При их использовании теряется информация либо о частотном составе сигнала (метод анализа изменения мощности сигнала во времени), либо о моменте времени возникновения того или иного импульса (метод спектрального анализа).

В качестве информационных признаков о техническом состоянии поршневых компрессоров и машин возвратно-поступательного действия целесообразно использовать данные о моменте появления выброса вибросигнала, превышающего нормальный уровень, с «привязкой» к фазе рабочего цикла машины, а также данные спектральном составе этого выброса [1]. Эти данные позволяют однозначно идентифицировать состояние определенного элемента контролируемого агрегата.

Одним из методов контроля технического состояния реализующих комплексный анализ вибросигналов в частотной и временной области является метод частотно-временных квадратичных детекторов [2]. Он основывается на анализе частотно-временных распределений (ЧВР) вибросигналов [3]. Структура системы реализующей данный метод представлена на рисунке 1.

Реализация метода частотно-временных квадратичных детекторов требует привязки ЧВР вибросигналов к фазе работы машины. Для получения синхросигнала $\varphi(t)$ можно использовать сигнал с датчика тока в случае, если приводом агрегата является синхронный электродвигатель, либо сигнал с датчика поворота вала, записываемые синхронно с вибросигналом. Однако зачастую привод поршневых компрессоров осуществляется от асинхронного двигателя, а установка датчика поворота вала трудно осуществима из-за того, что машина имеет герметичный корпус. Примерами таких машин могут служить малые поршневые холодильные компрессоры.

В связи с этим для решения проблемы получения синхросигнала предлагается использовать детектирование частотной компоненты вибросигнала, которую можно точно привязать к фазе работы машины (например, начало выпуска рабочего тела).

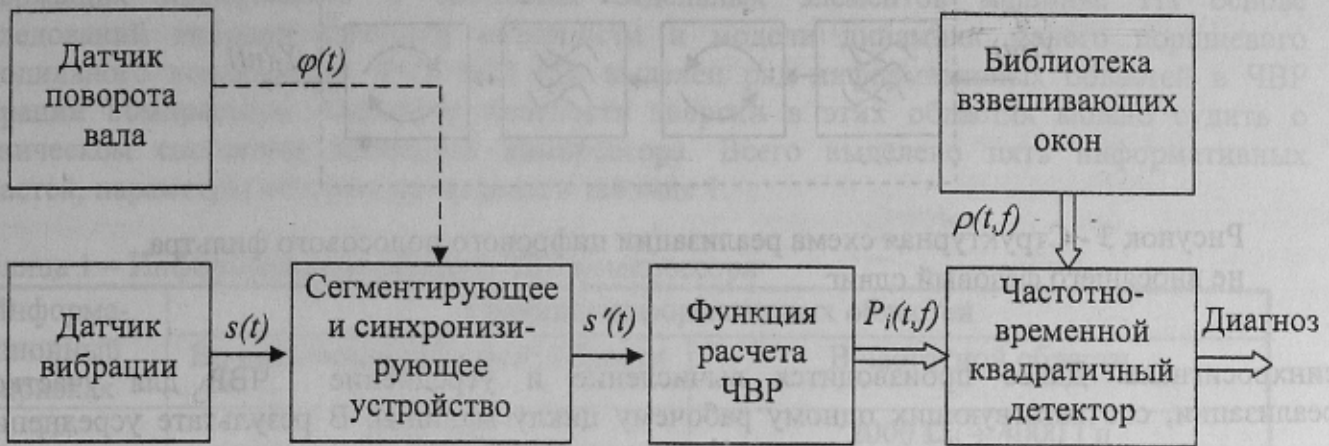


Рисунок 1 - Система виброакустической диагностики МВПД на основе частотно-временного квадратичного детектора

Структурная схема формирователя синхросигнала приведена на рисунке 2. В состав формирователя входят детектор огибающей (полосовой фильтр 1, амплитудный детектор 2, фильтр низких частот 3), настроенный на соответствующую частоту и длительность, дифференциатор 4 и пороговое устройство 5.

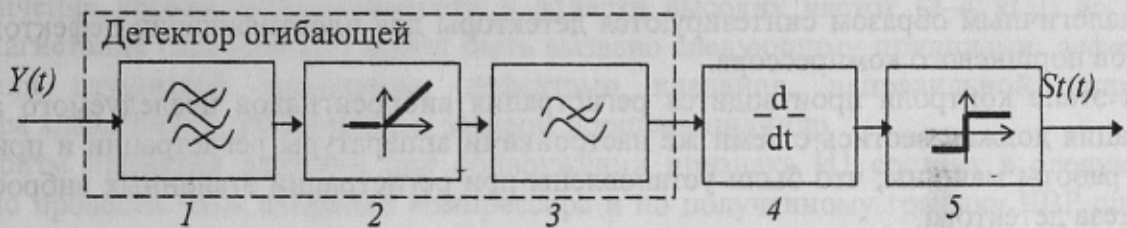


Рисунок 2 - Структурная схема формирователя синхросигнала

Динамические элементы формирователя синхросигнала не должны вносить фазовый сдвиг в результирующий сигнал. Для исключения влияния фазового сдвига, вносимого цифровыми фильтрами, применяется следующий прием: после обработки сигнала фильтром полученные выходные данные, взятые в обратном направлении, пропускаются через тот же фильтр. На рисунке 3 показана структурная схема реализации цифрового полосового фильтра, не вносящего фазовый сдвиг в результирующий сигнал. Фазовые сдвиги, внесенные фильтром при прямом прохождении сигнала, полностью компенсируются фазовыми сдвигами при прохождении в обратном направлении [4].

Дифференциатор 4 введен в схему формирователя синхросигнала для увеличения крутизны фронтов сигнала огибающей, используемого для формирования синхросигнала.

После решения задачи привязки частотно-временного распределения к фазе работы компрессора над ЧВР можно проводить операции усреднения (для повышения соотношения сигнал-шум) и синтезировать частотно-временные квадратичные детекторы для формирования диагноза о состоянии поршневого компрессора [2].

Алгоритм формирования диагноза включает в себя два этапа (предварительный этап и этап контроля). В течении предварительного этапа производится синтез частотно-временных квадратичных детекторов на основе заведомо известных данных о состоянии элементов машины [2]. Сначала производится регистрация вибросигнала при нормальном состоянии (H_0) элемента машины, для контроля которого синтезируется детектор. Данная реализация привязывается к рабочему циклу машины с помощью описанного выше формирователя

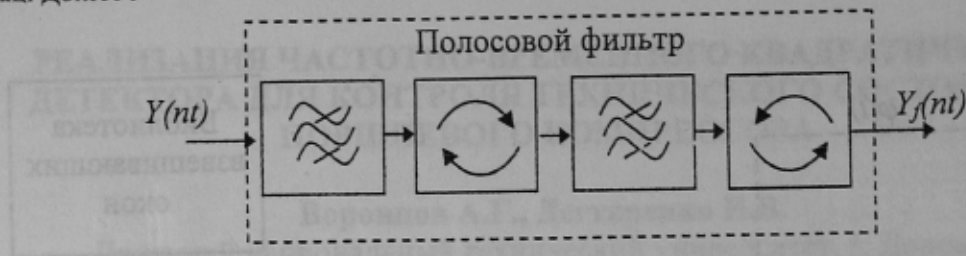


Рисунок 3 - Структурная схема реализации цифрового полосового фильтра, не вносящего фазовый сдвиг

синхросигнала. Далее производится вычисление и усреднение ЧВР для участков реализации, соответствующих одному рабочему циклу машины. В результате усреднений находится эталонное ЧВР $\bar{P}_0(t, f)$ для нормального состояния контролируемого элемента.

Такие же действия производятся для получения эталонного ЧВР $\bar{P}_1(t, f)$ в случае отказа (H_1) контролируемого элемента.

На основе полученных эталонных ЧВР по формуле (1) вычисляется взвешивающее окно (ядро) квадратичного детектора $\rho(t, f)$.

$$\rho(t, f) = \bar{P}_1(t, f) - \bar{P}_0(t, f). \quad (1)$$

Аналогичным образом синтезируются детекторы для идентификации дефектов других элементов поршневого компрессора.

На этапе контроля производится регистрация вибросигналов исследуемого агрегата. Регистрация должна вестись с теми же настройками аппаратуры регистрации и при том же режиме работы машины, что были установлены при регистрации эталонных вибросигналов для синтеза детектора.

В блоке сегментирования и синхронизации осуществляется выделение фрагмента реализации вибросигнала, соответствующего по длине одному циклу работы машины. Далее вычисляет ЧВР для этого фрагмента вибросигнала. Наиболее эффективным с точки зрения минимизации интерференционных компонент является ЧВР Цзюя-Вильямса [3].

После расчета ЧВР по формуле 2 вычисляется квадратичная статистика $\Lambda^k(r)$.

$$\Lambda(r) = \iint_{D_k} \rho(t, f) P_r(t, f) dt df, \quad (2)$$

где D_k – частотно-временная область, содержащая компоненты сигнала связанные с техническим состоянием контролируемого элемента машины (информативная область).

После сравнения квадратичной статистики с порогом η принимается гипотеза о наличии (H_1) или отсутствии (H_0) дефектов контролируемого элемента машины (формула 3).

$$\begin{aligned} H_0 &: \Lambda(r) < \eta, \\ H_1 &: \Lambda(r) \geq \eta, \end{aligned} \quad (3)$$

На основе принятых гипотез о состоянии элементов поршневого компрессора формируется диагноз его технического состояния.

Для реализации контроля технического состояния поршневого компрессора с использованием частотно-временных квадратичных детекторов необходимо производить предварительную селекцию частотных диапазонов и временных интервалов вибросигналов

содержащих информацию о состоянии отдельных элементов машины. На основе исследований виброакустической активности и модели динамики малого поршневого холодильного компрессора ХКВ 6.23 [5], выделен ряд информативных областей в ЧВР вибрации компрессора. Оценивая плотность энергии в этих областях можно судить о техническом состоянии элементов компрессора. Всего выделено пять информативных областей, параметры которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Информативные области ЧВР компрессора

Информационный признак	Границы информативных областей	
	Во временной (фазовой) области	В частотной области
И1	$-290^{\circ} \div 0^{\circ}$	2000 Гц ÷ 4000 Гц
И2	$-320^{\circ} \div 50^{\circ}$	7500 Гц ÷ 8500 Гц
И3	$-180^{\circ} \div 180^{\circ}$	< 1000 Гц
И4	$90^{\circ} \div 100^{\circ}$	5 Гц ÷ 20000 Гц
И5	$5^{\circ} \div 15^{\circ}$ и $-180^{\circ} \div -190^{\circ}$	5 Гц ÷ 20000 Гц

Границы во временной (фазовой) области даны в значениях угла поворота кривошипа компрессора, при этом начало отсчета соответствует моменту прохождения кривошипа через нижнюю мертвую точку [5].

Увеличение уровня виброактивности в области высоких частот (2–4 кГц) во время процесса нагнетания (признак И1) может быть вызвано следующими причинами: дефектами изготовления глушителя нагнетания, дефектами клапанов, неправильной заправкой компрессора хладагентом, увеличенным зазором поршень-цилиндр.

Алгоритм принятия решений при обнаружении признака И1 состоит в следующем: необходимо провести ЧВА вибрации компрессора и по полученному графику ЧВР оценить длительность процесса нагнетания. Если длительность процесса нагнетания находится в пределах нормы, то это означает, что причиной повышенной виброакустической активности компрессора является дефект глушителя нагнетания, вызвавший подъем его частотной характеристики.

Если длительность процесса нагнетания имеет отклонения, то проверяется - присутствует ли признак И4, указывающий на наличие удара в сопряжении поршень-цилиндр (подробнее этот признак описан ниже). Если признак И4 присутствует, то делается вывод о том, что причиной появления признака И1 является увеличенный зазор в сопряжении поршень-цилиндр. Иначе по ЧВР вибрации компрессора анализируется временная (фазовая) область, предшествующая моменту открытия нагнетательного клапана. Если в этой области наблюдаются колебательные процессы, то принимается гипотеза о том, что причиной возникновения признака И1 является дефект нагнетательного клапана (его недостаточная герметичность). Иначе принимается гипотеза о том, что причиной является отклонения в качестве (повышенное содержание воды, низкая плотность) или количестве (недостаток или избыток) заправленного в компрессор хладагента.

Появление информативного признака И2 однозначно соответствует дефекту змеевика нагнетания компрессора.

Увеличение уровня виброактивности компрессора в низкочастотной области (признак И3) может быть вызвано следующими причинами: небалансом вращающихся элементов компрессора, дефектом подвески компрессора, дефектами клапанов, отклонениями в параметрах заправки компрессора хладагентом, увеличенным зазором в сопряжении поршень-цилиндр.

Для выяснения причины появления данного признака может быть произведен съем и оценка спектрального состава тока, потребляемого приводом компрессора. Далее

анализируется уровень четных гармоник в полученном спектре. Уровень четных гармоник в спектре тока зависит от величины газовой силы. На газовую силу оказывают влияние следующие факторы: состояние клапанов, заправка компрессора хладагентом, состояние зазора поршень-цилиндр. Т.е. при обнаружении отклонений в уровне четных гармоник спектра тока проводится анализ, аналогичный обнаружению признака И1.

Если уровни четных гармоник спектра тока имеют нормальный уровень, то может быть произведена оценка демпфирующих свойств подвески компрессора. В случае если отклонений в характеристиках подвески не обнаружено, то причиной признака И3 признается небаланс вращающихся деталей компрессора.

Признак И4 соответствует наличию повышенной виброактивности компрессора в момент перекладки в сопряжении поршень-цилиндр ($90-100^\circ$). Он может быть вызван двумя причинами: увеличенным зазором в сопряжении поршень-цилиндр или плохой смазкой механических сопряжений. Алгоритм принятия решения в случае выявления этого признака состоит в следующем: вначале производится построение ЧВР вибрации машины, по которой анализируется наличие повышенной виброактивности при перекладках в других механических сопряжениях компрессора. Если она наблюдается, то делается вывод о том, что причиной признака И4 является недостаточное количество или плохое качество смазки компрессора, и принимается решение по управлению процессом заправки компрессора маслом. Иначе причиной повышенной виброактивности признается увеличенный зазор в сопряжении поршень-цилиндр и принимается решение по управлению процессами сборки данного сопряжения.

Аналогичным образом происходит принятие решений при обнаружении признака И5, соответствующего повышенной виброактивности при перекладках в сопряжениях кривошип-ползун и ползун-кулиса. Удары при перекладках в этих сопряжениях наблюдаются на очень близких фазах, поэтому разделение этих ударов с помощью частотно-временных квадратичных детекторов не будет обладать достаточной достоверностью. Это можно произвести только путем «тонкого» анализа временной структуры ЧВР вибрации компрессора. На ЧВР наблюдаются два близких по фазе импульса, первый из которых обусловлен ударом при перекладке в сопряжении кривошип-ползун, а второй – в сопряжении ползун-кулиса.

Приведенные выше алгоритмы принятия решения о техническом состоянии малого поршневого холодильного компрессора не претендуют на полноту описания всех возможных дефектов контролируемого агрегата. Они описывают лишь наиболее вероятные ситуации. В ходе эксплуатации системы контроля указанные алгоритмы могут дополняться и корректироваться по мере накопления опыта.

На основе приведенных выше алгоритмов принятия решений была построена дискретная ситуационная сеть управления технологическим комплексом производства малых поршневых холодильных компрессоров [6].

Основные трудности реализации метода частотно-временных квадратичных детекторов связаны с необходимостью создания сложных алгоритмов обработки больших объемов данных. Это определяет необходимость в значительных вычислительных ресурсах и не затрудняет использование данного метода в системах реального времени. Кроме того, объем вычислений при увеличении количества отсчетов в обрабатываемом сегменте сигнала быстро растет, что затрудняет проведение статистической обработки ЧВР сегментов сигналов дающей возможность анализировать тонкую структуру вибросигналов. Таким образом, существует необходимость в доработке данного метода в плане уменьшения объема обрабатываемых данных и упрощения операций обработки при проведении ЧВА вибросигналов.

Выводы.

Описан алгоритм реализации метода частотно-временных квадратичных детекторов применительно к контролю технического состояния поршневых компрессоров. Данный алгоритм может быть применен для контроля технического состояния и других классов машин возвратно-поступательного действия.

Предложен способ формирования синхросигналов, который позволяет исключить из системы контроля технического состояния канал регистрации фазы рабочего цикла поршневого компрессора. Использование данного способа необходимо при построении систем контроля технического состояния герметичных машин возвратно-поступательного действия, и в частности, малых поршневых холодильных компрессоров.

Описаны алгоритмы принятия решений о техническом состоянии малого поршневого холодильного компрессора ХКВ 6.23. Данные алгоритмы подразумевают использование частотно-временных квадратичных детекторов для обнаружения информационных признаков о техническом состоянии элементов поршневого компрессора.

Показана необходимость в доработке метода частотно-временных квадратичных детекторов в плане уменьшение объема обрабатываемых данных и упрощения операций обработки при проведении ЧВА вибросигналов.

Литература

1. Дегтяренко И.В. Об использовании частотно-временного анализа виброакустических сигналов при построении систем оценки технического состояния машин возвратно-поступательного действия// Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 12. - Донецьк: ДонДТУ. -1999. - С. 47-53.

2. Воронцов О.Г., Дегтяренко И.В. Застосування частотно-часового квадратичного детектора для контролю технічного стану машин зворотно-поступальної дії// Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 25. - Донецьк: ДонДТУ.- 2001. - С. 135-140.

3. Коэн Л. Время-частотные распределения: Обзор// ТИИЭР. - 1989. - Т. 77, №10. - С. 72-120.

4. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры: Пер. с англ./Под ред. А.М. Трахтмана. - М.: Сов. Радио, 1980. - 244 с.

5. Воронцов А.Г., Дегтяренко И.В. Математическая модель малого поршневого компрессора// Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 3: - Донецьк: ДонДТУ, - 1999. - С 32-39.

6. Воронцов А.Г, Дегтяренко И.В. Ситуационное управление производством малошумящих холодильных компрессоров // Матеріали Міжнародної конференції з управління "Автоматика - 2002". - Донецьк, 2002. - Т.1. - С. 33-35.