

А. В. Андрианов, И. В. Фаляхов, Э. В. Сусликов,
А. Ю. Кирсанов, Ю. К. Евдокимов

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНЫМ ПОДВЕСОМ СТЕНДА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Ключевые слова: магнитный подшипник, автоматизированная система управления, рекурсивный фильтр, LabVIEW, Compact RIO.

В работе рассмотрен стенд газодинамических испытаний на магнитных подвесах, проведен анализ структуры контура управления положением вала роторного компрессора. С учетом динамических свойств ротора сформулированы требования к частотной характеристике регулятора. Показан опыт использования системы реконфигурируемого ввода-вывода для реализации регулятора в цифровом виде.

Key words: magnetic bearing, automated control system, recursive filter, LabVIEW, Compact RIO.

The article describes the construction of the gas-dynamics test stand with magnetic bearings. The structure of the control feedback system of rotor position was analyzed. Dynamical features of the rotor were taken under consideration during preparation of rotor frequency domain characteristic. The reconfigurable input-output system was used for realizing of digital controller. Working experience of using the system was presented.

Введение

Магнитные подшипники (подвесы) являются надежной и перспективной альтернативой традиционным подшипникам качения и скольжения, используемым в качестве опорных узлов роторных механизмов. При использовании магнитных подвесов отпадает необходимость в масляной системе, необходимой для смазки и охлаждения традиционных подшипников в процессе работы. В результате повышается надежность роторной установки (до 30% неисправностей приходится именно на систему маслоснабжения), достигается чистота технологического процесса (магнитные подшипники являются безмаслянными, «сухими»).

Работа посвящена созданию автоматизированной цифровой системы управления магнитным подвесом вала стенда газодинамических испытаний (ГДИ) малорасходных ступеней центробежного компрессора на основе применения микропроцессорного комплекта «CompactRIO» [1] фирмы National Instruments.

Используемое оборудование и программное обеспечение

Для создания программного обеспечения системы управления была выбрана среда программирования LabVIEW 2009 [2] с модулями Real Time и FPGA. Для реализации регулятора была использована платформа NI cRIO 9116 с контроллером реального времени NI cRIO 9004. Указанная платформа является реконфигурируемой многоканальной системой измерения и генерации аналоговых и цифровых сигналов, построенной на базе ПЛИС [3].

Описание решения

Внешний вид стенда ГДИ показан на рис. 1.

Структурная схема одного канала управления показана на рис. 2. Система имеет пять независимых каналов управления: 4 радиальных (по два с каждой стороны вала); один – осевой. Отклонение положения вала от центральной оси фиксируется индуктивными датчиками (на каждый канал управления используется отдельный датчик). При работе стенда на выходе блока формирования сигнала (БФС) формируются сигналы отклонения вала от центрального положения. Информационными параметрами сигналов являются амплитуды и

множество гармонических частот, связанных со скоростью вращения вала, конструктивными особенностями ротора, а также с параметрами настройки магнитного подвеса.

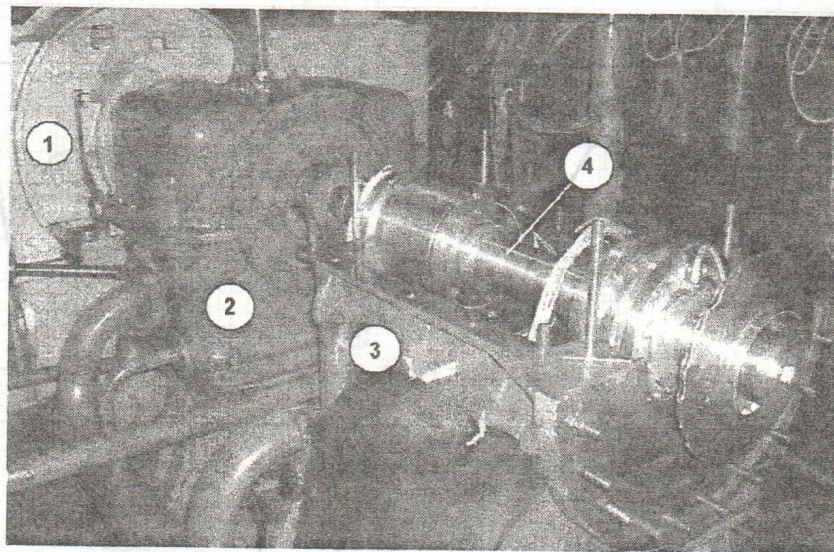


Рис. 1 – Стенд ГДИ: 1 – привод; 2 – муфта; 3 – корпус стенда (в разобранном виде); 4 – вал

Изменение силы тока в обмотках электромагнитов достигается за счет изменения скважности импульсов широтно-импульсного модулятора (ШИМ-сигналов), подаваемых на обмотки с усилителей мощности.

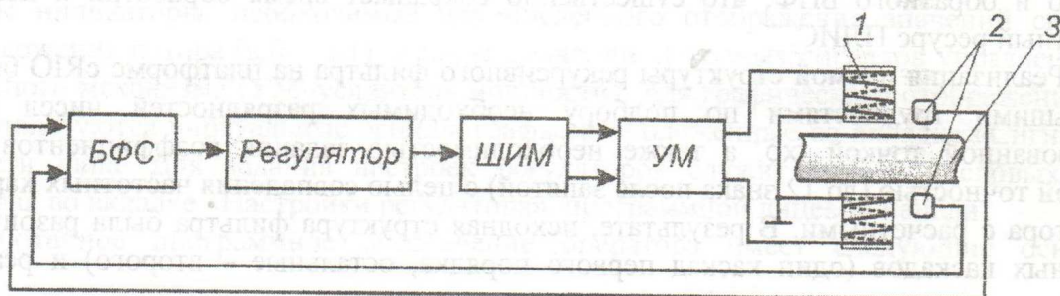


Рис. 2 – Структурная схема одного канала управления: БФС – блок формирования сигнала; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; УМ – усилитель мощности; 1 – электромагнит; 2 – датчики положения; 3 – ротор

Ротор, как объект системы магнитного подвеса, является структурно-неустойчивым [4], что требует введения в контуры управления каждого из каналов звеньев динамической коррекции. Задачу обеспечения стабилизации положения ротора в системе магнитного подвеса осуществляет регулятор, реализованный на базе контроллера Compact RIO.

В работе системы магнитного подвеса можно условно выделить два режима – статический (ротор стенда не вращается) и динамический (разгон или останов ротора). Особенность динамического режима обусловлена наличием резонансных (критических) частот, вызывающих определенные формы колебаний ротора. Расчетные значения критических частот стенда ГДИ: 1) 30,7 Гц (1843 об/мин) – параллельная форма; 2) 31,8 Гц (1800 об/мин) – коническая форма; 3) 263,5 Гц (15810 об/мин) – первая изгибная форма; 4) 656,5 Гц (39391 об/мин) – вторая изгибная форма.

С учетом динамических свойств ротора, для обеспечения его взвешивания в статическом и надежного удержания в динамическом режиме, регулятор должен иметь набор фильтров, обеспечивающих устойчивость и демпфирование указанных критических частот.

На рис. 3 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и ФЧХ регулятора с одним полосовым фильтром, реализующего вариант устойчивой стабилизации ротора стенда.

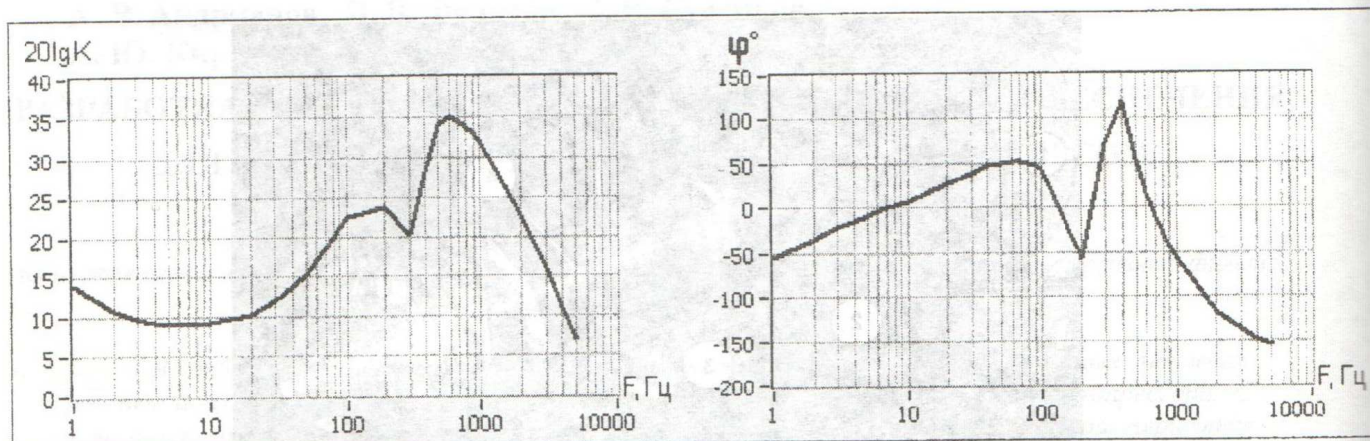


Рис. 3 – Частотные характеристики регулятора

Один из вариантов передаточной функции фильтра имеет вид

$$W(p) = \frac{27}{p} \cdot \frac{(0,1p + 1)(0,005p + 1)(0,0025p + 1)}{(0,00025p + 1)^4} \cdot \frac{(1570^{-2}p + 1)}{(1570^{-2}p + 0,0025p + 1)} \quad ((1))$$

При выполнении билинейного z -преобразования передаточная функция (1) может быть реализована по схеме рекурсивного фильтра [5]. В этом случае вся обработка входных сигналов осуществляется во временной области, отпадает необходимость в вычислении прямого и обратного БПФ, что существенно сокращает время обработки и используемый аппаратный ресурс ПЛИС.

Реализация прямой структуры рекурсивного фильтра на платформе cRIO была связана с большими трудностями по подбору необходимых разрядностей чисел формата с фиксированной точкой fxp , а также необходимостью задания коэффициентов фильтра с большой точностью (до 12 знака после запятой) с целью совпадения частотных характеристик регулятора с расчетными. В результате, исходная структура фильтра была разбита на шесть отдельных каскадов (один каскад первого порядка, остальные – второго) и реализована в последовательном виде.

Реализация и отладка регулятора осуществлялась на двух платформах NI cRIO-9104 и NI cRIO-9116. В обоих случаях использовался контроллер NI cRIO-9004. Для cRIO-9104, из-за недостаточного количества логических элементов матрицы ПЛИС (14336 элементов), для пяти каналов управления удалось реализовать только первые четыре каскада схемы, показанной на рис. 4. Однако из-за большего, по сравнению с cRIO-9116, количества умножителей (на cRIO-9104 количество умножителей составляет 96, на cRIO-9116 – 48) удавалось обеспечить обработку чисел в большем диапазоне и с большей точностью. Это делало фильтр применимым для большего числа комбинаций задаваемых коэффициентов, однако, из-за меньшего числа реализованных каскадов, не обеспечивало устойчивость вала компрессора в динамическом режиме. Платформа NI cRIO-9116 по количеству использованных логических элементов позволила с большим запасом реализовать необходимую структуру фильтра для всех каналов управления, но с меньшим запасом по точности (из-за нехватки умножителей) обрабатываемых данных.

При использовании фильтра с показанной структурой, задержка управления составила 25 мкс, что обеспечивает 20-кратный запас по частоте управления (максимальная частота сигнала датчиков не превышает 2 кГц).

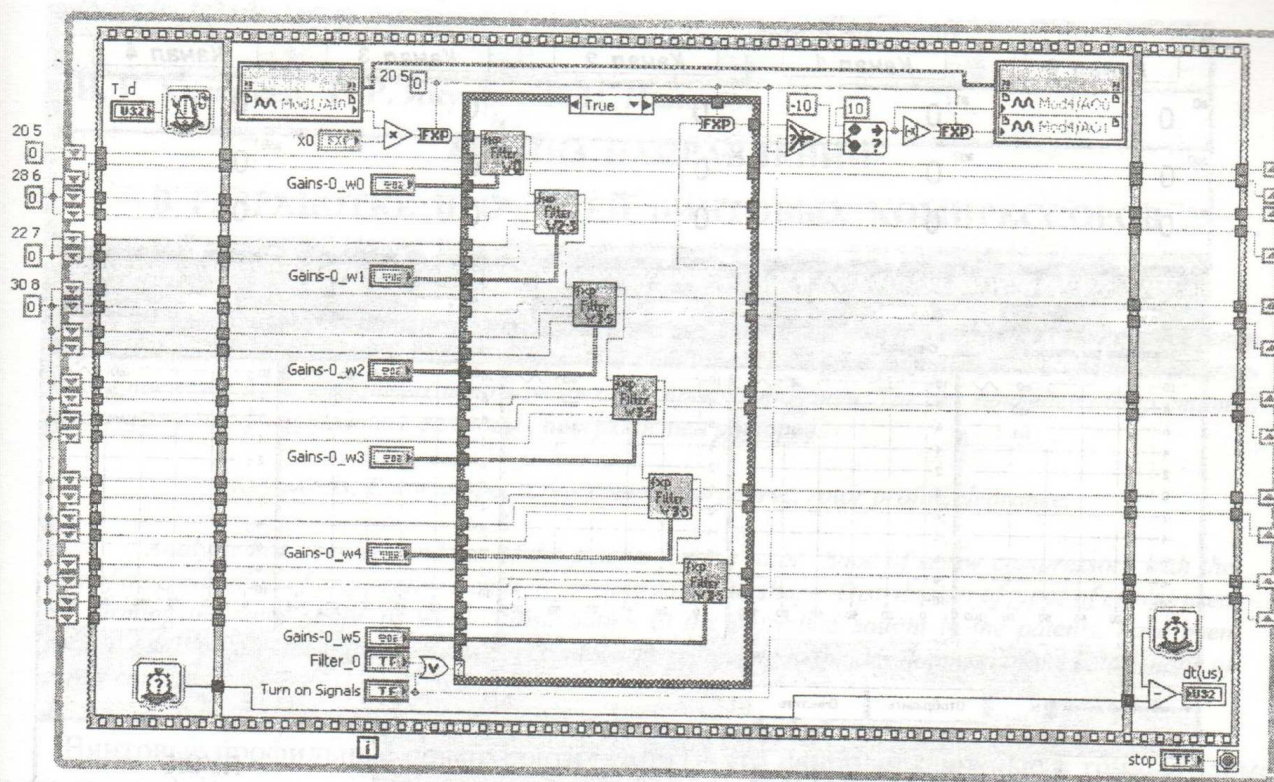


Рис. 4 – Структурная схема регулятора для одного канала управления, реализованная на платформе cRIO

Программная лицевая панель оператора показана на рис. 5. В верхней части окна расположены индикаторы, необходимые для численного отображения значений сигналов датчиков положения ротора ($ai0 - ai1$), а также значений выходных сигналов управления для исполнительного механизма (УМ–усилитель мощности). Для графического отображения этих сигналов используются виртуальные осциллографы, расположенные во вкладке «Сигналы» в средней части окна. Для задания настроек регуляторов служит группа числовых окон, расположенная во вкладке «Настройки регулятора», программной лицевой панели.

Разработанное программное обеспечение оператора имеет следующие основные функции:

- 1) коррекция введенных коэффициентов настроек регуляторов для каждого канала в отдельности;
- 2) задание новых коэффициентов (с клавиатуры либо чтением из файла);
- 3) отображение сигналов датчиков и управляющих воздействий;
- 4) отключение регуляторов (прямое прохождение сигналов датчиков – требуется в процессе отладки);
- 5) полное выключение регуляторов (подача нулевого напряжения на выход – необходимо для настройки силовой части системы управления).

Созданная автоматизированная система управления на основе цифрового регулятора с платформой cRIO успешно заменила аналоговый регулятор. Это позволяет реализовать более сложную передаточную функцию регулятора, обеспечить удобство и оперативность задания его настроек и в итоге повысить качество регулирования и устойчивость системы управления.

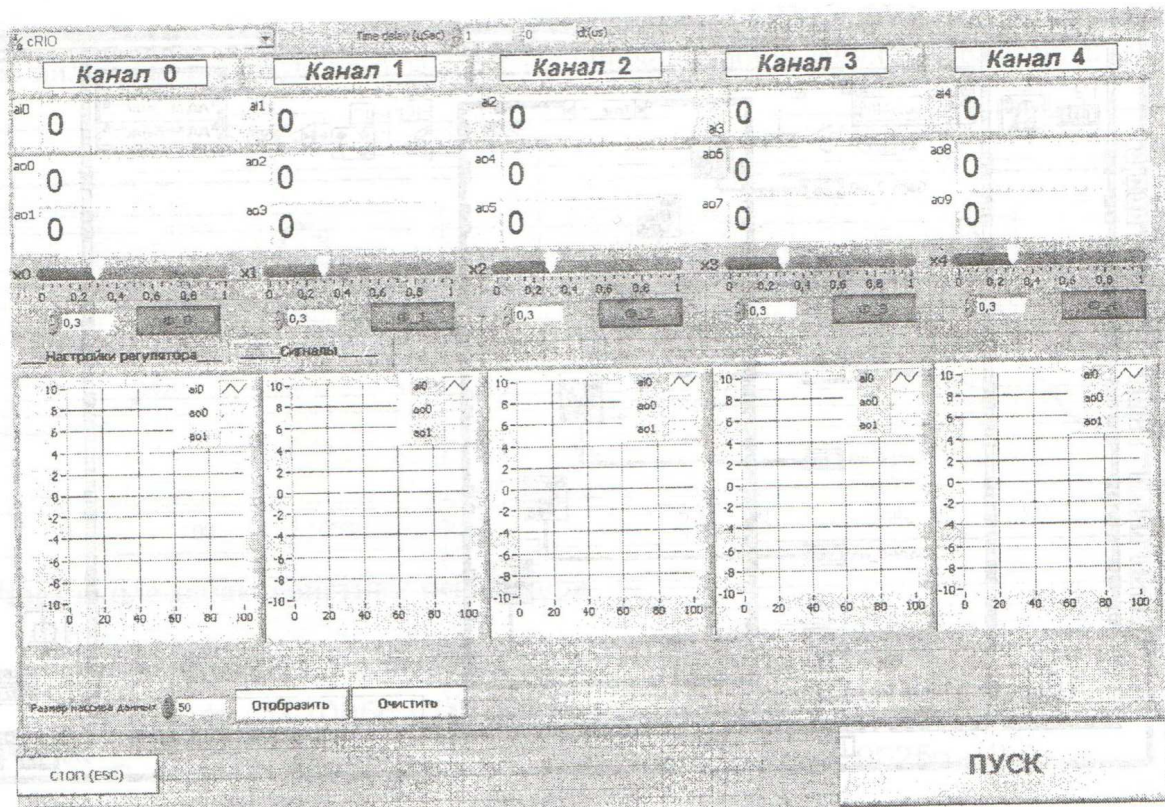


Рис. 5 – Программная лицевая панель оператора системы управления магнитным подвесом

Заключение

В результате проделанных работ создана программа для микропроцессорного модуля системы магнитного подвеса стенда ГДИ. Проведены пробные пуски стенда ГДИ, которые показали работоспособность программного комплекса. В дальнейшем планируется улучшение динамических свойств и быстродействия регулятора за счет использования датчика скорости вращения вала компрессора.

Литература

1. <http://www.ni.com/compactrio/> – раздел на сайте National Instruments
2. Евдокимов, Ю.К. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW/ Ю.К. Евдокимов, В.Р. Линдваль, Г.И. Щербаков. – М.: ДМК, 2007. – 400 с.
3. Баран, Е.Д. LabVIEW FPGA. Реконфигурируемые измерительные и управляющие системы // Е.Д. Баран. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 448 с.
4. Журавлев, Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение / Ю.Н. Журавлев. – СПб. Политехника, 2003. – 206 с.
5. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. / У. Титце, Ю. Шенк. – М.: Мир. – 1982. – 512 с.
6. Сайфетдинов, А.Г. Методика экспериментального исследования процессов в рабочей камере роторного компрессора внутреннего сжатия / А.Г. Сайфетдинов, А.Ю. Кирсанов, М.С. Хамидуллин, И.Г. Хисамеев // Вестник Казан. техн. ун-та. – 2010. - №9. – С. 157-164.

© А. В. Андрианов - канд. техн. наук, вед. науч. сотр., нач. отдела ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», niitk@kazan.ru; И. В. Фалыхов - вед. инж. ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», niitk@kazan.ru; Э. В. Сусликов - вед. инж.-конструктор ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа»; А. Ю. Кирсанов - канд. техн. наук, доц. каф. холодильной техники и технологии КНИТУ, akirsanov@list.ru; Ю. К. Евдокимов - д-р техн. наук, проф., зав. каф. радиоэлектроники и информационно-измерительной техники, КНИТУ им. А.Н. Туполева, evdokimov1@mail.ru.