

МЕХАНИКА

УДК 621.81

ЦИФРОВАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОДВЕСОМ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ АЭС С ГАЗОВЫМ РЕАКТОРОМ

© 2008 г.

В.С. Востоков, И.В. Друмов, Ю.А. Колесова, С.А. Малкин

ФНПЦ «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова»,
Нижний Новгород

gorbunov@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию 24.04.2008

Обсуждаются результаты создания релейной системы управления электромагнитным подвесом ротора турбомашин для АЭС с газовым реактором

Ключевые слова: АЭС, турбогенератор, газовый реактор.

Введение

В ФГУП ОКБМ производилась разработка цифровой нелинейной системы управления электромагнитным подвесом ротора турбогенератора для АЭС с газовым реактором. В настоящее время такая система нами сконструирована и успешно используется при проведении экспериментов на стендах.

Традиционно система управления (СУ) электромагнитным (ЭМ) подвесом создавалась для линеаризованной системы. Линеаризация достигается путем введения токов начального подмагничивания в обмотки диаметрально расположенных полюсов ЭМ.

На данный момент аналитическими методами доказана устойчивость нелинейной системы ротора на двух радиальных и одном осевом ЭМ подшипниках [1–4]. Более того, известны работы [5, 6], обосновывающие возможность создания робастных систем управления, малочувствительных к изменениям параметров системы.

Альтернативных решений ЭМ-подвесу ротора в ядерном реакторе с газовым теплоносителем по ряду причин не существует; в ОКБМ проводится большой объем расчетно-экспериментальных и проектных работ в обоснование работоспособности ротора на ЭМ-подвесе.

Система управления состоит из блоков нормирующих преобразователей для датчиков, блока управляющего контроллера, усилителей, рабочей станции управления [7]. Блок управ-

ляющего контроллера включает в себя один модульный IBM-совместимый микропроцессорный контроллер и предназначен для реализации законов управления. Контроллер управляет всеми каналами по всем ЭМП. Законы и коэффициенты регулирования, а также другие параметры настройки в процессе эксперимента могут быть изменены оператором СУ ЭМП с рабочей станции управления, которая одновременно выполняет функции информационно-измерительной системы.

В штатной системе управления стенда запрограммированы пять независимых ПД-регуляторов, каждый из которых управляет положением ротора по одной из осей ЭМП (по оси Z – в аксиальном направлении в части осевого ЭМП, по осям X1 и Y1 – в радиальных направлениях в части верхнего радиального ЭМП и по осям X2 и Y2 – в радиальных направлениях в части нижнего радиального ЭМП).

Вычисленные значения требуемых токов управления в обмотках электромагнита выдаются в силовой блок, который подает максимальное напряжение питания на обмотку ЭМ до момента достижения током заданной величины. Таким образом, линией переключения регулятора релейной структуры будет заданная величина тока управления, вычисленная пропорционально-дифференциальным регулятором.

В связи с тем, что штатная система управления построена на базе средств вычислительной программируемой техники, запрограммирован-

ные законы управления могут быть изменены и дополнены в ходе экспериментов без доработки оборудования стенда.

Состав регистрируемых параметров:

- положение ротора по датчикам радиального смещения ротора по осям X и Y;
- угловое положение ротора;
- частота вращения ротора.

На рис. 1 представлена базовая видеодиаграмма информационно-измерительной системы. На ней отображаются: в центре – траектория движения ротора по радиальному подшипнику (годограф движения ротора), сверху – разложение сигналов положения ротора в ряд Фурье (спектр сигнала), индикаторы направления вектора дисбаланса и элементы отображения других исследуемых параметров. Рядом с годографом слева отображаются амплитуды колебаний ротора по координатам X и Y, а также частота вращения ротора (об./мин, Гц).

Объект управления

Механическая часть объекта управления (рис. 2) представляет собой уменьшенную ко-

пию конструктивной схемы турбомашин на трех ЭМП (двух радиальных и одном осевом). Масштаб уменьшения составляет приблизительно 1:40.

Результаты расчетов и экспериментов

Полученные результаты устойчивости системы (ротор + СУ) подтверждены как аналитическими методами исследования, так и численными экспериментами по расчетным программам. Результаты численных экспериментов сравнивались с результатами экспериментов на стендах, получено их качественное совпадение. Такая многократная проверка позволяет сделать вывод о том, что основные эффекты математические модели учитывают. Количественные расхождения результатов следует отнести к специфике задачи, где практически невозможно задать точное значение исходных данных по объекту управления (например, реальное распределение дисбаланса по длине ротора и азимуту в каждом сечении). Именно это обстоятельство и определяет необходимость создания робастных систем управления.

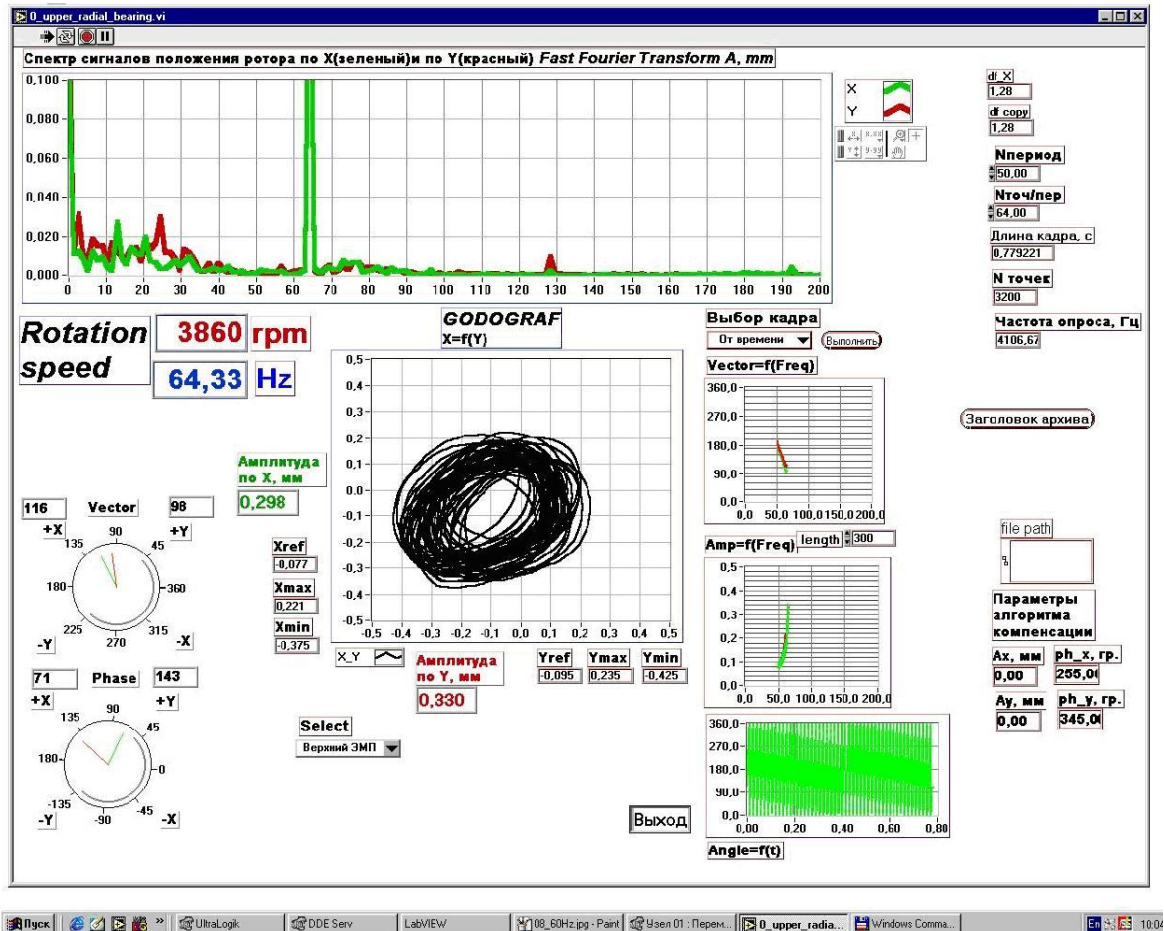


Рис. 1. Базовая видеодиаграмма информационно-измерительной системы

Расчеты ЭМ-подвеса ротора выполнялись по специально разработанной специалистами НИИ механики расчетной программе DIROM [8].

Основным элементом механической конструкции является распределенный деформируемый однородный участок ротора или статора.

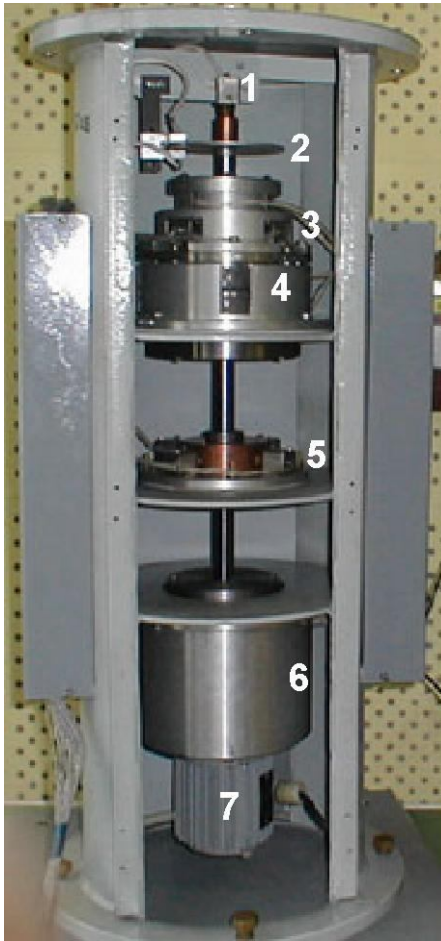


Рис. 2. Механическая часть стенда:
 1 – датчик аксиального смещения ротора; 2 – диск датчика угла поворота и частоты вращения; 3 – верхний радиальный электромагнитный подшипник в сборе с блоком датчиков радиального смещения ротора; 4 – аксиальный электромагнитный подшипник; 5 – блок датчиков радиального смещения; 6 – нижний радиальный электромагнитный подшипник в сборе с блоком датчиков радиального смещения ротора; 7 – электродвигатель

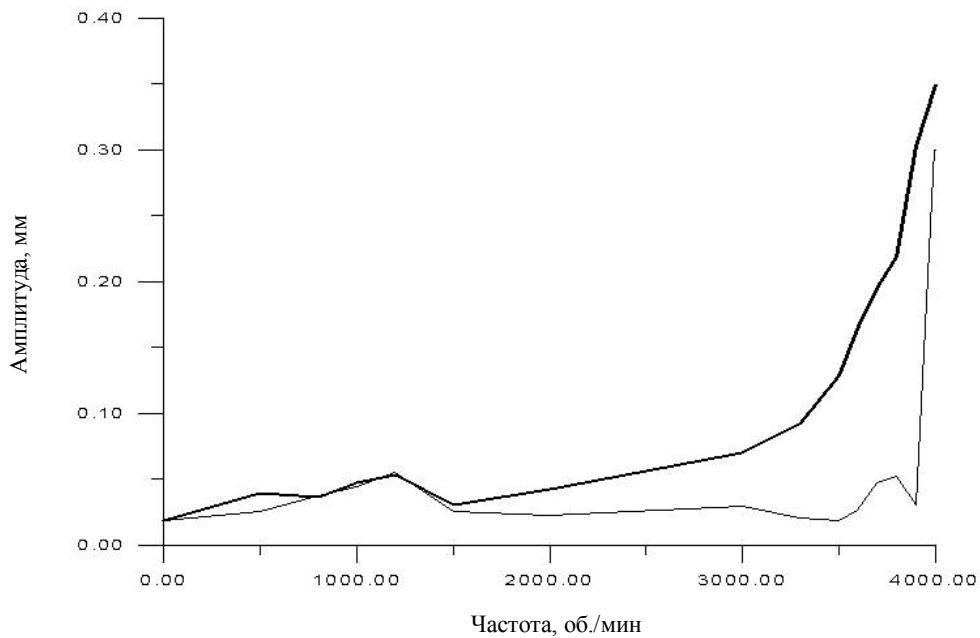


Рис. 3. Динамика вертикального неоднородного гибкого ротора на одном осевом и двух радиальных ЭМП

Упругие свойства участка определяются центральным трубчатым элементом, точное моделирование его инерционных свойств (в том числе и с учетом навешанных деталей) реализуется с помощью дополнительной распределенной массы. Для описания динамических деформаций участка используются уравнения изгибных и продольных колебаний стержней. При моделировании изгибных колебаний учтены деформации сдвига и инерция поворота нормального сечения (в том числе и дополнительной массы).

При помощи узлов соединения, протяженность которых много меньше характерных линейных размеров ротора, отдельные участки ротора объединяются в единую конструкцию с использованием элементов жесткого и гибкого соединения.

Для верификации разработанной расчетной модели динамики ротора на электромагнитном подвесе использованы данные экспериментов на специальном стенде. Результаты верификационного исследования показали правомерность основных положений, на базе которых построен расчетный комплекс ДИРОМ.

Пример результатов расчета динамики вертикального неоднородного гибкого ротора на одном осевом и двух радиальных ЭМП представлен на рис. 3.

На рис. 3 тонкой линией обозначены расчетные максимальные смещения для верхнего ЭМП по одной из осей в зависимости от частоты вращения ротора для ротора с равномерным 13%-м дисбалансом (практически такие же величины получены и по другой оси), толстой линией обозначены результаты эксперимента. Сравнивая результаты расчета и эксперимента, можно отметить в целом их качественное совпадение и хорошее количественное совпадение на низких частотах вращения. На высоких частотах одной из главных причин расхождения

результатов расчета и эксперимента может быть неточное соответствие параметров реального распределения остаточного дисбаланса ротора значениям, заданным в расчетах.

Заключение

1. Разработана цифровая СУ гибким ротором на ЭМП при релейном управлении исполнительными электромагнитами.
2. Теоретически доказана работоспособность такой системы.
3. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность нелинейной системы при релейном управлении гибким ротором.

Список литературы

1. Кодочигов Н.Г., Востоков В.С., Горбунов В.С. и др. // Всемирный конгресс по теории машин и механизмов, Безансон, Франция, июнь 2007. Тез. докл. С. 122.
2. Востоков В.С., Лебедева С.В. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 5. С. 48–53.
3. Востоков В.С., Горбунов В.С., Кодочигов Н.Г. и др. // Известия АН. Теория и системы управления. 2007. № 2. С. 87–92.
4. Kodochigov N.G., Vostokov V.S., Gorbunov V.S., et al. // 7 Workshop Mechatronische Systeme, Zittau-Kassel. 29–30 September 2006. P. 71.
5. Островский М.Я., Чечурин С.Л. Стационарные модели систем автоматического управления. Л.: Энергоиздат, 1989. 208 с.
6. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники. Теория, расчет и применение. СПб.: Политехника, 2003. 134 с.
7. Kodochigov N.G., Drumov V.V., Pobedonostsev V.V., et al. // 6 Workshop Mechatronische Systeme, Zittau-Kassel, 03–04 September 2003. P. 85.
8. Митенков Ф.М., Кодочигов Н.Г., Востоков В.С. и др. // XXVII Российская школа по проблемам науки и технологий, Миасс, июнь 2007. С. 43.

A DIGITAL NON-LINEAR CONTROL SYSTEM FOR ELECTROMAGNETIC SUSPENSION OF A TURBINE GENERATOR ROTOR OF NPP WITH A GAS COOLED REACTOR

V.S. Vostokov, I.V. Drumov, Yu.A. Kolesova, S.A. Malkin

The results are presented on the development of a relay control system for electromagnetic suspension of a turbomachine rotor of a nuclear power plant with a gas cooled reactor.