

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПО ТОКУ АКТИВНЫМ МАГНИТНЫМ ПОДВЕСОМ

Евдокимов Ю.К., Кирсанов А.Ю.

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, г. Казань,

Изосимова Т.А.,

Чебоксарский политехнический институт, г. Чебоксары

E-mail: [evdokimov@tre.kstu-kai.ru](mailto:evdokimov@tre.kstu-kai.ru), [ta\\_iz@mail.ru](mailto:ta_iz@mail.ru)

**Аннотация.** Описывается модель системы управления по току активным магнитным подвесом роторной машины ее реализация в среде программирования LABVIEW LabVIEW 8.5 фирмы National Instruments.

**Ключевые слова:** магнитный подшипник, активный подвес, управление, LabVIEW.

### Постановка задачи

Повышение эксплуатационных требований, предъявляемых к роторным машинам, требует создания таких опорных узлов, которые позволили бы при увеличении высоких скоростей и динамических нагрузок, обеспечить долгосрочность работы в экстремальных условиях и высокую степень надежности. Одним из решений данной проблемы является использование активных магнитных подшипников (АМП), взамен традиционных подшипников скольжения или качения. Работа АМП основана на известном принципе активного магнитного подвеса ферромагнитного тела: стабилизация тела осуществляется силами магнитного притяжения, действующими на тело со стороны управляемых электромагнитов, токи в обмотках электромагнитов формируются при помощи системы автоматического управления, которая состоит из датчика положения перемещений тела, электронного регулятора и усилителей мощности (1).

Если управляющей переменной является ток, то такой способ управления называется *управлением по току*, если же напряжение – то *управлением по напряжению*. Использование управления по току возможно при подвесе легких роторов и наличия достаточного ресурса напряжения. При данном подходе используется не полное описание объекта управления, усилителем мощности служит усилитель тока (рис.1). При подвесе же тяжелых роторов или весьма ограниченном ресурсе напряжения приходится учитывать инерционность электромагнитных процессов и использовать полное описание объекта управления, т. е. использовать управление по напряжению, усилителем мощности служит усилитель напряжения.

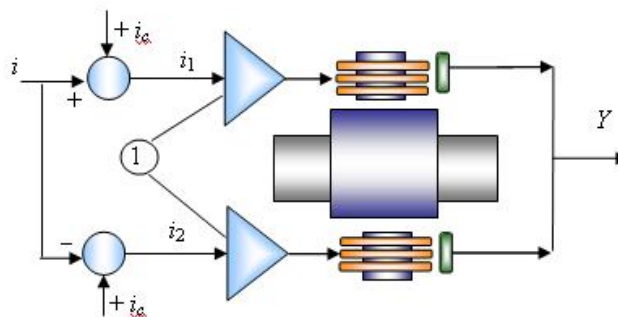


Рис. 1 Дифференциальная схема управления электромагнитами:

Ставится задача разработки автоматизированной системы управления магнитного подвеса с управлением по току и определения оптимальных параметров регуляторов цифровой системы управления АПМ.

### Выбранный метод решения

Для управления АМП по току в среде программирования LabVIEW 8.5 [1, 2] было разработано программное обеспечение, которое позволяет отладить систему стабилизации ротора, введя программно в канал управления ПИД-регулятор.

Магнитный подвес ротора имеет пять каналов управления, один осевой и четыре радиальных. Каждый канал управляется автономно, по сигналу своего датчика положения и имеет одну управляемую координату, т. е. одну степень свободы. Объект управления представляет собой инерционное звено с передаточной функцией  $1/(ms^2)$ , охваченное внутренней положительной обратной связью с коэффициентом усиления, равным «отрицательной» жесткости подвеса  $c_y$ . Входной сигнал, полученный с датчика положения, имеет синусоидальную форму, его амплитуда соответствует отклонению вала, а частота – текущей скорости вращения вала, об/мин.

Структурная схема отдельного канала управления представлена на рис. 2.

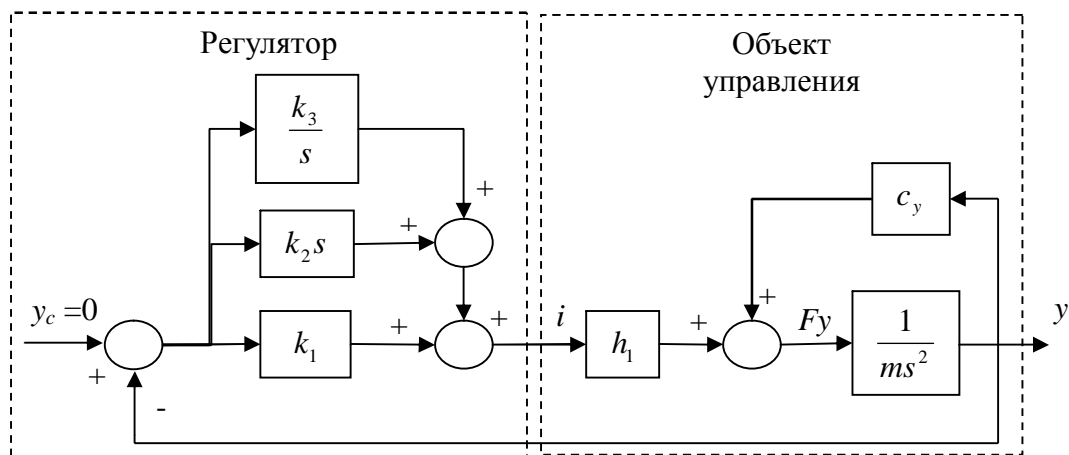


Рис. 2 Структурная схема отдельного канала управления

Для определения параметров ПИД- регулятора использовалась методика [3], в основе которой лежит использование обратных задач динамики к подвесу с управлением по току электромагнита.

При управлении по току свободное движение подвешиваемого тела описывается уравнением

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} - c_y y = h_i i, \quad (1)$$

где  $m$  – масса ферромагнитного тела (якорь);  $c_y$  – «отрицательная» жесткость подвеса;  $h_i$  – токовая жесткость электромагнита, уравнение (1) в точности совпадает при одинаковых начальных условиях со свободным движением механического линейного осциллятора с вязким трением, описываемого уравнением

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + cy = 0 \quad (2)$$

или

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\zeta w_0 \frac{dy}{dt} + w_0^2 y = 0, \quad (3)$$

где  $c$  – жесткость пружины;  $b$  – коэффициент вязкого трения демпфера;  $w_0$  – частота недемпфированных свободных колебаний;  $\zeta$  – безразмерный параметр затухания:

$$w_0 = \sqrt{\frac{c}{b}} \quad ; \quad \zeta = \sqrt{\frac{b}{(2mw_0)}}.$$

Значения коэффициентов  $b$  и  $c$  зависят от числа полюсов  $p$ .

Для сохранения положения тела при изменении статических нагрузок, т. е. чтобы подвес обладал высокой статической жесткостью, введем в (3) интегральную переменную с коэффициентом  $d$ , и уравнение (3) запишется как:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\zeta w_0 \frac{dy}{dt} + w_0^2 y + d^3 \int_0^t y(t) dt = 0 \quad (4)$$

Для совпадения движений систем (1) и (4) при одинаковых начальных условиях необходимо и достаточно, чтобы текущие значения ускорений  $\frac{d^2 y}{dt^2}$  обеих систем были одинаковы. Выразив из (4) ускорение  $\frac{d^2 y}{dt^2}$  и подстав его в (2), приходим к закону управления по току

$$-\left[ \left( \frac{mw_0^2 + c_y}{h_i} \right) y + \left( \frac{2\zeta w_0 m}{h_i} \right) \frac{dy}{dt} + \left( \frac{md^3}{h_i} \right) \int_0^t y(t) dt \right] = i \quad (5)$$

Так как система управления электромагнитами в подвесе является системой двустороннего действия, (рис.1 а), то управляющая переменная (ток) второго электромагнита равна по значению, но противоположна по знаку, управляющей переменной первого электромагнита, соответственно справедливо равенство [3]

$$i_{1v} = -i_{2v} = i \quad (6)$$

Исходя из этого, закон управления по току примет вид

$$i = ky + T_d \frac{dy}{dt} + T_u \int_0^t y(t) dt, \quad (7)$$

а настройки регулятора будут определяться по формулам:

- коэффициент усиления  $k = \frac{(mw_0^2 + c_y)}{h_i}$ ;
- постоянная дифференцирования  $T_d = \frac{2\zeta w_0 m}{h_i}$ ;
- постоянная интегрирования  $T_u = \frac{md^3}{h_i}$ .

«Отрицательная» жесткость подвеса ( $c_y$ ) и токовая жесткость электромагнита ( $h_i$ ) для осевого подшипника определяются как:

$$c_y = \left( \frac{\partial F}{\partial y} \right)_0 = \frac{c_L \cdot i_c^2}{\delta^3} = \frac{L \cdot i_c^2}{\delta^2}, \quad h_i = \left( \frac{\partial F}{\partial i} \right)_0 = \frac{c_L \cdot i_c}{\delta^2} = \frac{L \cdot i_c}{\delta}; \quad (8)$$

для радиального подшипника:

$$c_y = c_{y1} + c_{y2} = \frac{2L \cdot i_c^2}{\delta^2}, \quad h_i = h_{i1} + h_{i2} = \frac{2L \cdot i_c}{\delta}; \quad (9)$$

где:  $L$  - индуктивность в положении равновесия;  $c_L = \mu_0 n^2 A / 2$  - конструктивный параметр;  $\delta$  – расстояние от якоря до полюсов электромагнитов;  $i_c = i_{\max} / 2$  - ток смещения.

Для оптимизации параметров ПИД – регулятора необходимо значения коэффициентов  $w_0$ ,  $\zeta$  и  $d$  определять так, чтобы, прежде всего, обеспечивалась асимптотическая устойчивость подвеса. Для этой цели в ПО была введена проверка на устойчивость каждого контура управления по критерию Гурвица

$$d^3 < 2\zeta w_0^3. \quad (10)$$

Окно пользовательского интерфейса подпрограммы управления осевым подшипником представлено на рис.3.

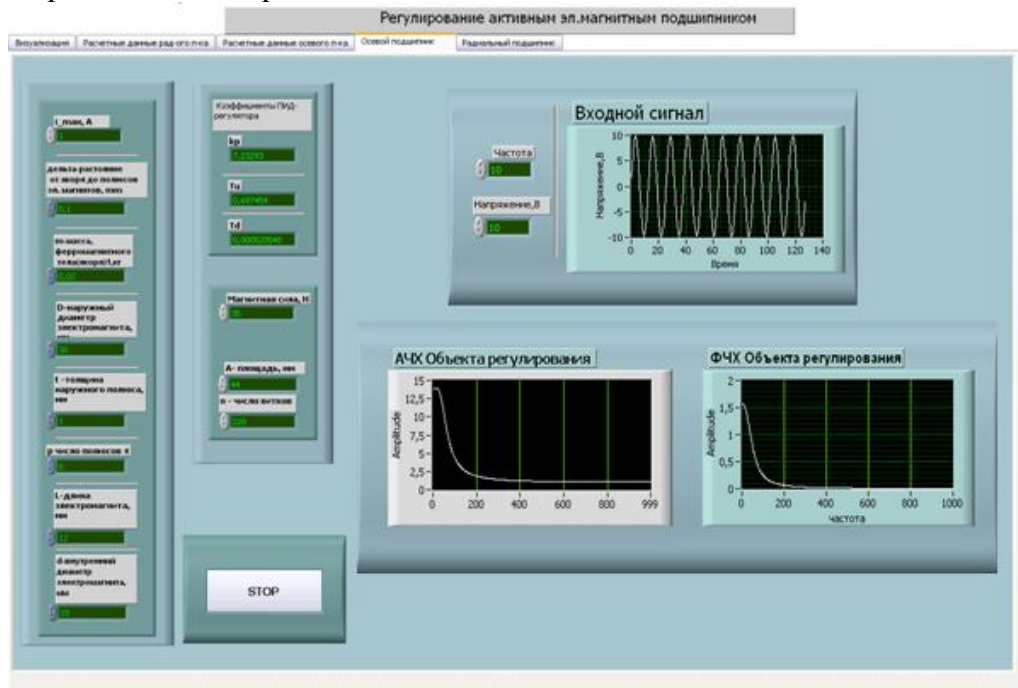


Рис. 3 Окно пользовательского интерфейса подпрограммы управления осевым подшипником

Задающимися параметрами, для расчета коэффициентов ПИД регулятора являются:

- $i_{\max}$  – максимальное значение тока, А;
- $\delta$  (дельта) – расстояние от якоря до полюсов электромагнитов, мм;
- $D$  – наружный диаметр электромагнита, мм;
- $p$  – число полюсов, шт;
- $d$  – внутренний диаметр электромагнита, мм;
- $t$  – толщина наружного полюса, мм;
- $n$  – число витков;
- $m$  масса ферромагнитного тела (якорь), кг;
- $A$  – площадь, мм.
- $F_c$  – магнитная сила, Н.

Данное ПО для АМП позволяет выработать управляющий ток, задав основные параметры осевого и двух радиальных подшипников, определить автоматически коэффициенты ПИД-регулятора, для каждого контура управления.

Результаты будут применены при разработке магнитного подвеса ротора и «сухих» газодинамических уплотнений.

### Список использованной литературы

1. Евдокимов Ю.К., Линдваль В.Р., Щербаков Г.И. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. М. ДМК Пресс, 2007. 400 с.
2. Суранов А.Я. LabVIEW 8.20: Справочник по функциям. М. ДМК Пресс, 2007. 536 с.
3. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. СПб. Политехника, 2003. 206 с.