

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО СТОЛА С АКТИВНОЙ МАГНИТНОЙ ОПОРОЙ

Введение. Активные магнитные подвесы и опоры находят применение в широком диапазоне технических устройств. К их преимуществам относятся малое трение (вызванное наличием вихревых токов), управляемые жесткость и демпфирование, отсутствие износа и т.д. Проектируемая магнитная опора представляет собой вращающийся рабочий стол обрабатывающего станка с особенно высокими требованиями к точности позиционирования в статических и динамических режимах. Особенность опоры позволяет подавлять нежелательные колебания в широком спектре частот.

Магнитный подшипник является нелинейной системой, в которой опорная сила представляется квадратичной функцией тока и обратно квадратичной функцией воздушного зазора. Для подшипников, управляемых напряжением, необходимо дополнительно учитывать изменение индуктивности обмотки магнита вследствие изменения воздушного зазора. Проблемы, связанные с этими нелинейностями, частично решаются рядом конструктивных мер. Например, внедрение постоянного источника напряженности магнитного поля в электромагнит с последующим дифференциальным включением противоположных магнитов частично линеаризует их общую токовую характеристику $F = f(I)$ и устраняет зависимость суммарной индуктивности от воздушного зазора. В общем случае при построении линейного регулятора, модель объекта может быть линеаризована в рабочей точке. Проектируемый регулятор должен обладать при этом достаточно низкой чувствительностью к изменениям параметров объекта. В данной работе приводится сравнительный анализ различных структур управления (модальный регулятор, подчиненное регулирование и скользящий режим), подтвержденный экспериментальными результатами.

Магнитная опора. Основным элементом рабочего стола с магнитной опорой (рис.1) являются 12 пар удерживающих и 4 пары центрирующих комбинированных магнитов. Парное включение магнитов позволяет развивать усилие в двух направлениях. Дополнительно такая схема включения обеспечивает постоянство сопротивления магнитного контура, а значит и суммарная индуктивность остается постоянной, что позволяет оптимально настроить контур регулирования тока. В свою очередь, динамика контура регулирования тока определяет верхнюю границу частоты пропускания контура регулирования положения. В представленном магнитном подвесе электрическая постоянная времени составляет около 1 мс. Привод вращения ротора является стандартным приводом позиционирования и осуществляется синхронным двигателем с повышенным

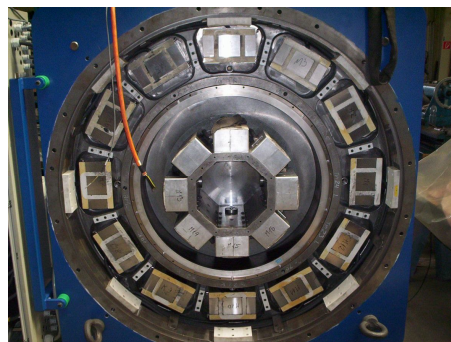


Рис. 1. Прототип, внутреннее устройство



Рис. 2. Общий вид стола

крутящим моментом. На рисунке 2 показан общий вид рабочего стола со следующими конструктивными параметрами:

- диаметр стола: 1.20 м;
- высота: 0.9 м;
- масса: 3000 кг;
- максимальная нагрузка: 2000 кг;
- частота вращения: 60 об/мин.

Структура системы регулирования положения. Учитывая переопределенность механической системы, целесообразно перейти от координат актуаторов (магнитов) к некоей обобщенной системе координат. Наиболее удобно связать начало этой системы с геометрическим центром ротора [1], перейдя от 16 степеней свободы (количество пар магнитов) к 5 обобщенным координатам. Пересчет координат, скоростей и ускорений осуществляется умножением на матрицу трансформации J_{AB} , а

пересчет сил - умножением на матрицу J_{AB}^T . В пространстве состояний объект описывается следующими уравнениями:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} q_B \\ \dot{q}_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & I \\ M_B^{-1} J_{AB}^T k_s J_{AB} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_B \\ \dot{q}_B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ M_B^{-1} J_{AB}^T k_i \end{pmatrix} i_A; \quad (1)$$

$$q_B = (I \ 0) \begin{pmatrix} q_B \\ \dot{q}_B \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Инверсная модель объекта управления приводит в соответствие выходной сигнал регулятора положения и управляющий сигнал контура регулирования тока. Таким образом, задача регулятора сводится к регулированию положения ротора в 5-ти обобщенных координатах с последующим пересчетом управляющих сигналов для реальных преобразователей тока. На рисунке 3 представлена общая структура управления положением.

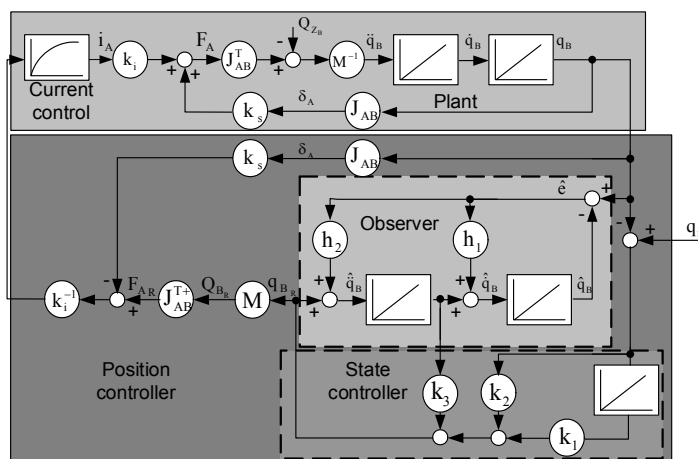


Рис. 3. Структурная схема управления положением

Внутренний контур регулирования тока настроен на максимальное быстродействие и представляет собой для внешнего контура инерционное передаточное звено с относительно малой постоянной времени. В качестве регулятора положения были испытаны различные типы регуляторов:

- регулятор с подчиненной структурой;
- классический модальный регулятор;
- регулятор с переменной структурой [2] (скользящий регулятор).

Положение ротора – это единственная переменная, доступная для прямого измерения, поэтому необходимая для регулирования скорость восстанавливается с помощью наблюдателя состояний. Точность регулирования в статическом режиме может быть обеспечена двумя разными подходами: восстановлением в наблюдателе возмущающего воздействия с последующим предупредлением; введением дополнительной переменной – интеграла от ошибки регулирования [3]. В последнем случае ожидается некоторая потеря в динамике отработки сигнала задания при улучшенной реакции на возмущающее усилие. Некоторое заключение о качестве управления можно сделать на основании ответа на скачок (рис. 4) для различных типов регулятора.

Представленные регуляторы были разработаны на основании линеаризованной модели объекта. Поэтому для удовлетворения более строгих требований к управлению требуются более сложные алгоритмы управления, использующие нелинейную структуру, например, основанные на теории Ляпунова.

Литература.

1. Tieste, K. - D. Mehrgrößenregelung und Parameteridentifikation einer Linear-Magnetführung, Fortschrittberichte der VDI Zeitschriften, Reihe 8 Nr. 656, Düsseldorf 1997.
2. Уткин, В. И. Скользящие режимы и их применения в системах с переменной структурой. – М.: Наука, 1974.
3. Riefenstahl, U. Elektrische Antriebstechnik. – B.G. Teubner Stuttgart Leipzig, 2000.

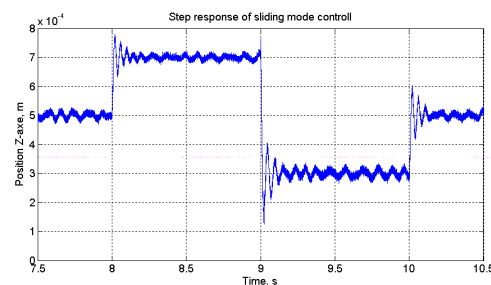
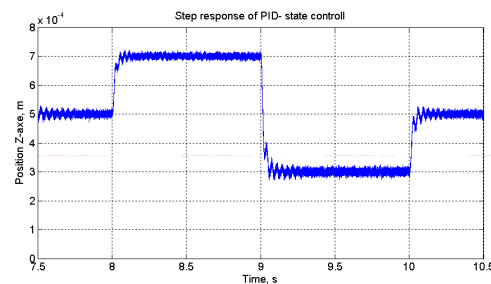
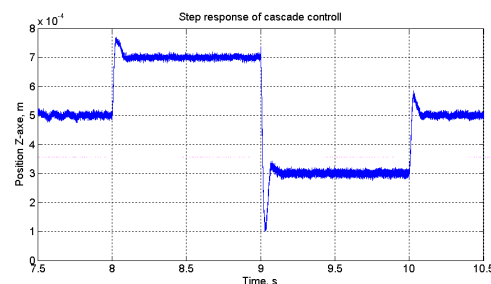


Рис. 4. Реакция на скачок задания положения