

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ПОВЕРХНОСТНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МАГНИТНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ

**Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами.** Создание систем управления магнитным полем является актуальной проблемой для многих технических объектов. При этом различают системы управления внешним и внутренним магнитным полем технических объектов. Уменьшение уровня внешнего магнитного поля является актуальной проблемой для кораблей и других подводных объектов оборонного назначения. Для выполнения экологических норм внутри рабочих помещений энергонасыщенных объектов, а также для создания комфортных условий необходимо поддерживать параметры магнитного поля на уровне магнитного поля Земли.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В работах [1-2] рассмотрены вопросы построения математических моделей технических объектов как источников магнитного поля. В этих работах рассмотрены также алгоритмы разомкнутых, замкнутых и комбинированных систем управления внешним магнитным полем технических объектов, а также математические модели этих систем управления [3-4]. В работах [1,5] рассмотрены вопросы построения системы робастного управления внешним магнитным полем технических объектов. Предполагается, что на техническом объекте размещены управляемые источники магнитного поля определенным образом ориентированные в пространстве относительно технического объекта. В зависимости от типа источников магнитного поля используют различные математические модели: для источников мультипольного типа используют потенциальный ряд Гаусса, для источников поверхностно-распределенного типа используют интегральное уравнение Фредгольма второго рода внешней задачи Дирихле, для источников объемно-распределенного типа используют уравнение Пуассона. С помощью этих моделей решается прямая задача магнитостатики.

**Цель работы.** Целью данной работы является синтез оптимального управления магнитным полем технических объектов с учетом особенностей источников поверхностно-распределенного типа как объектов управления.

**Изложение материала исследования, полученных научных результатов.** При управлении магнитным полем технических объектов с помощью поверхностно-распределенных магнитных исполнительных органов на основании решения прямой задачи магнитостатики [3] математическая модель объекта управления, входом которой является вектор токов в обмотках управления  $\vec{J}$ , а выходом является вектор напряженностей (индукций либо магнитного потенциала) в центрах обмоток магнитных исполнительных органов, может быть получена в виде  $\vec{H} = A\vec{J}$ , где  $A$  матрица передаточных коэффициентов магнитных исполнительных органов как статического объекта управления.

Особенностью задачи управления магнитным полем технических объектов с помощью поверхностно-распределенных магнитных исполнительных органов является вырожденность матрицы коэффициентов передачи объектов управления  $A$ . В частности, для поверхностно-распределенных магнитных исполнительных органов с двумя и тремя управляющими обмотками матрицы коэффициентов передачи объектов управления примут следующий вид

$$A_2 = \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{vmatrix}, \quad A_3 = \begin{vmatrix} 1 & -0,5 & -0,5 \\ -0,5 & 1 & -0,5 \\ -0,5 & -0,5 & 1 \end{vmatrix}.$$

Аналогично для магнитных исполнительных органов с  $n$  обмотками матрица  $A_n$  примет следующий вид

$$A_n = \begin{vmatrix} 1 & \frac{-1}{n-1} & \frac{-1}{n-1} & \dots & \frac{-1}{n-1} \\ \frac{-1}{n-1} & 1 & \frac{-1}{n-1} & \dots & \frac{-1}{n-1} \\ \frac{-1}{n-1} & \frac{-1}{n-1} & \frac{-1}{n-1} & \dots & \frac{-1}{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{-1}{n-1} & \frac{-1}{n-1} & \frac{-1}{n-1} & \dots & 1 \end{vmatrix}.$$

Задачей синтеза такой системы управления магнитным полем технических объектов является определение вектора заданных значений токов  $\vec{J}_3$ , при котором обеспечиваются заданные значения вектора магнитного поля  $H_3$ . Из математической модели исходного объекта управления, полученной в результате решения прямой задачи магнитостатики  $\vec{H} = A\vec{J}$ , формально получим  $\vec{J}_3 = A^{-1}\vec{H}_3$ . Однако матрица  $A$  не имеет обратной, да и сама

задача из физических соображений не имеет решения. В частности, если на вход системы подать одинаковые задающие воздействия – одинаковые токи в обмотки управления магнитных исполнительных органов, то все компоненты выходного вектора напряженностей (индукций, либо магнитного потенциала) в центрах обмоток будут нулевыми за счет взаимной компенсации магнитного поля этих обмоток. Данный факт отражает физическую неосуществимость создания магнитного монополя – источника магнитного поля, магнитный поток которого через замкнутую поверхность источника не равен нулю. Однако, при подаче различных токов в обмотки управления магнитных исполнительных органов компоненты выходного вектора в их центрах будут отличны от нулевых.

Рассмотрим один из подходов к решению этой задачи путем сведения ее к задаче нахождения вектора значения токов  $\vec{J}$ , минимизирующих следующий критерий

$$\vec{J}^* = \arg \min_{\vec{J}} \left[ (\vec{H}_3 - A\vec{J})^T R_1 (\vec{H}_3 - A\vec{J}) + \vec{J}^T R_2 \vec{J} \right],$$

где весовая матрица  $R_1$  учитывает различные веса компонент погрешности реализации заданного вектора значений магнитного поля  $\vec{H}_3$  в различных точках поверхностно распределенных магнитных исполнительных органов, а весовая матрица  $R_2$  учитывает различные веса компонент вектора тока  $\vec{J}$ .

При наличии в техническом объекте кроме управляемых источников магнитного поля и неуправляемых источников, создающих в точках управления на поверхности технического объекта вектор значений напряженности магнитного поля  $\vec{H}_0$ , эта задача примет следующий вид

$$\vec{J}^* = \arg \min_{\vec{J}} \left[ (\vec{H}_3 - \vec{H}_0 - A\vec{J})^T R_1 (\vec{H}_3 - \vec{H}_0 - A\vec{J}) + \vec{J}^T R_2 \vec{J} \right].$$

Такая задача является стандартной задачей метода наименьших квадратов и для ее решения используется квазиньютоновский метод с алгоритмом Левенберга - Марквардта.

Заметим, что используемые в этой задаче модели описывают связь между токами в контурах, либо эквивалентных им магнитных зарядов, и параметрами внешнего либо внутреннего магнитного поля технического объекта. По сравнению со скоростью распространения магнитного поля изменения токов в контурах источников магнитного поля и изменения положения самого технического объекта в пространстве являются медленными движениями, так что распространение магнитного поля в пространстве можно считать мгновенным. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только медленные движения, описывающие изменение токов в управляющих обмотках магнитных исполнительных органов и изменения положения самого технического объекта в пространстве, если технический объект совершает движение. Такое движение технического объекта необходимо учитывать в частности, при управлении магнитным полем космических аппаратов, кораблей, подводных лодок и других подвижных объектов.

**Результаты моделирования.** Приведены примеры применения такого подхода для формирования вектора токов в обмотках магнитных исполнительных органов с учетом особенностей источников магнитного поля поверхностно-распределенного типа как объектов управления для управления параметрами магнитного поля технических объектов различного назначения. Применение такого подхода позволяет повысить точность управления магнитным полем технических объектов.

**Выводы из проведенного исследования, перспективы этого направления.** Разработан метод синтеза, позволяющий формировать вектор управления – вектор токов в обмотках для управления параметрами магнитного поля технических объектов с учетом особенностей источников магнитного поля поверхностно-распределенного типа как объектов управления – вырожденности матрицы коэффициентов передачи объектов управления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Розов В.Ю., Кузнецов Б.И., Ассуиров Д.А. Стохастический синтез робастной системы управления магнитным полем технических объектов / 16 Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика – 2009». Тези доповідей. – Чернівці: Книги – XXI, 2009. – С. 209 – 211.
2. Розов В.Ю., Кузнецов Б.И., Ассуиров Д.А. Управление магнитным полем технических объектов. Автоматика-2008: Одесса: ОНМА. С. 480-483.
3. Ассуиров Д.А. Управление внешним магнитным полем технических объектов с источниками управляющего поля поверхностно-распределенного типа//Технічна електродинаміка. – 2007. – №6. – С. 8-14.
4. Розов В.Ю., Кузнецов Б.И., Ассуиров Д.А. Оптимальное управление внешним магнитным полем технических объектов. Вестник НТУ «ХПИ». Сб. научн. работ. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2005, № 45.
5. Розов В.Ю., Кузнецов Б.И., Ассуиров Д.А. Робастное управление внешним магнитным полем технических объектов//Збірник наукових праць Дніпродзержинського Державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». /Дніпродзержинськ: ДГТУ, 2007. – С. 418 – 419.