

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С НЕЙРОСЕТЕВЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ

Рассмотрен структурный и параметрический синтез замкнутой многоканальной системы оптимального управления внешним магнитным полем технического объекта с нейросетевым формированием сигналов обратных связей и источниками управляющего поля, расположенными на поверхности объекта. Приведены динамические характеристики синтезированной системы управления магнитным полем, полученные методом компьютерного моделирования.

Розглянуто структурний і параметричний синтез замкнутої багатоканальної системи оптимального керування зовнішнім магнітним полем технічного об'єкту з нейромережневим формуванням сигналів зворотних зв'язків і джерелами керуючого поля, розташованими на поверхні об'єкту. Наведено динамічні характеристики синтезованої системи керування магнітним полем, отримані методом комп'ютерного моделювання.

The structural and parametric synthesis of the closed loop multichannel optimal automatic control system of a technical facility's external magnetic field with the neural network formation of feedback signals and surface-distributed controlling field sources is considered. The dynamic characteristics of the synthesized magnetic field control system, obtained by computer simulation, is presented.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. Для ряда технических объектов (ТО) актуальной проблемой является создание систем управления их внешним магнитным полем (МП). В частности, такая задача возникает при защите автономных объектов от магнитных мин, при управлении ориентацией космических аппаратов на околоземной орбите за счет взаимодействия их МП с МП Земли, при снижении негативного влияния МП ТО на другие ТО, окружающую среду и здоровье людей.

Анализ последних достижений и публикаций. В настоящее время существуют различные подходы к построению систем управления внешним МП ТО, которые отличаются типом математической модели, используемой для описания ТО как управляемого источника МП [9,10]. В работе [3] рассмотрена теоретическая модель ТО в виде источника поверхностно-распределенного типа, описываемого с помощью интегрального уравнения Фредгольма второго рода. Эта модель позволяет определить параметры источника (поверхностную плотность магнитного момента) по параметрам его МП (скалярному магнитному потенциалу) на поверхности ТО и, соответственно, решить задачу управления МП ТО во всем окружающем пространстве, поскольку внешнее МП ТО однозначно определяется своим распределением на поверхности ТО. В этой же работе предложена физическая реализация управляемого источника МП поверхностно-распределенного типа в виде системы электрических контуров с регулируемым током, покрывающих всю поверхность ТО. Магнитный исполнительный орган (МИО) системы управления, выполненный на основе такого источника, принципиально способен формировать МП с любой требуемой пространственно-временной структурой, а само управление МП может быть реализовано как в разомкнутой, так и замкнутой

структурах [3,4]. В работе [8] показано, что эффективное управление внешним МП ТО в системах с МИО поверхностно-распределенного типа достигается при достаточно большом количестве независимых каналов управления, определяемом числом независимых контуров МИО, и использовании в качестве выходных управляемых координат скалярных потенциалов МП на поверхности ТО в точках, ограниченных контурами МИО.

Технический объект с МИО поверхностно-распределенного типа является многоканальным объектом управления и имеет особенности, обусловленные наличием у него межканальных взаимосвязей по МП и вырожденным характером его матричной передаточной функции по управлению. В работах [6,7] рассмотрен синтез оптимального управления внешним МП такого объекта, который учитывает эти особенности. Однако оптимальное управление само по себе автоматически не обеспечивает системе астатических свойств, необходимых для достижения высокой статической точности управления МП, а также не решает проблему инвариантности системы к несбалансированному управлению, при котором в силу ряда причин управление МП ТО может не соответствовать условию физической реализуемости ТО как источника МП, выражающемуся в равенстве нулю среднего значения скалярного магнитного потенциала на поверхности ТО. Несбалансированное управление вызывает появление в контурах МИО одинаковых по направлению и величине электрических токов, МП которых взаимно компенсируются и не участвуют в формировании МП ТО. Являясь балластными, эти токи в замкнутой системе с большим контурным коэффициентом усиления могут достигать большой величины и привести к перегрузке исполнительской части системы. Для придания системе оптимального управления МП ТО требуемых свойств необходимо использовать при ее синтезе специальные структурные

решения.

Одной из проблем, связанной с синтезом замкнутых систем управления МП ТО, является формирование сигналов обратной связи по скалярному магнитному потенциалу. Этот параметр МП является расчетной величиной и не может быть измерен непосредственно. Эффективное решение этой проблемы предложено в работах [1, 2], где рассмотрен нейросетевой метод определения скалярного магнитного потенциала по измеряемым в заданных точках поверхности ТО напряженностям МП. Однако реализация этого метода в системах управления с МИО поверхностно-распределенного типа также требует применения специальных структурных решений, которые должны быть учтены при синтезе системы оптимального управления внешним МП ТО.

Цель работы. Целью данной работы является структурный и параметрический синтез системы оптимального управления внешним МП ТО с МИО поверхностно-распределенного типа и нейросетевым формированием сигналов обратной связи.

Материалы исследования. Функциональная блок-схема синтезированной системы управления внешним МП ТО приведена на рис. 1. Ее основными элементами являются управляемый объект ТО, в состав которого входят МИО с регулируемым многоканальным источником питания ИП, задающее устройство ЗУ, многоканальный регулятор Р, многоканальные датчики токов МИО ДТ и нормальных компонент напряженности МП на поверхности ТО ДП, формирователь сигналов обратных связей ФОС, обеспечивающий замыкание системы по выходным управляемым переменным – скалярным потенциалам МП ТО.

С целью повышения качества управления МП ТО в системе использован предложенный в [8] комбинированный способ формирования сигналов обратных связей по скалярным потенциалам МП ТО, в соответствии с которым эти сигналы формируются раздельно по своим управляющим и возмущающим составляющим на основе измеренных значений токов МИО I_M и параметров МП ТО \vec{H}_{TO} .

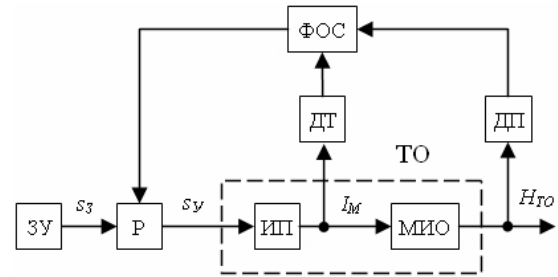


Рис.1. Блок-схема системы управления МП ТО

Реализация данного способа формирования обратных связей показана на алгоритмической схеме синтезированной системы управления МП ТО, выполненной в векторно-матричной форме, которая приведена на рис. 2. Согласно схеме вектор измеренных токов МИО \vec{s}_T преобразуется матричными операторами K_2 и K_3 в векторы скалярных потенциалов $\vec{s}_{СПУ}$ и напряженностей $\vec{s}_{НУ}$ управляющей составляющей МП ТО. Вычитанием вектора $\vec{s}_{НУ}$ из вектора измеренных напряженностей результирующего МП ТО \vec{s}_H определяется вектор напряженностей возмущающей составляющей МП $\vec{s}_{НВ}$. Этот вектор с помощью искусственной линейной нейросети, входящей в состав ФОС и характеризуемой матрицей своих весовых коэффициентов K_1 , преобразуется в вектор скалярных потенциалов возмущающей составляющей МП $\vec{s}_{СПВ}$. Суммированием полученных векторов $\vec{s}_{СПУ}$ и $\vec{s}_{СПВ}$ формируется вектор сигналов обратных связей по скалярным потенциалам результирующего МП \vec{s}_{OC} , по которым и производится замыкание системы управления МП ТО. Матрицы K_2 и K_3 определяются в процессе синтеза системы управления по известным геометрическим параметрам и расположению на поверхности ТО контуров МИО, а матрица весовых коэффициентов нейросети K_1 – в результате обучения нейросети по методике, изложенной в [1].

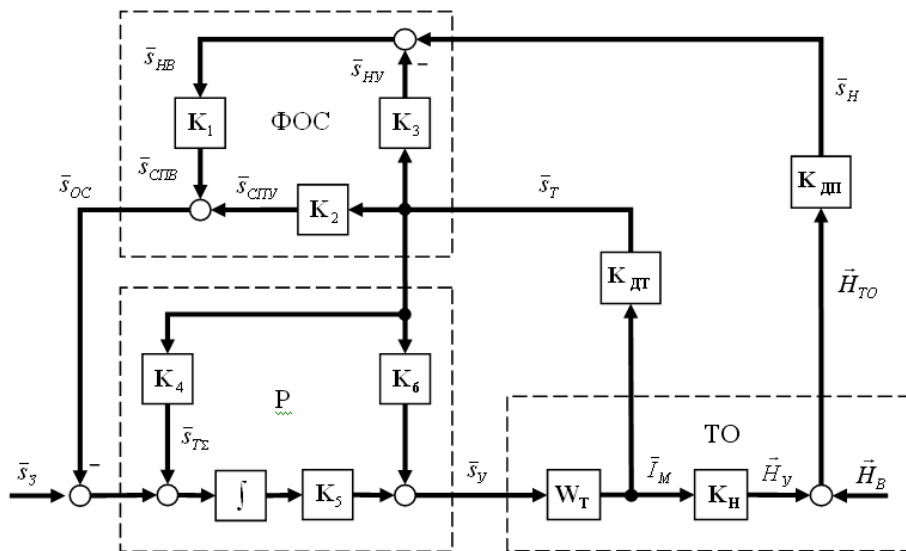


Рис.2. Алгоритмическая схема системы управления МП ТО

Для придания многоканальной системе управления МП необходимых астатических свойств в регулятор каждого из ее сепаратных каналов введено интегрирующее звено, как показано на рис.2. Инвариантность системы к несбалансированному управлению при этом обеспечивается за счет введения дополнительной отрицательной обратной связи по суммарному току МИО $\bar{s}_{T\Sigma}$, которая формируется с помощью матрицы единичных коэффициентов \mathbf{K}_4 .

Необходимо отметить, что при введении обратной связи $\bar{s}_{T\Sigma}$ многоканальная система управления МП теряет астатизм по отработке задающих управляющих воздействий в каждом из ее сепаратных каналов управления, однако при этом сохраняет астатизм по отношению к отработке разности этих воздействий. Последнее свойство является определяющим для системы управления, как астатической, поскольку именно разностные управляющие воздействия по МП определяют величину и структуру МП на поверхности ТО и во всем внешнем пространстве.

Оптимальное управление в синтезированной многоканальной системе управления МП ТО обеспечивается за счет соответствующего выбора величин элементов постоянных матриц \mathbf{K}_5 и \mathbf{K}_6 , через которые осуществляется замыкание системы по переменным состояния. Для определения этих матриц использован метод аналитического конструирования оптимальных регуляторов [5], согласно которому ТО с интеграторами рассматривается как линейный стационарный объект управления, описываемый уравнениями состояния

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t); \quad \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t), \quad (1)$$

где \mathbf{x} – вектор состояния, элементами которого являются токи МИО и выходы интеграторов; \mathbf{u} – вектор управления, элементами которого являются управляющие воздействия на входе источника питания МИО, \mathbf{y} – вектор выхода, элементами которого являются скалярные потенциалы МП на поверхности ТО; \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} – постоянные матрицы коэффициентов.

Задача синтеза регулятора формулируется как определение такого управления \mathbf{u} , при котором достигается минимум функционалу

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt, \quad (2)$$

где \mathbf{Q} и \mathbf{R} – постоянные матрицы весовых коэффициентов, от выбора которых зависит быстродействие и энергетические затраты системы по управлению.

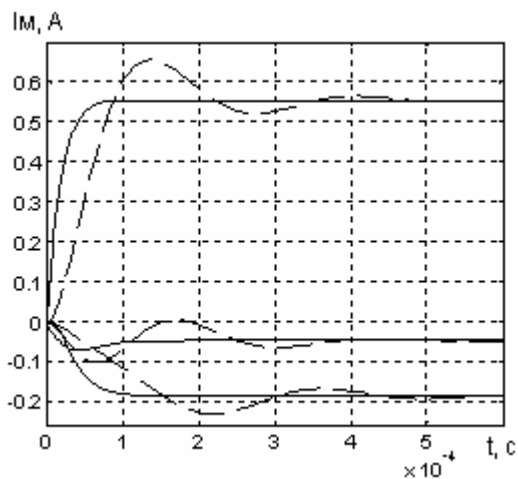
Решение задачи дается соотношениями

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}; \quad \mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}, \quad (3)$$

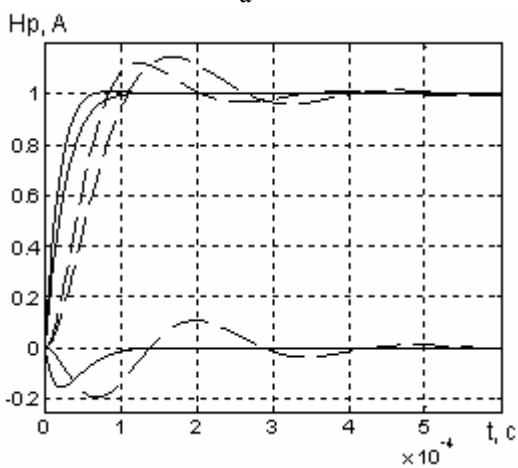
где \mathbf{P} – положительно определенная матрица, являющаяся решением матричного уравнения Риккати

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0;$$

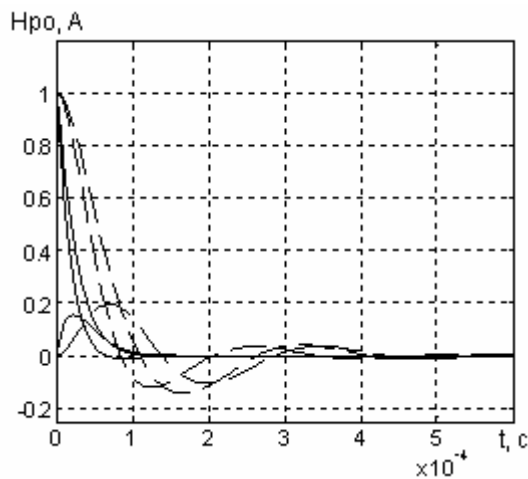
$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_5 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_6 \end{bmatrix}$ – искомая блочная матрица коэффициентов усиления оптимального регулятора по переменным состояния \mathbf{x} .



а



б



в

Рис.3. Процессы в синтезированной системе управления МП ТО: а – токи МИО; б – разностный выход системы в – ошибка по разностному управлению

На рис. 3 приведены переходные процессы в 24-канальной системе управления внешним МП ТО с синтезированным оптимальным регулятором (сплошные линии) и обычным интегральным регулятором (пунктирные линии) при отработке ступенчатого воздействия по одному из управляющих входов системы

(случай несбалансированного управления), полученные методом компьютерного моделирования. Для упрощения на рисунках показаны графики процессов только в 3 каналах системы управления из 24. Сравнивая процессы в системах с оптимальным и интегральным регуляторами нетрудно увидеть, что при наличии астатизма по разностному управлению в обеих системах основные показатели качества этих процессов (время регулирования, перерегулирование, число колебаний за время регулирования) для системы с оптимальным регулятором превосходят аналогичные показатели для системы с интегральным регулятором.

Выводы. Синтезирована многоканальная система оптимального управления внешним МП ТО с МИО поверхностно-распределенного типа и нейросетевым формированием сигналов обратных связей по МП, обладающая астатическими свойствами по управлению и обеспечивающая минимизацию токов МИО при несбалансированном управлении. Исследование синтезированной системы управления внешним МП ТО на компьютерной модели подтвердили ее работоспособность и высокие статические и динамические свойства.

Список использованной литературы

1. Ассуиров Д.А. Нейросетевой метод решения внешней задачи Неймана теории магнитного поля. *Технічна електродинаміка* / Д.А. Ассуиров, А.А. Давыдов, С.Ю. Реуцкий // *Техн. електродин. Вип. "Проблемы сучасної електротехніки"*. – К.: – 2010. – Ч. 1. – С. 13-16.
2. Ассуиров Д.А. Опыт применения нейросети в управлении внешним магнитным полем технических объектов / Д.А. Ассуиров, А.А. Давыдов // Тематич. вып. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика» научно-технич. журнала «ЭЛЕКТРОИНФОРМ». – Львов: ЕКОинформ. – 2009.– № 30. – С. 226-227.
3. Ассуиров Д.А. Управление внешним магнитным полем технических объектов с источниками управляющего поля поверхностно-распределенного типа / Д.А. Ассуиров // *Техніч. електродин.* – 2007. – № 6. – С. 8-14.
4. Ассуиров Д.А. Управление внешним магнитным полем технических объектов с источниками управляющего поля поверхностно-распределенного типа в замкнутой системе / Д.А. Ассуиров // *Техніч. електродин.* – 2008. – № 1. – С. 19-24.
5. Квакернаак Х. Линейные оптимальные системы управления / Х. Квакернаак, Р. Сиван. – М.: Мир, 1977. – 350 с.
6. Оптимальное управление магнитным полем технических объектов с помощью поверхностно распределенных магнитных исполнительных органов / В.Ю. Розов, Б. И. Кузнецов, Д.А. Ассуиров, А.А. Давыдов // *Вест. НТУ «ХПИ»*. Вып. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Харьков: – 2010. – № 28. – С. 85-86.
7. Розов В.Ю. Оптимальное управление внешним

магнитным полем технических объектов / В.Ю. Розов, Б.И. Кузнецов, Д.А. Ассуиров // *Вісн. Нац. техн. ун-ту "ХПИ"*. – Харків: – 2005. – № 45. – С. 153-154.

8. Розов В.Ю. Метод активного экранирования внешнего магнитного поля технических объектов / В.Ю. Розов, Д.А. Ассуиров // *Техніч. електродин. Вип. "Проблемы сучасної електротехніки"*. – К.: – 2006. – Ч. 3. – С. 13-16.

9. Розов В.Ю. Принципы построения систем автоматического управления внешним магнитным полем технических объектов / В.Ю. Розов, Д.А. Ассуиров // *Вісн. Нац. техніч. ун-ту "ХПИ"*. – Харків: – 2005.– № 45. – С. 101-102.

10. Шидловский А.К. Системы автоматической компенсации внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов / А.К. Шидловский, В.Ю. Розов // *Техніч. ел. динаміка.* – 1996. – № 1. – С. 3-9.

Получено 27.05.2011



Ассуиров
Дмитрий Александрович,
к.т.н., ст. науч. сотр. отдела
проблем управления магнит-
ным полем Научно-технич.
центра магнетизма технич.
объектов НАН Украины,
61106, г. Харьков, ул. Индуст-
риальная, 19,
e-mail: bikuznetsov@mail.ru



Давыдов
Алексей Александрович,
аспирант Научно-технич. цен-
тра магнетизма технич. объек-
тов НАН Украины, 61106, г.
Харьков, ул. Индустриальная,
19,
e-mail: bikuznetsov@mail.ru