

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВНЕШНИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

**В.Ю.Розов<sup>1</sup>**, чл.-корр. НАН Украины, **Д.А.Ассуиров<sup>2</sup>**, канд.техн.наук  
<sup>1,2</sup> – Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины,  
ул. Индустриальная, 19, а/я 72, г.Харьков, 61106, Украина

*Рассмотрены принципы автоматического управления внешним магнитным полем технических объектов, основанные на управлении скалярным потенциалом магнитного поля на поверхности объектов с помощью поверхностно-распределенной системы контуров с управляемыми токами, а также предложены методы их реализации, позволяющие обеспечить практическое решение задач автоматического управления внешним магнитным полем технических объектов, в том числе вблизи их поверхности. Библ. 23, рис. 4.*

**Ключевые слова:** магнитное поле, автоматическое управление, эквивалентный источник, скалярный потенциал.

**Введение.** Существует ряд научно-технических проблем, решение которых связано с необходимостью управления стационарным (квазистационарным) внешним магнитным полем (МП) технических объектов (ТО). Задачи управления МП ТО возникают при магнитном управлении ориентацией космических аппаратов на околоземной орбите [12], при защите подвижных ТО от магнитных мин [8], при снижении негативного влияния МП ТО на другие ТО [11], окружающую среду и здоровье людей [22]. Для решения таких задач требуется создание методов управления внешним МП ТО и реализуемых на их основе систем автоматического управления (САУ) МП, способных в условиях действия возмущающих факторов формировать внешнее МП ТО с заданной пространственно-временной структурой.

Реализуемый принцип управления МП ТО определяется математической моделью, принятой за основу для описания ТО как источника МП. В качестве такой модели может быть использована мультипольная модель ТО [20,23], основанная на представлении ТО в виде совокупности мультиполей (диполя, октополя, квадруполя и т.д.) – точечных источников пространственных гармоник МП, локализованных в объеме ТО и характеризующихся соответствующими магнитными моментами. При использовании принципа мультипольного управления для формирования заданного МП ТО требуется привлечение мультиполей высших порядков. Однако, из-за сложности физической реализации управляемых мультипольных источников МП в структуре ТО, а также отсутствия эффективных методов селективного измерения коэффициентов различных пространственных гармоник МП практическое применение этого принципа управления в настоящее время ограничено решением задач управления дипольной пространственной гармоникой МП ТО [8,12,23], когда эффективное управление МП достигается только в дальней области окружающего ТО пространства – на расстояниях более трех габаритных размеров ТО от его поверхности.

В этой связи представляет практический интерес принцип управления МП ТО, основанный на представлении ТО как источника МП в виде двойного слоя фиктивных магнитных зарядов, распределенных по поверхности ТО, для описания которого используется интегральное уравнение Фредгольма [7]. Как показано ниже, на основе такой математической модели может быть создан физически реализуемый управляемый источник МП в виде системы электрических контуров с токами, расположенных на поверхности ТО (рис. 1), который способен обеспечить формирование МП ТО с заданными пространственно-временными характеристиками во всей области окружающего пространства. В настоящей статье обобщены результаты исследований авторов по решению задач автоматического управления внешним МП ТО на основе поверхностно-распределенных управляемых источников МП [2–6, 14–19, 23].

**Теоретические основы управления внешним МП ТО с помощью поверхностно-распре-**



Рис. 1

**деленных управляемых источников.** Теоретическую основу данного метода управления МП ТО составляют следующие положения [3,4,17].

1. *Управление внешним МП ТО во всем пространстве  $V$ , окружающем ТО, может быть сведено к управлению МП на поверхности ТО.*

Предварительно заметим, что под внешним МП ТО понимаем стационарное (квазистационарное) МП в пространстве вне ТО, создаваемое любыми источниками, расположенными внутри ТО или на его поверхности. Для описания такого поля может быть использован скалярный магнитный потенциал, вводимый соотношением  $H = -gradU$ .

В теории потенциала [9] исследуется задача определения потенциала  $U$  в открытой области  $V$  по его значениям на поверхности  $S$ , ограничивающей эту область (внешняя задача Дирихле),

$$\Delta U(Q) = 0, \quad Q \in V, \quad (1)$$

$$U(Q) = f(Q), \quad Q \in S, \quad (2)$$

где  $f(Q)$  – заданная непрерывная функция точки  $Q$  на границе  $S$ . В частности, обосновывается существование решения этой задачи (принцип Дирихле) и доказывается единственность этого решения в виде следующей теоремы.

Функция, гармоническая в области  $V$ , вполне определяется заданием ее значений на поверхности  $S$ , ограничивающей эту область [13].

Взаимосвязь между значениями гармонической функции  $U(Q)$  в области  $V$  и на поверхности  $S$  устанавливается с помощью формулы [9]

$$U(Q) = \frac{1}{4\pi} \oint_S f(M) \cdot \frac{\partial G(Q, M)}{\partial n_M} ds, \quad (3)$$

где  $G(Q, M)$  – функция Грина внешней задачи Дирихле для уравнения Лапласа;  $n_M$  – внешняя нормаль к поверхности  $S$  в точке интегрирования  $M \in S$ , дающей решение задачи (1), (2) в области  $V$ .

2. *Внешнее МП ТО может быть описано с помощью эквивалентного источника особого типа в виде двойного слоя фиктивных магнитных зарядов, распределенных на поверхности ТО.*

Это положение доказывается в теории потенциала в процессе решения внешней задачи Дирихле для уравнения Лапласа методом граничных интегральных уравнений [9].

3. *Между скалярным потенциалом МП ТО и параметрами его эквивалентного источника в виде двойного магнитного слоя на поверхности ТО существует взаимно однозначное соответствие, устанавливаемое неоднородным интегральным уравнением Фредгольма второго рода*

$$v(Q)/2\mu_0 = (4\pi\mu_0)^{-1} \int_S v(M)K(Q, M)dS_M + U(Q), \quad (4)$$

где  $v$  – поверхностная плотность момента двойного слоя магнитных зарядов;  $K(Q, M) = \cos \vartheta / r_{QM}^2$  – ядро уравнения, являющееся функцией двух точек на поверхности ТО  $S$ ;  $\vartheta$  – угол между вектором  $r_{QM}$ , проведенным из точки наблюдения  $Q \in S$  в точку интегрирования  $M \in S$ , и внешней нормалью к поверхности  $S$  в точке  $M$ ;  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

В теории интегральных уравнений Фредгольма [7] доказывается существование и единственность решения уравнения (4), что и является теоретическим обоснованием возможности управления внешним МП ТО с помощью источника МП, расположенного на поверхности ТО.

**Основы синтеза систем автоматического управления МП ТО.** Практическая реализация теоретических положений рассматриваемого метода управления внешним МП ТО требует решения следующих основных задач, необходимых для осуществления автоматического управления:

1) синтеза физически реализуемых управляемых источников МП, которые могут быть использованы в качестве магнитных исполнительных органов САУ МП;

2) разработки методов определения скалярного потенциала МП на поверхности ТО по измеряемым параметрам МП, что необходимо для формирования обратных связей по управляемым переменным в замкнутых САУ;

3) разработки методов и средств эффективного управления внешним МП ТО в замкнутых САУ при наличии МП внешних (сторонних) источников.

Решение первой из этих задач было получено авторами в работах [3,17], где предложен управляемый источник МП в виде системы электрических контуров  $L_i$ ,  $i = \overline{1, N}$  с регулируемым током

ми  $I_i$ , покрывающих всю поверхность ТО  $S$  (рис. 1). Такой источник эквивалентен описываемому уравнением (4) источнику МП, в котором плотность момента двойного слоя магнитных зарядов на участках поверхности  $S$ , ограниченных контурами  $L_i$ , постоянна и равна  $v_i = \mu_0 I_i$ . Максимальная эффективность управления внешним МП ТО с помощью такого источника достигается в том случае, когда  $N \rightarrow \infty$ , а в качестве управляемых переменных САУ используются скалярные потенциалы МП на поверхности ТО.

Управление МП ТО с использованием описанного выше источника МП можно реализовать как в разомкнутой, так и в замкнутой структуре [3,4]. Управление в разомкнутой структуре может быть достаточно эффективным, если оно осуществляется с учетом возмущающего действия МП источников, расположенных в объеме ТО. При таком управлении токи контуров  $\bar{I} = [I_1, I_1, \dots, I_N]^T$  определяются соотношением [3]

$$\bar{I} = \mathbf{P}^{-1}(\bar{U}_3 - \bar{U}_6), \quad (5)$$

где  $\bar{U}_3 = [U_{31}, U_{32}, \dots, U_{3N}]^T$  и  $\bar{U}_6 = [U_{61}, U_{62}, \dots, U_{6N}]^T$  – векторы задания и возмущения, компонентами которых являются задающие сигналы и скалярные потенциалы возмущающего МП соответственно в точках  $Q_i$  поверхности ТО, где осуществляется управление МП;  $\mathbf{P}$  – квадратная матрица постоянных коэффициентов  $p_{ki} = -\Omega_{ik}/4\pi$ ;  $\Omega_{ik}$  – телесный угол, под которым виден участок поверхности ТО  $S_i$ , ограниченной контуром  $L_i$ , из точки  $Q_k \in S_k$ .

При отсутствии достоверной информации о возмущающем МП ТО эффективное управление МП ТО можно обеспечить в замкнутой структуре [4], реализующей принцип управления по отклонению. Такое управление осуществляется в функции отклонения  $\Delta\bar{U} = \bar{U}_3 - \bar{U}$  управляемых выходных координат системы  $\bar{U} = \bar{U}_y + \bar{U}_6$  от заданных значений  $\bar{U}_3$

$$\bar{U} = f(\Delta\bar{U}) = f(\bar{U}_3 - \bar{U}_y - \bar{U}_6), \quad (6)$$

где  $\bar{U}_y = [U_{y1}, U_{y2}, \dots, U_{yN}]^T$  – управляемая составляющая МП ТО, создаваемая МИО.

Согласно (7) необходимым условием реализации управления внешним МП ТО в замкнутой автоматической системе является возможность непрерывного получения информации о скалярном потенциале МП на поверхности ТО (вектор  $\bar{U}$ ) для формирования на ее основе сигналов обратной связи, используемых для замыкания системы. Как отмечалось выше, определение скалярного потенциала МП ТО является одной из ключевых проблем, возникающих при создании замкнутых САУ МП. Для ее решения авторами предложен ряд методов.

**Методы определения скалярного потенциала МП в процессе автоматического управления МП ТО.** Все методы, разработанные авторами для определения скалярного магнитного потенциала на поверхности ТО  $S$  по измеряемым в САУ параметрам МП [4,5,14,19], по сути дают приближенное решение внешней задачи Неймана для уравнения (1) с граничным условием

$$\partial U(Q)/\partial n_Q = -H_n(Q), \quad Q \in S, \quad (7)$$

где  $\partial U(Q)/\partial n_Q$  и  $H_n(Q)$  – нормальная производная скалярного потенциала и нормальная составляющая напряженности МП в точке  $Q$  поверхности  $S$ , и отличаются используемыми в них математическими методами решения этой задачи.

*Метод определения скалярного потенциала МП ТО, основанный на математическом методе функций Грина (МФГ).* Этот метод основан на аналитическом решении задачи (1), (7), полученном с использованием функции Грина [13], и дает выражение для приближенного вычисления скалярного потенциала МП в точке  $Q_i$  поверхности ТО  $S$  по измеренным в этой и других точках поверхности  $S$  нормальным составляющим напряженности МП [4]

$$\tilde{U}(Q_i) = \sum_{j=1}^N g_{ij} H_n(Q_j), \quad (8)$$

где  $g_{ij} = (4\pi)^{-1} \int_{S_j} G_N(Q_i, M) dS_M$  – постоянные коэффициенты, зависящие от формы наружной поверхности ТО и геометрии участков  $S_j$ , границей которых являются контуры МИО, определяющиеся

интегрированием функции  $G_N$  по поверхности  $S$ , если известно ее аналитическое выражение для этой поверхности. Однако такие выражения получены только для тел с простой формой поверхности (шар, плоскость) [13] и это существенно ограничивает возможность использования МФГ в решении проблемы управления МП ТО в замкнутой системе;  $G_N$  – функция Грина внешней задачи Неймана.

*Метод определения скалярного потенциала МП ТО, основанный на математическом методе фундаментальных решений (МФР).* Этот метод основан на приближенном решении задачи (1), (7) для точки  $Q_i$  поверхности ТО  $S$ , полученном в виде конечного ряда фундаментальных решений [1]

$$\text{уравнения (1)} \quad \tilde{U}(Q_i) = \sum_{j=1}^N p_j \Psi(Q_i - \xi_j), \quad (9)$$

где  $\Psi(Q_i - \xi_j) = |Q_i - \xi_j|^{-1}$ ;  $\xi_j$  – особые точки, расположенные в объеме ТО на вспомогательной замкнутой поверхности  $S'$  (рис. 2), охватывающей все источники МП ТО и не пересекающейся с наружной поверхностью ТО  $S$ ;  $p_j$  – постоянные коэффициенты, удовлетворяющие условию  $\sum_{j=1}^N p_j = 0$ , определяющиеся из краевого условия (7) в результате численного решения задачи минимизации квадратичного функционала [14]

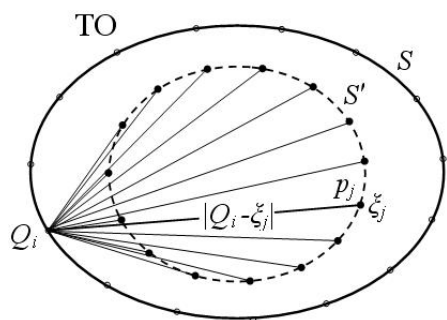


Рис. 2

$$\min_p \sum_{i=1}^N \left[ \sum_{j=1}^M p_j \frac{\partial \Psi(Q_i - \xi_j)}{\partial n_Q} - H_n(Q_i) \right]^2. \quad (10)$$

МФР не накладывает никаких ограничений на форму поверхности ТО, что является его основным преимуществом по сравнению с МФГ. К недостаткам метода следует отнести необходимость введения вспомогательной поверхности  $S'$ , расположение которой относительно поверхности ТО  $S$  существенно влияет на погрешность определения скалярного потенциала [19]. Кроме того, необходимость решения оптимизационной задачи (10) для каждого нового набора первичных данных о МП на поверхности ТО требует определенного времени, что может негативно влиять на динамику управления МП ТО в замкнутой системе.

*Метод определения скалярного потенциала МП ТО, основанный на использовании нейронной сети (МНС) [5].* Этот метод был разработан авторами с целью исключения недостатков, присущих МФГ и МФР. В его основе лежит использование искусственной нейронной сети [21] для определения зависимости между скалярным потенциалом и напряженностью МП на поверхности ТО, которая может быть представлена в виде многомерной линейной функции

$$\tilde{U} = \mathbf{G}\bar{H}_n, \quad (11)$$

где  $\tilde{U} = [\tilde{U}(Q_1), \tilde{U}(Q_2), \dots, \tilde{U}(Q_N)]^T$  и  $\bar{H}_n = [H_n(Q_1), H_n(Q_2), \dots, H_n(Q_N)]^T$  – векторы приближенных значений скалярного потенциала и нормальных компонент напряженности МП соответственно в точках  $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$  поверхности  $S$ , на которой ищется решение задачи (1), (7);  $\mathbf{G}$  – квадратная матрица коэффициентов  $g_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, N}$ , определяемых формулой (8).

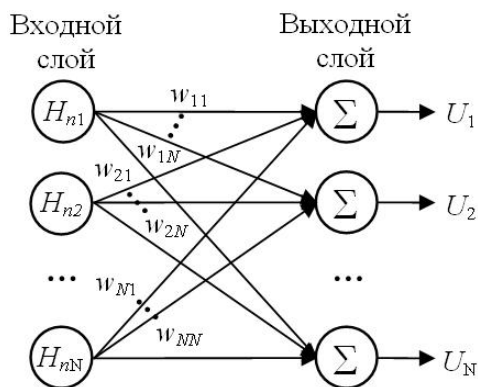


Рис. 3

Реализации функциональной зависимости (11) возможна с помощью линейной однослойной нейронной сети прямого распространения без смещений (рис. 3), осуществляющей преобразование входного вектора  $\bar{H}_n$  в вектор скалярных потенциалов  $\tilde{U}$  в соответствии с выражением

$$\tilde{U} = \mathbf{W}\bar{H}_n, \quad (12)$$

где  $\mathbf{W}$  – матрица весовых коэффициентов  $w_{ij}$  нейронов.

Весовые коэффициенты  $w_{ij}$  определяются на стадии синтеза нейронной сети в процессе ее обучения. Эта процедура проводится с использованием рекуррентного обучающего правила наименьших квадратов, минимизирующего среднее значение суммы квадратов ошибок обучения [21]. Формирование обучающих последовательностей  $\{\bar{H}_n\}_k$  и  $\{\bar{U}\}_k$  проводится на основе данных о МП на поверхности ТО  $S$ , полученных расчетным путем при моделировании источников МП ТО магнитными диполями, параметры и расположение которых в объеме ТО задается случайным образом.

Из изложенного выше следует, что в МНС нет ограничений на форму поверхности ТО, как в МФГ, отсутствует необходимость введения вспомогательной поверхности  $S'$ , оказывающей влияние на погрешность вычислений, как в МФР, а оптимизационная задача по определению коэффициентов матрицы  $W$  решается на этапе разработки нейронной сети, а не ее функционирования, что обеспечивает более высокую скорость преобразования вектора  $\bar{H}_n$  в вектор  $\bar{U}$  по сравнению с МФР.

**Обеспечение эффективного управления МП ТО в условиях действия МП внешних источников.** Если ТО находится в МП внешних источников, например, в МП Земли, его собственное МП может быть измерено только совместно с МП этих источников. При управлении МП ТО в замкнутой системе составляющая измеренного МП  $U'_g$ , обусловленная действием внешних источников, попадет через измерительные цепи обратных связей в контур управления и негативно влияет на процесс управления МП ТО, играя роль помехи. Действительно, согласно (7) управление МП ТО в замкнутой системе осуществляется таким образом, чтобы минимизировать величину  $\Delta\bar{U} = \bar{U}_z - \bar{U}_y - \bar{U}_g \approx 0$ . При наличии помехи  $U'_g$  система управления будет минимизировать величину  $\Delta\bar{U}' = \Delta\bar{U} - \bar{U}'_g \approx 0$  и, следовательно, ошибка управления МП ТО  $\Delta\bar{U}$  будет стремиться не к нулю, а к значению, определяемому уровнем помехи  $\bar{U}'_g$ . Исключить такое влияние МП внешних источников возможно путем выделения (селектирования) составляющей МП ТО из измеренного суммарного МП. Для осуществления такого селектирования авторами предложен ряд методов [18], которые можно разделить на три основные группы: аналитические, аппаратно-параметрические и комбинированные.

*Аналитические методы селектирования МП ТО* используют только математическую обработку результатов измерения МП на поверхности ТО. В их основе лежат математические приемы разделения потенциальных полей на составляющие внешних и внутренних относительно поверхности измерения источников. Из существующих математических методов разделения потенциальных полей наибольший интерес для решения задачи селектирования МП ТО представляет интегральный метод Кертца-Зибберта [10], обладающий инвариантностью к форме поверхности измерения. На основе этого метода получена интегральная формула [18]

$$\vec{H}_{TO}(\vec{r}_0) = \frac{\vec{H}_\Sigma(\vec{r}_0)}{2} - \frac{1}{4\pi} \int_S \left\{ (\vec{n} \cdot \vec{H}_\Sigma(\vec{r})) \text{grad} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_0|} + [\vec{n} \times \vec{H}_\Sigma(\vec{r})] \times \text{grad} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_0|} \right\} ds, \quad (13)$$

где  $\vec{r}_0 \in S$  – радиус-вектор точки, в которой определяется МП;  $\vec{r} \in S$  – радиус-вектор точки интегрирования, которая позволяет рассчитать напряженность МП ТО  $\vec{H}_{TO}$  на поверхности ТО  $S$  по результатам измерения напряженности суммарного МП  $\vec{H}_\Sigma = \vec{H}_{TO} + \vec{H}'_g$  на этой поверхности.

*Аппаратно-параметрические методы селектирования МП ТО* основаны на использовании результатов измерения суммарного МП  $\vec{H}_\Sigma$  на поверхности ТО  $S$  и информации о МП внешних источников  $\vec{H}'_g$  на этой поверхности, полученной с помощью аппаратных средств или иными способами. МП ТО  $\vec{H}_{TO} = \vec{H}_y + \vec{H}'_g$  в точках управления  $Q_i \in S$  определяется как векторная разность  $\vec{H}_{TO}(Q_i) = \vec{H}_\Sigma(Q_i) - \vec{H}'_g(Q_i)$ .

*Комбинированные методы селектирования МП ТО* сочетают в себе элементы как аналитического, так и аппаратно-параметрического методов селектирования МП ТО. В зависимости от конкретных условий этот метод может быть реализован в различных формах. Пример его использования для случая, когда МП внешних источников является однородным в пределах пространства, занимаемого ТО, а сам ТО имеет форму шара, рассмотрен в [18].

Из рассмотренных методов селектирования МП ТО наиболее универсальным является аналити-

ческий, основанный на использовании формулы (13). Однако его практическая реализация связана с определенным усложнением измерительной части САУ МП из-за необходимости измерения всех координатных составляющих вектора суммарного МП на поверхности ТО. Для реализации аппаратно-параметрических и комбинированных методов селектирования МП ТО в большинстве случаев достаточно измерения только нормальных составляющих суммарного МП, что не ведет к усложнению САУ МП, поскольку именно эти составляющие МП используются в качестве управляемых координат.

**Система автоматического управления МП ТО.** На рис. 4 показана функциональная схема замкнутой многоканальной САУ внешним МП ТО, выполненная в соответствии с рассмотренными выше принципами построения и реализующая разработанные методы управления. Ее основными элементами являются: МИО в виде системы электрических контуров, расположенных на поверхности ТО (рис. 1); управляемый многоканальный источник питания (ИП) МИО; многоканальный регулятор (Р); датчик напряженности МП в точках поверхности ТО (ДМП), где осуществляется управление; селектирующее (СУ) и преобразующее (ПУ) устройства, обеспечивающие формирование сигналов обратной связи на основе измеренного на поверхности ТО МП.

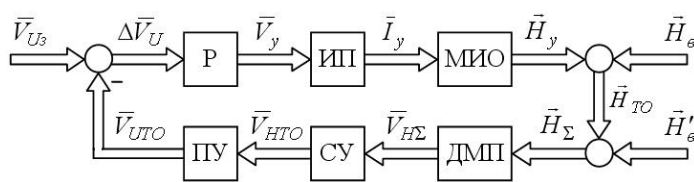


Рис. 4

Согласно схеме, управляющее воздействие  $\vec{V}_y$  для источников питания МИО вырабатывается регулятором Р в функции отклонения  $\Delta\vec{V}_U$  сигналов обратных связей  $\vec{V}_{UTO}$  от сигналов задания  $\vec{V}_{U3}$ . Формирование сигналов обратных связей  $\vec{V}_{UTO}$  производится на основе сигналов  $\vec{V}_{H\Sigma}$  датчиков

ДМП, измеряющих напряженность результирующего МП  $\vec{H}_\Sigma$  в заданных точках поверхности ТО. Это поле является суммой управляющего МП  $\vec{H}_y$ , создаваемого МИО, и возмущающих МП внутренних  $\vec{H}'_e$  и внешних  $\vec{H}'_s$  источников. С помощью селектирующего устройства СУ из сигналов  $\vec{V}_{H\Sigma}$  выделяется составляющая  $\vec{V}_{HTO}$ , соответствующая напряженности МП ТО  $\vec{H}_{TO} = \vec{H}_y + \vec{H}'_e$ , которая преобразуется с помощью преобразующего устройства ПУ в сигналы обратных связей  $\vec{V}_{UTO}$  по скалярным потенциалам МП ТО  $U_{TO}$ , по которым и производится замыкание системы управления.

Исследование методом компьютерного моделирования замкнутой 32-канальной САУ МП (рис. 4) для ТО сферической формы [19], находящегося в МП Земли, показали, что относительная статическая погрешность управления МП на расстояниях, менее габаритного размера ТО от его поверхности, составляет величину от 1 до 10% в зависимости от расположения точки наблюдения. При необходимости эта погрешность может быть снижена путем увеличения количества каналов САУ [2].

**Заключение.** Рассмотренный принцип управления внешним магнитным полем технических объектов, основанный на управлении скалярным потенциалом магнитного поля на поверхности объекта с помощью поверхностно-распределенной системы контуров с управляемыми токами, а также предложенные методы его реализации позволяют обеспечить практическое решение задач автоматического управления внешним магнитным полем технических объектов, в том числе вблизи их поверхности.

1. Алексидзе М.А. Фундаментальные функции в приближенных решениях граничных задач. – М.: Наука, 1991. – 412 с.

Aleksidze M.A. Fundamental functions in approximate solutions to boundary value problems. – Moskva: Nauka, 1991. – 412 p. (Rus.)

2. Ассуиров Д.А. Исследование системы активного экранирования магнитного поля постоянных токов // Электротехника і електродинаміка. – 2007. – №2. – С. 63–64.

Assuirov D.A. System research of active shielding of magnetic field of permanent stream // Elektrotehnika і elektrodynamika. – 2007. – №2. – P. 63–64. (Rus.)

3. Ассуиров Д.А. Управление внешним магнитным полем технических объектов с источниками управляющего поля поверхностно-распределенного типа // Техн. електродинаміка. – 2007. – №6. – С. 8–14.

Assuirov D.A. External magnetic field control of technical objects with controlling field sources of surface-distributed type // Tekhnichna elektrodynamika. – 2007. – №6. – P. 8–14. (Rus.)

4. *Ассуиров Д.А.* Управление внешним магнитным полем технических объектов с источниками управляющего поля поверхностно-распределенного типа в замкнутой системе // Техн. электродинамика. – 2008. – №1. – С. 19–24.
- Assuirov D.A.* External magnetic field control of technical objects with controlling field sources of surface-distributed type in closed loop system // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2008. – №1. – P. 19–24. (Rus.)
5. *Ассуиров Д.А., Давыдов А.А., Реуцкий С.Ю.* Нейросетевой метод решения внешней задачи Неймана теории магнитного поля // Техн. электродинамика. Тем. вип. "Проблемы сучасної електротехніки". – 2010. – Ч. 1. – С. 13–16.
- Assuirov D.A., Davydov A.A., Reutskii S.Yu.* Neural network method of solving an exterior Neumann problem of the theory of magnetic field // *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki"*. – 2010. – Vol 1. – P. 13–16. (Rus.)
6. *Ассуиров Д.А., Кузнецов Б.И., Давыдов А.А.* Влияние внешних магнитных полей на управление магнитным полем технических объектов в замкнутой автоматической системе / 16 Міжн. конф. з автоматичного управління «Автоматика – 2009». Тези доповідей. – Чернівці: Книга XXI, 2009. – С. 110–111.
- Assuirov D.A., Kuznetsov B.I., Davydov A.A.* Influence of external magnetic fields on external magnetic field control of technical objects in closed loop automatic system / XVI Mizhnar. konf. z avtomatichnogo upravlinnia "Avtomatyka – 2009". Tezy dopovidei. – Chernivtsi: Knyga XXI, 2009. – P. 110–111. (Rus.)
7. *Владимиров В.С.* Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1967. – 436 с.
- Vladimirov V.S.* Equations of mathematical physics. – Moskva: Nauka, 1967. – 436 p. (Rus.)
8. *Григорьев Б.П.* Актуальные проблемы снижения физических полей судов // Труды международной конференции по судостроению. Секция А. Судовая электродинамика, магнетизм и гидрофизика. – СПб-б.: Изд-во ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, 1994. – С. 3–7.
- Grigorev B.P.* Actual problems of physical field reduction of ships // Trudy mezhdunar. konf. po sudnostroeniiu. Sektsiia A. Sudovaia elektrodinamika, magnetizm i hidrofizika. – Sankt-Peterburg: Centralnyi Nauchno-issledovatel'skii institut im. akad. A.N.Krylova, 1994. – P. 3–7. (Rus.)
9. *Гюнтер Н.М.* Теория потенциала и ее применение к основным задачам математической физики. – М.: Гостехиздат, 1953. – 280 с.
- Giunter N.M.* Potential theory and its application to basic problems of mathematical physics. – Moskva: Gostekhizdat, 1953. – 280 p. (Rus.)
10. *Жданов М.С.* Аналогии интеграла типа Коши в теории геофизических полей. – М.: Наука, 1984. – 326 с.
- Zhdanov M.S.* Analogies of the Cauchy integral in the theory of geophysical fields. – Moskva: Nauka, 1984. – 326 p. (Rus.)
11. *Князев А.Д.* Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. – М.: Радио и связь, 1984. – 336 с.
- Kniazev A.D.* Elements of theory and practice with regard to the assurance of the electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment. – Moskva: Radio i sviaz, 1984. – 336 p. (Rus.)
12. *Коваленко А.П.* Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1975. – 248 с.
- Kovalenko A.P.* Magnetic systems for spaceship control. – Moskva: Mashinostroenie, 1975. – 248 p. (Rus.)
13. *Кошляков Н.С.* Основные дифференциальные уравнения математической физики. – Л.-М.: Государственное технико-теоретическое издательство, 1932. – 512 с.
- Koshliakov N.S.* Basic differential equations of mathematical physics. – Leningrad-Moskva: Gostekhnteorizdat, 1932. – 512 p. (Rus.)
14. *Реуцкий С.Ю., Ассуиров Д.А.* Об одном численном методе решения задачи Неймана в связи с решением проблемы управления внешним магнитным полем технических объектов в замкнутой системе // Электротехника і електродинаміка. – 2008. – №3. – С. 58–62.
- Reutskii S.Yu., Assuirov D.A.* About one numerical method for the solution of certain Neumann problems in connection with problem solving of external magnetic field control of technical objects in closed loop system // *Elektrotekhnika i elektrodynamika*. – 2008. – №3. – P. 58–62. (Rus.)
15. *Розов В.Ю., Ассуиров Д.А.* Исследование замкнутой системы автоматического управления магнитным полем технического объекта // Техн. электродинамика. Тем. вип. "Проблемы сучасної електротехніки". – 2004. – Ч. 2. – С. 13–16.
- Rosov V.Yu., Assuirov D.A.* Study of closed system of magnetic field automatic control of technical object // *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki"*. – 2004. – Vol 2. – P. 13–16. (Rus.)
16. *Розов В.Ю., Ассуиров Д.А.* Метод активного экранирования внешнего магнитного поля технических объектов // Техн. электродинамика. Тем. вип. "Проблемы сучасної електротехніки". – 2006. – Ч. 3. – С. 13–16.
- Rosov V.Yu., Assuirov D.A.* Method of active shielding of external magnetic field of technical objects // *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki"*. – 2006. – Vol 3. – P. 13–16. (Rus.)

17. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А. Принципы построения систем автоматического управления внешним магнитным полем технических объектов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2005. – №45. – С. 101–102.

Rosov V.Yu., Assuirov D.A. System integration principles of automatic control of external magnetic field of technical objects // Visnyk Natsionalnogo Tekhnichnogo Universytetu "Kharkivskiy Politekhnichnyi Instytut". – 2005. – №45. – P. 101–102. (Rus.)

18. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А., Давыдов А.А. Методы формирования сигналов обратных связей в замкнутых системах управления магнитным полем технических объектов при наличии сторонних источников магнитного поля // Техн. електродинаміка. – 2009. – №6. – С. 8–16.

Rosov V.Yu., Assuirov D.A., Davydov A.A. Methods of forming feedback signals in closed-loop control systems of the magnetic field of technical objects under off-site magnetic field sources // Tekhnichna elektrodynamika. – 2009. – №6. – P. 8–16. (Rus.)

19. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А., Реуцкий С.Ю. Замкнутые системы компенсации магнитного поля технических объектов с различными способами формирования обратных связей // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2010. – Ч. 4. – С. 97–100.

Rosov V.Yu., Assuirov D.A., Reutskii S.Yu. Closed loop systems of magnetic field compensation of technical objects with different ways of feedback formation // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki". – 2010. – Vol. 2. – P. 97–100. (Rus.)

20. Розов В.Ю., Добродеев П.Н., Волохов С.А., Гузеев С.Т. Мультипольная модель технического объекта и его магнитный центр // Техн. електродинаміка. – 2008. – №2. – С. 3–8.

Rosov V.Yu., Dobrodeev P.N., Volokhov S.A., Guzeev S.T. Multipole model of technical object and its magnetic centre // Tekhnichna elektrodynamika. – 2008. – №8. – P. 3–8. (Rus.)

21. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / Пер. с англ. – М.: Изд. дом "Вильямс", 2006. – 1104 с.

Haikin S. Neural networks: A comprehensive foundation / Transl. from Engl. – Moskva: Williams, 2006. – 1104 p. (Rus.)

22. Холодов Ю.А. Организм и магнитные поля // Успехи физиологических наук. – 1982. – Т.13. – №2. – С. 48–64.

Kholodov Yu.A. Organism and magnetic field // Uspekhi fiziologicheskikh nauk. – 1982. – Vol.13. – №2. – P. 48–64. (Rus.)

23. Шидловский А.К., Розов В.Ю. Системы автоматической компенсации внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов // Техн. електродинаміка. – 1996. – №1. – С. 3–9.

Shidlovskii A.K., Rosov V.Yu. Automatic compensation systems of external magnetic field of energy-saturated objects // Tekhnicheskaya elektrodynamika. – 1996. – №1. – P. 3–9. (Rus.)

УДК 621.3.073

**В.Ю.Розов<sup>1</sup>**, чл.-кор. НАН України, **Д.А.Ассуіров<sup>2</sup>**, канд.техн.наук

<sup>1,2</sup> – Науково-технічний центр магнетизму технічних об'єктів НАН України, вул. Індустріальна, 19, а/с 72, м.Харків, 61106, Україна.

**Автоматичне керування зовнішнім магнітним полем технічних об'єктів**

*Розглянуто принципи автоматичного управління зовнішнім магнітним полем технічних об'єктів, які базуються на управлінні скалярним потенціалом магнітного поля на поверхні об'єктів за допомогою поверхнево-розподіленої системи контурів з керованими струмами, а також запропоновано методи їхньої реалізації, що дозволяють забезпечити практичний розв'язок задач автоматичного управління зовнішнім магнітним полем технічних об'єктів, у тому числі поблизу їхньої поверхні. Бібл. 23, рис. 4.*

**Ключові слова:** магнітне поле, автоматичне управління, еквівалентне джерело, скалярний потенціал.

**V.Yu.Rozov<sup>1</sup>**, **D.A.Assuirov<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup> – Scientific and Technical Center of Magnetism of Technical Objects of National Academy of Science of Ukraine, Industrialna, 19, a/s 72, Kharkiv, 61106, Ukraine.

**Automatic control of external magnetic field of technical objects**

*The principles of automatic control of external magnetic field of technical objects which are based on the control of scalar potential of magnetic field on the surface of objects with the help of surface-distributed system of contours with control currents are considered. The methods of their realization which permit to ensure the practical problem solutions of automatic control of external magnetic field of technical objects including their surface are suggested. References 23, figures 4.*

**Key words:** magnetic field, automatic control, equivalent source, skalar potential.

Надійшла 09.09.2010

Received 09.09.2010