

УДК 623.618.

Ю.В. Данилов, В.И. Левчин, А.В. Уланов, А.С. Федоров

## ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КОРАБЛЯ

**Данилов Юрий Васильевич**, закончил факультет автоматизированных систем управления Высшего военно-морского училища радиоэлектроники (ВМУРЭ) им. А.С. Попова. Старший научный сотрудник НИЦ ОСО ФГУ «24 ЦНИИ МО РФ». Имеет статьи и публикации в области математического моделирования вооруженной борьбы на море, а также в области анализа управления рисками. [Тел.: (812) 450-50-79, доб. 118].

**Левчин Вячеслав Игоревич**, закончил факультет математического обеспечения автоматизированных систем управления ВМУРЭ им. А.С. Попова. Заместитель начальника отдела НИЦ ОСО ФГУ «24 ЦНИИ МО РФ». Имеет статьи и публикации в области математического моделирования вооруженной борьбы на море, а также в области анализа управления рисками. [Тел.: (812) 450-50-79, доб. 118].

**Уланов Алексей Васильевич**, закончил факультет автоматизированных систем управления ВМУРЭ им. А.С. Попова. Начальник отдела НИЦ ОСО ФГУ «24 ЦНИИ МО РФ». Имеет статьи и публикации в области математического моделирования вооруженной борьбы на море, а также в области анализа управления рисками. [Тел.: (812) 450-50-79, доб. 118].

**Федоров Алексей Сергеевич**, закончил факультет математического обеспечения автоматизированных систем управления ВМУРЭ им. А.С. Попова. Адъюнкт ФГУ «24 ЦНИИ МО РФ». Имеет статьи и публикации в области математического моделирования вооруженной борьбы на море, а также в области анализа управления рисками. [E-mail: fedorov\_a@list.ru].

### Аннотация

В статье рассматриваются природа магнитного поля корабля (МПК), источники его возникновения, векторный характер его представления и основные составляющие (постоянная и индуктивная намагниченность). Определена топология поля, и представлен подход к пересчету параметров магнитного поля корабля в произвольной точке пространства по имеющимся данным контрольных замеров.

Ценность предлагаемого подхода заключается в том, что он опирается на достаточно простые математические зависимости и использует доступные исходные данные. Достижимая при этом точность достаточна для проведения оперативно-тактических расчетов.

Ключевые слова: магнитное поле корабля, топология магнитного поля корабля, расчет параметров магнитного поля корабля.

### Abstract

The article deals with nature of ship magnetic field, its sources, vector nature of its presentation and basic components (permanent and inductive magnetization). The article also defines field topology and presents approach to recalculation of ship magnetic field parameters in an arbitrary point of space by available data.

The value of the proposed approach consists in the fact that it is based on sufficiently simple mathematical dependencies and applies available reference data. At that, achieved accuracy is sufficient for operational and tactical calculations.

### Key words:

ship magnetic field, topology of ship magnetic field, calculation of parameters of ship magnetic field

### 1 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КОРАБЛЯ

Причиной образования магнитного поля корабля является магнитное поле Земли, находясь в котором корабль намагничивается, т.е. приобретает собственное магнитное поле. Отличительными особенностями магнитного поля ко-

рабля являются нестабильность его во времени даже для сходных условий измерения для одного и того же корабля, а также значительное отличие магнитного поля конкретного корабля от других кораблей притом одного и того же класса. Магнитное поле корабля образуется как

результат наложения многих элементов — постоянного намагничивания, индуктивного намагничивания, полей, создаваемых электрооборудованием корабля, включая также специальные устройства компенсации магнитного поля. Иногда также рассматривают поле динамического намагничивания, которое определяется движением корабля как магнита в проводящей среде (морская вода) и движением корабля как проводника в магнитном поле Земли (МПЗ).

Напряженность полей электрооборудования и динамического намагничивания корабля значительно ниже, чем напряженность двух основных его составляющих (постоянное и индуктивное намагничивание).

**Постоянное намагничивание** приобретает кораблем под действием земного магнитного поля главным образом в период постройки и зависит от следующих факторов:

- ориентация корабля при постройке;
- широта места постройки;
- магнитные свойства материалов, из которых построен корабль;
- распределение ферромагнитных масс;
- технология постройки (количество сварочных и клепальных работ).

Характер и величина постоянного намагничивания могут значительно изменяться в случае сильных сотрясений корпуса корабля, которые имеют место при близких взрывах, стрельбах, а также при длительном плавании в районах, где геомагнитное поле значительно отличается от поля в месте постройки.

**Индуктивное намагничивание**, в отличие от постоянного, полностью определяется величиной действующего на корабль в данный момент магнитного поля Земли. Основными факторами, влияющими на индуктивное намагничивание корабля, являются:

- широта места;
- курс корабля;
- магнитные свойства материалов, из которых построен корабль (магнитная проницаемость).

Перечисленные факторы обуславливают возникновение постоянного или медленно меняющегося поля, частота которого является весьма низкой и составляет доли герца [2].

### 1.1 Основные составляющие магнитного поля корабля

Основной характеристикой магнитного поля является напряженность ( $\vec{H}$ ), которая имеет векторный характер. Вектор напряженности магнитного поля корабля принято представлять в виде совокупности трех составляющих:

$$\vec{H}_e = \vec{H}_x + \vec{H}_y + \vec{H}_z,$$

где  $\vec{H}_x$  - продольная составляющая напряженности магнитного поля корабля;

$\vec{H}_y$  - поперечная составляющая напряженности магнитного поля;

$\vec{H}_z$  - вертикальная составляющая напряженности магнитного поля.

Применительно к магнитному полю корабля координатные оси принято ориентировать по следующим направлениям (см. рис. 1):

- ось  $x$  — от носа корабля в корму;
- ось  $y$  — поперек корабля, с правого борта на левый;
- ось  $z$  — вертикально вниз.

Точкой начала отсчета координат является точка пересечения главных плоскостей корабля (плоскость ватерлинии, плоскость мидельшпангоута, диаметральной плоскости). Основной единицей измерения напряженности магнитного поля является ампер на метр (А/м).

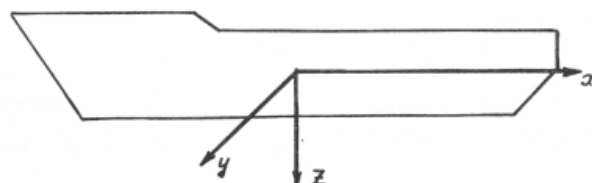


Рис. 1. Направление координатных осей магнитного поля корабля [1]

#### 1.1.1 Продольная составляющая магнитного поля корабля

Продольную намагниченность корабль получает под воздействием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли вдоль оси  $x$ . Вектор напряженности магнитного поля от продольного намагничивания раскладывается на следующие составляющие (символ ' применяется для того, чтобы не путать составляющие напряженности поля с координатными осями):

$$\vec{H}'_x = \vec{X}'_x + \vec{Y}'_x + \vec{Z}'_x,$$

где  $X'_x$  - продольная составляющая напряженности поля продольного намагничивания;

$Y'_x$  — поперечная составляющая напряженности поля продольного намагничивания;

$Z'_x$  — вертикальная составляющая напряженности поля продольного намагничивания.

В общем случае каждая составляющая представляет собой сумму составляющих от постоянной и индуктивной намагниченности (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} X'_x &= x'_{px} + x'_{ix}; \\ Y'_x &= y'_{px} + y'_{ix}; \\ Z'_x &= z'_{px} + z'_{ix}. \end{aligned}$$

#### 1.1.2 Поперечная составляющая магнитного поля корабля

Поперечную намагниченность корабль получает под воздействием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли вдоль оси  $y$ .

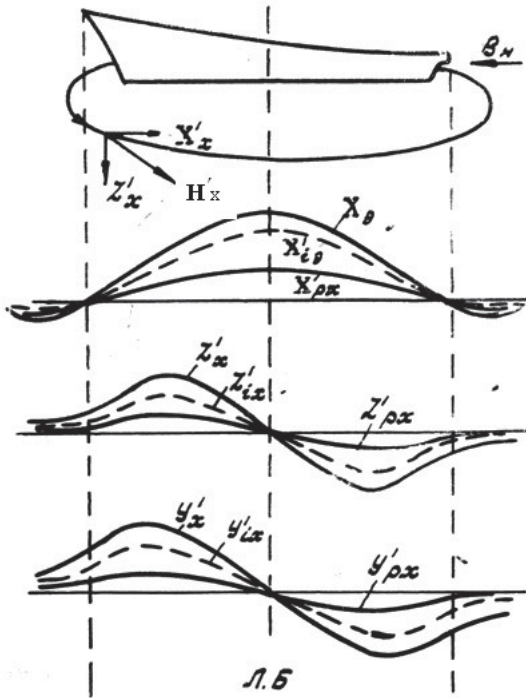


Рис. 2. Поле продольной намагниченности корабля (на курсе Нورد) [3]

Вектор напряженности магнитного поля от поперечного намагничивания раскладывается на следующие составляющие:

$$\bar{H}'_y = \bar{X}'_y + \bar{Y}'_y + \bar{Z}'_y,$$

где  $X'_y$ ,  $Y'_y$ ,  $Z'_y$  — продольная, поперечная и вертикальная составляющие напряженности поля поперечного намагничивания.

Аналогично 1.1.1, каждый из перечисленных элементов представляет собой сумму составляющих от постоянной и индуктивной намагниченности (см. рис. 3):

$$X'_y = x'_{py} + x'_{iy}$$

$$Y'_y = y'_{py} + y'_{iy}$$

$$Z'_y = z'_{py} + z'_{iy}$$

### 1.1.3 Вертикальная составляющая магнитного поля корабля

Вертикальную намагниченность корабль получает под воздействием вертикальной составляющей магнитного поля Земли. Вектор напряженности магнитного поля от вертикального намагничивания раскладывается на следующие составляющие:

$$\bar{H}'_z = \bar{X}'_z + \bar{Y}'_z + \bar{Z}'_z,$$

где  $X'_z$ ,  $Y'_z$ ,  $Z'_z$  — продольная, поперечная и вертикальная составляющие напряженности поля вертикального намагничивания.

Аналогично 1.1.1, каждый из перечисленных элементов представляет собой сумму составляющих от постоянной и индуктивной намагниченности (см. рис. 4, 5):

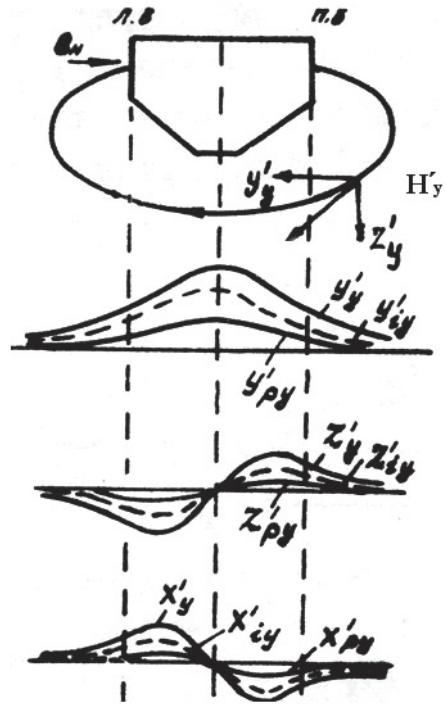


Рис. 3. Поле поперечной намагниченности корабля (на курсе Вест) [3]

$$\begin{aligned} X'_z &= x'_{pz} + x'_{iz} \\ Y'_z &= y'_{pz} + y'_{iz} \\ Z'_z &= z'_{pz} + z'_{iz} \end{aligned}$$

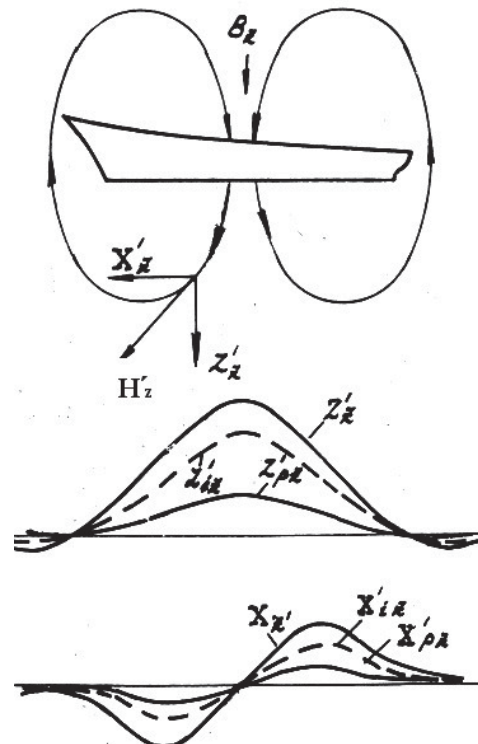


Рис. 4. Поле вертикальной намагниченности корабля, вид сбоку (северное полушарие) [3]

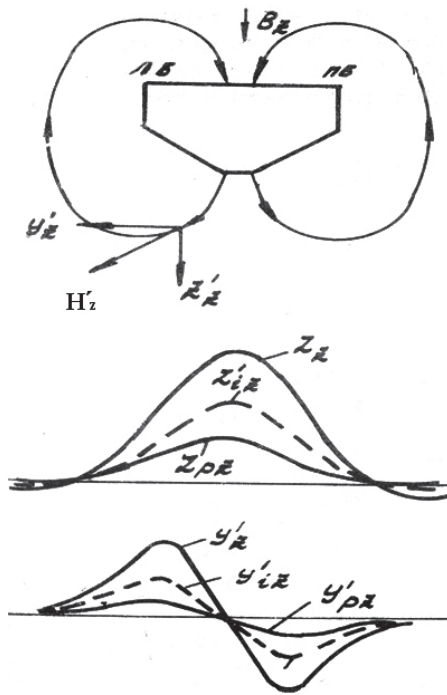


Рис. 5. Поле вертикальной намагниченности корабля, вид спереди (северное полушарие) [3]

**1.2 Особенности индуктивной намагниченности корабля**

Как было указано выше, вектор напряженности магнитного поля корабля, как и любой другой вектор, может быть представлен в виде разложения по трем составляющим (вертикальная, продольная и поперечная), каждая из которых в свою очередь состоит из постоянной и индуктивной части. При этом постоянная часть имеет относительно стабильный характер и при изменении внешнего магнитного поля (поля Земли) в течение достаточно длительного времени сохраняет свои значения. Индуктивная же составляющая полностью определяется магнитным полем Земли и может изменяться в достаточно широких пределах при изменении широты места и особенно курса корабля.

Магнитное поле корабля как сумма постоянной и индуктивной частей, благодаря своей индуктивной составляющей, меняется при изменении курса корабля и широты места. Чтобы обеспечить возможность расчета параметров магнитного поля корабля для произвольных широт плавания и произвольных курсов, необходимо знать, какой вклад в суммарную напряженность магнитного поля корабля вносит каждая из его составляющих. Данная задача решается путем замера параметров магнитного поля на основных магнитных курсах (норд, ост, зюйд, вест). Таким образом, для моделирования магнитного поля, в принципе, достаточно иметь 4 набора численных значений параметров магнитного поля (для основных магнитных курсов

корабля). Однако это неудобно с точки зрения подготовки исходных данных для моделирования, поскольку требует задания большого числа параметров, а для кораблей противника и вовсе невозможно. В настоящей работе предлагается для каждого корабля хранить только один набор параметров, соответствующий его постоянной намагниченности. При этом индуктивная намагниченность должна пересчитываться для конкретных условий плавания (широта места, курс). Далее определим соотношение между постоянной и индуктивной частями намагниченности корабля.

**1.2.1 Соотношение между постоянной и индуктивной намагниченностью**

Согласно [3] соотношение между максимальными значениями постоянной и индуктивной намагниченности можно приближенно оценить следующим образом (на примере вертикальной составляющей магнитного поля):

$$Z_{iz} / Z_{pz} = 2 * \mu * h / T,$$

где  $Z_{iz}$  - индуктивное намагничивание корабля;

$Z_{pz}$  - постоянное намагничивание корабля;

$\mu$  - магнитная проницаемость материала обшивки корпуса корабля;

$h$  - средняя толщина обшивки корпуса корабля;

$T$  - максимальная высота борта корабля.

Анализ данного соотношения позволяет заключить, что при увеличении толщины обшивки корпуса корабля и его магнитной проницаемости доля индуктивной составляющей возрастает, а в предельном случае (например, для сплошного металлического тела) магнитное поле образуется только от индуктивного намагничивания.

Это дает возможность выразить максимальное значение индуктивной намагниченности в следующем виде:

$$Z_{iz} = Z_{pz} * 2 * \mu * h / T. \tag{1}$$

Следует отметить, что величина магнитной проницаемости  $\mu$  для кораблестроительных сталей, из которых строят корпуса кораблей, является переменной величиной, которая колеблется от начальных до максимальных значений в следующих пределах:

-  $\mu_{нач.}$  - 100 - 250;

-  $\mu_{макс.}$  - 120 - 1000.

Конкретное значение магнитной проницаемости зависит как от внешнего магнитного поля, так и от предыдущих ударных, тепловых и электрических воздействий на корпус корабля. Таким образом, по мере эксплуатации магнитная проницаемость корпуса корабля непрерывно возрастает. Отсюда следует, что без выполнения специальных мероприятий по снижению уровня магнитного поля корабля (размагничивания) значительно (в разы) возрастает его индуктивная намагниченность.

При помощи формулы (1) нетрудно посчитать, что для корабля класса «эсминец» с высотой борта около 8 метров, средней толщиной обшивки 1,5 см и магнитной проницаемостью  $\mu = 200$  максимальное значение напряженности индуктивной составляющей магнитного поля будет составлять до 75% от напряженности постоянной составляющей.

Выражение (1) можно записать в виде:

$$Z_{iz} = K * Z_{pz}, \quad (2)$$

где  $K = 2 * \mu * h / T$ .

В настоящей работе магнитная проницаемость материалов обшивки корабля рассматривается как величина постоянная и задается в качестве исходных данных.

### 1.2.2 Зависимость индуктивной намагниченности от внешних условий

Как было отмечено выше, индуктивная составляющая намагниченности корабля полностью определяется напряженностью магнитного поля Земли и может изменяться в достаточно широких пределах при изменении широты места и особенно курса корабля.

При этом горизонтальные составляющие индуктивной намагниченности (продольная и поперечная) изменяются пропорционально горизонтальной составляющей магнитного поля Земли и зависят как от широты места, так и от курса

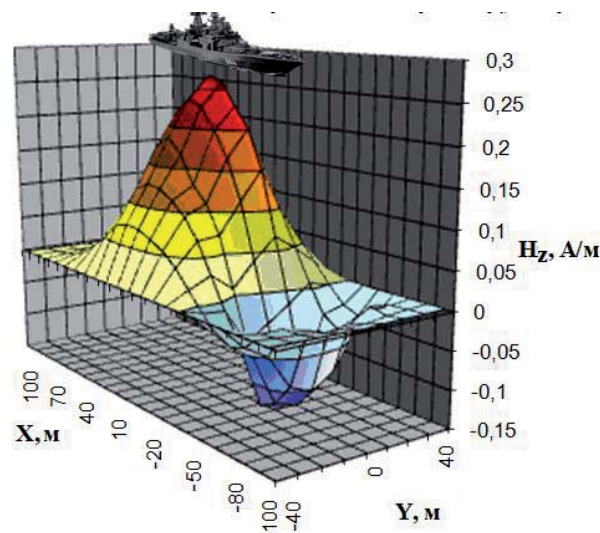


Рис. 6. Примерная конфигурация магнитного поля корабля класса «эсминец» на глубине 15 м (вертикальная составляющая)

корабля, а вертикальная составляющая изменяется пропорционально вертикальной составляющей магнитного поля Земли и зависит только от широты места. Для определения характера зависимости индуктивной намагниченности корабля от магнитного поля Земли предлагается пользоваться следующей таблицей (см. таблицу 1).

Таблица 1  
Зависимость индуктивной намагниченности корабля от магнитного поля Земли

Составляющая МПК	Составляющая МПЗ	Внешний фактор		
		Место корабля		Курс корабля
		Фактор	Закон изменения	
Продольная	Горизонтальная	Широта	sin	cos
Поперечная			sin	sin
Вертикальная	Вертикальная		cos	-

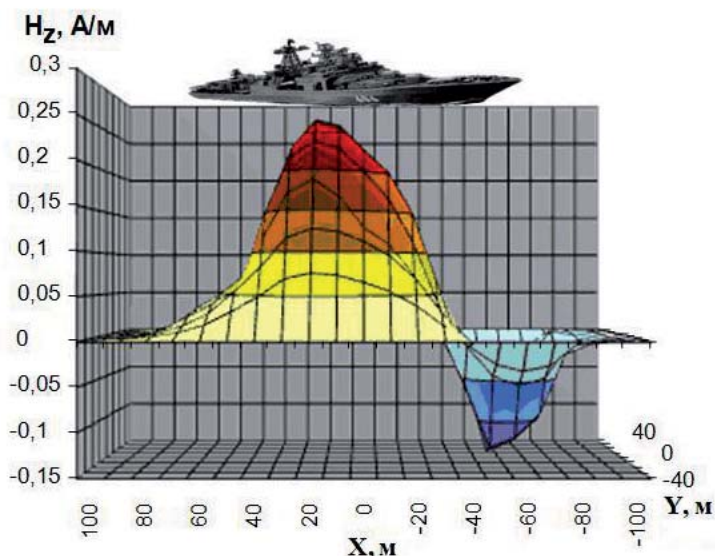


Рис. 7. Вертикальная составляющая магнитного поля корабля класса «эсминец» на глубине 15 м, вид сбоку

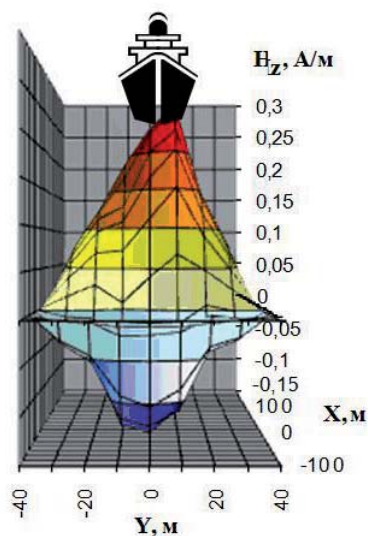


Рис. 8. Вертикальная составляющая магнитного поля корабля класса «эсминец» на глубине 15 м, вид спереди

### 1.3 Топология магнитного поля корабля

Магнитное поле корабля имеет достаточно сложную форму, образованную значительным количеством составляющих. Для упрощения представления топологии МПК представим примерный объемный вид вертикальной составляющей магнитного поля корабля класса «эсmineц», замеренной на глубине 15 м (см. рис. 6).

Магнитное поле корабля, в отличие от его гидродинамического поля, несимметрично относительно главных плоскостей корабля, что проиллюстрировано на рисунках 7, 8 на примере его вертикальной составляющей (в различных проекциях).

## 2 ПЕРЕСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КОРАБЛЯ

### 2.1 Общая постановка задачи

Задача пересчета параметров магнитного поля корабля реализуется при вычислении напряженности поля в произвольной точке пространства по имеющимся данным его контрольных замеров. Целью решения данной задачи применительно к настоящей работе является расчет напряженности магнитного поля корабля на входе магнитного или магнитно-динамического канала взрывателя мины или магнитометрического сенсора с целью определения факта подрыва корабля на mine или фиксации события обнаружения корабля с помощью магнитометра соответственно.

Для аналитического решения задачи пересчета напряженности магнитного поля необходимо знать функцию, характеризующую распределение источников поля на поверхности и в объеме корабля. Точно определить данную функцию не представляется возможным. Поэтому в инженерных расчетах часто пользуются приближенным методом исследования магнитного поля, который получил название «метода

исходной плоскости». Суть метода заключается в том, что реальное поле корабля подменяется плоскостью, по которой распределен магнитный потенциал (см. рис. 9).

Как показано в [2], по известным значениям напряженности одной из составляющих магнитного поля на исходной плоскости  $S(x_s, y_s, z_s)$  можно получить аналитические зависимости для вычисления всех составляющих напряженности магнитного поля корабля для произвольной точки пространства. Учитывая, что в практике измерений магнитного поля кораблей имеют дело в основном с вертикальной составляющей его напряженности, можно привести следующие формулы пересчета:

$$\left. \begin{aligned} H_x &= -\frac{1}{2\pi} \iint_{S(z_s=0)} H_{zs} \frac{x_s - x}{r^3} dx_s dy_s ; \\ H_y &= -\frac{1}{2\pi} \iint_{S(z_s=0)} H_{zs} \frac{y_s - y}{r^3} dx_s dy_s ; \\ H_z &= \frac{1}{2\pi} \iint_{S(z_s=0)} H_{zs} \frac{z}{r^3} dx_s dy_s , \end{aligned} \right\} (3)$$

где  $r = \sqrt{(x_s - x)^2 + (y_s - y)^2 + (z_s - z)^2}$  ;

$x_s, y_s, z_s$  - текущие координаты точки в исходной плоскости  $S$ ;

$x, y, z$  - координаты произвольной точки ниже плоскости;

$H_{zs}$  - измеренные значения напряженности вертикальной составляющей магнитного поля на исходной плоскости в точке с координатами  $x_s, y_s, z_s$ .

Таким образом, источником исходных данных для пересчета параметров магнитного поля является так называемая **плоскостная масштабная карта магнитного поля корабля**, которая представляет собой координатную сетку с центром в точке пересечения главных плоскостей корабля (см. рис. 9). Карта разбита на прямоугольные ячейки, в каждую из которых записано значение вертикальной составляющей магнитного поля корабля. С допустимой для инженерных расчетов точностью в качестве основы карты принимается прямоугольник с размерами 1,8 длины и 4 ширины корабля.

Отметим, что приведенные формулы (3) являются приближенными, поскольку получены исходя из допущения о том, что магнитное поле создается только дипольными моментами, т.е. при интегрировании не учитываются моменты высших порядков. Погрешность вычислений с помощью данных формул также будет появляться вследствие ограничения площади интегрирования (т.е. ограниченных размеров плоскостной масштабной карты).

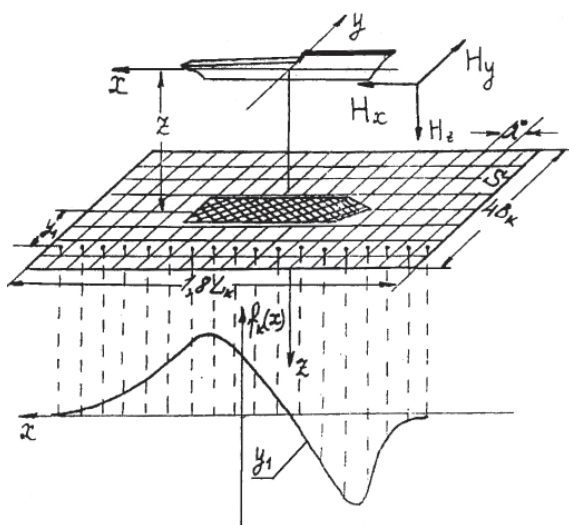


Рис. 9. Составляющие магнитного поля корабля и его плоскостная карта [2]

## 2.2 МЕТОДИКА ПЕРЕСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КОРАБЛЯ ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

В настоящей работе предлагается следующая методика расчетов по вычислению параметров магнитного поля корабля с учетом его местоположения и курса применительно к произвольной точке пространства.

### 2.2.1 Исходные данные для расчетов

В качестве исходных данных для расчетов используются:

- географические координаты (широта, долгота) места корабля;
- истинный курс корабля;
- магнитное склонение для данного района плавания;
- плоскостная масштабная карта магнитного поля корабля.

### 2.2.2 Суть расчетов

Географические координаты и курс корабля являются параметрами текущего состояния корабля как моделируемого маневренного объекта («переменная информация»), плоскостная масштабная карта магнитного поля относится к тактико-техническим характеристикам корабля как образца ВВТ («постоянная информация»). Магнитное склонение является параметром (свойством) моделируемого района ТВД.

Напомним, что плоскостная масштабная карта магнитного поля корабля является результатом непосредственного измерения вертикальной составляющей его намагниченности (замеры магнитного поля должны выполняться для каждого корабля с установленной периодичностью) и содержит значения **только постоянной** составляющей вертикальной намагниченности. Исходя из этого, масштабная карта представляет сумму только трех слагаемых из шести, упомянутых в п.1.1.3:

$$H'_z = z'_{px} + z'_{py} + z'_{pz}.$$

В п.1.2 было отмечено, что постоянная часть намагниченности имеет стабильный характер. Индуктивная же составляющая полностью определяется магнитным полем Земли и может изменяться в достаточно широких пределах при изменении широты места и особенно курса корабля. Таким образом, магнитное поле корабля как сумма постоянной и индуктивной частей, благодаря своей индуктивной составляющей, меняется при изменении курса корабля и широты места. Чтобы обеспечить возможность пересчета параметров магнитного поля корабля для произвольных широт плавания и курсов, необходимо знать, как изменяется индуктивная составляющая.

Для вычисления индуктивной составляющей намагниченности применяется формула (1), устанавливающая взаимосвязь между постоянным и индуктивным намагничиванием. Полное намагничивание корабля вычисляется путем

суммирования постоянной и переменной составляющих.

Далее по известным значениям одной из составляющих (вертикальной, продольной, поперечной) напряженности магнитного поля можно с помощью системы интегральных уравнений вида (3) вычислить значения двух остальных составляющих для произвольной точки пространства.

### 2.2.3 Порядок вычислений

Предлагается следующий порядок вычислений.

1 Разложение постоянной составляющей вертикальной намагниченности корабля на отдельные элементы  $z'_{px}$ ,  $z'_{py}$  и  $z'_{pz}$ .

2 Вычисление индуктивных составляющих вертикальной намагниченности корабля  $z'_{ix}$ ,  $z'_{iy}$  и  $z'_{iz}$  с учетом его местоположения и ориентации с помощью формулы (1).

3 Получение путем суммирования полной вертикальной намагниченности корабля на плоскости измерений:

$$H'_z = z'_{px} + z'_{ix} + z'_{py} + z'_{iy} + z'_{pz} + z'_{iz}.$$

4 Вычисление значений всех составляющих магнитного поля корабля для произвольной точки пространства с помощью формул (3).

## 2.3 Ограничения и допущения

В настоящей методике приняты следующие ограничения и допущения:

- не учитывается поле динамической намагниченности корабля, связанное с работой корабельных механизмов, а также движением корабля в воде;
- не учитывается динамическое изменение поля корабля в результате качки от волнения моря;
- магнитная проницаемость материалов корпуса корабля не меняется в ходе моделирования;
- при определении соотношения между постоянной и индуктивной намагниченностью корабль представляется телом цилиндрической формы, обладающим эквивалентной намагниченностью;
- магнитное поле создается только дипольными моментами, т.е. при интегрировании не учитываются моменты высших порядков;
- с целью получения вычисляемых математических зависимостей для пересчета напряженности магнитного поля реальный корабль заменяется эквивалентным плоским источником (плоскостной масштабной картой), который имеет ограниченные размеры, что снижает точность вычислений.

## 3 ПРИМЕР РАСЧЕТОВ

В качестве примера рассмотрим магнитное поле корабля класса «эсmineц» (длина 100 м,

Таблица 2

Плоскостная масштабная карта МПК класса «эсминец» (вертикальная составляющая, А/м)

Y, м									X, м
-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	
0	0	0	0,00043	-0,001	0,00043	0	0	0	100
0	0,00115	0,00025	0,000118	0,0004	0,000118	0,0003	0,00215	0	90
0	0,0031	0,00475	0,004555	0,007	0,008555	0,011	0,0051	0	80
0	0,008	0,014	0,023695	0,0195	0,030695	0,024	0,012	0	70
0	0,0166	0,0285	0,038515	0,0415	0,048515	0,0405	0,0216	0	60
0	0,0318	0,054	0,05207	0,057	0,07207	0,068	0,0378	0	50
0	0,0485	0,082	0,116955	0,15	0,156955	0,098	0,0555	0	40
0	0,0691	0,1165	0,172305	0,217	0,232305	0,1345	0,0771	0	30
0	0,0756	0,1275	0,18766	0,237	0,26766	0,1488	0,0846	0	20
0	0,0734	0,124	0,16733	0,228	0,26033	0,1465	0,0834	0	10
0	0,065	0,1125	0,13	0,2	0,23	0,1375	0,075	0	0
0	0,0548	0,0955	0,10967	0,166	0,20267	0,118	0,0648	0	-10
0	0,0384	0,069	0,07234	0,113	0,15234	0,0903	0,0474	0	-20
0	0,016	0,03	0,007695	0,04	0,067695	0,048	0,024	0	-30
0	-0,0076	-0,0095	-0,05696	-0,037	-0,01696	0,0065	-0,0006	0	-40
0	-0,0276	-0,043	-0,13207	-0,141	-0,11207	-0,029	-0,0216	0	-50
0	-0,0347	-0,055	-0,12052	-0,1295	-0,11052	-0,043	-0,0297	0	-60
0	-0,0289	-0,0455	-0,0907	-0,1035	-0,0837	-0,0355	-0,0249	0	-70
0	-0,005	-0,005	-0,02056	-0,02	-0,01656	0,0013	-0,003	0	-80
0	-0,0027	-0,0045	-0,00867	-0,009	-0,00867	-0,0045	-0,0017	0	-90
0	-0,0006	-0,001	-0,00143	-0,003	-0,00143	-0,001	-0,0006	0	-100

ширина 10 м), замеренное на глубине 15 метров и представленное масштабной плоскостной картой, имеющей вид матрицы (двухмерного массива) размерности 21 x 9 (см. таблицу 2).

Объемный вид постоянной вертикальной составляющей МПК соответствует представленной на рисунке 6 конфигурации.

Принимая во внимание, что продольная составляющая вертикальной намагниченности  $Z'_x$  зеркальна относительно мидель-шпангоута (см. рис. 4, обозначена как  $X'_z$ ), а поперечная составляющая  $Z'_y$  — относительно диаметральной плоскости (см. рис. 5, обозначена как  $Y'_z$ ), каждую из их составляющих  $z'_{py}$ ,  $z'_{px}$  и  $z'_{pz}$  можно вычислить путем попарного сложения и деления пополам значений напряженности поля в

точках, равноотстоящих от мидель-шпангоута и диаметральной плоскости соответственно. Результатом вычислений являются три матрицы размерности 21x9, представляющие отдельные составляющие вертикальной намагниченности.

Объемный вид составляющих  $z'_{py}$ ,  $z'_{px}$  и  $z'_{pz}$  представлен на рисунках 10, 11 и 12 соответственно.

Далее на основе имеющихся значений постоянных составляющих производится вычисление соответствующих индуктивных составляющих вертикальной намагниченности по следующим формулам:

$$\begin{aligned} z'_{iy} &= z'_{py} * K * \sin(\varphi) * \sin(\alpha); \\ z'_{ix} &= z'_{px} * K * \sin(\varphi) * \cos(\alpha); \\ z'_{iz} &= z'_{pz} * K * \cos(\varphi), \end{aligned}$$

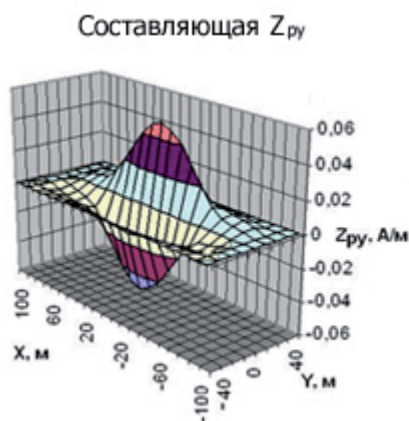


Рис. 10. Поперечная составляющая постоянной вертикальной намагниченности

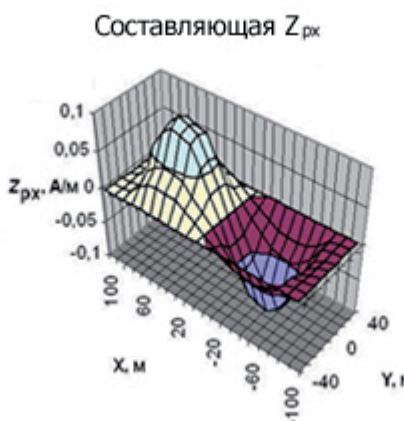


Рис. 11. Продольная составляющая постоянной вертикальной намагниченности

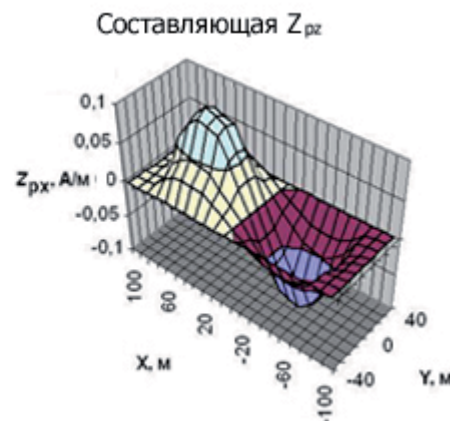


Рис. 12. Вертикальная составляющая постоянной вертикальной намагниченности



Составляющая  $Z_{iy}$

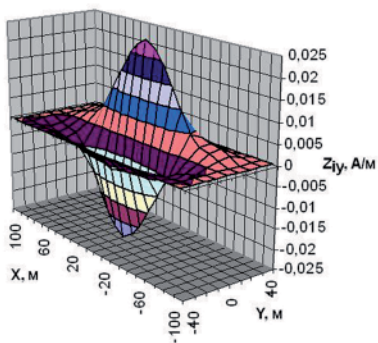


Рис. 13. Поперечная составляющая индуктивной вертикальной намагниченности

Составляющая  $Z_{ix}$

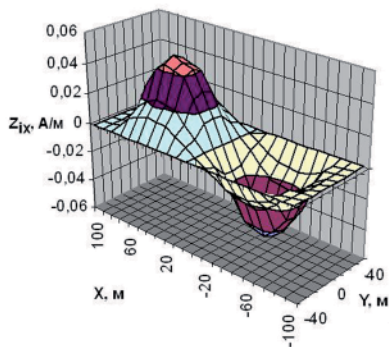


Рис. 14. Продольная составляющая индуктивной вертикальной намагниченности

Составляющая  $Z_{iz}$

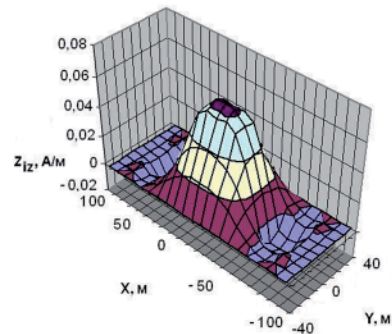


Рис. 15. Вертикальная составляющая индуктивной вертикальной намагниченности

где  $\alpha$  - магнитный курс корабля;

$\varphi$  - широта места;

$K$  - коэффициент соотношения между постоянной и индуктивной составляющими МПК.

Входными данными для указанных вычислений, кроме матриц составляющих постоянной вертикальной намагниченности, являются широта места и магнитный курс корабля.

Результатом вычислений являются три матрицы  $Z_{ix}$ ,  $Z_{iy}$  и  $Z_{iz}$  размерности  $21 \times 9$ , представляющие отдельные составляющие индуктивной вертикальной намагниченности. Объемный вид составляющих  $Z_{iy}$ ,  $Z_{ix}$  и  $Z_{iz}$  представлен на рисунках 13, 14 и 15 соответственно. В качестве исходных данных для расчетов использованы следующие:

- $K$  - расчетное соотношение между индуктивной и постоянной намагниченностью - 0,75;
- широта места - 65 градусов;
- магнитный курс корабля - 45 градусов.

Характеристику полного вертикального намагничивания корабля  $H'_z$  получают путем алгебраического сложения шести матриц:

$$Z'_{px} + Z'_{ix} + Z'_{py} + Z'_{iy} + Z'_{pz} + Z'_{iz}$$

Результатом сложения является матрица размерности  $21 \times 9$ , вид которой представлен на рисунке 16.

Далее в соответствии с формулами (3) производится пересчет составляющих МПК для произвольной точки пространства. В качестве исходных

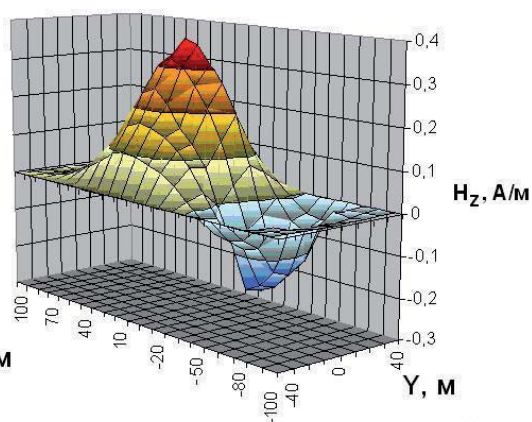


Рис. 16. Полная вертикальная намагниченность корабля класса «эсминец», движущегося курсом 45 градусов на широте 65°N (северной), соответствующая глубине 15 м

данных для расчетов используется матрица полного вертикального намагничивания корабля, полученная на предыдущем этапе, а также координаты  $(x, y, z)$  точки пространства, величину напряженности МПК в которой требуется получить.

Результаты расчета параметров МПК класса «эсминец», движущегося магнитным курсом 45 градусов на широте 65 градусов сев. для точек с глубиной 40 метров, приведены на рисунках 17, 18 и 19 для продольной, поперечной и вер-

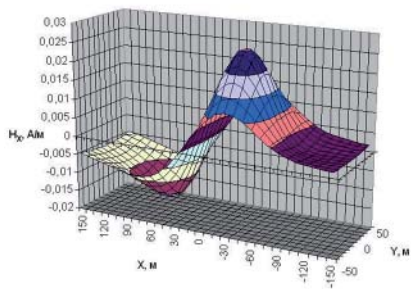


Рис. 17. Поле полного продольного намагничивания корабля класса «эсминец»

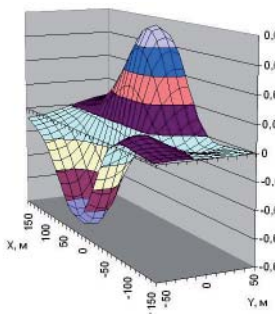


Рис. 18. Поле полного поперечного намагничивания корабля класса «эсминец»

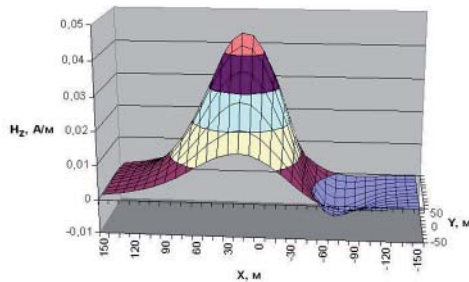


Рис. 19. Поле полного вертикального намагничивания корабля класса «эсминец»

тикальной составляющих соответственно.

### Выводы

Изложенные в настоящей статье рассуждения позволяют сделать следующие выводы:

1 Предлагаемый порядок расчетов может быть использован для вычисления параметров любых составляющих магнитного поля корабля.

2 Предлагаемые математические зависимости позволяют создать достаточно простую математическую модель магнитного поля корабля, чувствительную к следующим факторам:

- материал корпуса корабля;
- начальное состояние намагниченности корабля;
- местоположение корабля;
- ориентация корабля;
- координаты точки, в которой требуется знать параметры МПК.

3 Расчеты носят приближенный характер, который определяется принятыми ограничениями и допущениями.

4 Предлагаемый способ расчетов позво-

ляет производить моделирование «дальнего» магнитного поля корабля с приемлемой для оперативно-тактических расчетов точностью.

5 Описанный способ расчетов может быть использован при моделировании функционирования минного оружия (магнитные и магнитно-динамические каналы неконтактных взрывателей) и средств обнаружения (магнитометров).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Физические поля корабля: учебное пособие для слушателей ВМА / под ред. В.В. Ярцева. - Л., 1989.

2 Теория эксплуатации неконтактных систем мин / под ред. А.Г. Толстых. - Л.: ВМорА, 1984.

3 Прорвин Л.А. Теория и методы исследования магнитного, электрического и электромагнитного полей корабля. - Л.: ВМорА, 1981.

4 Нерсесов Б.А., Апекс Г.М. Экспериментальные исследования трансформации магнитного поля корабля // Вопросы фундаментальных и поисковых исследований. - М.: МО, 1980. - Вып. 23.