

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МОРСКИХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR MEASURING AND CONTROLLING MAGNETIC FIELD PARAMETERS OF MARINE TECHNICAL OBJECTS

*I. Shakhsuvarova
Yu. Zhukov*

Summary. A brief overview of the investigated problems is made and the basic concepts are given. The relevance of the research, due to both civil and defense tasks, is defined. A method of measuring and controlling magnetic field parameters of marine technical objects and a measuring system of magnetic moments, which do not depend on the coordinates of measurement points, in contrast to the traditional parameters of magnetic induction and magnetic field strength, are proposed. The causes of measurement errors and consideration of the influence of high order spatial magnetic field harmonics on them and on the measurement results are noted. The advantages of the proposed method of measurements and the corresponding measuring system are revealed. Practical problems suitable for solution by the developed method are noted.

Keywords: marine technical facilities, magnetic field, magnetic moment, measuring system, error of measurement.

Шахсуварова Илона Витальевна

Аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-

Бруевича

shahsuvarova.ilona@mail.ru

Жуков Юрий Иванович

Д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

zhukovji@mail.ru

Аннотация. Выполнен краткий обзор исследуемой проблематики и даны основные понятия. Определена актуальность исследований, обусловленная как гражданскими, так и оборонными задачами. Предложен метод измерения и контроля параметров магнитного поля морских технических объектов и измерительная система магнитных моментов, которые не зависят от координат точек измерения, в отличие от традиционных параметров магнитной индукции и напряженности магнитного поля. Отмечены причины погрешности измерений и учет воздействия на них и на результаты измерений пространственных гармоник магнитного поля высокого порядка. Выявлены преимущества предложенного метода измерений и соответствующей измерительной системы. Отмечены практические задачи, пригодные для решения разработанным методом.

Ключевые слова: морские технические объекты, магнитное поле, магнитный момент, измерительная система, погрешность измерения.

Морские технические объекты, понятие о которых наиболее лаконично и емко определено в государственных стандартах, обладают комплексом физических полей в области, примыкающей к корпусу объекта. Наиболее интересными в рамках настоящей работы являются надводные корабли, подводные лодки и автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА). В настоящее время выявлено более тридцати физических полей корабля, однако степень их использования неодинакова. Наиболее широкое применение нашли следующие физические поля: акустическое, тепловое, гидродинамическое, электромагнитное, магнитное, электрическое. В рамках настоящей работы для нас наиболее интересным является внешнее магнитное поле (ВМП) морского технического объекта, в частности, корабля.

Актуальность этой тематики, — измерения и контроля параметров ВМП, — определяется как проблемами магнитной экологии, электромагнитной совместимости, навигационными проблемами, так и задачами национальной обороны, поскольку ВМП широко исполь-

зуют в неконтактных системах морского оружия для поиска и обнаружения кораблей, магнитометрического обнаружения подводных лодок, наведения на них боевых средств, — мин, торпед, ракет, — и в системах их бесконтактных взрывателей.

Задачи первого типа, — навигация, совместимость, экология и им подобные, — могут успешно и эффективно решаться объединением усилий многих стран, как пример можно привести недавнее объединенное исследование состояния Балтийского моря на основе синтеза методов морского мониторинга [1]. Исследование проводилось объединенными усилиями университетов, институтов, центров и лабораторий Германии, Финляндии, Саудовской Аравии, Испании, Швеции, Эстонии. Но задачи национальной безопасности могут надежно решаться только в рамках одного государства и поэтому их решение характерно как повышенной ответственностью, так и важностью. Создание эффективных методов и средств измерения и контроля параметров ВМП морских технических объектов необходимый компонент решения обозначенных гражданских и оборонных задач.

Следует отметить, что применяемые в разных странах уровни ВМП отличаются по величине: 10^{-6} – 10^{-4} Тл (0,8–80 А/м), а для обеспечения нужд навигации и магнитной защиты кораблей эти уровни снижаются до 10^{-9} Тл ($8 \cdot 10^{-4}$ А/м). Частотный диапазон этих слабых ВМП составляет 0–10000 Гц.

Для разработки метода измерения и контроля параметров магнитного поля морских технических объектов изначально наилучшим будет выявить и рассмотреть оптимальный подход к решению этой задачи. Представляется наиболее адекватным найти способ определения напряженности магнитного поля в любой точке пространства ВМП, чтобы выявлять и устанавливать структуру и объемную конфигурацию внешнего магнитного поля.

Экспериментальное измерение параметров ВМП, окружающего большие объекты, может быть весьма трудным процессом. Эти эксперименты обычно проводятся с целью измерения параметров магнитного поля объекта в дискретных точках вокруг него, чтобы собрать данные для последующего математического предсказания распределения картины магнитного поля вокруг и под кораблем. Кроме того, бортовые системы компенсации магнитного поля, называемые системами размагничивания, настраиваются и калибруются для минимизации амплитуды окружающего поля. Минимизация ВМП корабля крайне важна для снижения его уязвимости к магнитным минам, что, в общем случае, касается как военных, так и гражданских судов.

В соответствии с методическими указаниями по измерению и оценке электрических, магнитных и электромагнитных полей на судах и морских сооружениях [2] оценка воздействия ВМП осуществляется по следующим контролируемым параметрам и единицам измерения: напряженность магнитного поля (Н, А/м) и магнитная индукция (В, мкТл, мТл) для постоянного поля; магнитная индукция (В, нТл) для переменного магнитного поля диапазона частот 5 Гц — 400 кГц. Предельные допустимые уровни параметров постоянного магнитного поля, в соответствии с принятыми стандартами, не должны превышать для магнитной индукции 10 мТл, для напряженности магнитного поля 8 кА/м.

Традиционными методами измерения параметров ВМП являются методы измерения магнитной индукции или напряженности магнитного поля в отдельных точках пространства — это точечные магнитометрические методы. Точка пространства имеет свои координаты. Преимуществом такого параметра магнитного поля, как магнитный дипольный момент является то,

что этот параметр не зависит от координат точек измерения. Магнитный дипольный момент определен в государственном стандарте [3] как измерительный параметр. Дипольный магнитный момент M [А×м²] является обобщенной характеристикой магнитного поля, используя его становится возможным определить напряженность магнитного поля в любой точке пространства, выявить структуру и пространственную конфигурацию магнитного поля, причем величина его прямо коррелирована с массой ферромагнитного материала, присутствующего в конструкции морских объектов [4].

Для разработки метода измерения и контроля параметров магнитного поля воспользуемся измерением дипольных магнитных моментов по трем ортогональным направлениям x , y , z сферической системы координат, подразумевая, что измерения будем проводить магнитометрическим способом в отдельных точках пространства. Измерительными датчиками будут являться магнитоиндукционные катушки, преобразующие магнитное поле в электрический сигнал. Выбранная система координат имеет три декартовых x , y , z и три сферических координаты r , θ , φ , где θ — угол между вектором радиуса точки r и осью z , φ — угол между проекцией вектора r на плоскость xy и осью x .

В плоскости xy , когда $\theta=90^\circ$, на окружностях выбранных радиусов r_1 и r_2 расположим две группы датчиков по четыре датчика в каждой группе. Координаты каждого датчика первой группы (радиус r_1) и второй группы (радиус $r_2 > r_1$) определяются выражениями $\varphi_i=(2i-1)45^\circ$, $\varphi_k=(2k-9)45^\circ$, где $i=1 \dots 4$, $k=5 \dots 8$. i и k — соответственно, номера датчиков первой и второй группы.

Измеряемый магнитный дипольный момент имеет компоненты по трём декартовым осям M_x , M_y , M_z . Магнитное поле с напряженностью H наводит в катушках датчиков электрический сигнал прямо пропорциональный магнитному моменту

$E_x(r_1) \sim M_x$, $E_y(r_1) \sim M_y$, $E_z(r_1) \sim M_z$ — для первой группы датчиков, (1)

$E_x(r_2) \sim M_x$, $E_y(r_2) \sim M_y$, $E_z(r_2) \sim M_z$ — для второй группы датчиков. (2)

В общем случае структура результирующих по каналам x , y , z сигналов $E(r_1)$ и $E(r_2)$ складывается из основного сигнала первой гармоники и сигналов остальных, более высоких гармоник, что, по существу, определяет погрешность измерения M , поэтому от вклада высоких гармоник нужно избавляться. Пропуская громоздкие выкладки можно в конечном итоге получить выражение для электрического сигнала

$$E = q_1 E(r_1) - q_2 E(r_2) \quad (3)$$

где q_1 и q_2 — коэффициенты, определяемые радиусами r_1 и r_2 следующим образом

$$q_1 = 2/(d^2 - 1), \quad q_2 = 2 d_3 / (d^2 - 1) \quad (4)$$

Дальнейшие выкладки и анализ их результатов показывают, что в итоге, пренебрегая ввиду малости вкладом высоких гармоник, можно получить для магнитных моментов выражения

$$M_x \approx E_x R_1^3 / S_x, \quad M_y \approx E_y R_1^3 / S_y, \quad M_z \approx E_z R_1^3 / S_z \quad (5)$$

где S_x, S_y, S_z — чувствительность каналов x, y, z измерительной системы к полезному сигналу дипольной составляющей.

По результатам измерений компонент магнитного момента магнитного поля исследуемого источника можно вычислить уровень напряженности магнитного поля источника в любых зонах окружающего пространства. Соответственно, используя свойства сферической системы координат и аналитические выражения для напряженности магнитного поля можно рассчитать объемную структуру и конфигурацию внешнего магнитного поля технического объекта, в том числе с помощью компьютерного моделирования [5].

Экспериментальное исполнение разработанного метода измерения выполняется с помощью трехканальной измерительной системы (ИС). ИС включает в себя два блока измерительных датчиков первой и второй группы, смеситель (коммутатор), переключатель каналов их сигналов, усилители сигналов, сумматор сигналов, компенсатор внешней помехи; измерительный прибор.

Датчики имеют в своем составе осевую и радиальную катушки, в которых внешнее магнитное поле наводит электрические сигналы, которые поступают в смеситель, где формируются электрические сигналы в соответствии с выражениями (1, 2) для трех каналов x, y, z . Далее сигналы трех каналов поступают в трехпозиционный смеситель каналов, который осуществляет режим работы ИС по поочередному измерению сигналов и дипольных магнитных моментов. Затем итоговые сигналы $E(R_1)$ и $E(R_2)$ поступают, соответственно, на отдельный, предназначенный им усилитель для усиления в соответствии с выражениями (3) и (4), соответственно в q_1 и q_2 раз. Усиленные сигналы поступают на вход сумматора совместно с сигналом внешней помехи и с компенсирующим сигналом компенсатора внешней помехи. После сумматора выделенный сигнал поступает в измерительный прибор для отображения результата измерений.

Преимущества и достоинства разработанного метода и ИС заключаются в измерении нескольких параметров — магнитный момент, напряженность и пространственная конфигурация магнитного поля, предусмотрена возможность компенсации помех посторонних источников, относительно невысокая стоимость применяемых индукционных датчиков.

Разработанный метод измерения пригоден для решения ряда практических задач: по электромагнитной совместимости различного оборудования, чувствительного к внешнему магнитному полю; при разработке защиты от отрицательного воздействия внешнего магнитного поля на окружающую среду; при создании магнитометрических испытательных стендов для контроля параметров магнитного поля технических средств, к которым предъявляются требования по снижению уровня их магнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. A Synthesis of Marine Monitoring Methods with the Potential to Enhance the Status Assessment of the Baltic Sea / *Frontiers in Marine Science*, Original research published: 12 November 2020. doi: 10.3389/fmars.2020.552047
2. Методические указания МУК 4.3.3214–14 Измерение и оценка электрических, магнитных и электромагнитных полей на судах и морских сооружениях. 08.08.2014
3. ГОСТ Р 50010–92 Совместимость технических средств электромагнитная. Электрооборудование силовое. Нормы параметров низкочастотного периодического магнитного поля. — Госстандарт России, 1993 г.
4. Яроцкий В.А. Методы обнаружения и определения местоположения объектов по их постоянному магнитному полю // *Зарубежная радиоэлектроника*, 1984, № 7, с. 45–56.
5. Wang, T., Wang, K.-P., Tan, H.-D. Forward modeling and inversion of tensor CSAMT in 3D anisotropic media. (2017) *Applied Geophysics*, 14(4), 590–605.