

Повышение точности измерений магнитного момента корабля в дальнем поле

Алексей Александрович Затеев¹, Юрий Михайлович Иванов², Валентин Григорьевич Семенов³

АО «МЕРА», Санкт-Петербург, Россия, mail@mera.spb.ru✉

¹z1195522@gmail.com

²210848@gmail.com, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24741016200>

³valentinesemenov@hotmail.com, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197152206>

Аннотация. Измерения магнитного момента корабля необходимы для контроля защищённости от магнитных мин и скрытности по магнитному полю. Рассмотрена модификация метода измерения магнитного момента корабля с использованием трёхкомпонентного дифференциального магнитометра. С помощью компьютерного моделирования проведено сравнение погрешностей разработанного авторами метода с известными аналогами и установлено его преимущество по точности (практически на порядок). Показано, что предложенный метод можно также применять для магнитных моделей кораблей и стандартных образцов магнитных материалов для определения компонент петель гистерезиса по намагниченности.

Ключевые слова: магнитные измерения, магнитный момент, средняя намагниченность, дифференциальный магнитометр, корабли, модели, стандартные образцы

Для цитирования: Затеев А. А., Иванов Ю. М., Семенов В. Г. Повышение точности измерений магнитного момента корабля в дальнем поле // Измерительная техника. 2021. № 8. С. 67–72. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-67-72>

Improving accuracy for measuring the ship's magnetic moment in the far field

Aleksei A. Zateev¹, Yury M. Ivanov², Valentin G. Semenov³

MERA JSC, St. Petersburg, Russia, mail@mera.spb.ru✉

¹z1195522@gmail.com

²210848@gmail.com, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24741016200>

³valentinesemenov@hotmail.com, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197152206>

Abstract. The magnetic moment of the ship is measured to control its protection from magnetic mines and to control the stealth by the magnetic field. A modification of the measurement method using a three-component differential magnetometer is considered. Using computer simulation, the errors of the new method are compared with those of the known analogues and its advantage in accuracy is established (almost by an order of magnitude). It is shown that the new method can also be used for magnetic models of ships and standard samples of magnetic materials to determine their components of the hysteresis loops by magnetization.

Keywords: magnetic measurements, magnetic moment, average magnetization, differential magnetometer, ships, models, standard samples

Введение. Защищённость корабля от магнитных мин и скрытность подводных лодок от магнитных средств обнаружения контролируют по численным значениям их магнитного момента. Контролируемым параметром является магнитный момент, а наиболее простым методом его измерения – двухточечный магнитометрический метод в дальнем поле, т. е. на расстоянии более половины длины корабля до дифференциального магнитометра (ДМ). ДМ измеряет разность магнитной индукции трёхкомпонентных феррозондовых измерительного и компенсационного датчиков на фоне

магнитного поля Земли. В работах [1–8] представлены оценки точности таких измерений, согласно которым феррозондовые ДМ не обладают достаточным запасом по точности измерений магнитного момента в дальнем поле. Для измерений магнитной индукции также используются модульные (квантовые) магнитометры, имеющие более высокие точность и стабильность по сравнению с феррозондовыми магнитометрами. Однако модульные магнитометры по определению измеряют только одну (инвариантную) компоненту – проекцию магнитной индукции на её направление,

и этого недостаточно для измерения вектора магнитной индукции. В последние годы появились предложения [9] по обращению квантовых магнитометров в трёхкомпонентные, т. е. созданию трёхкомпонентных магнитометров на базе квантовых датчиков.

Цель работы – оценка повышения точности измерения магнитного момента корабля при замене традиционных трёхкомпонентных (феррозондовых) магнитометров квантовыми с применением соответствующего методического обеспечения.

Корректирующие матрицы трёхкомпонентного ДМ. В работе [3] представлена следующая модель уравнения измерения трёхкомпонентным магнитометром:

$$\mathbf{B}_и = u\mathbf{B} + \mathbf{0}, \quad (1)$$

где $\mathbf{B}_и$ – результат измерения магнитометром (три числа); u – искажающая матрица размером 3×3 в собственной ортогональной системе координат (СОСК) в общем случае неортогонального магнитометра; $\mathbf{B}$ – действительное значение магнитной индукции в СОСК магнитометра; $\mathbf{0}$ – уход нулей магнитометра (три числа).

Если заранее по методике [3] определить искажающую матрицу и уход нулей, то каждый последующий результат измерения $\mathbf{B}_и$ (1) можно исправлять с помощью корректирующей матрицы $k \cong u^{-1}$:

$$\mathbf{B}' = k(\mathbf{B}_и - \mathbf{0}). \quad (2)$$

Тогда с учётом уравнения (1) погрешность до коррекции (2) запишем как сумму мультипликативной и аддитивной частей

$$\Delta\mathbf{B} = \mathbf{B}_и - \mathbf{B} = (u - I)\mathbf{B} + \mathbf{0}. \quad (3)$$

где I – единичная матрица.

Погрешность после коррекции определяется выражением

$$\Delta\mathbf{B}' = \mathbf{B}' - \mathbf{B} = (ku - I)\mathbf{B} + \Delta\mathbf{0}, \quad (4)$$

где $\Delta\mathbf{0}$ – погрешность определения уходов нулей.

В соответствии с выражениями (3), (4) для уменьшения погрешности трёхкомпонентного магнитометра следует повышать точность определения его корректирующей матрицы и уходов нулей.

Аналог скорректированного уравнения (2) для ДМ имеет следующий вид [4]:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}'_{и.к} &= \sigma_{к.и} \mathbf{B}'_и - \mathbf{B}'_к = \sigma_{к.и} k_{и} (\mathbf{B} - \mathbf{0})_и - k_к (\mathbf{B} - \mathbf{0})_к = \\ &= \sigma_{к.и} k_{и} \mathbf{B}_и - k_к \mathbf{B}_к - (\sigma_{к.и} k_{и} \mathbf{0}_и - k_к \mathbf{0}_к) = \mathbf{B}'_{и.к(м)} - \Delta\mathbf{0}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mathbf{B}'_{и.к}$ – результат измерения ДМ, скорректированный в СОСК компенсационного канала, нижние индексы «и» и «к» указывают на принадлежность соответственно к измерительному и компенсационному каналам ДМ; $\sigma_{к.и}$ – матрица ортогонального преобразования из СОСК измерительного в СОСК компенсационного магнитометра (методика

определения σ предложена в работе [5]); $\mathbf{B}'_и, \mathbf{B}'_к$ – результаты измерений магнитной индукции, скорректированные в СОСК измерительного и компенсационного каналов соответственно; $(\mathbf{B} - \mathbf{0})_и, (\mathbf{B} - \mathbf{0})_к$ – результаты измерений магнитной индукции в измерительном и компенсационном каналах соответственно; $\mathbf{B}'_{и.к(м)} = \sigma_{к.и} k_{и} \mathbf{B}_и - k_к \mathbf{B}_к$ – мультипликативная часть результата измерения ДМ; $\Delta\mathbf{0} = \sigma_{к.и} k_{и} \mathbf{0}_и - k_к \mathbf{0}_к$ – аддитивная часть результата измерений ДМ.

Уравнения измерений магнитного момента корабля в дальнем поле. Как показано в работе [1], традиционное уравнение измерений магнитного момента в дальнем поле имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{изм} &= \mathbf{M} + \Delta\mathbf{M}_{мет} = A\mathbf{B}_{и.к} = \frac{4\pi}{\mu_0} \left(\nabla \nabla \frac{1}{R_и} - \nabla \nabla \frac{1}{R_к} \right)^{-1} \mathbf{B}_{и.к} = \\ &= \frac{4\pi}{\mu_0} \left(\frac{3\mathbf{n}_и \mathbf{n}_и^T - I}{R_и^3} - \frac{3\mathbf{n}_к \mathbf{n}_к^T - I}{R_к^3} \right)^{-1} \mathbf{B}_{и.к}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\mathbf{M} = M\mathbf{m}$ – измеряемый (дипольный) магнитный момент тела; $M, \mathbf{m}$ – модуль и единичный вектор магнитного момента; $\Delta\mathbf{M}_{мет}$ – методическая погрешность или погрешность уравнения измерений, или погрешность, обусловленная недипольностью корабля; $\mathbf{M}_{изм}$ – результат измерений; A – обратная координатная 3×3 матрица; $\nabla \nabla \frac{1}{R_и}, \nabla \nabla \frac{1}{R_к}$ – градиенты градиентов

обратных расстояний $R_и, R_к$ от центра корабля до измерительного и компенсационного датчиков соответственно; $\mathbf{n}_и$ – единичное направление между центром корабля и датчиками (рис. 1); $\mathbf{n}_и \mathbf{n}_и^T$ – симметричная матрица 3×3 , образованная умножением матрицы-столбца $\mathbf{n}_и$ справа на транспонированную матрицу-строку $\mathbf{n}_и^T$ (аналогично для компенсационного датчика); верхний индекс «-1» – символ обращения матрицы; $\mathbf{B}_{и.к}$ – разность индукций магнитного поля измерительного и компенсационного датчиков ДМ.

Для упрощения рассмотрим (6) при измерительном и компенсационном датчиках, лежащих на одной оси с центром 0, т. е. при $\mathbf{n}_и = \mathbf{n}_к = \mathbf{n}$, как показано на рис. 1.

Вычислив обратную координатную матрицу A в общем виде, получим

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{изм} &= \mathbf{M} + \Delta\mathbf{M}_{мет} = A\mathbf{B}_{и.к} = \frac{4\pi}{\mu_0} \frac{R_и^3}{1 - \gamma^3} (3\mathbf{n}\mathbf{n}^T - I)^{-1} \mathbf{B}_{и.к} = \\ &= \frac{4\pi}{\mu_0} \frac{R_и^3}{1 - \gamma^3} \left(\frac{3}{2} \mathbf{n}\mathbf{n}^T - I \right) \mathbf{B}_{и.к}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\gamma = R_и / R_к$.

В работе [6] предложено уравнение измерений магнитного момента, в котором координатный оператор A уравнения (7) заменяется усреднённым оператором $A_{ср}$, получаемым при разбиении по длине корабля на p участков:

$$\mathbf{M} + \Delta\mathbf{M}_{мет} = \frac{4\pi}{\mu_0} \left(\frac{C_1 + C_2 + \dots + C_i + \dots + C_p}{p} \right)^{-1} \mathbf{B}_{и.к} = A_{ср} \mathbf{B}_{и.к}, \quad (8)$$

где $C_i = \left(\nabla \nabla \frac{1}{R_и} - \nabla \nabla \frac{1}{R_к} \right)_i$.

Метод (8) подвергался экспериментальной проверке [8]. Большой интерес представляет следующая модификация данного метода:

$$\mathbf{M} + \Delta \mathbf{M}_{\text{мет}} = \frac{4\pi}{\mu_0} \left(\frac{m_1 C_1 + m_2 C_2 + \dots + m_i C_i + \dots + m_p C_p}{m} \right)^{-1} \mathbf{B}_{\text{и.к}}, \quad (9)$$

где m_i , m – ферромагнитные массы i -го участка и всего корабля соответственно.

Далее сравним точность методов (8), (9) и традиционного метода (7).

Классификация погрешностей измерений магнитного момента. Результирующая погрешность измерений магнитного момента в дальнем поле имеет вид

$$\Delta \mathbf{M} = \mathbf{M}_{\text{изм}} - \mathbf{M} = \Delta \mathbf{M}_{\text{мет}} + \delta_{\text{м}} \mathbf{M} + \mathbf{M}_0 + \mathbf{M}_{\text{п}} + \Delta \mathbf{A} \mathbf{B}_{\text{и.к}}, \quad (10)$$

где $\delta_{\text{м}} \mathbf{M}$ – инструментальная мультипликативная составляющая; $\delta_{\text{м}}$ – безразмерная матрица 3×3 ; $\mathbf{M}_0$ – аддитивная составляющая погрешности; $\mathbf{M}_{\text{п}}$ – аддитивная погрешность ДМ, обусловленная внешними помехами; $\Delta \mathbf{A} \mathbf{B}_{\text{и.к}}$ – координатная (линейно-угловая) составляющая погрешности ДМ.

Аддитивная погрешность $\mathbf{M}_0$ включает постоянную составляющую $|\mathbf{M}_0|$ (обусловлена разностью уходов нулей измерительного и компенсационного магнитометров Δ_0) и случайные составляющие $\mathbf{M}'_0$ (связаны с собственными шумами ДМ и внешними помехами).

Аналитическое выражение мультипликативной составляющей погрешности приведено в работе [6]:

$$\delta_{\text{м}} \mathbf{M} = \left(\frac{3}{2} \mathbf{n} \mathbf{n}^T - \mathbf{I} \right) \frac{(u_{\text{и}} \sigma_{\text{к.и}} - I) - \gamma^3 (u_{\text{к}} - I)}{1 - \gamma^3} (3 \mathbf{n} \mathbf{n}^T - \mathbf{I}) \mathbf{M}, \quad (11)$$

где $u_{\text{и}}$, $u_{\text{к}}$ – искажающие матрицы измерительного и компенсационного каналов ДМ.

Запишем расчётные формулы остальных составляющих результирующей погрешности (10):

$$\sigma_{\mathbf{M}_0} = \frac{6\pi}{\mu_0} \frac{R_{\text{и}}^3}{1 - \gamma^3} \sigma_{\text{Вг}} \sqrt{2}; \quad (12)$$

$$|\Delta \mathbf{M}_0| = \frac{4\pi}{\mu_0} \frac{R_{\text{и}}^3}{1 - \gamma^3} \left| \left(\frac{3}{2} \mathbf{n} \mathbf{n}^T - \mathbf{I} \right) \Delta_0 \right|; \quad (13)$$

$$\sigma_{\mathbf{M}_{\text{п}}} = \frac{2z R_{\text{и}}^3 \sigma_{\text{I}}}{1 - \gamma^3} \left(\frac{1}{\rho_{\text{и}}^2} - \frac{1}{\rho_{\text{к}}^2} \right); \quad (14)$$

$$\sigma_{\mathbf{M}_{\text{R}}} = \frac{3}{2} (7\varphi^2 + 5)^{1/2} \frac{(1 + \gamma^8)^{1/2}}{1 - \gamma^3} \frac{\sigma_{\text{R}}}{R_{\text{и}}} \mathbf{M}. \quad (15)$$

Здесь $\sigma_{\mathbf{M}_0}$ – среднее квадратическое отклонение (СКО) случайной части $\mathbf{M}_0$; $\sigma_{\text{Вг}}$ – СКО шумов одностипных измерительного и компенсационного датчиков; $\sigma_{\mathbf{M}_{\text{п}}}$ – СКО случайной погрешности $\mathbf{M}_{\text{п}}$ [10]; $\rho_{\text{и}}$, $\rho_{\text{к}}$ – расстояния от линии ж/д электротранспорта до измерительного и компенсационного датчиков; $2z$ – расстояние между токопроводами линии

железнодорожного электротранспорта; σ_{I} – СКО суммы токов прямой и обратной колеи; σ_{MR} – СКО координатной составляющей погрешности измерений магнитного момента; $\varphi = \mathbf{m} \mathbf{n}$; σ_{R} – СКО погрешностей измерения компонент радиус-векторов $\mathbf{R}$. В формуле (14) рассмотрена погрешность, создаваемая линиями ж/д электротранспорта при их непосредственной близости к магнитоизмерительной системе. Общеизвестно, что колебания токов в сети питания электротранспорта на постоянном токе (электричка, метро, трамвай, троллейбус) создают максимальные помехи магнитометрии. Чтобы уменьшить влияние таких помех, морские магнитоизмерительные стенды размещают за городом, как можно дальше от ближайшей линии электротранспорта на постоянном токе. В работе [10] построена модель таких помех, учитывающая среди прочих факторов расстояние между линией транспорта и магнитометром.

Выражения (12), (13), (15) выведены в работе [1]. Обратить внимание на то, что аддитивные составляющие (12)–(14) нарастают в третьей степени расстояния $R_{\text{и}}$ и могут быть доминирующими для методов измерений магнитного момента в дальнем поле. Отметим также, что в системах магнитного поиска [4] σ_{R} пропорционально пятой степени расстояния $R_{\text{и}}$.

Компьютерное моделирование погрешностей измерений магнитного момента. С помощью компьютерного моделирования (КМ) в пакете МАТЛАБ удобно имитировать разнообразные аспекты измерений [4], в частности, погрешности измерений магнитного момента в дальнем поле.

Инструментальные погрешности. Сравним аналитические оценки (11)–(15) и КМ-оценки инструментальных составляющих погрешностей ДМ при модуле магнитного момента $M = 10^5 \text{ Ам}^2$, длине объекта измерений $L = 121 \text{ м}$ и расстоянии между датчиками ДМ, равном 50 м . Результаты сравнения представлены в табл. 1, где координатная погрешность получена при $\varphi = 0,1$, $\sigma_{\text{R}} = 0,3 \text{ м}$, а аддитивные составляющие погрешности приведены при следующих параметрах:

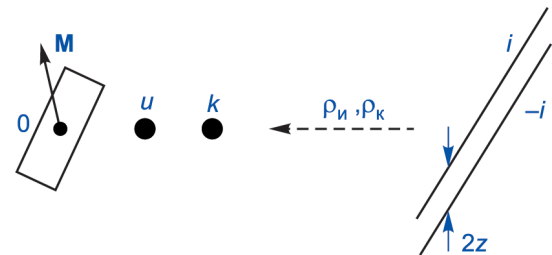


Рис. 1. Схема измерений магнитного момента корабля в дальнем поле:

$\mathbf{M}$ – вектор магнитного момента; u , k – измерительный и компенсационный датчики ДМ (лежат на одной оси с центром 0); $2z$ – расстояние между токопроводами (+i, -i) линии железнодорожного электротранспорта; $\rho_{\text{и}}$, $\rho_{\text{к}}$ – расстояния от линии железнодорожного электротранспорта до измерительного и компенсационного датчиков соответственно

Fig. 1. Measurement scheme of the MM of the ship in the far field
 $\mathbf{M}$ – the MM vector; u , k – measuring and compensation sensors of the DM (both lying on the same axis with the 0 – center); $2z$ – the distance between the current wires (+i, -i) of the electric railway line; $\rho_{\text{и}}$, $\rho_{\text{к}}$ – distances between the railway and the measuring and compensation sensors

Таблица 1

Таблица 2

Относительные инструментальные погрешности измерения магнитного момента

$R_{и}/L$	$\delta_M M$		σ_{M_0}/M		$ \Delta M_0 /M$		σ_{M_n}/M		σ_{M_R}/M	
	(11)	КМ	(12)	КМ	(13)	КМ	(14)	КМ	(15)	КМ
0,50	0,0190	0,0184	0,0057	0,0056	0,0022	0,0021	0,0006	0,0006	0,0206	0,0201
0,75	0,0210	0,0203	0,0216	0,0217	0,0085	0,0082	0,0023	0,0023	0,0155	0,0155
1,00	0,0233	0,0226	0,0592	0,0582	0,0230	0,0222	0,0062	0,0062	0,0139	0,0134
1,25	0,0259	0,0251	0,1290	0,1275	0,0503	0,0488	0,0136	0,0142	0,0122	0,0122
1,50	0,0287	0,0278	0,2410	0,2448	0,0966	0,0936	0,0260	0,0260	0,0119	0,0115
1,75	0,0316	0,0307	0,4408	0,4280	0,1688	0,1637	0,0460	0,0440	0,0111	0,0111
2,00	0,0346	0,0336	0,7028	0,6979	0,2753	0,2670	0,0740	0,0740	0,0114	0,0107
2,25	0,0377	0,0366	1,0820	1,0780	0,4253	0,4125	0,1150	0,1050	0,0108	0,0105

Относительные методические погрешности измерений магнитного момента по уравнениям (7)–(9)

$R_{и}/L$	$\delta M_{мет}$		
	(7)	(8)	(9)
0,50	0,39	0,092	0,062
0,75	0,26	0,070	0,031
1,00	0,18	0,058	0,019
1,25	0,13	0,049	0,013
1,50	0,10	0,042	0,010
1,75	0,08	0,036	0,008
2,00	0,07	0,032	0,006
2,25	0,06	0,029	0,005

$\sigma_{B_i} = 10^{-10}$ Тл (собственные шумы ДМ); $|\Delta_0| = 1,3 \cdot 10^{-10}$ Тл (уходы нулей ДМ); $\sigma_I = 10^3$ А, $\rho = 1500$ м, $z = 4$ м (помехи от линии электро тяги).

Из табл. 1 следует, что значения соответствующих пар аналитических и КМ-оценок достаточно близки, что подтверждает правильность выводов соотношений (11)–(15).

Характер соотношения между мультипликативной составляющей инструментальной погрешности (11) и аддитивной составляющей от уходов нулей (13) проиллюстрирован на рис. 2. При измерениях в ближних полях ($R_{и}/L \leq 0,5$) мультипликативная составляющая погрешностей преобладает

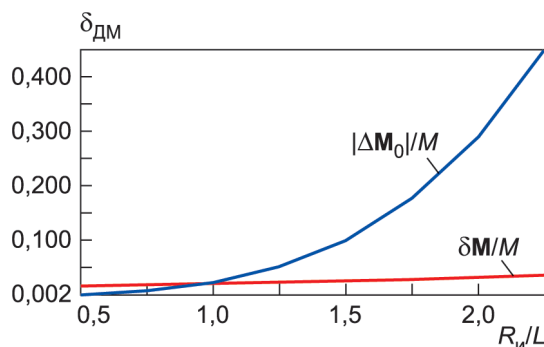


Рис. 2. Относительные мультипликативная $\delta M/M$ (11) и аддитивная $|\Delta M_0|/M$ (13) составляющие погрешности ДМ в зависимости от расстояния $R_{и}/L$

Fig. 2. Relative multiplicative $\delta M/M$ (11) and relative additive $|\Delta M_0|/M$ (13) parts of the error of the DM depending on the distance $R_{и}/L$

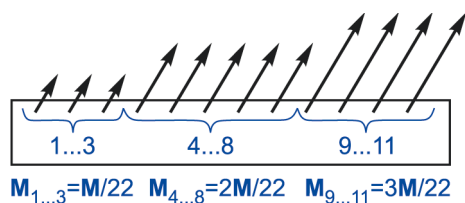


Рис. 3. Модель распределения магнитного момента по длине корабля при разбиении $M = 10^5(0,3; 0,1; (1 - 0,3^2 - 0,1^2)^{1/2})$ на 11 участков

Fig. 3. the MM distribution model when $M = 10^5(0,3; 0,1; (1 - 0,3^2 - 0,1^2)^{1/2})$ divided along the ship into 11 sections

и уходами нулей, как правило, пренебрегают. Но в дальнем поле ($R_{и}/L > 0,5$) погрешность ухода нулей лавинообразно нарастает и снижает точность измерений магнитного момента с помощью феррозондовых ДМ. Заметим, что модульные магнитометры практически не имеют уходов нулей.

Методические погрешности. Вычислим КМ-оценки относительных методических составляющих для условного распределения магнитного момента по длине L корабля при разбиении $M = 10^5(0,3; 0,1; (1 - 0,3^2 - 0,1^2)^{1/2})$ на 11 участков (рис. 3). Для определённости выберем конкретные значения компонент магнитного момента, чтобы сравнивать методические мероприятия по уменьшению погрешностей измерения магнитного момента в одинаковых условиях. Методические погрешности рассчитаем по уравнениям измерений магнитного момента (7)–(9) без учёта инструментальных погрешностей. Результаты вычислений представлены в табл. 2 и на рис. 4.

Номинально метод (8) рассчитан на равномерное распределение магнитного момента по длине L , но его можно использовать и для рассмотренного неравномерного распределения (см. рис. 3), обеспечивая более высокую точность в сравнении с традиционным методом (7). Наиболее высокую точность обеспечивает метод (9).

Инструментальные погрешности ДМ разных классов. Для обобщённого анализа инструментальных составляющих погрешности измерений магнитного момента разделим на три

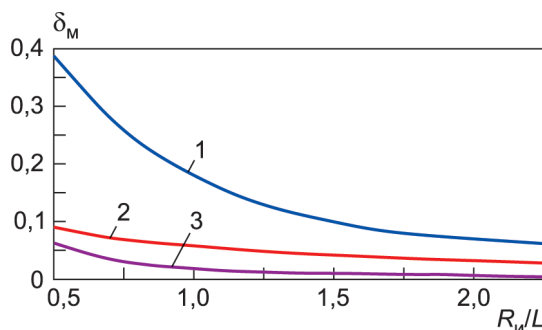


Рис. 4. Оценки относительных методических погрешностей методов измерений магнитного момента (7)–(9) – кривые 1–3 соответственно

Fig. 4. Estimates of the relative methodical errors for methods (7)–(9) – 1–3

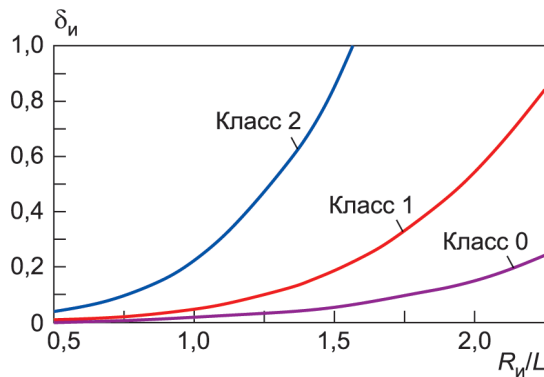


Рис. 5. Инструментальные погрешности ДМ классов 0–2

Fig. 5. Instrumental errors for the different DM classes 0–2

Таблица 3
Точностные аргументы инструментальных погрешностей ДМ 0–2 классов

Аргумент, формула	Класс ДМ		
	0	1	2
$\ u_n - I\ $, (3)	0,003	0,003	0,03
$\ u_k - I\ $, (4)	0,002	0,002	0,02
$\ \sigma_{и.к} - I\ $, (5)	0,003	0,003	0,03
$ \Delta 0_{и.к} $, нТл (13)	0	0,130	0,13
σ_{B_i} , нТл (12)	0,010	0,010	0,10

класса ДМ, основанные на различных датчиках: традиционных феррозондовых датчиках (класс 2); феррозондовых датчиков с коррекцией и угловым согласованием [3, 5] (класс 1); трёхкомпонентных квантовых датчиков [9] (класс 0).

В табл. 3 указаны точностные аргументы, которые выбраны для характеристики инструментальных составляющих погрешностей измерений с учётом условий моделирования и факторов, влияющих на составляющие погрешностей (см. табл. 1, характеристики координатной погрешности и помех от железнодорожной линии). Значение точностного аргумента для заданного класса ДМ определяет значение соответствующей составляющей инструментальной погрешности.

В табл. 4 и на рис. 5 представлены соответствующие КМ-оценки относительных инструментальных погрешностей.

Погрешности от помех железнодорожной линии электропутья на постоянном токе. В табл. 5 приведены оценки помех для схемы на рис. 1 при $2z = 8$ м, СКО суммы токов прямой и обратной колеи $\sigma_I = 1000$ А в зависимости от относительного расстояния R_n/L и удалённости ρ железнодорожной линии от ДМ.

Результирующие погрешности измерений. Для определения результирующих погрешностей вычисляют КМ-оценки соответствующих уравнений измерений с учётом всех источников погрешностей, получают ряд результатов измерений (вектора) магнитного момента, находят СКО и среднее значение этого ряда и вычисляют итоговое значение в виде суммы среднего и утроенного СКО, делённого на модуль магнитного момента. Результаты КМ-оценок относительных результирующих погрешностей измерений магнитного момента представлены в табл. 6 и на рис. 6.

Таблица 4

КМ-оценки относительных инструментальных погрешностей

R_n/L	Класс ДМ		
	0	1	2
0,50	0,001	0,004	0,037
0,75	0,005	0,016	0,092
1,00	0,013	0,045	0,220
1,25	0,029	0,096	0,460
1,50	0,052	0,185	0,850
1,75	0,095	0,324	1,530
2,00	0,149	0,537	2,450
2,25	0,240	0,830	3,750

Таблица 5

Относительные помехи от линии электропутья

R_n/L	500	1000	1500	2000
0,50	0,047	0,002	0,0006	0,0002
0,75	0,180	0,007	0,0020	0,0010
1,00	0,480	0,019	0,0060	0,0030
1,25	1,090	0,040	0,0140	0,0060
1,50	1,790	0,076	0,0260	0,0110
1,75	3,400	0,150	0,0440	0,0200
2,00	5,400	0,210	0,0740	0,0300
2,25	8,700	0,370	0,1100	0,0500

Таблица 6

Оценки относительных результирующих погрешностей измерений магнитного момента

R_n/L	Класс ДМ, формула		
	0, (9)	1, (8)	2, (7)
0,50	0,065	0,093	0,42
0,75	0,038	0,075	0,34
1,00	0,036	0,067	0,37
1,25	0,047	0,092	0,57
1,50	0,070	0,190	0,89
1,75	0,110	0,340	1,49
2,00	0,170	0,550	2,54
2,25	0,250	0,850	3,83

Обсуждение результатов и выводы. Исследование точностных возможностей трёх наиболее простых (двухточечных) магнитометрических методов измерения магнитного момента проведено в предположении линейной модели преобразования ДМ. С увеличением расстояния от исследуемого объекта до места измерения уменьшается методическая составляющая погрешности и резко увеличиваются аддитивные составляющие инструментальных погрешностей. На некотором оптимальном расстоянии совместное влияние методических и инструментальных погрешностей минимизируется.

Результирующая погрешность измерений магнитного момента при оптимальном расстоянии для традиционного метода измерения (см. формулу (7)) с ДМ класса 2 составляет не менее 34 %, для методов с уравнениями измерений (8), (9) (для ДМ классов 1 и 0 соответственно) эта погрешность уменьшается до 6,7 и 3,6 % соответственно (см. табл. 6, результаты выделены полужирным шрифтом).

Трёхкомпонентный ДМ класса 0 можно реализовать путём модификации квантовых магнитометров [9] в сочетании с методами корректирующих матриц [3] и углового согласования ДМ [5].

Ожидаемые преимущества замены феррозондовых трёхкомпонентных ДМ квантовыми модификациями состоят в строгой линейности преобразования, пренебрежимо малых уходах нулей и увеличении числа разрядов отсчёта результата измерения. При этом метод корректирующих матриц [3] позволит устранить влияния остаточных неортогональностей магниточувствительных осей ДМ.

Обратим также внимание на то, что уравнение измерения магнитного момента (9) обращается в уравнение (6) для тела в виде одного участка и в уравнение (8) при условно равномерном распределении намагниченности по длине тела. Таким образом, метод с уравнением измерений (9) является обобщением методов с уравнениями (6), (8).

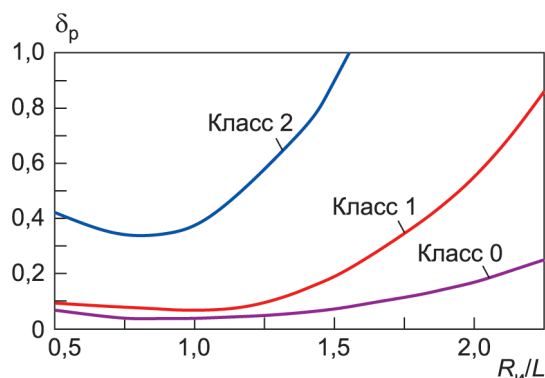


Рис. 6 Относительные результирующие погрешности измерений магнитного момента ДМ классов 2, 1, 0, рассчитанные по уравнениям измерений (7)–(9) соответственно

Fig. 6 Resulting relative errors of the MM measurement for the DM classes 2, 1, 0, calculated according to the measurement equations (7)–(9), respectively

Закключение. Помимо натурных измерений магнитных моментов кораблей и подводных лодок методы на основе уравнений (8), (9) можно рекомендовать для измерений магнитных моментов маломасштабных магнитных моделей натуральных объектов при разделении индуктивных и постоянных составляющих магнитных моментов кораблей [2], а также для разнообразных измерений образцов магнитных материалов в виде стержней и пластин, например, для измерения компонентов петель усреднённой намагниченности при циклическом перемагничивании образцов.

Список литературы

1. Семенов В. Г., Сонина В. Э. Анализ методов измерений магнитных моментов // Метрология. 1992. № 8. С. 3–46.
2. Пат. № 2293345 РФ / Ю. М. Иванов, О. В. Малышев, В. Я. Матисов, В. Г. Семенов // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 4.
3. Иванов Ю. М., Семенов В. Г. Корректирующие матрицы – путь к повышению точности трёхкомпонентных магнитометров // Измерительная техника. 2013. № 6. С. 46–51.
4. Иванов Ю. М., Семенов В. Г. Сравнительный анализ методов поиска источника магнитного поля дипольной модели // Измерительная техника. 2017. № 8. С. 49–54. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2017-8-49-54>
5. Затеев А. А., Иванов Ю. М., Семенов В. Г. Согласование координат в магнитоизмерительных системах // Материалы XII Всероссийской конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в РФ», Поведники, Московская обл., 13–15 ноября 2018. М.: ВНИИФТРИ, 2018. С. 57–60.
6. Гетьман Р. В., Затеев А. А., Иванов Ю. М., Матисов В. Я., Семенов В. Г. Анализ погрешностей измерения магнитного момента кораблей в дальнем поле // Морской вестник. 2018. № 1(65). С. 102–104.

7. Иванов Ю. М., Семенов В. Г. Перспективный метод размагничивания кораблей // Сборник докладов X Международной конференции «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях» NSN-2019, Санкт-Петербург, 11–12 июля 2019. С. 209–212.

8. Затеев А. А., Иванов Ю. М., Матисов В. Я. Экспериментальная оценка методов измерений магнитного момента // Сборник докладов X Международной конференции «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях» NSN-2019, Санкт-Петербург, 11–12 июля 2019. С. 213–215.

9. Александров Е. Б., Вершовский А. К. и др. Быстродействующий трёхкомпонентный магнитометр-вариометр на основе цезиевого датчика // Журнал технической физики 2006. Т. 76. Вып. 1. С. 115–120.

10. Пат. РФ № 2319973 / Ю. М. Иванов, В. Г. Семенов // Изобретения. Полезные модели. 2008. № 8.

References

1. Semenov V. G., Sonina V. E., Analysis of measurement methods of magnetic moments, *Metrologiya*, 1992, no. 8. pp. 3–46. (In Russ.)
2. Ivanov Yu. M., Malyshev O. V., Matisov V. Ya., Semenov V. G., RF Patent no. 2293345, *Buyll. Izobret.*, no. 4 (2007).
3. Ivanov Yu. M., Semenov V. G., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 674–682. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0264-4>
4. Ivanov Yu. M., Semenov V. G., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 8, pp. 823–830. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1277-1>
5. Zateev A. A., Ivanov Yu. M., Semenov V. G., Coordinate adjustment in magnetic measuring systems, *Proceedings of XII All-Russian Conference “Metrological provision of defence and security in Russian Federation”*, Povedniki, Moscow region, November 13–15, 2018, Moscow, VNIIFTRI Publ., pp. 57–60. (In Russ.)
6. Getman R. V., Zateev A. A., Ivanov Yu. M., Matisov V. Ya., Semenov V. G., Analysis of measurement errors of the magnetic moment of ships in the far field, *Morskoi vestnik*, 2018, no. 1 (65), pp. 102–104. (In Russ.)
7. Ivanov Yu. M., Semenov V. G., The promising method for degaussing, *Proceedings of X International Conference “Navy and Shipbuilding Nowadays” NSN-2019*, Saint-Petersburg, July 11–12, 2019, pp. 209–212.
8. Zateev A. A., Ivanov Yu. M., Matisov V. Ya., Experimental evaluation of methods for measuring magnetic moment, *Proceedings of X International Conference “Navy and Shipbuilding Nowadays” NSN-2019*, Saint-Petersburg, July 11–12, 2019, pp. 213–215.
9. Aleksandrov E. B., Vershovskiy A. K. et.al., Fast three-component magnetometer-variometer based on a cesium sensor, *Technical Physics*, 2006, vol. 76, no. 1, pp. 115–120. (In Russ.)
10. Ivanov Yu. M., Semenov V. G., RF Patent no. 2319973, *Buyll. Izobret.*, no. 8 (2008).

Статья поступила в редакцию 01.12.2020; принята к публикации 26.02.2021.