

УДК 519.23:[537.212+537.612]
EDN: FJJJPD

А.М. Вишнеvский^{id}, А.А. Фирсова
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Объект и цель научной работы. Объектом работы являются методы интерпретации данных измерений электрического поля (ЭП) морских объектов: определение электрического дипольного момента (ЭДМ) и пересчет поля на различные расстояния, а также при других условиях внешней среды. Цель состоит в разработке алгоритмов для оценки погрешности пересчета и определения ЭДМ.

Материалы и методы. Оценка погрешности методов интерпретации результатов измерений потенциала ЭП базируется на статистическом подходе, основанном на решении большого числа тестовых задач, в которых и параметры системы источников, и погрешность измерений задаются с помощью случайных величин. Производится анализ и выбор моделей источников ЭП для выполнения численных расчетов.

Основные результаты. Предложен алгоритм статистической оценки погрешности методов интерпретации данных измерений ЭП с использованием модели источников ЭП в виде вытянутого сфероида с изоляционной или проводящей поверхностью и точечными источниками тока на этой поверхности. В рамках предложенных моделей может варьироваться как расположение источников тока, так и их интенсивность, что позволяет сформировать большое число тестовых задач. Приведены примеры оценки погрешности определения ЭДМ.

Заключение. Развивается статистический подход для оценки погрешности методов интерпретации данных измерений ЭП. Для его реализации предложена модель источников ЭП, которая позволяет выполнять многовариантные расчеты. Приведены примеры практической реализации алгоритма.

Ключевые слова: электрическое поле, измерения, погрешность интерпретации, статистический подход, вытянутый сфероид, дипольный момент, пересчет.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 519.23:[537.212+537.612]
EDN: FJJJPD

A.M. Vishnevsky^{id}, A.A. Firsova
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

STATISTICAL ANALYSIS OF INTERPRETATION ERROR IN ELECTRIC SIGNATURE MEASUREMENTS

Object and purpose of research. This paper discusses measurement data interpretation methods for electric signature of marine objects, i.e. determination of electric dipole moment (EDM) and extrapolation of signature data to various distances and various environmental conditions. The purpose of the study was to develop the algorithm for error assessment of extrapolation and EDM calculation.

Materials and methods. The assessment of error in the interpretation methods for measurement results of electric signature potential is based on statistical approach, i.e. on the extensive set of test cases where source system parameters and measurement error are specified by means of random values. The models of electric signature sources are analysed and selected to perform numerical calculations.

Main results. The authors suggest a statistical algorithm of error assessment for the interpretation of electric signature measurement data where the model of electric signature sources is represented as an oblong spheroid with isolating or conducting surface and point sources of current on it. The models suggested in this study allow variation of both locations and intensity

Для цитирования: Вишнеvский А.М., Фирсова А.А. Статистический анализ погрешности интерпретации результатов измерений электрического поля. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 3(409): 128–137.

For citations: Vishnevsky A.M., Firsova A.A. Statistical analysis of interpretation error in electric signature measurements. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 3(409): 128–137 (in Russian).

of current sources, thus making it possible to generate an extensive set of test examples. The paper also presents practical cases of EDM calculation error assessment.

Conclusion. Statistical approach is a promising way to estimate the error in the interpretation methods for electric signature measurements. The authors implement this approach as a model of electric signature sources enabling multi-variant calculations, illustrating their algorithm with examples of its practical implementation.

Keywords: electric signature, interpretation error, statistical approach, oblong spheroid, dipole moment, extrapolation.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Известно, что в ряде случаев параметры электрического поля (как и любого другого физического поля) или интегральные характеристики его источников не могут быть измерены напрямую, а определяются по результатам измерений расчетным путем.

Одним из примеров является определение электрических мультипольных моментов, в частности электрического дипольного момента, для которого не существует прямых методов измерений. Другой пример – пересчет измеренных значений ЭП на различные расстояния от источников или определение ЭП при других параметрах среды (глубины места, электрической проводимости грунта).

При этом погрешность определения искомым параметров зависит как от погрешности прямых измерений ЭП, так и от методической погрешности расчета, которые и определяют суммарную погрешность. В свою очередь, методическая погрешность обычно оценивается на основе решения контрольных задач для источников поля сравнительно простой структуры либо для достаточно сложной компьютерной модели источников реальных морских технических объектов (МТО). При этом моделирование, как правило, предполагает рассмотрение лишь небольшого числа моделей и, соответственно, оценку погрешности только для рассмотренных моделей.

При проведении измерений фактическое ЭП МТО может существенно отличаться от прогнозируемого расчетным путем. Так, непрогнозируемую составляющую ЭП вносит изменение характеристик покрытия корпуса МТО в процессе эксплуатации, сопротивления узлов разъединения гальванически активных конструкций, степень износа протекторов и других средств электрохимической защиты от коррозии [1]. С учетом этого можно полагать, что ЭП имеет случайный характер.

В работе [2] для интерпретации результатов измерений магнитного поля предложен статистический подход оценки погрешности, основанный на предположении о случайном характере распре-

ления источников МП и решении большого числа тестовых задач. В статье развивается указанный подход для электрического поля.

Оценка погрешности на основе статистического подхода

Error assessment as per statistical approach

В предположении о случайном характере параметров источников ЭП и погрешности измерений предлагается оценку погрешности искомым характеристик производить на основе метода Монте-Карло с использованием большого числа реализаций случайного процесса, который формируется таким образом, чтобы его вероятностные характеристики совпадали с аналогичными характеристиками рассматриваемого физического процесса.

Каждая реализация случайного процесса соответствует решению тестовой задачи с имитацией измерений ЭП. Решение тестовых задач проводится в следующем порядке. Моделируется система источников ЭП и осуществляется решение прямой задачи по расчету электрического потенциала в заданных точках и расчету точного значения ЭДМ. Моделируется погрешность измерений и вносятся в данные расчета потенциала. Результаты расчета ЭП используются в качестве исходных данных для определения параметров ЭП. В результате решения тестовой задачи вычисляется погрешность определения параметров ЭП, например, относительная погрешность определения составляющих вектора ЭДМ:

$$\delta_{P_{\xi}} = \frac{|P_{\xi}^{\text{Calc}} - P_{\xi}^{\text{Exact}}|}{|\vec{P}^{\text{Exact}}|} \cdot 100\%, \quad \xi = x, y, z,$$

где P_{ξ}^{Exact} – компоненты точного значения ЭДМ, P_{ξ}^{Calc} – рассчитанные по модельным данным измерений компоненты ЭДМ, $|\vec{P}^{\text{Exact}}|$ – модуль вектора точного значения ЭДМ.

При выполнении пересчета может рассматриваться относительная погрешность определения максимальной разности потенциалов или средне-

квадратическая погрешность определения потенциала в точках пересчета:

$$\delta^{\Delta U} = \frac{\Delta U^{\text{Calc}} - \Delta U^{\text{Exact}}}{\Delta U^{\text{Exact}}} \cdot 100\%,$$

$$\delta^{\text{СР.КВ}} = \sum_{j=1}^K \sqrt{\frac{(U_j^{\text{Calc}} - U_j^{\text{Exact}})^2}{K}} \cdot 100\%,$$

где U_j^{Exact} – точное значение потенциала в точке с номером j , U_j^{Calc} – результаты пересчета потенциала, ΔU^{Exact} – точное значение максимальной разности потенциалов, ΔU^{Calc} – пересчитанное значение максимальной разности потенциалов, K – число точек пересчета.

При статистическом подходе получаемая в результате решения тестовой задачи погрешность рассматривается как случайная величина. Для оценки погрешности определяются ее математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение.

Предложенный алгоритм позволяет:

- оценить погрешность определения ЭДМ или пересчета ЭП, если известна погрешность измерений потенциала;
- сопоставить точность различных методов расчета;
- сопоставить информативность различных сеток точек измерений;
- оценить степень влияния различных составляющих погрешности измерений ЭП на результаты расчета.

Выбор модели источников

Selection of source model

Одним из этапов статистической оценки погрешности является выбор модели источников, по которой

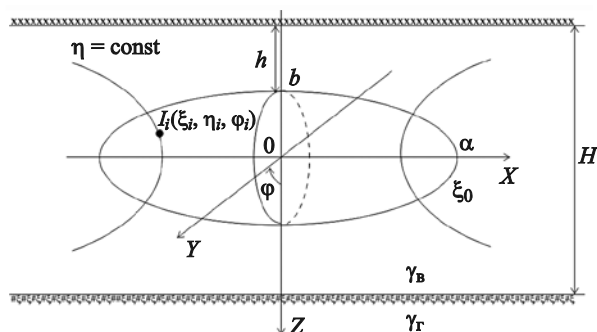


Рис. 1. Расчетная модель источников электрического поля

Fig. 1. Computational model of electric signature sources

производится имитация значений ЭП. С одной стороны, модель должна адекватно отражать физические процессы формирования ЭП, а с другой – быть достаточно простой и универсальной для возможности выполнения многовариантных расчетов.

Источником стационарного ЭП в морской воде являются гальванические токи многоэлектродной электронейтральной гальванической системы, распределенные по смоченной поверхности МТО [3]. При этом ЭП формируется взаимодействием обычно достаточно локальных электрохимически неоднородных конструкций с корпусом МТО, имеющим защитное лакокрасочное покрытие, и локальными повреждениями покрытия.

В этих условиях предлагается аппроксимировать поверхность МТО поверхностью вытянутого сфероида с большой и малой полуосями a и b (изоляционного или имеющего покрытие с достаточно высоким удельным поверхностным сопротивлением), а локальные источники – точечными источниками тока I_i ($i = \overline{1, N}$), расположенными на поверхности сфероида или вблизи нее (рис. 1).

В случае изоляционной поверхности потенциал ЭП такой системы в однородной проводящей среде с удельной электрической проводимостью γ_B рассчитывается по формуле:

$$U(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\gamma_B} \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{r_i} - \frac{1}{4\pi\gamma_B} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \sum_{m=0}^n (2-\delta_{0m})(-1)^m \left[\frac{(n-m)!}{(n+m)!} \right]^2 \times$$

$$\times Q_n^m(\xi) P_n^m(\eta) \frac{P_n^{m'}(\xi_0)}{Q_n^{m'}(\xi_0)} \times$$

$$\times \sum_{i=1}^N I_i Q_n^m(\xi_i) P_n^m(\eta_i) \cos m(\varphi - \varphi_i), \quad (1)$$

где Q_n^m , P_n^m – присоединенные полиномы Лежандра,

$$r_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2},$$

$$c = \sqrt{a^2 - b^2}, \quad \xi_0 = \frac{a}{c}.$$

Сфероидальные координаты (ξ, η, φ) связаны с декартовыми (x, y, z) равенствами:

$$x = c\xi\eta,$$

$$y = c\sqrt{(\xi^2 - 1)(1 - \eta^2)} \sin \varphi,$$

$$z = c\sqrt{(\xi^2 - 1)(1 - \eta^2)} \cos \varphi.$$

В свою очередь, составляющие ЭДМ определяются равенствами:

$$\begin{aligned} P_X &= \sum_{i=1}^N I_i \left[1 - \frac{P_1'(\xi_0) Q_1(\xi_i)}{Q_1'(\xi_0) P_1(\xi_i)} \right] x_i, \\ P_Y &= \sum_{i=1}^N I_i \left[1 - \frac{P_1'(\xi_0) Q_1(\xi_i)}{Q_1'(\xi_0) P_1(\xi_i)} \right] y_i, \\ P_Z &= \sum_{i=1}^N I_i \left[1 - \frac{P_1'(\xi_0) Q_1(\xi_i)}{Q_1'(\xi_0) P_1(\xi_i)} \right] z_i. \end{aligned} \quad (2)$$

При этом под ЭДМ понимается интегральная характеристика источников ЭП без учета их отражения от границы «вода – воздух».

Расчет по формуле (1), являющейся точным выражением функции Грина 2-го рода для вытянутого сфероида, занимает достаточно много времени, что ограничивает применение рассматриваемого варианта метода Монте-Карло.

Для резкого сокращения времени расчета, исходя из физических представлений, заменим точечный источник тока на поверхности изоляционного сфероида системой из двух точечных источников, один из которых, с удвоенной интенсивностью $2I_i$, расположен в точке (x_i, y_i, z_i) , а второй, с отрицательной интенсивностью $-I_i$, – в точке (x_i', y_i', z_i') . В свою очередь, координаты (x_i', y_i', z_i') определим с учетом выражений (2) таким образом, чтобы первые две гармоники поля аппроксимирующей системы соответствовали точному решению (1). Для этого положим

$$\frac{x_i'}{x_i} = 1 + \frac{P_1'(\xi_0) Q_1(\xi_i)}{Q_1'(\xi_0) P_1(\xi_i)} = 1 + \frac{\frac{1}{2} \ln \frac{\xi_i + 1}{\xi_i - 1} - \frac{1}{\xi_i}}{\frac{1}{2} \ln \frac{\xi_0 + 1}{\xi_0 - 1} - \frac{1}{\xi_0}},$$

$$\frac{y_i'}{y_i} = \frac{z_i'}{z_i} = 1 + \frac{P_1'(\xi_0) Q_1(\xi_i)}{Q_1'(\xi_0) P_1(\xi_i)} = 1 + \frac{\frac{1}{2} \ln \frac{\xi_i + 1}{\xi_i - 1} - \frac{1}{\xi_i}}{\frac{1}{2} \ln \frac{\xi_0 + 1}{\xi_0 - 1} - \frac{1}{\xi_0}}. \quad (3)$$

ЭП такой системы рассчитывается по простой формуле

$$U_i(x, y, z) = \frac{I_i}{4\pi\gamma_B} \left(\frac{2}{r_i} - \frac{1}{r_i'} \right), \quad (4)$$

где $r_i' = \sqrt{(x - x_i')^2 + (y - y_i')^2 + (z - z_i')^2}$.

Покажем справедливость такой замены на конкретном примере. При численных расчетах будем пользоваться безразмерными величинами, принимая, что масштаб длины $l_0 = 1$ м, тока $I_0 = 1$ мА и электрической проводимости $\gamma_0 = 3$ См/м. Соответственно, масштаб потенциала ЭП $u_0 = I_0 / (\gamma_0 l_0)$.

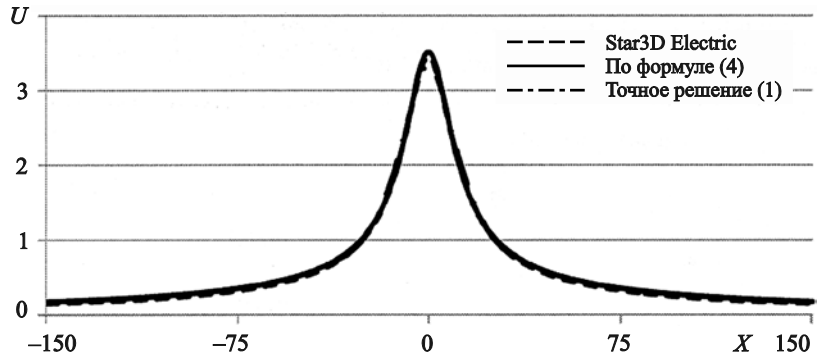
Рассмотрим сфероид с полуосями $a = 50$, $b = 5$, с изоляционной поверхностью и точечным источником тока на нем. Система расположена в однородной среде. Центр сфероида расположен в начале координат.

На рис. 2 и 3 приведено в безразмерном виде сопоставление значений потенциала ЭП U на линии $Y = 15$, $Z = 0$, полученных по формуле (1) с использованием полиномов Лежандра, упрощенным способом по формуле (4) и по программе Star3D Electric [4]. На рис. 2 источником поля является точечный источник тока, расположенный на поверхности изоляционного сфероида в точке $(0, 5, 0)$, а на рис. 3 – смещенный к концу сфероида источник тока, расположенный в точке $(40, 3, 0)$.

На линии $Y = 15$, $Z = 0$ максимальное расхождение значений потенциала, полученного по упро-

Рис. 2. Распределение потенциала электрического поля на линии $Y = 15$, $Z = 0$ при координатах источника тока $(0, 5, 0)$ на поверхности изоляционного сфероида

Fig. 2. Distribution of electric signature potential on line $Y = 15$, $Z = 0$ with current source coordinates $(0, 5, 0)$ on the surface of isolating spheroid



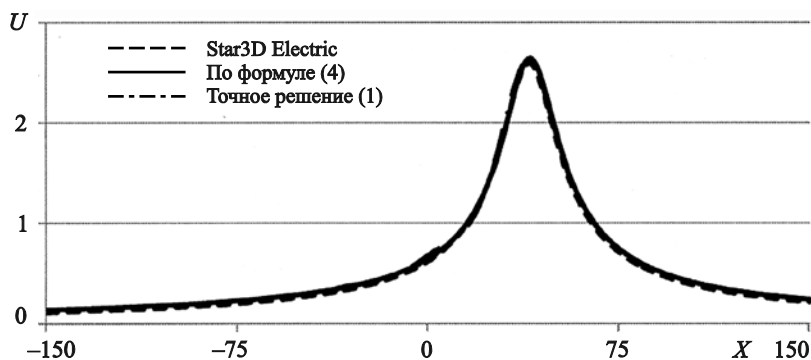


Рис. 3. Распределение потенциала электрического поля на линии $Y = 15, Z = 0$ при координатах источника тока $(40, 3, 0)$ на поверхности изоляционного сфероида

Fig. 3. Distribution of electric signature potential on line $Y = 15, Z = 0$ with current source coordinates $(40, 3, 0)$ on the surface of isolating spheroid

щенной формуле (4), с контрольными значениями по формуле (1) составляет 5 %. Результаты расчетов, полученные по программе Star3D Electric, практически совпадают с контрольными значениями по формуле (1).

Для расчетной модели в виде точечного источника тока на проводящей поверхности сфероида аналитическое решение отсутствует. Поэтому в качестве контрольных значений используются результаты расчетов по программе Star3D Electric.

Упрощенная модель включает:

- источник тока в точке (x_i, y_i, z_i) с удвоенной интенсивностью $2I_i$;
- источник тока с отрицательной интенсивностью $-I_i$, расположенный в точке (x'_i, y'_i, z'_i) , при

этом координаты x'_i, y'_i, z'_i определяются по формуле (3);

- ток, равномерно распределенный на отрезке $[-a, a]$ с постоянной линейной плотностью

$$j = -\frac{I_i}{2a}.$$

Потенциал ЭП такой системы определяется как

$$U = \frac{1}{4\pi\gamma_B} \times \sum_{i=1}^N I_i \left[\frac{2}{r_i} - \frac{1}{r'_i} - \frac{1}{2a} \ln \left| \frac{x+a+\sqrt{(x+a)^2+y^2+z^2}}{x-a+\sqrt{(x-a)^2+y^2+z^2}} \right| \right]. \quad (5)$$

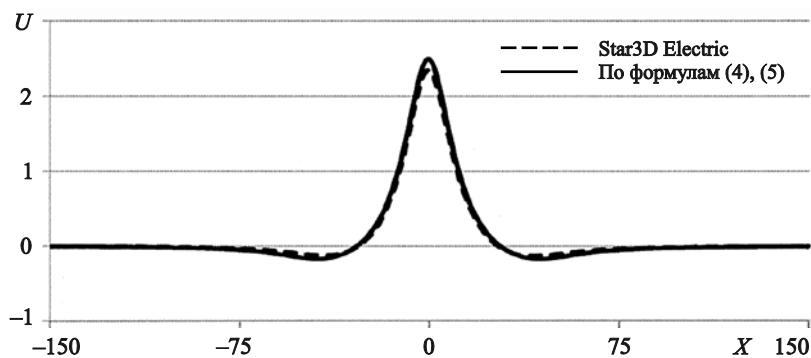


Рис. 4. Распределение потенциала электрического поля на линии $Y = 15, Z = 0$ при координатах источника тока $(0, 5, 0)$ на поверхности проводящего сфероида

Fig. 4. Distribution of electric signature potential on line $Y = 15, Z = 0$ with current source coordinates $(0, 5, 0)$ on the surface of conducting spheroid

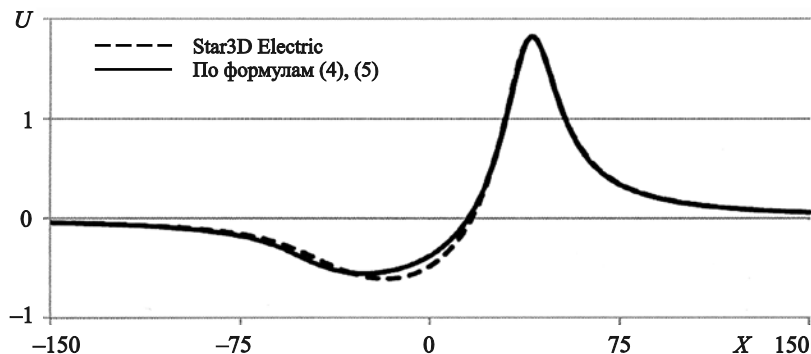


Рис. 5. Распределение потенциала электрического поля на линии $Y = 15, Z = 0$ при координатах источника тока $(40, 3, 0)$ на поверхности проводящего сфероида

Fig. 5. Distribution of electric signature potential on line $Y = 15, Z = 0$ with current source coordinates $(40, 3, 0)$ on the surface of conducting spheroid

Таблица 1. Параметры источников электрического поля для тестовой задачи с трехслойной средой
Table 1. Parameters of electric signature sources for test example with three-layered medium

i	Координаты источников			I_i
	x_i	y_i	z_i	
1	0	0	-5	-1
2	0	5	0	-2
3	49	0	1	3

На рис. 4 и 5 приведено сопоставление значений ЭП на линии $Y = 15, Z = 0$, полученного с использованием упрощенного способа по формуле (5) и по программе Star3D Electric. На рис. 4 источником поля является точечный источник тока, расположенный на поверхности проводящего сфероида в точке $(0, 5, 0)$, а на рис. 5 – смещенный к концу сфероида источник тока, расположенный в точке $(40, 3, 0)$.

На линии $Y = 15, Z = 0$ максимальное расхождение потенциала составляет 6 %.

При наличии границ раздела «вода – воздух» и «вода – грунт» для приближенного расчета ЭП воспользуемся методом отражений [5], последовательно отражая точечные источники тока (или распределенные по отрезку источники) только от границы раздела сред «вода – воздух» и «вода – грунт». При глубине места H , проводимости грунта γ_r поле в точке с координатами x, y, z от точечного источника I , расположенного в точке с координатами x', y', z' , рассчитывается по формуле:

$$U(x, y, z) = \frac{I}{4\pi\gamma_B} \left\{ \sum_{\lambda=1,-1} \frac{1}{[(x-x')^2 + r_\lambda^2]^{1/2}} + \sum_{m=1}^{\infty} k^m \sum_{\beta,\lambda=1,-1} \frac{1}{[(x-x')^2 + r_{m\beta\lambda}^2]^{1/2}} \right\}, \quad (6)$$

$$\text{где } r_\lambda = \sqrt{(y-y')^2 + z_\lambda^2}, \quad z_\lambda = z - \lambda z',$$

$$r_{m\beta\lambda} = \sqrt{(y-y')^2 + z_{m\beta\lambda}^2}, \quad z_{m\beta\lambda} = 2mH - \lambda z' - \beta z.$$

$$k = \frac{\gamma_B - \gamma_r}{\gamma_B + \gamma_r}.$$

Для оценки уровня методической погрешности рассмотрим следующую контрольную задачу. Пусть граница раздела «вода – воздух» расположена на расстоянии $h = 5$ от поверхности сфероида (плоскость $z = -10$), а граница раздела «вода – грунт» – на глубине $H = 50$ м. Полагаем $\gamma_r = 0,20$ См/м. ЭП создается тремя точечными источниками тока I_i , координаты которых приведены в табл. 1.

На рис. 6 приведено сопоставление значений ЭП, полученного упрощенным способом по формулам (4), (6) и по программе Star3D Electric.

На линии $Y = 0, Z = -9$ максимальное расхождение потенциала составляет 7 %.

Следует отметить, что значения потенциала ЭП и ЭДМ зависят от близости к границе раздела «вода – воздух». В табл. 2 приведено значение ЭДМ в зависимости от минимального расстояния h от поверхности сфероида до границы раздела сред.

Рис. 6. Распределение потенциала электрического поля на линии $Y = 0, Z = -9$ для системы трех источников тока на изоляционном сфероиде при трехслойной среде

Fig. 6. Distribution of electric signature potential on line $Y = 0, Z = -9$ for a system with three current sources on isolating spheroid with three-layered medium

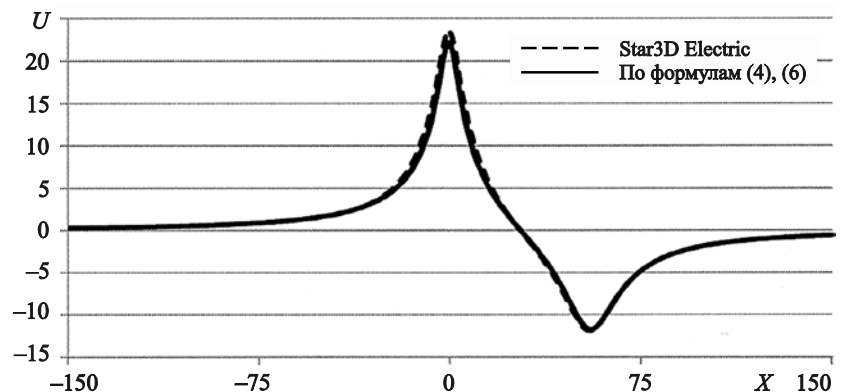


Таблица 2. Значение электрического дипольного момента в трехслойной среде
Table 2. Values of electric dipole moment in three-layer medium

Глубина h	Star3D Electric			По формуле (2)		
	P_x	P_y	P_z	P_x	P_y	P_z
Однородная среда	-149,4	19,6	-15,6	-150	19,6	-15,7
15	-149,6	19,7	-16,4			
5	-149,9	20,5	-18,7			
1	-150,1	22,8	-24,5			

Значения ЭДМ, полученные по программе Star3D Electric, в условиях однородной безграничной среды практически совпадают с контрольными значениями, полученными из аналитического решения. Из приведенных данных видно, что при $h > 5$ влиянием границ раздела сред на величину ЭДМ практически можно пренебречь.

Для моделирования ЭП МТО, находящегося в надводном положении, подводная часть МТО аппроксимируется половиной сфероида и также используется метод отражения.

Учет составляющих погрешности измерений

Consideration of measurement error components

Пересчет или расчет ЭДМ по исходным данным без погрешности позволяет оценить методическую погрешность пересчета/определения ЭДМ. Для получения суммарной погрешности производится моделирование погрешности измерений.

Ниже приведен пример возможных составляющих погрешности измерений:

1. Погрешность средств измерений: погрешность измерительного канала, дрейф нуля.
2. Неточность установки измерительного датчика и нулевого электрода: отклонение фактических координат датчика от проектных.
3. Неточность установки объекта: смещение объекта относительно проектного положения.
4. Влияние сторонних источников электрического поля.

В зависимости от особенностей конструкций стенда и используемой измерительной системы возможны дополнительные составляющие погрешности измерений.

Каждая составляющая погрешности рассматривается как случайная величина, в зависимости от имеющейся априорной информации о вероятностных значениях погрешности измерений выбирается

закон распределения соответствующей случайной величины. В результате совместного моделирования рассмотренных факторов рассчитывается общая оценка погрешности решения задачи.

Когда целью является сопоставление методов расчета или сеток точек измерений и характеристики измерительной системы неизвестны, можно использовать следующую упрощенную модель. Пусть погрешность измерений состоит из двух составляющих: первая – не зависит от величины измеряемого ЭП (внешние помехи), вторая – зависит от уровня измеряемого ЭП в данной точке (смещение датчиков, погрешность аппаратуры). Погрешность измерений в точке i моделируется случайной величиной, распределенной по нормальному закону с математическим ожиданием, равным нулю, и среднеквадратическим отклонением

$$\sigma_{\text{изм}}^i = \alpha + \beta |U^i|,$$

где α – составляющая погрешности, не зависящая от уровня ЭП, β – коэффициент, задающий зависимость величины погрешности от уровня измеренного ЭП, U^i – значение потенциала в точке i , $i = \overline{1, M}$, M – число точек измерений.

Пример оценки погрешности интерпретации

Case study

В качестве примера выполним статистическую оценку погрешности определения ЭДМ подводного МТО для двух возможных сеток точек измерений ЭП (рис. 7).

Расчет ЭДМ выполнялся по существующей методике измерений ЭП. Для выполнения статистической оценки предполагалось, что ЭП создается десятью ($N = 10$) гальваническими источниками. Соответственно, моделью источников является сфероид с распределенными по поверхности токами, интен-

сивность которых является случайной величиной, имеет равномерное распределение в диапазоне $[-1; 1]$. Координаты расположения источников на поверхности сфероида также являются случайной величиной. Система источников электронейтральна.

Для определения ЭДМ производилась оценка методической погрешности и суммарной погрешности при наличии погрешности в исходных данных. Погрешность исходных данных моделировалась по упрощенной схеме, при этом полагалось, что $\alpha = 0,02\Delta U$, $\beta = 0,05$.

На рис. 8 и 9 в относительных единицах представлен пример распределения потенциала ЭП од-



Рис. 7. Варианты сеток точек измерений электрического поля

Fig. 7. Point grids variants for electric signature measurements

Рис. 8. Распределение потенциала электрического поля на линии $Y = 0, Z = -11$

Fig. 8. Distribution of electric signature potential on line $Y = 0, Z = -11$

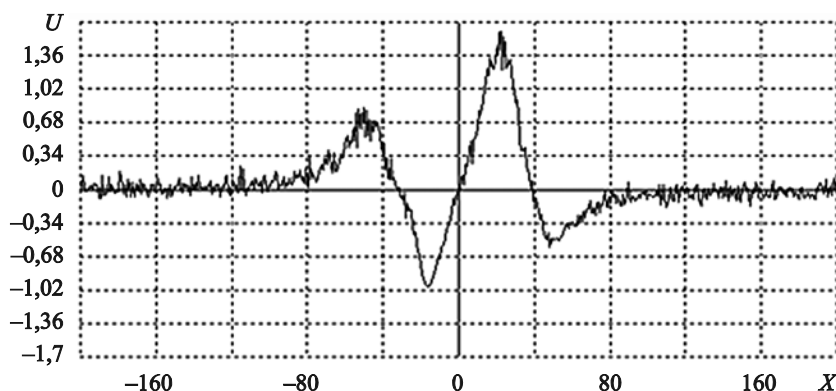


Рис. 9. Распределение потенциала электрического поля на линии $Y = 30, Z = 0$

Fig. 9. Distribution of electric signature potential on line $Y = 30, Z = 0$

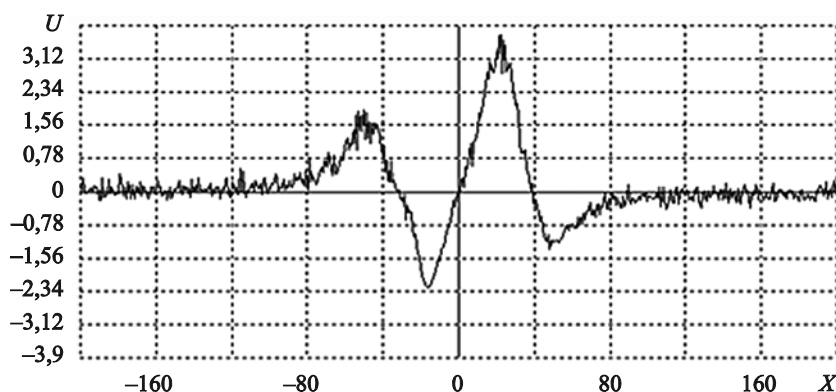


Таблица 3. Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение погрешности определения электрического дипольного момента, %

Table 3. Mathematical expectation and RMS deviation of EDM measurement error, %

Сетка измерений	Методическая погрешность						Суммарная погрешность					
	P_x		P_y		P_z		P_x		P_y		P_z	
	МО	СКО	МО	СКО	МО	СКО	МО	СКО	МО	СКО	МО	СКО
Вариант а	0,1	5,6	0	0,4	-0,1	3,5	-0,2	10,1	0	1,9	-0,1	3,6
Вариант б	-1	21,1	0,4	8	0,2	3	-1	21,6	-0,6	11,7	0,2	8,5

ной из реализаций случайной системы источников с имитацией погрешности измерений. В табл. 3 приведено математическое ожидание (МО) и среднеквадратическое отклонение (СКО) погрешности определения ЭДМ.

Заключение

Conclusion

В статье рассмотрено применение статистического подхода для оценки погрешности интерпретации данных измерений электрического поля. Для реализации метода предложена модель источников ЭП в виде локальных источников тока на поверхности изоляционного или проводящего сфероида.

Для ускорения расчетов предложен быстрый алгоритм, основанный на замене точечного источника на изоляционной поверхности системой двух точечных источников. В случае проводящей поверхности сфероида используется система из двух точечных источников и равномерно распределенных по отрезку токов.

Изменение координат и интенсивности источников тока позволяет сформировать большое число тестовых задач. Предложенная модель дает возможность использовать априорную информацию об источниках путем задания законов распределения случайных величин.

Предложенный подход может быть использован для сравнительного анализа информативности различных сеток точек измерений и сопоставления различных методов расчета ЭДМ и пересчета ЭП. А при известной погрешности исходных данных он также может быть применен в методиках измерений для определения погрешности косвенных измерений и при аттестации методик измерений.

Список использованной литературы

1. Кузьмин Ю.Л., Орыщенко А.С. Коррозия и электрохимическая защита морских судов / ЦНИИ КМ «Прометей». Санкт-Петербург : Профессионал, 2017. 288 с.
2. Вишнеvский А.М., Лаповок А.Я., Фирсова А.А. Статистический анализ погрешности расчета дипольного магнитного момента // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Вып. 4(390). С. 203–210. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-203-210.
3. Иоссель Ю.Я., Кленов Г.Э., Павловский Р.А. Расчет и моделирование контактной коррозии судовых конструкций. Ленинград : Судостроение, 1979. 261 с.

4. Программа расчета электрического поля STAR3D Electric : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011617901 Рос. Федерация / А.Я. Лаповок № 2011616006; заявл. 09.08.2011; опубл. 20.08.2014. 1 с.
5. Иоссель Ю.Я. Расчет потенциальных полей в энергетике : справ. книга. Ленинград : Энергия, 1978. 350 с.
6. Вишнеvский А.М., Фирсова А.А. Программное обеспечение для пересчета электрического и магнитного поля // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2008. Вып. 36(320). С. 93–106.

References

1. Kuzmin Yu.L., Oryshenko A.S. Corrosion and electrochemical protection of sea-going ships / CRISM Prometey. St. Petersburg : Professional, 2017. 288 p. (in Russian).
2. Vishnevsky A.M., Lapovok A.Ya., Firsova A.A. Statistical analysis of dipole magnetic moment determination error // Transactions of Krylov State Research Centre. 2019. Vol. 4(390). P. 203–210. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-203-210 (in Russian).
3. Iossel Yu.Ya., Klenov G.E., Pavlovsky R.A. Calculation and simulation of contact corrosion for ship structures. Leningrad : Sudostroyeniye, 1979. 261 p. (in Russian).
4. State Registration Certificate for Software RU 2011617901. STAR3D Electric software for electric signature calculation / A.Ya. Lapovok. No. 2011616006; Appl. 09.08.2011, publ. 07.10.2011. 1 p. (in Russian).
5. Iossel Yu.Ya. Calculation of potential signatures in power engineering. Reference Book. Leningrad : Energiya, 1978. 350 p. (in Russian).
6. Vishnevsky A.M., Firsova A.A. Software for electric and magnetic signature extrapolation // Transactions of Krylov Central Research Institute. 2008. Vol. 36(320). P. 93–106 (in Russian).

Сведения об авторах

Вишнеvский Александр Михайлович, д.т.н., профессор, заместитель начальника 7-го отделения ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-65-10. E-mail: 7_otd@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4795-0113>.

Фирсова Анна Анатольевна, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-65-33. E-mail: nurka100@mail.ru.

About the authors

Alexander M. Vishnevsky, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Deputy Head of Division, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-65-10. E-mail: 7_otd@ksrc.ru. https: 0000-0002-4795-0113.

Anna A. Firsova, Cand. Sci (Eng.), Lead Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-65-33. E-mail: nurka100@mail.ru.

Поступила / Received: 24.04.24

Принята в печать / Accepted: 22.08.24

© Вишневский А.М., Фирсова А.А., 2024