

УДК 005.961:656.6

**UNCERTAINTY OF MEASUREMENT IN SHIP'S ERGATIVE
FUNCTIONS****НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ В СУДОВЫХ
ЭРГАТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЯХ**

О. О. Райнов, *senior lecturer*, **В. О. Бобыр**, *PhD, associate professor*
А. О. Райнов, *старший преподаватель*, **В. А. Бобыр**, *к.т.н., доцент*

National University "Odessa Maritime Academy", Ukraine
Національний університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

Based on the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", published by the International Organization for Standardization, "measurement uncertainty" is a measure of confidence in the measurement results. The harmonization of national and international requirements has led to the need to ensure uniform assessment of measurements in the navy. According to this manual, to assess the accuracy of the measurement result, the concept of expanded uncertainty is introduced, which is expressed using the coefficient of coverage and standard deviation depending on the method of its assessment: A is by analyzing statistical series of observations and B is by a method different from analyzing statistical series of observations.

Currently, in the navy the characteristics of measurement errors (systematic and random) are still used to describe the accuracy of the measurement result. A common disadvantage of this approach is that systematic and random errors are not related to each other through the laws of distribution of random variables. While estimating the systematic and random components of the errors measured on a vessel of parameters, in general, both estimates are used separately - type A and type B, which is fairly incorrect. The article shows that a random variable cannot be characterized unambiguously - by expectation or standard deviation. It is characterized by a confidence interval for a given probability.

Also in the navy there is a situation where the requirements for the accuracy of instruments for measuring parameters in the ship's ergatic function are in no way connected with the requirements for the accuracy of solving practical problems based on the results of these measurements.

In the article, the sensitivity of the ship's ergatic function is expressed through the expanded uncertainty of measurements. A technique has been developed for assessing the accuracy of parameter measurements, which takes into account the combined effect of systematic and random measurement errors, as well as the level of confidence in them. Using the obtained expressions, one can solve various problems of estimating the accuracy of measurements of various parameters on a ship, as well as determining the requirements for the accuracy of their measurements. Also, if data

on the divisions of the scales of measuring instruments are available, it is possible to determine their acceptability for solving specific practical problems on the ship.

Key words: sensibility, ship's ergative function, expanded uncertainty, measurements, entropy, systematic and random errors, level of confidence, coverage factor.

РЕФЕРАТ

Виходячи з "Керівництва по вираженню невизначеності вимірів", виданого Міжнародною організацією по стандартизації, "невизначеність виміру" є мірою довіри до результатів вимірів. Гармонізація національних і міжнародних вимог привела до необхідності забезпечення єдності оцінки вимірів і на морському флоті. Згідно з цим керівництвом для оцінки точності результату вимірів вводиться поняття розширена невизначеність, що виражається за допомогою коефіцієнта охоплення і стандартного відхилення залежно від методу його оцінки: А - шляхом аналізу статистичних рядів спостережень і В - способом відмінним від аналізу статистичних рядів спостережень.

Нині на морському флоті для опису точності результату вимірів досі використовуються характеристики погрешностей вимірів - систематичних і випадкових. Загальним недоліком такого підходу є те, що систематичні і випадкові погрешності не зв'язуються між собою через закони розподілу випадкових величин. При оцінці систематичної і випадкової складових погрешностей вимірюваних на судні параметрів загалом використовуються окремо обидва оцінювання - типи А і типу В, що дещо некоректно. У статті показано, що випадкову величину не можна характеризувати однозначно - математичним очікуванням або стандартним відхиленням. Вона характеризується довірчим інтервалом для заданої вірогідності.

Також на морському флоті склалася ситуація, коли вимоги до точності приладів для виміру параметрів в судновій ергатичній функції ніяк не пов'язані з вимогами до точності рішення практичних завдань на основі результатів цих вимірів.

У статті чутливість суднової ергатичної функції виражена через розширену невизначеність вимірів. Розроблена методика оцінки точності вимірів параметрів, яка враховує спільний вплив систематичних і випадкових погрешностей вимірів, а також рівень довіри до них. За допомогою отриманих виразів можна вирішувати різні завдання за оцінкою точності вимірів різних параметрів на судні, а також за визначенням вимог до точності їх вимірів. Також за наявності даних про ціни ділень шкал вимірювальних приладів можна визначити їх прийнятність для вирішення конкретних практичних завдань на судні.

Ключові слова: чутливість, суднова ергатична функція, розширена невизначеність, виміри, ентропія, систематичні і випадкові погрешності, рівень довіри, коефіцієнт охоплення.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами

После опубликования в 1997 г. «Руководства по выражению неопределенности измерений» (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement - в дальнейшем GUM) [1] «неопределенность измерения» стала мерой доверия к результатам измерений, признанной на международном уровне.

От имени семи авторитетных международных организаций, включая Международную организацию по стандартизации (ISO), в GUM была определена новая концепция оценки точности измерений - неопределенность измерений. Цель этого – обеспечить унификацию представления различных измерений, проводимых в разных странах и организациях.

Во многих странах, как в ЕС, так и в СНГ на основе GUM были разработаны национальные стандарты, в которых неопределенность измерений принята в качестве меры по обеспечению доверия к результатам измерений.

В GUM для оценки точности результата измерений вводится понятие расширенная неопределенность, выражаемая с помощью коэффициента охвата и стандартного отклонения в зависимости от метода его оценки: А - путем анализа статистических рядов наблюдений и В - способом отличным от анализа статистических рядов наблюдений.

На морском флоте для описания точности результата измерений до сих пор используются характеристики погрешностей измерений – систематических и случайных. К ним относятся дисперсия и математическое ожидание случайной погрешности, предел погрешности, доверительные границы погрешности, стандартное отклонение систематической погрешности, границы исключенной систематической погрешности и др. При этом случайные и систематические погрешности разделены, что является одним из основных препятствий для оценки точности измерений через расширенную неопределенность.

Поскольку морские суда посещают порты различных государств, появилась необходимость гармонизации национальных и международных требований с целью обеспечения единства оценки измерений и на морском флоте,

В первую очередь это касается судовых эргатических функций (СЭФ), с помощью которых решаются практические задачи – определение координат места судна, швартовка – отшвартовка, погрузка – выгрузка, определение количества принятого груза и т.п. В судовой эргатической системе оператор – судно, включая груз - окружающая среда, состоящая из природной среды и социума, судовая эргатическая функция характеризует изменение энтропии (неопределенности) связи любых двух ее элементов, например, оператор – груз, судно – груз, природная среда – оператор т.д. При этом энтропия рассматривается с точки зрения обеспечения целей и задач судовых систем менеджмента.

Решение практических задач по реализации СЭФ основывается на измерениях различных физических, химических и других параметров, как показателей действия законов природы.

Результатом этих измерений является достижение целей судовых систем менеджмента - выполнение законодательных и регламентирующих требований каждой из систем менеджмента. Эти требования представляются в виде эксплуатационных или финансовых показателей действия экономических законов.

Однако на морском флоте сложилась ситуация, когда требования к точности приборов для измерения параметров в СЭФ никак не связаны с требованиями к точности решения практических задач на основе результатов этих измерений. И наоборот – отсутствует связь между фактической точностью используемых измерительных приборов и тем, какую результирующую точность они могут обеспечить при решении конкретной практической задачи. В работе [2] показано, что эта связь обеспечивается с помощью чувствительности СЭФ функций

С точки зрения теории вероятностей чувствительность функции – это предел точности измерений, в границах которого величины ее энтропии, как вероятностные ее состояния, неразличимы [3].

Применительно к эргатической функции ее чувствительность означает такую минимально допустимую величину изменения показателя действия закона природы, которая практически не влияет на заданное допустимое изменение эксплуатационного или финансового показателя. Другими словами, изменения энтропии при реализации эргатической функции в пределах ее чувствительности практически неразличимы.

В настоящее время для доказательств достоверности различных измерений при реализации судовой эргатической функции, признаваемых во всех странах, необходимо представление их в виде, требуемом GUM, т.е. в терминах неопределенности измерений.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы, и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

В работе [1] принято два принципиально новых подхода, касающихся оценки точности измерений.

Первый подход основывается на том, что случайные и систематические погрешности измерений нельзя разделять, поскольку природа их при одном и том же измерении одинакова. И в настоящее время зачастую способ их объединения выбирается таким образом, чтобы удовлетворить представление о «безопасности».

Второй подход относится к тому, что нужно обеспечивать реалистичные границы неопределенности, а не «безопасные», т.е. взятые с некоторым запасом или заниженные.

Общие вопросы, касающиеся толкований неопределенности измерений, в литературе освещены достаточно полно [4].

Имеются также и публикации по вопросу недостаточной правомерности замены теории «погрешностей» теорией «неопределенности измерений» [5].

В работе [6] на основе философских категорий необходимости и случайности установлена связь между систематическими и случайными погрешностями.

Однако, работы, которые были бы посвящены проблемам применения подхода «неопределенности измерений» в судовых эргатических функциях, отсутствуют.

Формулирование целей статьи и постановка задач

Цель статьи – выразить чувствительность судовой эргатической функции через расширенную неопределенность измерений.

Задачи, которые ставятся в статье – с помощью выраженной через расширенную неопределенность измерений чувствительности судовой эргатической функции разработать методики по оценке точности:

- 1) измерений параметров судовой эргатической функции;
- 2) создаваемых приборов для измерения параметров в СЭФ, требуемой для решения практических задач на основе результатов этих измерений;
- 3) имеющихся измерительных приборов и тем, какую результирующую точность они могут обеспечить при решении с помощью СЭФ конкретной практической задачи.

Изложение материалов исследования с обоснованием полученных научных результатов

Традиционно принято считать, что к предмету теории ошибок, как раздела теории вероятностей, относятся только случайные погрешности. При этом полагается, что систематические погрешности должны предварительно выявляться и исключаться из наблюдений [7].

Общим недостатком такого подхода является то, что систематические и случайные погрешности не связываются между собой через законы распределения случайных величин.

В настоящее время в целом при толковании категорий необходимости и случайности используется диалектический подход [8]. Однако при раскрытии природы этих категорий они рассматриваются отдельно и из-за этого превращаются друг в друга. По этой причине изложение этих категорий теряет свою последовательность и логику, что приводит к неверной их интерпретации. Это не позволяет использовать теорию вероятностей как на практике, так и как метод научного познания для решения вопроса о совместном действии систематических и случайных погрешностей в рамках закона распределения случайных величин.

Рассмотрим диалектику категорий необходимости и случайности в развитии некоторой вещи. Под вещью понимается всякая относительно самостоятельная система свойств, характеризующаяся и определяемая набором мер. В процессе своего развития в силу действия энтропии эта вещь будет стремиться изменить каждую свою меру в силу действий законов природы,

оставаясь сама собой пока количественные изменения мер не превратят ее в качественно новую меру. Действие законов природы и является необходимостью. Стремлению вещи изменить, например, меру q , как следствие соответствующего ей существенного свойства, определяемого действием одного из законов природы, будут противодействовать не только такие же стремления бесконечного множества других вещей, но и собственные стремления по отношению к остальным мерам самой вещи. Это проявляется в их взаимодействии, в результате которого в следующий момент развития в силу энтропии, неизотропности, бесконечности и взаимопроникновения материи у вещи появится бесконечное множество возможностей изменить меру q . Одна из этих возможностей необходимо реализуется и превращается в действительность. Такой процесс развития продолжается до тех пор, пока вещь не потеряет свою меру q . Каждое значение измененной меры q в дискретные моменты времени определяется из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= q + \Delta q_{n1} + \Delta q_{c1}; \\ q_2 &= q + \Delta q_{n2} + \Delta q_{c2}; \\ &\dots \\ &\dots \\ q_n &= q + \Delta q_{nn} + \Delta q_{cn}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\Delta q_{n1}, \Delta q_{n2}, \dots, \Delta q_{nn}$ - необходимые изменения меры q , вызванные взаимодействием вещи с внешним миром и внутри самой себя вследствие проявления существенного свойства, вызванного действием одного из законов природы, определяющим это свойство; $\Delta q_{c1}, \Delta q_{c2}, \dots, \Delta q_{cn}$ - несущественные, случайные изменения меры q , которые предстают перед нами в виде явления; n - индекс измененного количества меры, при котором происходит образование нового качества и вещь перестает быть сама собой.

Необходимые и случайные изменения меры не проявляются отдельно. Мы наблюдаем их только как единое целое. Случайность является дополнением и формой проявления необходимости. В этом единство необходимого и случайного. Каждая отдельная необходимость является единым целым в совокупности всех необходимостей изменения общей меры вещи, но в то же время, рассматриваемые каждая в отдельности, они противодействуют друг другу. В этом противоречие необходимого и случайного. Для каждой отдельной необходимости все остальные необходимости являются составляющими проявления результирующего случайного взаимодействия. Поэтому необходимость, с другой стороны, является случайностью, в случайность – необходимостью.

Итак, нами получена диалектическая взаимозависимость мера – остальные меры внутри самой вещи и в окружающем мире, одним полюсом которой является необходимость, другим – случайность. Характер этой взаимозависимости определяется сущностью вещи. Случайное же проявляется в силу энтропии, многообразия и бесконечности материи. Это позволяет

сделать вывод о том, что все взаимодействия в мире суть явления, протекающие необходимо, а форма их проявления случайная.

После переноса в выражении (1) меры q в левую часть, получаем, что изменение, вызванное любым взаимодействием, будет состоять из суммы необходимой и случайной слагаемых:

$$\left. \begin{aligned} \Delta q_1 &= \Delta q_{n1} + \Delta q_{c1}; \\ \Delta q_2 &= \Delta q_{n2} + \Delta q_{c2}; \\ \dots & \\ \dots & \\ \Delta q_n &= \Delta q_{nn} + \Delta q_{cn}; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\Delta q_1 = q_1 - q$, $\Delta q_2 = q_2 - q$, ..., $\Delta q_n = q_n - q$. Фактически это погрешности наблюдаемых изменений меры вещи q .

Наблюдаемое изменение представляется случайной величиной, принимающей то или иное возможное значение, заранее неизвестное и изменяющиеся от наблюдения к наблюдению. Величины каждого из слагаемых в правой части уравнений (2) в процессе наблюдений также остаются неизвестными.

Принято считать, что законы распределения с точки зрения теории вероятностей представляют собой соотношения, устанавливающие связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями [3]. Однако анализ законов распределения показывает, что в более широком смысле эти законы отражают диалектику необходимого и случайного и описывают любое реальное явление. Они являются выражением количественных соотношений между: 1) необходимостью, 2) случайностью, 3) возможностью и 4) действительностью через вероятность.

Рассмотрим наиболее часто встречающийся в природе нормальный закон распределения (рис. 1). Его основные числовые характеристики случайных величин: m – математическое ожидание и σ – стандартное отклонение. Величина m характеризуется абсциссой максимального значения $f(\Delta q)$, а величина σ – абсциссой точек перегиба кривой. Примем, что на рисунке 1 показаны результаты проявления взаимодействия, определяемого действиями какого-либо закона природы, вызывающего изменения меры вещи q . По оси абсцисс отложены все возможные значения изменений меры вещи q от Δq_1 до Δq_n , состоящие из сумм необходимых и случайных слагаемых. По оси ординат отложены плотности распределения вероятностей $f(\Delta q)$, как характеристики вероятности появления тех или иных значений изменений меры вещи q . Площадь, ограниченная кривой плотности распределения и осью абсцисс, всегда равна единице [3], как вероятность того, что одно из возможных значений изменения меры вещи обязательно реализуется и превратится в действительность.

Математическое ожидание m является количественным выражением необходимости изменения меры вещи, случайная форма проявления которой описывается кривой плотности распределения. Величина математического

ожидания не влияет на форму кривой плотности распределения, а приводит лишь к сдвигу кривой вдоль оси абсцисс при своем изменении.

Числовой характеристикой случайности является стандартное отклонение случайной величины изменения меры вещи σ , от которой зависит форма кривой распределения. С возрастанием дисперсии, как показателя проявления случайности, кривая плотности распределения становится более пологой, а с уменьшением дисперсии – растягивается по ординате.

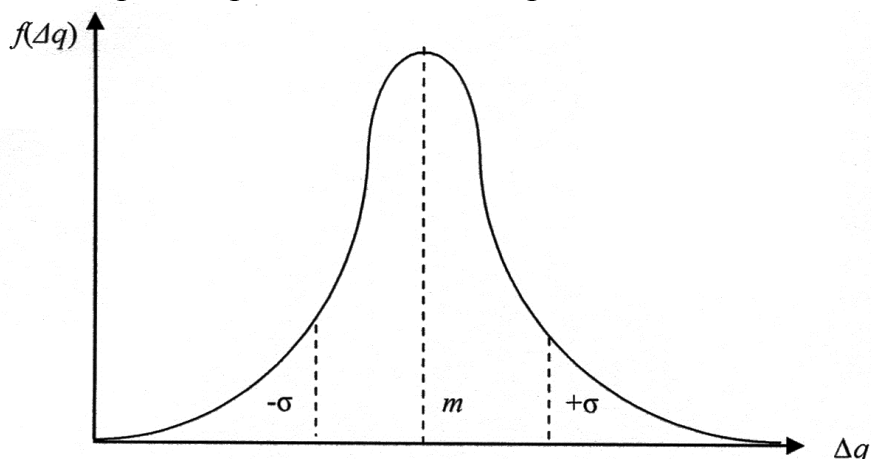


Рис. 1. Нормальный закон распределения изменений меры вещи q

Связь между числовыми характеристиками необходимости – математическим ожиданием m изменения меры вещи, случайности – стандартным отклонением σ , возможности – интервалом изменения меры вещи от Δq_1 до Δq_n и задаваемым уровнем доверия (доверительной вероятностью) P попадания величины изменения меры в этот интервал для нормального закона распределения находится из выражения:

$$\Phi_1\left(\frac{\Delta q_n - m}{\sigma}\right) - \Phi_2\left(\frac{\Delta q_1 - m}{\sigma}\right) = P(\Delta q_1 < \Delta q < \Delta q_n), \quad (3)$$

где $\Phi = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\Delta q} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – табулированные функции; σ – среднее квадратическое отклонение случайной величины изменения меры вещи; π и e – натуральные числа; t – действительное число, определяемое по табулированной функции, исходя из заданного уровня доверия P [3].

Тогда на этой основе получаем, что погрешность наблюдаемых случайных изменений меры вещи q для нормального закона распределения определяется неравенством:

$$m - t\sigma < \Delta q < m + t\sigma, \quad (4)$$

где $m - t\sigma$ и $m + t\sigma$ – минимальное и максимальное предельные или граничные значения величины изменения меры вещи.

При произвольном несимметричном законе распределения случайной величины выражение (4) принимает вид:

$$m - t_1\sigma_1 < \Delta q < m + t_2\sigma_2, \quad (5)$$

где σ_1 и σ_2 - среднеквадратические отклонение случайной величины изменения меры вещи для левой и правой частей кривой плотности распределения; t_1 и t_2 – действительные числа, определяемые, исходя из заданного уровня доверия для левой и правой частей кривой плотности распределения.

Если кривая плотности распределения симметрична, то числа $t_1 = t_2$.

Для каждого закона распределения существуют свои значения действительных чисел t .

Например, ниже в Таблице 1 приведены величины t для равномерного, показательного и нормального законов распределения в зависимости от различных значений уровня доверия P попадания случайной величины в заданный интервал.

Таблица 1. Значения величины t

ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ	УРОВЕНЬ ДОВЕРИЯ P		
	0,6827	0,9545	0,9973
1. Равномерный	2,3629	3,3030	3,4512
2. Показательный	1,1479	3,0900	5,9145
3. Нормальный	1,0000	2,0000	3,0000

Из данных таблицы видно, что при одном и том же уровне доверия значения величины t для разных законов распределения различны. И, наоборот, при одинаковых значениях величины t у разных законов распределения значения уровни доверия различны. Поэтому при сложении случайных величин с разными законами распределения для заданного уровня доверия необходимо знать эти законы распределения, чтобы выбрать такое значение приведенного t_{np} , при котором для всех законов распределения уровень доверия был не менее заданного. С увеличением t увеличивается и доверительный интервал.

Итак, случайную величину нельзя характеризовать однозначно – математическим ожиданием или стандартным отклонением. Она характеризуется доверительным интервалом для заданной вероятности.

На границе любой из частей доверительного интервала изменения меры вещи происходит образование нового качества, вещь теряет свою меру и перестает быть сама собой. На практике при оценке точности измерений наибольший интерес представляет именно максимальное предельное граничное значение погрешности. В связи с этим, а также для упрощения дальнейших выкладок ограничимся в (4) только правой частью доверительного интервала. На этой основе абсолютная предельная величина суммарной погрешности измерений, состоящая из систематической и случайной слагаемых, выражается равенством:

$$\Delta q = m + t\sigma. \quad (6)$$

Из (6) можно заключить, что абсолютная предельная величина суммарной погрешности измерений равна сумме двух слагаемых. Первое слагаемое – это математическое ожидание m погрешности измерений параметра, как характеристика систематической составляющей. А второе слагаемое – это стандартное отклонение σ , как характеристика случайной составляющей

измерений параметра, где t – число, зависящее от закона распределения случайной величины и заданного уровня доверия (доверительной вероятности) P . Математическое ожидание и стандартное отклонение в (6) связаны законом распределения случайной погрешности измерений.

Величинами уровня доверия P при установлении предельной погрешности измерений на практике задаются, исходя из требований к точности. Так, при уровне доверия $P = 0,9544$ для нормального закона распределения точность характеризуют, как «две сигмы» ($t = 2$), при $P = 0,9973$ – «три сигмы» ($t = 3$), при $P = 0,99997$ – «шесть сигм» ($t = 6$), и т.п.

Эргатические функции определяют связь между эксплуатационными и/или финансовыми показателями действия экономических законов и показателями действия законов природы. Эта связь в общем виде может быть представлена выражением:

$$P_{i,j} = \varphi(q_{i,j}), \quad (7)$$

где $P_{i,j}$ – эксплуатационный и/или финансовый показатель действия i -го экономического закона, определяемый показателем действия j -го закона природы; $\varphi(q_{i,j})$ – аналитическое описание эргатической функции; $q_{i,j}$ – i -й показатель действия j -го закона природы.

Выражение для стохастической модели погрешности реализации эргатической функции для случая, когда она характеризует зависимость одного эксплуатационного или финансового показателя от показателя действия одного закона природы получаем после дифференцирования (7) по P и q , перехода к конечным приращениям и подстановки вместо Δq выражения (6):

$$\Delta P = \varphi'(q)(m + t\sigma). \quad (8)$$

Если в левой части (8) задаться допустимым изменением эксплуатационного или финансового показателя, то второй множитель правой части будет представлять собой минимально допустимую величину изменения показателя действия закона природы, которая практически не влияет на изменение эксплуатационного или финансового показателя. Тогда (8) будет являться выражением чувствительности эргатической функции.

Особенностью эргатической функции является то, что ее чувствительность отражает влияние погрешности измерений параметра на конечный результат реализации этой функции.

Для практического использования выражения чувствительности эргатической функции необходимы оценки математического ожидания и стандартного отклонения погрешностей измеряемого параметра.

В настоящее время при измерениях параметров в эксплуатационных условиях на судне оценка систематических и случайных погрешностей измерений параметров производится отдельно. Поэтому случайная составляющая систематических погрешностей измерений остается неучтенной.

Систематические погрешности могут исключаться из результатов судовых измерений параметров различными способами [7].

Рассмотрим способы ведения поправок, как наиболее типичный при измерениях параметров на судне в эксплуатационных условиях. Поправка равна постоянной составляющей систематической погрешности по величине и обратна ей по знаку.

Поправки определяют по результатам специальных экспериментальных исследований при поверке приборов на основе анализа статистических рядов наблюдений. Если закономерность влияния какого-либо фактора на измеряемый параметр известна, то поправка рассчитывается по этой закономерности с некоторыми ограничениями. Эта закономерность принимается для определенных условий, которые обычно не отвечают условиям, при которых проводятся измерения параметра на судне. Например, поправка за наклонение видимого горизонта для измеряемой высоты светила рассчитана для среднего значения коэффициента земной рефракции. Это среднее значение коэффициента земной рефракции, в свою очередь, получено опытным путем на основе статистического анализа ряда измерений, на точность которых оказывают влияние изменения оптической плотности воздуха в нижних слоях атмосферы, разность температур воздуха и воды и т.п.

В случаях, когда закономерность влияния какого-либо фактора на измеряемый параметр неизвестна, поправку к измеряемому параметру определяют на основе статистического анализа ряда измерений проявления этого фактора на судне. Например, это поправка к показаниям гирокомпаса.

Поскольку в обоих случаях поправка определяется на основе анализа статистического ряда измерений, то математическое ожидание погрешности измерений параметра на судне с учетом (6) можно представить в виде суммы:

$$m = a \pm t_a \sigma_a, \quad (9)$$

где a – поправка, как постоянная составляющая систематической погрешности; t_a – число, зависящее от закона распределения погрешности измерений поправки и заданного уровня доверия P ; σ_a – стандартное отклонение погрешности измерений поправки, как случайная составляющая систематической погрешности.

Из анализа приведенного выше порядка оценивания характеристик систематической и случайной составляющих погрешности измерений параметров в эксплуатационных условиях на судне источником увеличения энтропии является то, что обе оценки составляющих погрешности измерений параметров:

- 1) получены, в конечном итоге, на основе анализа статистического ряда измерений;
- 2) разделены, как по времени, так и по месту;
- 3) имеют разные законы распределения.

Итак, можно заключить, что при оценке систематической и случайной составляющих погрешностей измеряемых на судне параметров в общем используются отдельно оба оценивания по GUM - типа А и типа В.

Поскольку постоянная составляющая математического ожидания погрешности измерений параметра компенсируется поправкой, то (8) с учетом (9) на основе и в терминах [1] преобразуется к виду:

$$\Delta P = \varphi'(q) \sqrt{\sum_{i=1}^n (a + t_a \sigma_a)_i^2 + t^2 \sigma^2}, \quad (10)$$

где a_i – i -я поправка; t_{ai} – коэффициент охвата случайной величины i -ой поправки, зависящий от закона распределения поправки и заданного уровня доверия; σ_{ai} – стандартная неопределенность случайной величины i -ой поправки; $i = 1, 2, \dots, n$ – количество поправок; t – коэффициент охвата случайной величины погрешности измеряемого параметра для нормального закона распределения и заданного уровня доверия; σ – стандартная неопределенность случайной величины измеряемого параметра.

Итак, нами получено выражение чувствительности эргатической функции для случая зависимости эксплуатационного или финансового показателя от одного измеряемого параметра с несколькими поправками. Это выражение характеризует расширенную неопределенность измерений, при которой энтропия от влияния указанных выше источников погрешностей не влияет на величину заданного эксплуатационного и/или финансового показателя действия экономического закона.

На основе уравнения (10) можно решать различные задачи по оценке точности измерений разных параметров на судне, а также по определению требований к точности их измерений. В данной работе ограничимся рассмотрением двух задач, связанных с измерением навигационных параметров при определении координат места судна.

Первая задача – это определение достаточности точности измерений навигационных параметров для обеспечения решения на их основе задач по определению координат места судна при известных оценках стандартных неопределенностей и законах их распределения. Так, значения σ для нормального закона распределения можно получить из различных справочников и руководств. Это, например, оценки стандартных неопределенностей измерений высоты светила, пеленга, расстояния и т.п. Значения σ_a также можно получить из справочников и руководств. Это такие, как оценки стандартных неопределенностей измерений поправок пеленга, поправок индекса секстана и т.п. Поправки, как правило, вводятся на весь диапазон измерений, что соответствует равномерному закону распределения. Тогда, по известным значениям σ_a , σ и t из уравнения (10) можно определить величину заданного эксплуатационного и/или финансового показателя действия экономического закона, которая может быть обеспечена с помощью измерений судовых параметров имеющимися измерительными приборами.

Вторая задача – определение требований к точности измерения судовых параметров для обеспечения заданной величины эксплуатационного и/или финансового показателя действия экономического закона. В этом случае можно воспользоваться приведенной в работе [2] рекомендацией по определению

зависимости оценки стандартной неопределенности измерений от цены деления шкалы измерительного прибора:

$$\sigma = 1,208c \cdot t^l, \quad (11)$$

где c - цена деления шкалы измерительного прибора.

После подстановки (11) в (10) и преобразований получаем:

$$\sum c_i^2 + c^2 = \Delta P^2 / [1,208\varphi'(q)]^2, \quad (12)$$

где c_i^2 и c - цены делений шкал измерительных приборов, с помощью которых определялись поправки к погрешностям измерений и измерялся сам параметр; $i = 1, 2, \dots, n$ - количество поправок.

По формуле (12) при наличии данных о ценах делений шкал измерительных приборов можно определить их приемлемость для решения практических задач на судне. Например, это можно сделать с помощью метода итераций.

Таким образом, полученные нами выражения (10) и (12) позволяют определить чувствительность судовой эргатической функции через расширенную неопределенность измерений, которая учитывает совместное влияние систематических и случайных погрешностей измерений, а также уровень доверия к ним.

В качестве примера практического применения выражений (10) и (12) выразим в терминах расширенной неопределенности измерений чувствительность судовой эргатической функции определение координат места судна – широты и долготы по измеренному пеленгу, поскольку к точности определения места судна установлены международные требования [10].

В работе [9] приведены выражения для чувствительности судовой эргатической функции определение широты и долготы места судна по измеренному пеленгу.

Для карт с прямоугольной системой координат с одинаковыми масштабами по оси абсцисс и ординат, например, Universal Transverse Mercator System (UTM), которая широко используется в системах динамического позиционирования, чувствительности этих функций описываются выражениями:

$$\Delta\varphi_\alpha = 0,56 \cdot \sec^2 \alpha \cdot (\lambda - \lambda_0) \cdot \Delta\alpha, \quad (13)$$

$$\Delta\lambda_\alpha = 0,56 \cdot \operatorname{cosec}^2 \alpha \cdot (\varphi_0 - \varphi) \cdot \Delta\alpha, \quad (14)$$

где $\Delta\varphi_\alpha$ и $\Delta\lambda_\alpha$ - погрешности в определяемой широте и долготе места судна, м; α – угол между пеленгом на объект и осью абсцисс, град.; $\Delta\alpha$ – погрешность в измеренном пеленге, град.; φ и λ – широта и долгота места судна, м; φ_0 и λ_0 – широта и долгота наблюдаемого объекта, на который измерен пеленг, м.

При использовании морских путевых карт меркаторской проекции выражения (13) и (14) преобразуются к виду:

$$\Delta\varphi_\alpha = 0,017 \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{sec}\alpha \cdot \operatorname{sec}\varphi_{cp} \cdot d \cdot \Delta\alpha, \quad (15)$$

$$\Delta\lambda_\alpha = -0,017 \cdot \operatorname{ctg}\alpha \cdot \operatorname{cosec}\alpha \cdot d \cdot \Delta\alpha, \quad (16)$$

где $\varphi_{cp} = (\varphi - \varphi_0)/2$ – средняя широта, как полусумма широт места судна и наблюдаемого объекта, град.; d – расстояние до пеленгуемого объекта, мили.

На основе (10) после замены в (15) и (16) погрешностей в измеренном пеленге на стандартные неопределенность определения поправок и стандартную неопределенность измерения параметра получим выражения для определения чувствительности судовой эргатической функции определение координат места судна – широты и долготы по измеренному пеленгу в зависимости от стандартных неопределенностей измерений и их законов распределения:

$$\Delta\varphi_\alpha = 0,017 \cdot \operatorname{tga} \cdot \operatorname{sec} a \cdot \operatorname{sec} \varphi_{cp} \cdot d \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2 \sigma_i^2 + t^2 \sigma^2}; \quad (17)$$

$$\Delta\lambda_\alpha = -0,017 \cdot \operatorname{ctga} \cdot \operatorname{cosec} a \cdot d \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2 \sigma_i^2 + t^2 \sigma^2}, \quad (18)$$

где $\Delta\varphi_\alpha$, $\Delta\lambda_\alpha$ и d в милях; α в град.; t_i и t – безразмерные величины; σ_i и σ в град.

В качестве примера решим обе задачи применительно к СЭФ определение места судна с помощью гирокомпасных пеленгов на судне на основе расширенной неопределенности измерений.

Пример 1. Рассчитаем приемлемость современных гирокомпасов для определения широты и долготы места судна при плавании в прибрежных водах и на подходах к берегу. Точность определения координат места судна в этих условиях согласно международным требованиям характеризуется погрешностью в пределах от 10 до 100 м [10].

Примем за исходные следующие данные: 1) судно осуществляет плавание в прибрежных водах; маяк находится на расстоянии $d = 5$ миль и $\varphi_{cp} \approx 3'$; 2) пеленг на маяк 35° ($\alpha = 90^\circ - 35^\circ = 55^\circ$); 3) в эксплуатационных условиях на судне измеренный пеленг исправляется только одной поправкой; 4) стандартная неопределенность измерения пеленга $\sigma = 0,5^\circ$, а определения поправки $\sigma_n = 0,6^\circ$ [7]; 5) уровень доверия $P = 0,95$; 6) закон распределения погрешности измерений пеленга нормальный и $t = 2$, а поправки к пеленгу – равномерный и $t_n = 3,3$ (см. таблицу выше).

Тогда с учетом значений $\operatorname{tg}55^\circ = 1,43$; $\operatorname{sec}55^\circ = 1,74$; $\operatorname{ctg}55^\circ = 0,70$; $\operatorname{cosec} 55^\circ = 1,22$ из (17) и (18) получаем, что в данных условиях наблюдений при определении координат места судна по гирокомпасному пеленгу широта места может быть определена с погрешностью не менее $\Delta\varphi_\alpha = 0,6'$ или 1057 м, а долгота - $\Delta\lambda_\alpha = 0,2'$ или 363 м.

Данные расчетов показывают, что современный гирокомпас при плавании в прибрежных водах и на подходах к берегу не во всех случаях может

обеспечить требуемую международными документами точность определения широты и долготы места судна.

Пример 2. Теперь решим другую задачу – определим, какова должна быть цена деления шкалы репитера гирокомпаса для обеспечения заданной точности определения широты и долготы места судна по пеленгу.

С помощью пеленгатора по шкале репитера гирокомпаса измеряется как пеленг, так и определяется поправка к пеленгу. В этом случае цена деления шкалы репитера одна и та же. После перевода миль в метры, а градусов в радианы, с учетом формулы (11), а также того, что в прибрежном плавании φ_{cp} не превышает $10'$ и $\sec\varphi_{cp}$ при этом будет равен единице, из (17) и (18) получим:

$$\Delta\varphi_\alpha = 76,92 \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{sec}\alpha \cdot d \cdot c, \quad (19)$$

$$\Delta\lambda_\alpha = -76,92 \cdot \operatorname{ctg}\alpha \cdot \operatorname{cosec}\alpha \cdot d \cdot c, \quad (20)$$

где $\Delta\varphi_\alpha$ и $\Delta\lambda_\alpha$ - в метрах; d - расстояние до маяка в милях; α - угол между пеленгом на маяк и осью абсцисс; c - цена деления шкалы репитера гирокомпаса в град.

Из формул (19) и (20) определяем:

$$c_\varphi = 0,013 \cdot (\operatorname{tga} \cdot \operatorname{seca} \cdot d)^{-1} \cdot \Delta\varphi_\alpha, \quad (21)$$

$$c_\lambda = -0,013 \cdot (\operatorname{ctga} \cdot \operatorname{coseca} \cdot d)^{-1} \cdot \Delta\lambda_\alpha, \quad (22)$$

где c_φ и c_λ – цены делений шкал репитера гирокомпаса, при которых обеспечивается заданная точность определения широты и долготы места судна по измеренным пеленгам, град.

Принимая в этой задаче за исходные данные первой задачи, а также $\Delta\varphi_\alpha = \Delta\lambda_\alpha = 100$ м, из (21) и (22) получаем требуемые величины цен шкал репитера гирокомпаса для заданных условий: $c_\varphi = 0,11^\circ$ и $c_\lambda = 0,31^\circ$.

Из этих расчетов можно сделать вывод о том, что с помощью современного гирокомпаса определить широту и долготу места судна с точностью, требуемой международными документами при плавании в прибрежных водах и на подходах к берегу, можно, если обеспечить измерение пеленга и определение поправки к нему по шкале репитера гирокомпаса, по крайней мере, с точностью до $0,1^\circ$.

Для формального представления результатов измерения, которые будут соответствовать требованиям GUM, необходимо предоставить следующее:

- 1) подробное определение измеряемой величины;
- 2) порядок определения уровня доверия;
- 3) значение коэффициента охвата;
- 4) информацию об источнике данных об оценке стандартных неопределенностей;
- 5) данные о поправках и методах учета их влияния;

б) результат определения расширенной неопределенности по формуле (10) с указанием единиц измерения.

Часть из приведенных выше данных можно внести в руководства, разрабатываемые компанией менеджером. Например, в навигационном руководстве для СЭФ определение места судна могут содержаться общие данные по расширенной неопределенности, как одно из положений навигационной политики компании. Это: 1) уровень доверия, принятый в компании, 2) порядок определения коэффициентов охвата; 3) данные о поправках и порядке их определения и учета; 4) данные об оценке стандартных неопределенностей измерений параметров.

Другая часть требуемых GUM данных по расширенной неопределенности измерений в настоящее время уже фиксируется на судне. Так, при определении по измерениям навигационных параметров места, которое принимается к счислению, в судовой журнал вносится запись о: 1) названии параметров, их измеренной величине и поправках к ним с указанием единиц измерения, 2) обсервованных широте и долготе. Для полного соответствия требованиям GUM недостает только данных о расширенной неопределенности, рассчитываемой по формуле (10).

При определении места судна в эксплуатационных условиях рассчитывать каждый раз величину расширенной неопределенности по формуле (10) можно, если на основе этой формулы разработать компьютерные программы для различных методов определения места в разных условиях.

Выводы и перспектива работы по данному направлению

Таким образом, чувствительность судовой эргатической функции выражена через расширенную неопределенность измерений. На этой основе разработана методика оценки точности измерений параметров на судне. Это, в свою очередь, дает возможность решить ряд теоретических и практических задач, связанных с совершенствованием эксплуатации морских судов, самолетов и космических кораблей и повышением точности приборов и инструментов для измерения различных параметров. К первоочередным задачам, связанным, например, с судовой эргатической функцией определение координат места судна, можно отнести:

1) анализ существующих методов определения широты и долготы места морских судов, самолетов и космических кораблей с точки зрения соответствия их заданным требованиям к точности определения координат места;

2) определение точности, которую могут обеспечить имеющиеся инструменты и приборы измерений навигационных параметров;

3) анализ систематических погрешностей измерений для выявления наиболее значимых из них;

4) определение требований к точности вновь создаваемых инструментов и приборов измерения навигационных параметров;

5) оценка условий, при которых обеспечивается требуемая точность определения широты и долготы места с помощью современных инструментов и приборов измерений навигационных параметров.

Решение аналогичных задач требуется и для других судовых эргатических функций таких, как определение количества груза, учет изгиба корпуса, определение судового фактора, сокращение потерь груза от испарения, учет температурного расширения груза, определение гидравлических характеристик трубопроводов и т.п.

ЛИТЕРАТУРА

1. ISO/IEC Guide 98-03:2008. Uncertainty of Measurement – Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty of Measurement (GUM:1997). – International Standards Organisation. – Geneve, 2008. – 100 p.
2. Бобыр В.А. Судовые эргатические функции: монография / Бобыр В.А. – К.: Кафедра, 2014. – 362 с.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Вентцель Е.С. – М.: Наука – Главная редакция физико-математической литературы, 1969. – 564 с.
4. Борисов Ю.И. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник / Борисов Ю.И., Сигов А.С., Нефедов В.И. и др. – М.: ФОРУМ, 2009. – 336 с.
5. Сулаберидзе В.Ш. Проблема погрешности и неопределенности измерения / Сулаберидзе В.Ш. – http://n2.insu.ru/article/arts/article_3.pdf.
6. Бобыр В.А. Повышение точности измерений навигационных параметров. Судовождение: сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 20. – Одесса: ИздатИнформ, 2011. – С.16-22.
7. Кондрашихин В.Т. Теория ошибок и ее применение к задачам судовождения / Кондрашихин В.Т. – М.: Изд-во «Транспорт», 1969. – 256 с.
8. Пилипенко Н.В. Диалектика необходимости и случайности / Пилипенко Н.В. – М.: Мысль, 1981. – 263 с.
9. Бобыр В.А., Райнов А.О. Чувствительность судовой эргатической функции определение места. Судовождение: сб. научн. трудов / НУ ОМА, Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2017. - С. 15-25.
10. Руководство по навигационному оборудованию. МАМС. – Международная ассоциация морских средств навигационного оборудования и маячных служб (МАМС). - Сен-Жермен: 2006. – 190 с.