

УДК 004.048

И. В. Бусько

Санкт-Петербургский государственный университет

Анализ влияния параметров системы и шума на восстановление спектральной плотности морского волнения

Приводится обзор решения задачи идентификации параметров морского волнения для бортовой интеллектуальной системы судна. Показана актуальность задачи, кратко описана история решения задачи, в которой приведены различные подходы к ее решению. Дана постановка задачи и возникающие при решении проблемы. Дано математическое решение задачи в линейном случае взаимодействия судна и морского волнения. Представлен анализ влияния параметров модели и шума на восстановление спектральной плотности морского волнения в линейном случае, кратко описан сам алгоритм восстановления. Алгоритм восстановления параметров морского волнения в линейном случае основан на теореме Хинчина, анализе поведения судна под воздействием волн и использовании такой дополнительной информации, как «климатический спектр». Анализ проделан для разных видов судов и бортовой и килевой видов качки как наиболее информативных сигналов. Приведены результаты возможного восстановления спектральной плотности по предложенному алгоритму, которые основаны на анализе влияния параметров модели и шума.

Спектральная плотность морского волнения, климатический спектр, идентификация параметров, теорема Хинчина

Одной из актуальных задач по обеспечению безопасности мореплавания является создание бортовой системы, предоставляющей текущую информацию о состоянии волнения и прогноз о возможном изменении погоды в районе плавания. Несмотря на высокое развитие службы гидрометеорологических прогнозов и покрытие районов Мирового океана, предоставляемая информация носит обобщенный характер, часто не учитывает особенностей конкретных районов плавания и, что самое главное, не позволяет судить как судно выдержит данные внешние воздействия.

Морское волнение бывает нескольких видов. Для решения задачи обеспечения безопасного мореплавания необходимо идентифицировать параметры волнения, вызванные теми или иными погодными условиями. Параметры ветровых волн зависят от скорости и продолжительности действия ветра, параметров разгона и других факторов волнообразования. Основными параметрами каждой системы волн являются: средняя высота и период, а также генеральное направление их распространения. Все эти параметры отражаются в понятии спектральной плотности. В настоящее время известны несколько подходов, позволяющих идентифицировать параметры морского волнения. Во-первых, возможны прямые подходы с использованием волнового буя; космические ра-

диолокационные системы и некоторые др. Однако их использование в эксплуатационных условиях либо затруднительно, либо не обеспечивает заданной точности. Во-вторых, возможно создание бортовой системы идентификации параметров волнения, основанной на анализе поведения самого судна под действием самих волн. Представленное в статье решение относится к последнему подходу.

Прогноз развития волновой погоды возможен на основании анализа изменения спектральной плотности морского волнения, оценка которого делается на основе косвенных динамических измерений процесса колебательного движения судна на волнении. Воздействие ветрового волнения на судно выводит его из состояния равновесия и заставляет совершать колебательные движения – возникает так называемая качка (бортовая, килевая, вертикальная). Эти колебания можно зарегистрировать соответствующими приборами и записать их в виде временных рядов. При длине временного интервала регистрации до 15...20 мин записанные процессы можно рассматривать как стационарный эргодический процесс.

Впервые задача идентификации параметров морского волнения на основании поведения объекта была поставлена Ю. И. Нечаевым [1], [2]. За последние 10 лет эта задача стала достаточно по-

пулярна, и появился ряд разработок, в которых продемонстрированы различные методики оценки волнового спектра. Среди этих исследований можно отметить работы Nielsen, Simons, Pascoal и др. [3]–[8]. Проводились исследования о возможности построения таких методов, их применения и сравнение с другими методами. Для подтверждения теорий проводились натурные испытания [8]. В ряде работ исследовалось влияние различных физических параметров на возможность применения методов и получения оценок волнового спектра [3], [6]. В качестве одного из наиболее популярных подходов оценивания в условиях моря рассматривался байесовский подход [3], [5], хотя есть и попытки использования фильтрации Калмана для решения поставленной задачи [7]. На данный момент наиболее разработанным решением можно считать только оценку интегральных показателей – параметров спектральной плотности ветрового волнения, представленной какой-либо известной формой аппроксимации, например Барлинга [6].

Тем не менее, несмотря на большое число исследований, до сих пор нельзя говорить о приемлемом для практики эффективном решении поставленной проблемы. Поэтому в данной статье предлагается усовершенствование имеющихся методов идентификации параметров морского волнения при использовании корабля в качестве буя.

Постановка задачи. Задача идентификации параметров морского волнения в процессе плавания судна является задачей типа «черный ящик». Динамическая система состоит из «входа» (морское волнение, воздействующее на судно), динамического объекта (само судно) и «выхода» (регистрируемый датчиками колебательный процесс судна). Регистрируемый сигнал содержит шумовую составляющую. Параметры динамического объекта точно неизвестны, но на них накладываются определенные ограничения. Первоначально автор предполагал искать волновое воздействие методом адаптивной идентификации, описанным в [9].

Математически волновое воздействие на судно выражается в виде $\exists f: f(\zeta) \rightarrow Y(t)$ – существует оператор f , который переводит внешнее возмущение ζ в вектор параметров судна $Y(t)$. Данный оператор может быть как линейным, так и нелинейным. Волновое возмущение также может быть как линейным, так и нелинейным. Последнее возникает преимущественно в результате воздействия линейных или нелинейных волн. В случае линейных или квазилинейных волн закон распределения случайного процесса возмущения можно считать гауссовским. В связи с этим возможны 3 случая:

- 1) ζ – линейное возмущение, f – линейный оператор, тогда Y – линейная функция;
- 2) ζ – линейное возмущение, f – нелинейный оператор, тогда Y – нелинейная функция;
- 3) ζ – нелинейное возмущение, f – любой, тогда Y – нелинейная функция.

На данный момент разработаны методы решения и сделан анализ только для полностью линейного случая. Уравнение колебательного процесса в линейном случае имеет вид

$$y''(t) + ay'(t) + by(t) = \zeta(t), \quad (1)$$

где a – коэффициент демпфирования; b – коэффициент, характеризующий частоту собственных колебаний судна; $\zeta(t)$ – описывает возмущение, вызванное морским волнением.

В нелинейном виде уравнение можно в первом приближении представить следующим образом:

$$y''(t) + \varphi(y'(t)) + l(y(t)) = \kappa_y n_y^2 \alpha(t),$$

где $\varphi(y'(t))$ – момент сил сопротивления; $l(y(t))$ – восстанавливающий момент; $\alpha(t)$ – центрированный стационарный эргодический гауссовский случайный процесс, описывающий изменение угла волнового склона во времени.

Линейность позволяет воспользоваться для восстановления спектральной плотности морского волнения известным в этом случае соотношением

$$S_y(\omega) = |F_{xy}(\omega)|^2 S_x(\omega), \quad (2)$$

где $S_x(\omega)$ – спектральная плотность входного процесса, связанная с процессом возмущения – морским волнением; $S_y(\omega)$ – спектральная плотность выходного процесса – регистрируемый приборами процесс колебаний судна, вызванный действием волн; $F_{xy}(\omega)$ – передаточная функция линейной системы.

Подробно постановка задачи и проблемы, возникающие при ее решении, описаны в статьях [9]–[12]. Кратко стоит отметить, что основные трудности при решении вызывают следующие моменты:

1. Зашумленность регистрируемого сигнала или сложность выделить полезный сигнал на фоне процессов, обусловленных другими физическими причинами.
2. Определение параметров системы: для уравнения (1) – это параметры a и b , которые

входят и в состав передаточной функции (см., например, [6], [13]).

3. Использование для облегчения восстановления параметров ветрового волнения известных аппроксимаций спектральной плотности (см., например, [6]).

4. Нарушение предположения о линейности системы при регистрации нелинейных колебаний. Такая ситуация актуальна при интенсивных внешних воздействиях.

Выходом из этих проблем является привлечение как можно большего количества различной дополнительной информации и всевозможный анализ влияния шумовой составляющей, параметров системы и т. п. на результат восстановления спектральной плотности. Одним из решений проблемы нелинейности является выбор оптимальных условий регистрации процесса колебаний.

Решение. Было предложено 2 алгоритма идентификации параметров морского волнения в линейном случае. Первый был основан на теореме Хинчина (2), связывающей спектральные плотности выходного и входного процессов. Второй – на итеративном алгоритме адаптивной идентификации и использовании концепции «климатического спектра» [12]. «Климатический спектр» – это набор спектральных плотностей, характеризующих состояние волновой погоды для конкретного района плавания и сезона года. В [14] приведен подход к моделированию сценария погоды на море, который отображает концепцию «климатического спектра».

Введение в рассмотрение задачи концепции «климатического спектра» позволяет видоизменить алгоритм решения задачи идентификации морского волнения в линейном случае. Для построения алгоритма с учетом этой концепции был проведен следующий анализ влияния параметров системы (1) и шумовой составляющей на результат восстановления спектральной плотности волнения:

1. Сгенерированы спектры морского волнения – однопиковый и двухпиковый.

2. Взято судно с конкретными значениями параметров уравнения (1) ($a = 0.03$, $b = 2.8$), и для обоих видов спектров по уравнению (1) смоделирована информация от датчика бортовой качки.

3. Проведен анализ влияния параметров судна. Для этого шумовая составляющая была взята равной нулю. Поскольку параметры судна из

уравнения (1) входят в состав передаточной функции (3), в методе восстановления спектральной плотности из информации, смоделированной для датчика бортовой качки, они рассматривались как параметры.

Вид передаточной функции:

$$|F_{xy}(i\omega)|^2 = \frac{1}{(\omega^2 - b)^2 + a^2\omega^2}. \quad (3)$$

Для расчета корреляционной функции процесса использовалась формула

$$R(p) = \frac{1}{N-p} \sum_{j=0}^{N-1-p} (y(t_j) - \bar{y})(y(t_{j+p}) - \bar{y}), \quad (4)$$

где N – длина реализации; p – сдвиг; \bar{y} – среднее значение $y(t)$ по всей длине реализации.

Для расчета спектральной плотности бортовой качки судна использовалась аналогичная формула:

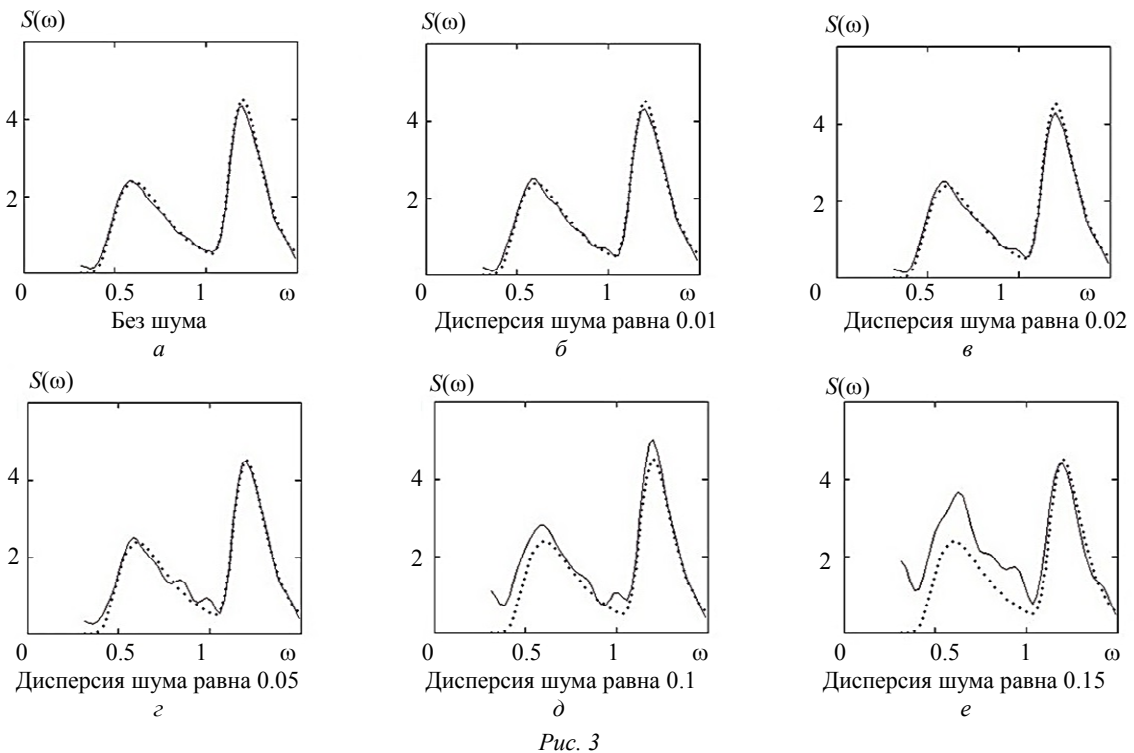
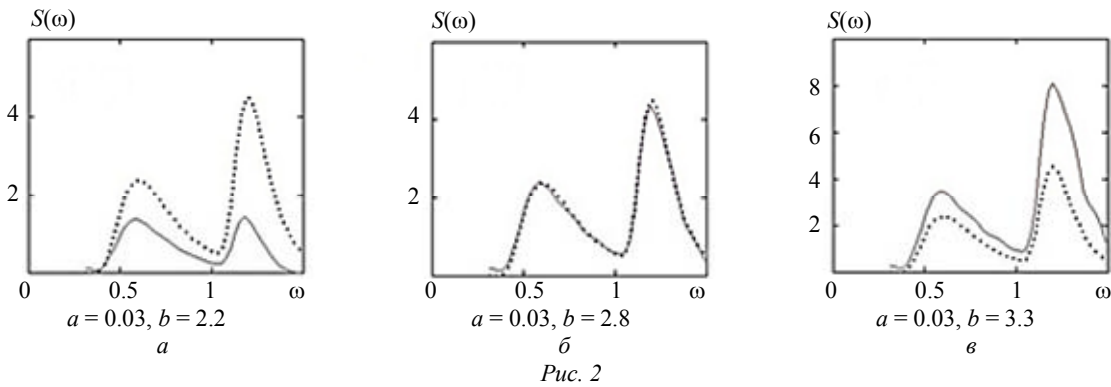
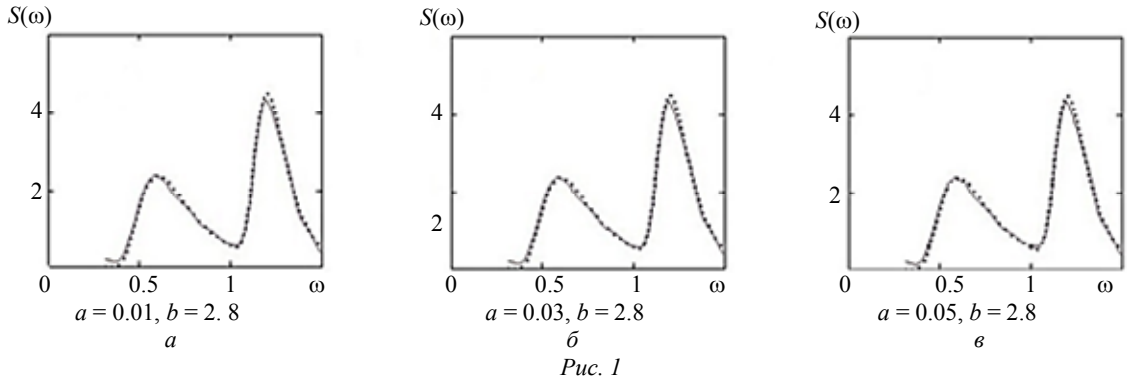
$$S_y(\omega) = \frac{2}{\pi} dt \left[\sum_{k=0}^{K-1} R(k) \cos(\omega k dt) - \frac{R(0) + R(K) \cos(\omega K dt)}{2} \right], \quad (5)$$

где dt – интервал времени, через который поступает информация с датчика качки; K – количество точек от 0 по оси $k \cdot dt$ корреляционной функции, в течение которых происходит затухание.

После подстановки (3)–(5) в (2) методом варьирования значений a и b было рассмотрено влияние параметров на результат восстановления.

4. Затем к смоделированной информации датчика был добавлен шум нескольких видов, исходя из размера дисперсии: 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.15. Возможные размеры для дисперсий шума были взяты из [15]. Параметры для уравнения (3) были взяты равными значениям параметров судна. Таким образом, было рассмотрено влияние шумовой составляющей на результат восстановления.

На рис. 1, a - v показано влияние параметра демпфирования, а на рис. 2, a - v – влияние коэффициента, характеризующего частоту собственных колебаний судна, на результат восстановления спектральной плотности. Дисперсия шумовой составляющей в этом случае была взята равной нулю.



На рис. 3 показано влияние шумовой составляющей на результат восстановления спектральной плотности. В этом случае параметры модели были взяты точно: a – результат восстановления спектральной плотности без шума; b – результат восстановления спектральной плотности при дисперсии шума, равной 0.01; v – результат восстан-

ления спектральной плотности при дисперсии шума, равной 0.02; z – результат восстановления спектральной плотности при дисперсии шума, равной 0.05; d – результат восстановления спектральной плотности при дисперсии шума, равной 0.1; e – результат восстановления спектральной плотности при дисперсии шума, равной 0.15.

5. После рассмотрения конкретного судна анализировалось, как восстановить спектральную плотность морского волнения для судов с другими значениями параметров. При этом в качестве волнения использовались те же сгенерированные процессы, соответствующие ранее упомянутым спектральным плотностям. На рис. 4 показано, как может быть восстановлено волнение, но на судах с другой частотой собственных колебаний: a – собственная частота судна равна 0.4 с^{-1} , $b = 0.16$; b – собственная частота судна равна 0.8 с^{-1} , $b = 0.64$; c – собственная частота судна равна 1 с^{-1} , $b = 1$.

6. По итогам п. 5 был сделан вывод о влиянии расположения собственной частоты судна в интервале частот спектральной плотности на результат восстановления. Так, например, качество восстановления будет сильно различаться в случае расположения собственной частоты судна в окрестности пика и за пределами этой окрестности, на середине склона пика и у самого подножья и т. д. Для решения этой проблемы было рассмотрено восстановление спектральной плотности по нескольким видам колебательного про-

цесса: пара бортовой и килевой качки. Собственные частоты судна бортовой и килевой качки отличаются. Например, у грузовых судов для бортовой качки она находится приблизительно в интервале от 0.5 до 0.9 с^{-1} , а для килевой – от 1.05 до 1.57 с^{-1} . Следовательно, качество результата восстановления будет различным. Например, на рис. 5, a и b показана разница в восстановлении спектральной плотности на основании информации от датчика бортовой и килевой качки одного и того же судна: грузовое судно с собственной частотой бортовой качки 0.7 с^{-1} и килевой качки – 1.1 с^{-1} .

7. «Климатический спектр» для конкретного района плавания определяется на основе обработки обширной информации с привлечением данных волномерных буев, реанализа и результатов расчетов волновой погоды. Судно реагирует на воздействие морских волн немного по-другому, а это означает, что вид спектральной плотности будет различным. Различаться будут высота пиков и их форма. Тем не менее, частоты, на которых находятся пики (частота волны, на которой переносится больше всего энергии), будут оставаться теми же. Будут различаться и

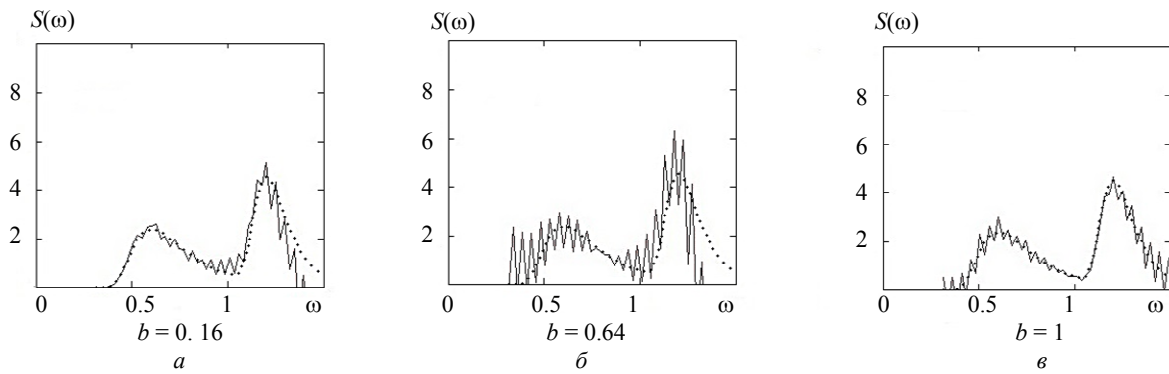


Рис. 4

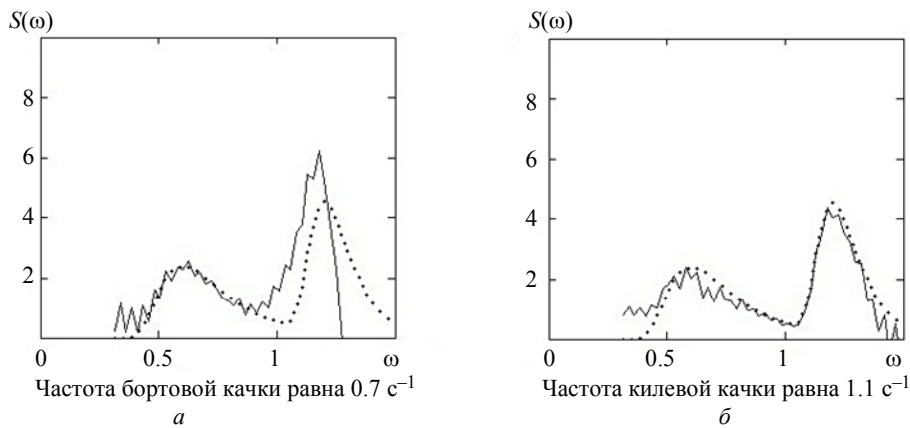


Рис. 5

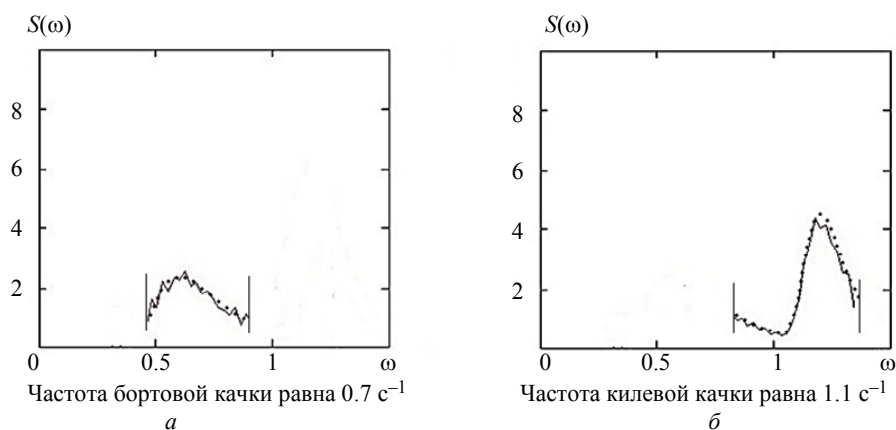


Рис. 6

формы восстановленных спектральных плотностей между различными видами колебательного процесса судна, что было отражено на рис. 6. Таким образом, надо определить вид спектральной плотности из «климатического спектра» по восстановленным частям плотностей бортовой и килевой качки.

Для этого надо:

1. Выделить на графиках восстановления спектральной плотности бортовой и килевой качки хорошо восстановленные участки. Для случая на рис. 5 это будет выглядеть как показано на рис. 6: *a* – хорошо восстановленные участки при собственной частоте бортовой качки судна 0.7 c^{-1} ; *б* – хорошо восстановленные участки при собственной частоте килевой качки судна 1.1 c^{-1} .

2. «Простым наложением» рис. 6 на «климатический спектр» выявить ту спектральную плотность, которая более всего подходит к восстановленным участкам. В результате может быть 3 варианта: спектральная плотность найдена и она единственна; восстановленные участки не похожи ни на одну из возможных спектральных плотностей; спектральная плотность найдена, но она не единственная. В этом случае возможно

введение меры близости на основании дополнительных данных.

О влиянии параметров модели на восстановление можно сказать, что неточность подбора значений приводит к пропорциональному увеличению или уменьшению пиков спектра и не влияет на смещение пиков по частоте (см. рис. 1 и 2). Значение собственной частоты судна в интервале частот по отношению к расположению пиков спектра сильно влияет на длину хорошо восстановленных участков графика (см. рис. 4). Для решения этой проблемы можно проводить одновременное восстановление спектральной плотности по нескольким видам качки, например бортовой и килевой (см. рис. 5, 6). О влиянии шума можно сказать, что результат восстановления становится неудовлетворительным только при довольно больших значениях дисперсии шума (см. рис. 3). Проведенная работа показала, что в линейном случае взаимодействия морского волнения и судна при использовании такой дополнительной информации, как «климатический спектр», можно добиться хороших результатов восстановления спектральной плотности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нечаев Ю. И. Оперативный контроль динамики судна на волнении с помощью экспертной системы // Сб. докл. на науч.-техн. конф. по экспериментальной гидромеханике. Калининград, 1990. С. 28–32.
2. Нечаев Ю. И. Исследование динамики ветроволновых полей с помощью судовых интеллектуальных систем реального времени // Навигация и гидрография. 1996. № 3. С. 45–50.
3. Iseki T., Terada D. Bayesian Estimation of Directional Wave Spectra for Ship Guidance System // Intern. J. of Offshore and Polar Engineering. 2002. № 12. P. 25–30.

4. Nielsen U. D. Estimations of on-site directional wave spectra from measured ship responses // Marine Structure. 2006. Vol. 19, № 1. P. 33–69.
5. Nielsen U. D. Introducing two hyperparameters in Bayesian estimation of wave spectra // Probabilistic Engineering Mechanics. 2008. Vol. 23, № 1. P. 84–94.
6. Nielsen U. D., Stredulinsky D. C. Onboard Sea State Estimation Based on Measured Ship Motions // Proc. of the 12th Intern. Ship Stability Workshop, USA, June 2011. P. 61–67.

7. Pascoal R., C. Guedes Soares. Kalman filtering of vessel motion for ocean wave directional spectrum estimation // *Ocean Engineering*. 2009. Vol. 36, № 6–7. P. 477–488.

8. Estimating wave spectra from the motions of moored vessels: Experimental Validation / A. N. Simons, E. A. Tannuri, J. V. Sparano, V. L. F. Matos // *Applied Ocean Research*. 2010. Vol. 32, № 2. P. 191–208.

9. Дегтярев А. Б., Бусько И. В. Проблемы идентификации параметров волнения в бортовых интеллектуальных системах // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2012. № 8. С. 3–10.

10. Degtyarev A., Busko I., Nechaev Y. System identification for wave measurements using ship as a buoy // *Proc. of the 11th Intern. Conf. on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*, Greece, Athens, 2012. P. 725–734.

11. Бусько И. В., Дегтярев А. Б. Идентификация параметров морского волнения в бортовой ИС параллельной архитектуры // VI Междунар. конф. «Параллельные вычисления и задачи управления» PACO'2012. М.: ИПУ РАН, 2012. Т. 3. С. 183–189.

12. Дегтярев А. Б., Бусько И. В. Идентификация параметров морского волнения в бортовой ИС. Линейный случай // *Процессы управления и устойчивость: тр. 44-й Междунар. науч. конф. аспирантов и студентов* / под ред. Н. В. Смирнова, Т. Е. Смирновой. СПб.: Издат. Дом С.-Петерб. гос. ун-та, 2013. С. 413–419.

13. Lin. J., Ji-de L. Blind estimation of wave state from ship motions in navigation // *Proc. of the 11th Intern. Conf. on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*, Greece, Athens, 2012. P. 719–723.

14. Degtyarev A. New approach to wave weather scenarios modeling // *Contemporary Ideas on Ship Stability and Capsizing in Waves, Fluid Mechanics and Its Applications*. Springer. 2011. Vol. 97. P. 599–617.

15. Трунин В. К. Экспериментальная оценка гидродинамических характеристик качки при сильном демпфировании // *Сб. ВНТО им. акад. А. Н. Крылова*. Л.: Судостроение, 1986. Вып. 432. С. 4–14.

I. V. Busko

Saint Petersburg University

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE SYSTEM PARAMETERS AND NOISE ON THE RECOVERY THE SPECTRAL DENSITY OF SEA WAVES

Has an overview character of the solution of the problem of sea wave parameters identification for the onboard intellectual system. The urgency of the problem is shown, the history of the solution is briefly described, in which various approaches are presented. The formulation of the problem and the problems that arise during the solving are given. A mathematical solution of the problem is given in the linear case of vessel and sea waves interaction. The article presents an analysis of model parameters and noise impact on sea waves spectral density recovery in the linear case. The sea wave parameters recovery algorithm in the linear case is based on the Khinchin theorem, the analysis of ship behavior under the influence of waves and the use of such additional information as the «climatic spectrum». The analysis is carried out for different types of ships and the two main types of pitching. The possibilities of spectral density recovery with the proposed algorithm are presented based on the analysis of model parameters and noise impact.

Sea wave spectral density, climatic spectrum, parameters identification, Khinchin theorem