

О ВЛИЯНИИ БОРТОВОЙ КАЧКИ НА ЭФФЕКТИВНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ РАССЕЯНИЯ КОРАБЛЯ

О. И. Соломенцев, д-р техн. наук, проф. ;
Нгуен Доан Кыонг, канд. техн. наук, стажер-исследователь
Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Приведены приближенные зависимости, позволяющие оценить влияние нерегулярной бортовой качки на эффективную поверхность рассеяния проектируемого корабля. Показано, что для закона распределения ординат бортовой качки в данном случае целесообразно применить распределение Пирсона типа I.

Ключевые слова: эффективная поверхность рассеяния, бортовая качка, закон распределения Пирсона типа I.

Анотація. Наведені наближені залежності, що дозволяють оцінити вплив нерегулярної бортової хитавиці на ефективну поверхню розсіювання проектуваного корабля. Зроблено висновок, що для закону розподілу ординат бортової хитавиці в даному випадку доцільно застосувати розподіл Пірсона типу I.

Ключові слова: ефективна поверхня розсіювання, бортова хитавиця, закон розподілу Пірсона типу I.

Abstract. In this article is learned the influence of ship rolling in irregular seas on the ship radar cross section. For the rolling distribution on the irregular seas in this case must be used Pierson's distribution of type I.

Keywords: radar cross section, rolling of the ship, Pierson's distribution of type I.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) корабля является важным фактором, который определяет его неуязвимость в миллиметровом и в сантиметровом диапазонах длин электромагнитных волн. Важную роль при определении этой величины играют бортовые колебания корабля [2, 5]. При этом в [2] при анализе влияния бортовых наклонений на ЭПР были рассмотрены равномерный закон распределения углов крена в пределах $\pm\theta_{\max}$ гармонический закон со случайной равномерно распределённой начальной фазой и с неслучайной амплитудой θ_{\max} , и центрированный нормальный закон, единственным параметром которого является дисперсия бортовых колебаний D_{θ} .

Но поскольку в решаемой задаче необходимым оказывается нахождение расчетной амплитуды θ_{\max} , то для последнего случая (центрированный нормальный закон) в [2] было принято

$$\theta_{\max} = m_{\theta} \sqrt{D_{\theta}}, \quad (1)$$

причем $m_{\theta} = 3$.

Поскольку основное практическое значение здесь имеет влияние на ЭПР качки корабля на нерегулярном волнении, то именно этот последний рассмотренный в [2] случай и представляет интерес, так как ординаты бортовой качки могут приближенно считаться распределенными по нормальному закону.

Анализируя целесообразность применения для данного случая нормального закона, отметим следующее. С одной стороны, величины $\theta_{\max} \approx 3\sqrt{D_{\theta}}$ близки к таким амплитудам бортовой качки, которые за время действия стационарного волнового режима мо-

гут быть превзойдены не более одного раза [8]. С другой стороны, величина $m_{\theta} = \frac{\theta_{\max}}{\sqrt{D_{\theta}}}$ существенно зависи-

т от степени нелинейности бортовой качки (а следовательно, и от интенсивности волнения) и может колебаться в достаточно широких пределах. В то же время величина θ_{\max} может быть более достоверно подсчитана не в функции m_{θ} и D_{θ} , а по квазирегулярной схеме с применением метода огибающей [3]. При этом можно в явном виде учесть все нелинейности и, найдя по известным из теории качки зависимостям дисперсию D_{θ} , рассматривать величину

$$m_{\theta} = \frac{\theta_{\max}}{\sqrt{D_{\theta}}} = m_{\theta}(h_3)$$

которого находится величина ЭПР. Здесь h_3 – высота волны 3%-й обеспеченности, характеризующая интенсивность реального нерегулярного волнения. При этом $D_{\theta} = D_{\theta}(h_3)$ и $D_{\theta}(0) = 0$.

Далее пусть по аналогии с [9] имеем для ЭПР качающегося корабля $\sigma_{\text{ЭПР}}$ зависимость вида

$$\sigma_{\text{ЭПР}} = \sigma_{\text{ЭПР}}^{(0)} U_{S1}(\psi_M, \gamma) U_{S2}(\psi_M, \gamma, h_3) U_{S3}(\psi_M, \gamma, D_{\theta}), \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{ЭПР}}^{(0)}$ – ЭПР эквивалентной пластины в свободном пространстве; ψ_M – угол места (при скользющем облучении этот угол мал и имеет порядок нескольких градусов); γ – угол наклона пластины; U_{S1} – поправка на влияние гладкой подстилающей поверхности [2]; $U_{S2} = U_{S2}(h_3)$ – поправка на шероховатость подстилающей поверхности (морского волнения) [10]; $U_{S3}(D_{\theta})$ – рассматриваемая в данной работе поправка на влияние бортовой качки.

Соотношение (1) имитирует корабль одной эквивалентной пластиной. В противоположном случае применяется метод дискретизации, когда корабль имитируется большим количеством элементарных геометрических тел, ЭПР которых известны [5]. В некоторых практически важных случаях современный многоцелевой корабль может иметь завал и развал по высоте борта (рис. 1). В этом случае приходим к моделированию корабля двумя эквивалентными пластинами. Аналогичный подход был принят в [7] при расчете эффективной поверхности рассеяния

опытового корабля с малой площадью ватерлинии «Sea Shadow», а также в [4] при расчете ЭПР крылатой ракеты. Это максимально упрощенный случай дискретизации поверхности корабля. Но какой бы вариант метода дискретизации ни применялся, для каждого элементарного геометрического тела должен быть выполнен расчет по соотношению (1), а в том числе – и найден коэффициент U_{S2} . По очевидным соображениям должно быть

$$\forall \psi_m, \gamma: U_{S2}(\psi_m, \gamma, 0) = U_{S3}(\psi_m, \gamma, 0) = 1.$$

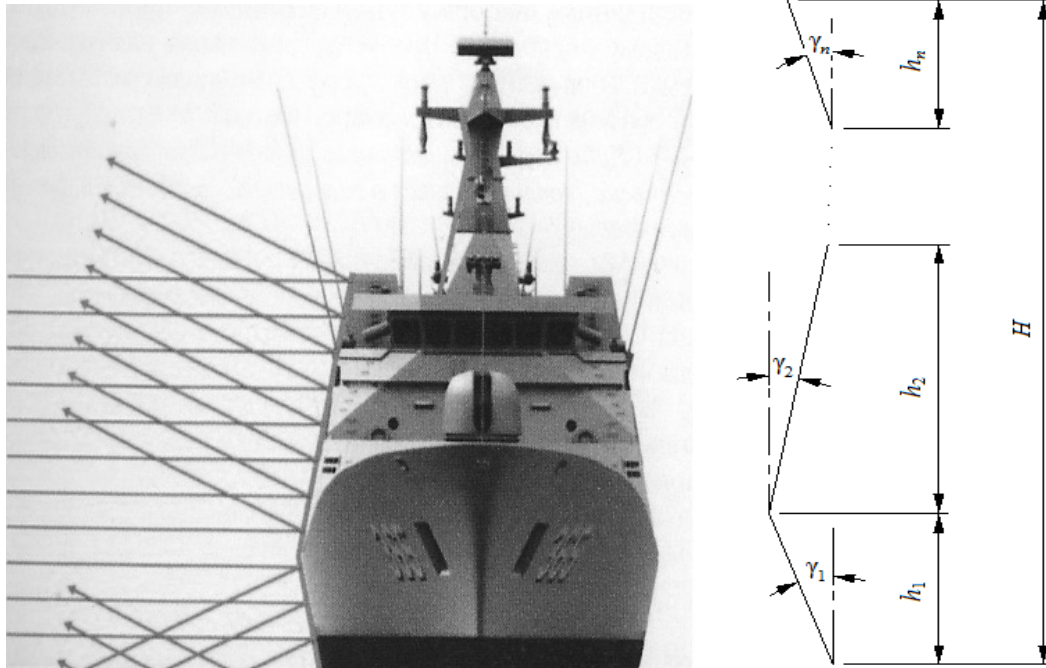


Рис. 1. Пример проектирования надводной части корабля с развалом и завалом (корвет голландской постройки концепции SIGMA)

Но если закон распределения ординат бортовой качки – центрированный нормальный и соответствующая плотность вероятности $\phi_\theta = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_\theta}} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2D_\theta}\right)$,

то из-за конечности величины θ_{\max} имеем $U_{S3}(0) < 1$ и только при $\theta_{\max} \rightarrow \infty$ имеем $U_{S3}(0) \rightarrow 1$ (зависимости U_{S3} от ψ_m и от γ здесь и далее опущены).

Снять указанные противоречия возможно, если заменить нормальный закон распределения амплитуд бортовой качки $\phi(\theta)$ распределением Пирсона типа I [1, 6]. Это распределение, в отличие от нормального распределения, будет уже не одно-, а двухпараметрическим: оно зависит как от дисперсии D_θ , так и от максимальной амплитуды θ_{\max} , причем ординаты соответствующего интегрального распределения при всех $|\theta| \geq |\theta_{\max}|$ равны 1. При $\theta_{\max} \rightarrow \infty$ распределение Пирсона типа I переходит в нормальное распределение [6].

Определение входящего в (1) коэффициента $U_{S3} = U_{S3}(D_\theta)$ в предположении, что амплитуды бор-

товой качки описываются распределением Пирсона типа I, и представляет собой решаемую в данной статье проблему.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Общая схема нахождения ЭПР корабля по схеме эквивалентной пластины, одной из составных частей которой является учет бортовой качки, приведена в [9]. Схема учета влияния подстилающей поверхности (так называемая четырехлучевая схема) и общие подходы к учету влияния бортовой качки рассмотрены в [2]. Возможности применения для описания нерегулярной бортовой качки распределения Пирсона типа I и его связь с нормальным распределением проанализированы в [1, 6].

ЦЕЛЮЮ ДАННОЙ РАБОТЫ является получение аналитических и графических зависимостей, позволяющих учесть влияние бортовой качки на ЭПР корабля, в предположении, что амплитуды

бортовой качки распределены по закону Пирсона типа I.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Пусть корабль совершает бортовую качку, ординаты которой θ распределены по центрированному закону Пирсона типа I с максимальным значением амплитуды качки θ_{max} и с дисперсией D_θ [1, 6]:

$$\phi_\theta(\bar{\theta}) = C_{\phi\theta} (1 - \bar{\theta}^2)^{q_\theta}, |\bar{\theta}| \leq 1; \quad \phi_\theta(\bar{\theta}) = 0, |\bar{\theta}| > 1; \quad (2)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\theta}{\theta_{max}}; \quad C_{\phi\theta} = \frac{\Gamma(q_\theta + 1,5)}{\sqrt{\pi} \Gamma(q_\theta + 1)}$$

$$q_\theta = \frac{5K - 9}{2(3 - K_\theta)}; \quad K_\theta = \frac{3}{1 + \frac{1}{u_\theta^2}}; \quad u_\theta = \frac{\theta_{max}}{\sqrt{2D_\theta}}$$

Применив формулу полной вероятности, можно показать, что коэффициент $U_{S3} = U_{S3}(\gamma, D_\theta, \theta_{max})$ определится в виде

$$U_{S3}(\gamma, D_\theta, \theta_{max}) = \frac{1}{U_{S1}(\psi_M, \gamma)} \int_{-\theta_{max}}^{\theta_{max}} U_{S1}(\psi_M, \gamma - \theta) \phi_\theta(\theta) d\theta. \quad (3)$$

Рассмотрим предельные переходы в соотношении (3). Пусть бортовая качка отсутствует, $D_\theta \rightarrow 0$ и $\theta_{max} \rightarrow 0$. В этом случае $\gamma \gg \theta_{max}$, а поскольку в формуле (2) имеем $\theta \leq |\theta_{max}|$, то под интегралом в формуле (3) при всех γ будет $\gamma \gg \theta$, в силу чего приближенно $\gamma - \theta \approx \gamma$ и $U_{S3}(\psi_M, \gamma - \theta) \approx U_{S3}(\psi_M, \gamma) \neq U_{S3}(\theta)$. Эта величина выносится за интеграл и сокращается. А так как при любых значениях θ_{max} , в том числе и при $\theta_{max} \rightarrow 0$, остается справедливым условие нормирования

$$\int_{-\theta_{max}}^{\theta_{max}} \phi_\theta(\theta) d\theta = 1,$$

несмотря на то что плотность вероятности $\phi_\theta(\theta)$ при $\theta_{max} \rightarrow 0$ вырождается в дельта-функцию), то при всех γ будет $U_{S3}(\gamma, 0, 0) = 1$.

Изучим сначала влияние угла наклона пластины γ на коэффициент U_{S3} . С этой целью на рис. 2 приведены рассчитанные на основе соотношений (2), (3)

$$\text{графики коэффициента } \kappa_{\gamma\theta}(\gamma, \theta_{max}) = \frac{U_{S3}(\gamma, \theta_{max})}{U_{S3}(0, \theta_{max})}$$

Эти графики представляют указанный коэффициент в функции θ_{max} при параметре γ в миллиметровом диапазоне длин радиоволн (см. рис. 2,а) и в функции угла наклона пластины γ при параметре θ_{max} (см. рис. 2,б).

При $\theta_{max} = 0$ уже небольшое отклонение угла γ от 0 ведет к интенсивному снижению как эффективной поверхности рассеяния, так и коэффициента $U_{S3}(\gamma, \theta_{max})$ по сравнению с коэффициентом $U_{S3}(0, \theta_{max})$. Поэтому значения коэффициента $\kappa_{\gamma\theta}(\gamma, \theta_{max})$, который определяется при возрастании θ_{max} от 0 до какой-то конечной величины, остаются мало отличными от 0 до тех пор, пока величина θ_{max} не сравняется с γ . Эта закономерность ясно прослеживается из рис. 2,а

и рис. 3. Дело в том, что при $\theta_{max} > \gamma$ корабль с какой-то достаточно значительной вероятностью может встретить падающую на него волну под прямым углом, когда выполненный с целью снижения ЭПР наклон бортов не выполнит ожидаемых функций из-за наличия бортовой качки. Указанная вероятность растет с увеличением максимальной амплитуды бортовой качки, что и отражено графиком рис. 2,а.

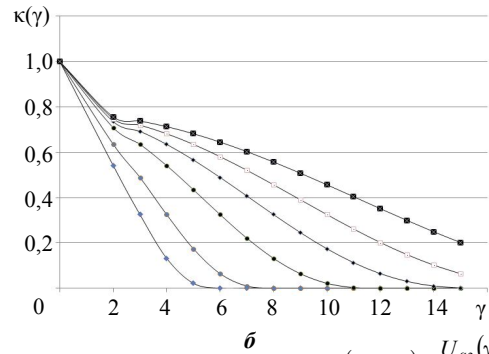
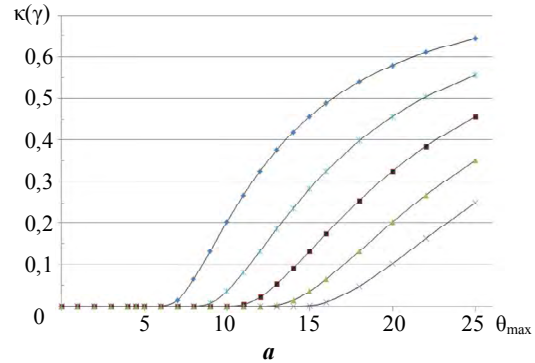


Рис. 2. Зависимости коэффициента $\kappa_{\gamma\theta}(\gamma, \theta_{max}) = \frac{U_{S3}(\gamma, \theta_{max})}{U_{S3}(0, \theta_{max})}$ от угла наклона пластины γ и максимальных амплитуд бортовой качки θ_{max} для радиоволн миллиметрового диапазона: а – в функции θ_{max} при параметре γ (—•— $\gamma = 6$ град; —*— $\gamma = 8$ град; —■— $\gamma = 10$ град; —▲— $\gamma = 12$ град; —×— $\gamma = 14$ град; б – в функции γ при параметре θ_{max} (—•— $\theta_{max} = 6$ град; —■— $\theta_{max} = 8$ град; —●— $\theta_{max} = 12$ град; —▲— $\theta_{max} = 16$ град; —×— $\theta_{max} = 20$ град; —■— $\theta_{max} = 25$ град)

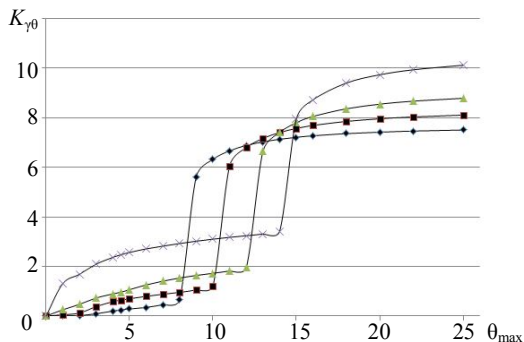


Рис. 3. Зависимость коэффициента $K_{\gamma0} = \lg(U_{S3}(\gamma, \theta_{max}))$ от угла наклона пластины γ и максимальных амплитуд бортовой качки θ_{max} для радиоволн миллиметрового диапазона: —•— $\theta_{max} = 8$ град; —■— $\theta_{max} = 10$ град; —▲— $\theta_{max} = 12$ град; —×— $\theta_{max} = 14$ град

Очевидно, что при $\gamma = 0$ для всех θ_{\max} имеем $K_{\gamma 0}(0, \theta_{\max}) = 1$ (см. рис. 2, б). Даже с небольшим отклонением γ от 0 величина $K_{\gamma 0}$ скачком снизилась бы почти до 0, если бы не было бортовой качки. А наличие качки ведет к тому, что, как уже говорилось, при $\theta_{\max} > \gamma$ корабль может встретить падающую на него волну под прямым углом. Поэтому при наличии бортовой качки величина $K_{\gamma 0}$ с ростом γ хотя и снижается практически до 0, но происходит это значительно медленнее, чем если бы качки не было. Причины этого пояснены выше.

Теперь можно перейти к непосредственному изучению коэффициента $U_{S3} = U_{S3}(\gamma, \theta_{\max})$. Как отмечалось выше, коэффициент $U_{S1} = U_{S1}(\gamma)$ в формуле (1) максимален при $\gamma = 0$ и снижается на несколько порядков даже при весьма небольшом отклонении угла γ от 0 [2]. При наличии бортовой качки место угла γ занимает величина $\gamma - \theta_{\max}$ и максимальные значения теперь уже коэффициента $U_{S3} = U_{S3}(\gamma, \theta_{\max})$ будут отвечать случаю $\gamma = \theta_{\max}$ или $\frac{\gamma}{\theta_{\max}} = 1$. Сказанное подтверждается графиками рис. 3, где приведен коэффициент $K_{\gamma 0} = \lg U_{S3}$ в функции γ и θ_{\max} , и рис. 4, где этот же коэффициент приведен в функции отношения $\frac{\gamma}{\theta_{\max}}$.

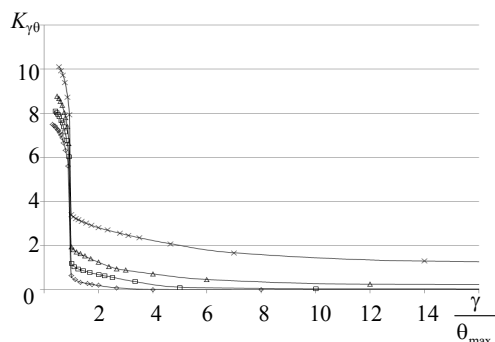


Рис. 4. Зависимость коэффициента $K_{\gamma 0} = \lg(U_{S3}(\gamma, \theta_{\max}))$ от отношений $\frac{\gamma}{\theta_{\max}}$ при разных углах наклона пластины для радиоволн миллиметрового диапазона: \diamond $\gamma = 8$ град; \square $\gamma = 10$ град; \triangle $\gamma = 12$ град; \times $\gamma = 14$ град

ВЫВОДЫ

1. В результате выполненного исследования получены аналитические и графические зависимости, позволяющие учесть влияние бортовой качки на ЭПР корабля.

2. Бортовая качка оказывает существенное отрицательное влияние на эффективную поверхность рассеивания проектируемого корабля, и при прогнозировании реально достижимого уровня защиты корабля этот фактор обязательно должен учитываться.

3. Физические закономерности, которые определяют влияние бортовой качки на ЭПР, таковы, что практическое применение предложенных в предыдущей работе на эту тему [2] расчетных моделей бортовых наклонов (постоянный крен, регулярная бортовая качка, нормально распределенные ординаты бортовой качки на нерегулярном волнении) не позволяют адекватно описать изучаемое явление.

4. Наиболее адекватной в данном случае является такая расчетная модель нерегулярной бортовой качки корабля, которая учитывала бы в явном виде наличие максимально возможных амплитуд бортовой качки θ_{\max} . В качестве такой модели рационально применить распределение ординат нерегулярной бортовой качки по закону Пирсона типа I, которое при $\theta_{\max} \rightarrow \infty$ переходит в нормальное распределение.

5. Влияние бортовой качки в миллиметровом диапазоне длин радиоволн может вести к весьма значительному росту ЭПР и, соответственно, к опасному снижению уровня защиты проектируемого корабля. В соответствии с физикой данного явления это связано с тем, что, несмотря на проектирование бортов и надстроек корабля с углом наклона (см. рис. 1), из-за бортовой качки корабль может встретить падающую волну под прямым углом к борту. А вероятность этого события тем выше, чем больше максимальная амплитуда бортовой качки θ_{\max} (см. рис. 2).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Алешин, И. К. Влияние ограниченности реальных случайных процессов волнения и ветра на вероятностные характеристики качки и устойчивости судов в условиях шторма [Текст] / И. К. Алешин // Малотоннажное судостроение : сб. науч. трудов НКИ. – Николаев : НКИ, 1988. – С. 80–89.
- [2] Андреев, А. Ю. Средняя эффективная площадь рассеивания колеблющейся прямоугольной пластины, расположенной на границе раздела двух сред [Текст] / А. Ю. Андреев, В. О. Кобак, В. В. Леонтьев // Радиотехника. – 1989. – № 6. – С. 65–68.
- [3] Бородай, И. К. Оценка наибольших высот волн и амплитуд качки в условиях нерегулярного волнения [Текст] / И. К. Бородай // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. – Л. : Судостроение, 1970. – Вып. 259. – С. 74–84.
- [4] Гульшин, В. А. Расчет характеристик рассеяния сложной радиолокационной цели методом простейших компонентов [Электронный ресурс] / В. А. Гульшин. – Режим доступа: www.conf-ulstu.ru/p6_3.php.

- [5] **Кобак, В. О.** Эффективная площадь рассеяния и радиолокационная заметность корабля [Текст] / В. О. Кобак, В. В. Леонтьев // Судостроение за рубежом. – 1989. – № 10. – С. 22–35.
- [6] **Некрасов, В. А.** Устойчивость нелинейной бортовой качки судна на регулярном и нерегулярном волнении [Текст] / В. А. Некрасов // Гидродинамика корабля : сб. науч. трудов НКИ. – Николаев : НКИ, 1989. – С. 24–37.
- [7] **Писаревский, И. Ф.** О некоторых характеристиках объектов, выполненных по технологии «Стелс» [Текст] / И. Ф. Писаревский, В. В. Бодренков, В. В. Савельев // Морской сборник. – 1998. – № 4. – С. 33–35.
- [8] **Севастьянов, Н. Б.** К обоснованию проекта основных положений по нормированию остойчивости океанских и морских промысловых судов [Текст] / Н. Б. Севастьянов // Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости промысловых и транспортных судов : науч.-техн. сб. Регистра СССР. – М. ; Л. : Транспорт, 1965. – С. 39–61.
- [9] **Соломенцев, О. И.** Расчет эффективной поверхности рассеивания корабля путем моделирования корабля эквивалентной пластиной [Текст] / О. И. Соломенцев, Нгуен Доан Кьонг // Матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд». – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 148–153.
- [10] **Штагер, Е. А.** Эффективная площадь рассеивания морских объектов в неоднородном падающем поле [Текст] / Е. А. Штагер // 17-th Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology». – Sevastopol, 2007. – P. 9–14.

© О. И. Соломенцев, Нгуен Доан Кьонг

Надійшла до редколегії 25.04.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК

д-р техн. наук, проф. В. О. Некрасов

Статтю розміщено у Віснику НУК № 3, 2013