

УДК 656.61.052

## ВЛИЯНИЕ ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ

*Львов В.Е.*

*Одесская национальная морская академия*

*Определение внешних сил волновой природы представляет сложный теоретико-экспериментальный процесс, а расчетные модели громоздки и обладают значительными неточностями и ограниченностью. Цель исследования состоит в разработке методики учета волновой составляющей внешних воздействий на процесс управления курсом судна. Введение в состав системы управления новых элементов и установление функциональных связей по ветру и волнению, позволяет повысить надежность работы системы, ее быстродействие и экономичность, особенно в штормовых условиях.*

*Включение в контур регулирования устройств расчета угла ветрового и волнового дрейфа и введение их значений в задатчик курса позволяет повысить точность управления по заданному курсу.*

**Ключевые слова:** *волновое воздействие, управление курсом, компенсационное управление.*

**Постановка проблемы в общем виде и её связь с важными научными или практическими задачами.** Внешние возмущения на судно формируются в условиях ветра, волнения, течения и воздействия мелководья и определяются его мореходными качествами. Расчетные алгоритмы по учету влияния внешних возмущений на процесс маневрирования представлены не для всех видов возмущений. Проявление внешних возмущений связано с увеличением сопротивления движению, существенным ухудшением управляемости, падением скорости хода, изменением посадки и маневренных свойств судна.

Определение внешних сил волновой природы представляет сложный теоретико-экспериментальный процесс, а расчетные модели громоздки и обладают значительными неточностями и ограниченностью.

По этой причине без достаточной оценки влияния ветра и сопутствующего ему волнения в системе управления курсом судна качество поддержания направления движения остается проблематичным.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В работе [1] рассмотрены способы расчета параметров состояния судна при движении в условиях шторма и использование их для выбора режимов движения судна. Однако вопросы расчета воздействия волнения на движение судна не рассмотрены.

В работе [2] приведены теоретические основы формирования сигналов управления на исполнительные органы для управления курсом и процессом маневрирования.

В работе [3] проанализированы принципы построения, теория, моделирование и синтез систем управления широкого класса. Для расчета влияния волнения, основываясь на линейной теории качки, Я. И. Войткунский [3] предложил определять проекции силы от волнения на координатные оси движения судна, следующей зависимостью:

$$R_{\text{вн}} = 0,5 \cdot \rho \cdot L \cdot h_{3\%} \cdot K_{\text{вн}}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность морской воды;  $L$  – длина судна между перпендикулярами;  $R_{\text{вн}}$  – поперечная составляющая возмущающих сил от волнения;  $K_{\text{вн}}$  – безразмерный волновой коэффициент, который зависит от размеров судна, длины волны и ее курсового угла;  $h_{3\%}$  – высота волны 3% обеспеченности.

Зависимость между высотой развитого волнения и скоростью истинного ветра предлагается определять соотношениями:

$$\tau = 0,65 \cdot K_E \cdot W_u, \quad \lambda = 1,55 \cdot \tau^2 = 0,655 \cdot K_E^2 \cdot W_u^2, \quad (2)$$

где  $\tau$  – период бега волн;  $\lambda$  – длина волны;  $W_{и}$  – скорость истинного ветра;  $K_E$  – коэффициент роста, для развитого волнения его принимают равным 0,8. Высота волны 3% обеспеченности  $h_{3\%}$ :

$$h_{3\%} = 0,03 \cdot W_{и}^2. \quad (3)$$

С учетом приведенных выражений зависимость (1) представлена как:

$$R_{ey} = 4 \cdot 10^{-4} \cdot \rho \cdot g \cdot L \cdot K_{ey} \cdot W_{и}^2 = C_b \cdot W_{и}^2, \quad (4)$$

где  $C_b$  – коэффициент возмущающей силы.

В работах [4, 5] рассмотрены методы адаптивного управления курсом судна при использовании ПИД регуляторов без оценки ветроволновых возмущений.

Работа [6] содержит способы улучшения работы системы управления курсом путем введения в ее состав корректирующего элемента, который по истинным параметрам ветра вырабатывает дополнительное управляющее воздействие  $\delta_k$ , устанавливая рулевой привод на этот угол. В результате интегральная составляющая переходного процесса существенно уменьшается до величины, сравнимой с погрешностью расчета значения угла компенсации. За счет этого уменьшается нагрузка на рулевое устройство в штормовых условиях, производится адаптация системы управления к внешним воздействиям и повышается ее быстродействие. Недостатком такого компенсационного устройства является отсутствие влияния волновой составляющей возмущений.

**Целью статьи** является разработка методики учета волновой составляющей внешних воздействий на процесс управления курсом судна.

**Изложение материала исследования.** При расчете возмущающих сил от волнового воздействия можно использовать два подхода. Первый основан на методике Я. И. Войткунского [3], в которой сила воздействия на судно от волнения рассчитывается по формуле (4). Недостаток такого способа заключается в том, что коэффициент возмущающей силы  $C_b$  определяется по приближенным эмпирическим зависимостям, имеющим существенные ограничения.

В работе [7] приведена методика определения безразмерных коэффициентов волновых сил по пространственным осям X ( $C_x^w$ ), Y ( $C_y^w$ ) и момента  $C_m^w$  по результатам испытаний судов в натуральных условиях и их моделей в бассейне, а также соответствующие эмпирические зависимости:

$$C_x^w = 0,062 \cdot \frac{B}{T} - 0,0085 \cdot \frac{L}{T} + 0,328 \cdot \delta_v, \quad (5)$$

$$C_y^w = 0,0823 \cdot \frac{L}{B} + 2,56 \cdot \frac{T}{L} + 0,903 \cdot \delta_v^2, \quad (6)$$

$$C_m^w = 0,15 \cdot \delta_v + 0,197 \cdot \delta_v^2 - 0,00373 \cdot \frac{L}{T}, \quad (7)$$

где  $B$  – ширина судна;  $T$  – средняя осадка;  $L$  – длина судна по КВЛ;  $\delta_v$  – коэффициент общей полноты судна.

Эмпирические зависимости (5-7) справедливы при изменении главных размеров в следующих диапазонах:

- |                             |                              |
|-----------------------------|------------------------------|
| – отношение длины к осадке  | $10,0 < \frac{L}{T} < 23,0;$ |
| – отношение ширины к осадке | $1,0 < \frac{B}{T} < 3,7;$   |
| – отношение длины к ширине  | $5,0 < \frac{L}{B} < 12,0;$  |
| – коэффициент общей полноты | $0,6 < \delta_v < 0,8.$      |

Величины составляющих волновой силы  $X_w, Y_w$  и момента  $M_w$  при нерегулярном волнении определяется по частотному составу последовательности регулярных волн:

$$X_w = C_x^w \cdot (0.1 - \cos q_w) \cdot \rho \cdot g \cdot L \cdot \left(\frac{h_{3\%}}{2}\right)^2 \cdot e^{-A_0 \frac{\lambda}{L}} \cdot \left(1 + A_1 \frac{V_n}{V_w}\right), \quad (8)$$

$$Y_w = C_y^w \cdot \sin q_w \cdot \rho \cdot g \cdot L \cdot \left(\frac{h_{3\%}}{2}\right)^2 \cdot e^{-A_0 \frac{\lambda}{L}} \cdot \left(1 + A_1 \frac{V_n}{V_w}\right), \quad (9)$$

$$M_w = C_m^w \cdot \frac{\sin(2 \cdot q_w)}{1 + \frac{\pi - |q_w|}{\pi}} \cdot \rho \cdot g \cdot L^2 \cdot \left(\frac{h_{3\%}}{2}\right)^2 \cdot e^{-A_0 \frac{\lambda}{L}} \cdot \left(1 + A_1 \frac{V_n}{V_w}\right), \quad (10)$$

где  $q_w$  – курсовой угол бега волн;  $g$  – ускорение свободного падения;  $A_0$  – эмпирический коэффициент, учитывающий соотношение длины волны и судна (рекомендуется принимать  $A_0 = 3,3$ );  $A_1$  – эмпирический коэффициент, учитывающий степень влияния скорости движения судна на силы от волнения  $A_1 \in [1,0; 8,5]$ ;  $\lambda$  – длина регулярной волны;  $V_n$  – составляющая скорости движения судна, направленная вдоль направления бега волн;  $V_w$  – скорость бега волн.

Для выполнения расчетов используется двухпараметрический спектр реального морского волнения [7].

Величина плеча силы волновой природы  $\ell_w$  определяется путем деления (10) на (9), в результате получим:

$$\ell_w = \frac{C_m^w}{C_y^w} \cdot \frac{\sin(2 \cdot q_w)}{2 - |q_w|/\pi} \cdot L. \quad (11)$$

Приведенные выше расчетные зависимости позволяют ввести новые элементы и связи в систему управления курсом судна в штормовую погоду и обеспечить функционирование второго канала компенсационного управления по волновому сопротивлению корпуса.

Введение второго компенсационного канала повышает упрежденность системы при использовании двух пропорциональных сигналов от ветра и волнения отдельно.

Такая схема системы управления курсом судна приведена на рис. 1.

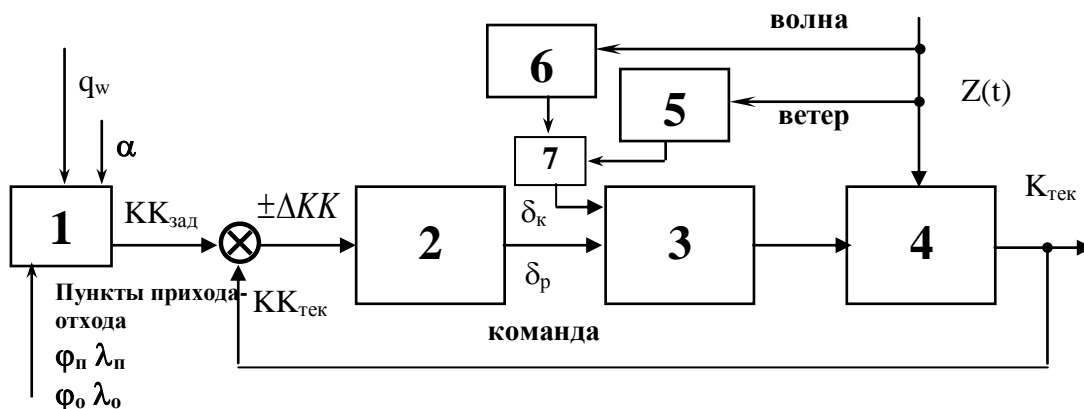


Рис.1 – Схема системы управления курсом судна:

1 – задатчик курса, 2 – информационно-управляющее устройство, 3 – устройство управления, 4 – объект управления. 5 – компенсатор ветрового воздействия, 6 – компенсатор волнового воздействия, 7 – блок расчета угла компенсации для устройства управления

Система управления функционирует следующим образом: по координатам пункта прихода и отхода в блоке 1 определяется  $KK_{зад} = f(\varphi_{п}, \lambda_{п}; \varphi_{о}, \lambda_{о}; \alpha; q_w)$ , значение которого поступает на устройство сравнения. По каналам обратной связи сюда же поступает текущее значение курса  $KK_{мек}$ , и при несовпадении заданного и фактического состояния информационное управляющее устройство вырабатывает команду на средства управления для приведения объекта маневрирования в заданное состояние.

При появлении внешних возмущений включаются два канала компенсационного управления по ветру 5 и по волнению 6. Указанные элементы производят расчет исходных данных для расчета угла компенсации с учетом ветра и волнения. В блок 1 от блоков 5 и 6 поступает значение угла ветрового и волнового дрейфа, которые вводят поправку в  $KK_{зад}$ .

Для уменьшения угла и числа переключений руля был введен корректирующий элемент, который производит вычисление значения угла компенсации  $\delta_{\kappa}$ , по формуле [6]:

$$\delta_{\kappa} = \frac{1 + (2/\lambda_p)}{S_p \cdot \rho} \cdot \left[ \left( 0.25 + \frac{\ell_{\text{шп}}}{L} - \frac{q_w}{360} \right) \cdot 0.37 \cdot \sin q_w \cdot \rho_b \cdot S_{\text{н}} \cdot \frac{W^2}{V_{\text{л}}^2} + \right. \\ \left. + \left( 0.5 + \frac{\ell_{\text{бс}}}{L} - \frac{\alpha}{180} \right) \cdot \frac{0.23 \cdot \sin \alpha + 1.09 \cdot \sin^2 \alpha}{(2.1 \cdot \delta_{\text{он}} - 7 \cdot T/L)^2} \cdot \rho \cdot S_{\text{н}} \right], \quad (12)$$

где  $\lambda_p$  – относительное удлинение руля,  $S_p$  – площадь пера руля,  $\ell_{\text{шп}}$  – отстояние центра парусности от модель-шпангоута,  $L$  – длина судна между перпендикулярами,  $q_w$  – курсовой угол кажущегося ветра,  $\rho_b$  – массовая плотность ветра,  $S_{\text{н}}$  – площадь надводной части корпуса судна на диаметральной плоскости,  $W$  – скорость кажущегося ветра,  $V_{\text{л}}$  – скорость судна по лагу,  $\ell_{\text{бс}}$  – отстояние центра бокового сопротивления от мидель-шпангоута, можно приближенно рассчитать по формуле [6]:

$$\ell_{\text{бс}} = \frac{1 + 2 \cdot T_{\text{н}} / T_{\text{к}}}{3 \cdot (1 + T_{\text{н}} / T_{\text{к}})} - 0.5, \quad (13)$$

$\alpha$  – угол ветрового дрейфа,  $\delta_{\text{он}}$  – коэффициент общей полноты,  $T$  – средняя осадка,  $T_{\text{н}}$  и  $T_{\text{к}}$  – осадка носом и кормой соответственно,  $S_{\text{н}}$  – площадь проекции подводной части корпуса судна на диаметральную плоскость.

Для уточнения расчета угла компенсации  $\delta_{\kappa}$  введен момент от волновой составляющей (10). Тогда формула для расчета совместного угла компенсации от ветра и волнения примет вид:

$$\delta_{\kappa} = \frac{1 + (2/\lambda_p)}{S_p \cdot \rho} \left\{ \left[ \left( 0.25 + \frac{\ell_{\text{шп}}}{L} - \frac{q_w}{360} \right) \cdot 0.37 \cdot \sin q_w \cdot \rho_b \cdot S_{\text{н}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \left( 0.5 + \frac{\ell_{\text{бс}}}{L} - \frac{\alpha}{180} \right) \cdot \frac{0.23 \cdot \sin \alpha + 1.09 \cdot \sin^2 \alpha}{(2.1 \cdot \delta_{\text{он}} - 7 \cdot T/L)^2} \cdot \rho \cdot S_{\text{н}} \right] + \right. \\ \left. + \left[ C_m^w \cdot \frac{\sin(2 \cdot q_w)}{1 + \frac{\pi - |q_w|}{\pi}} \cdot \rho \cdot g \cdot L^2 \cdot \left( \frac{h_{3\%}}{2} \right)^2 \cdot e^{-A_0 \frac{z}{L}} \cdot (1 + A_1 \frac{V_{\text{н}}}{V_w}) \right] \right\} \quad (14)$$

В компенсаторе 7 предусмотрена оценка потери управляемости, что позволяет своевременно принять меры по ее сохранению.

Для компенсации постоянных воздействий внешних факторов на судно руль переключается на постоянный угол  $\delta_k$ , и для удержания судна на курсе в условиях шторма происходит манипуляция на угол  $\delta_b$  вокруг  $\delta_k$ . Потеря управляемости наступает тогда, когда  $\delta_k + \delta_b > \delta_{max} = 35^\circ$ .

**Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению.** Введение в состав системы управления новых элементов и установление функциональных связей по ветру и волнению, позволяет повысить надежность работы системы, ее быстродействие и экономичность, особенно в штормовых условиях.

Включение в контур регулирования устройств расчета угла ветрового и волнового дрейфа и введение их значений в датчик курса позволяет повысить точность управления по заданному курсу.

Повышение точности определения угла компенсации, за счет учета волновой составляющей, позволяет уменьшить нагрузку на рулевую машину и создает условия для оптимизации ее использования в шторм и автоматизации управления судном при движении по криволинейным траекториям.

Результаты могут быть использованы в учебном процессе на старших курсах морских учебных заведений и на курсах повышения квалификации.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородай И. К. Прикладные задачи динамики судов на волнении / И. К. Бородай, В. А. Мореншильдт, Г. В. Виленский. – Л. : Судостроение, 1982. – 288 с.
2. Гофман А. Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна / А. Д. Гофман. – Л. : Судостроение, 1988. – 360 с.
3. Лукомский Ю. А. Системы управления морскими подвижными объектами / Ю. А. Лукомский, В. С. Чугунов. – Л. : Судостроение, 1988. – 272 с.
4. Пипченко А. Д. Разработка метода адаптивного управления на основе ПИД-регулятора / А. Д. Пипченко // Материалы наук.-техн. конф. «Стан та проблеми судноводіння», 19 окт.2005 г. – Одесса : ОНМА, 2005. – С. 119-126.
5. Пипченко А. Д. Создание упрощенной математической модели судна, управляемого рулем и винтом / А. Д. Пипченко // Судовождение : сб. науч. тр. ОНМА. – Одесса : Феникс, 2005. – Вып. 9. – С. 75-81.
6. Львов В. Е. Метод улучшения компенсационных свойств системы управления курсом судна / В. Е. Львов // Судовождение : сб. науч. тр. ОНМА. Одесса : Феникс, 2008. – Вып. 15 – С. 109-114.
7. Юрканский А. В. Исследование управляемости судов в условиях ветра и волнения : дис... канд.техн.наук. : 05.08.01 / Юрканский Александр Викторович. – Санкт-Петербург, 2005. – 118 с.

### **Львов В.С.** ВПЛИВ ХВИЛЬОВОЇ ПРИРОДИ НА СИСТЕМУ УПРАВЛІННЯ КУРСОМ

*Визначення зовнішніх сил хвильової природи представляє складний теоретико-експериментальний процес, а розрахункові моделі громіздкі та мають значні неточності й обмеженість. Мета дослідження полягає в розробці методики обліку хвильової складової зовнішніх впливів на процес управління курсом судна. Введення до складу системи управління нових елементів і встановлення функціональних зв'язків з бурєю й хвилями, дозволяє підвищити надійність роботи системи, її швидкодію та економічність, особливо у штормових умовах. Включення в контур регулювання пристроїв розрахунку кута вітрового і хвильового дрейфу та введення їх значень в заданий курс дозволяє підвищити точність управління судном.*

**Ключові слова:** хвильовий вплив, управління курсом, компенсаційне управління.

**Lvov V.E. THE EFFECT OF WAVE ACTION ON THE SYSTEM MANAGEMENT COURSES**

*Determination of the wave nature of external forces is a complex theoretical and experimental process and simulation models are bulky and have significant inaccuracies and limitations. The purpose of research is to develop methods of accounting wave component of external influences on the management of the ship's heading. The introduction of the management system and the establishment of the new elements of the functional relationships in the wind and the raging, can improve the reliability of the system, its performance and efficiency, especially in storm conditions. Inclusion in the control circuit devices for calculating the angle of wind and wave drift and the introduction of their values in the course of the dial allows you to increase the accuracy of the control at the specified rate.*

**Keywords:** wave action, course management, compensation management.

© Львов В.Є.

Статтю прийнято  
до редакції 5.06.14